

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv svarového cyklu na pevnost materiálů pro výztuže karoserií osobních
vozů

Josef Hylský

Bakalářská práce

2009

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef HYLSKÝ**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Vliv svarového cyklu na pevnost materiálů pro výstuže karoserií osobních vozů**

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

1. Svařitelnost konstrukčních ocelí, vlivy na svařitelnost
2. Vliv teplotního cyklu svařování na vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti
3. Představení řešeného problému svarového spoje
4. Hodnocení změn tvrdosti vybraných vzorků základního materiálu a svarového spoje
5. Rozbor možností vyjádření korelace pevnost vs. tvrdost pro hodnocení vlivu svařování u dané aplikace

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Hrivňák, I.: Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin, Veda, 1988, ISBN 80-224-0016-5
2. Ahmed, N.: New Developments in Advanced Welding, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge, England, 2005, ISBN 1-85573-970-4
3. Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesaf, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 28. 5. 2009

Josef Hylský

Souhrn

Práce je zaměřena na rozbor svarového cyklu, který má bezprostřední vliv na tvrdost materiálů určených pro výztuže karoserií osobních vozů.

Klíčová slova

svařitelnost, svar, teplotní cyklus, jakost spoje, konstrukční ocele

Title

Weld cycle influence on the bodycar materials strenght

Abstract

Work is bent on analysis weld cyclethat the has immediate influence over hardness materials intended for reinforcer bodycar.

Keywords

weldability, weld, temperature cycle, quality communications, constructional steel

Obsah

Úvod.....	7
1 Svařitelnost konstrukčních ocelí, vlivy na svařitelnost	8
2 Vliv teplotního cyklu svařování na vlastnosti ovlivněné oblasti	11
2.1 Popis teplotního cyklu	11
2.2 Tepelně ovlivněná oblast základního materiálu.....	12
2.2.1 Nízkouhlíkové nelegované ocele	14
2.2.2 Vysocepevné martenzitické	16
2.2.3 Vysocelegované oceli	17
2.2.4 Vysoce až středně uhlíkové	19
2.3 Limitace svařitelnosti.....	20
3 Představení řešeného problému svarového spoje	21
3.1 Případné vady bodových svarů	21
3.2 Použitá metodika hodnocení	23
3.2.1 Metodika tvrdosti HV 10	24
3.2.2 Statické tahové zkoušky.....	25
4 Hodnocení změn tvrdosti vybraných vzorků základního materiálu a svarového spoje	27
4.1 Metodika mikrotvrdosti a její hodnocení	27
4.2 Hodnocení tvrdosti HV 10.....	28
Závěr	32
Použitá literatura	34
Seznam obrázků.....	35
Seznam tabulek.....	36
Seznam zkratk	37

Úvod

Svařitelností se v dnešní době zabývá celá řada odvětví průmyslu, což vede k zdokonalování již známých stávajících způsobů. Pokud by k tomuto rozvoji, pokroku a vylepšování nedocházelo, možnosti spojování rozdílných druhů materiálů, nejen těch zaručeně svařitelných, by byly značně omezeny. Cílem všech, kteří využívají možnosti svařování, je bezesporu dosáhnout výsledku, který bude co nejkvalitnější za cenu co možná nejnižších nákladů na samotnou realizaci.

Cílem práce je ověřit možnosti predikce pevnostních změn vlivem svařování různými metodami měření tvrdosti a studium možností evidence vlivu výchozího rozptylu pevnosti. Dále budou bodové svary podrobeny statické zkoušce pevnosti, ve které by se mělo ověřit, zda odpovídají normám a jakosti spoje na tento typ svaru.

Během práce se budeme věnovat teoretické části obsahující rozbor konstrukčních ocelí, jejich svařitelnost, vliv tepelných cyklů na ovlivněnou oblast v okolí svaru, vyhodnocení zkoušek svaru a rozbor jakosti spoje.

1 Svařitelnost konstrukčních ocelí, vlivy na svařitelnost

Samotnou svařitelnost ovlivňuje hned několik základních prvků. Pokud se nebudeme omezovat pouze na konstrukční oceli, ale na oceli jako celek, pak je nutné zmínit, že faktory ovlivňující svařitelnost jsou:

- uhlíkový ekvivalent C_E ,
- materiálové složení svařovaných částí,
- třída oceli,
- tepelné zpracování,
- pevnostní vlastnosti, houževnost,
- únavové vlastnosti, tvárnost za studena,
- odolnost proti stárnutí,
- struktura oceli
 - feriticko – perlitická
 - bainitická
 - struktura popuštěného martenzitu,
- množství přísadových prvků aj.

Pokud je zvolená ocel v těchto bodech odpovídající požadavkům, které jsou na svařovaný výsledný spoj kladeny, pak záleží jen na způsobu a typu svařovací metody, jak výsledného svarového spoje dosáhnout.

Norma ČSN 05 1309 definuje svařitelnost jako komplexní charakteristiku materiálu, vyjadřující jeho vhodnost ke zhotovení svařenců s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje. Ve všeobecnosti pojem svařitelnosti odráží tepelné a deformační ovlivnění materiálu v oblasti spoje svařovacím procesem [3, s.86].

Protože tepelně-deformační proces svařování je pro různé metody a parametry variabilní a ovlivňuje ho celá řada faktorů, ze kterých je třeba při hodnocení vycházet, používá se často soubor vhodně volených zkoušek. Těmito zkouškami se pak ověřují vlastnosti nejvíc ovlivněné pochodem a mírou zaručení svařitelnosti pak vyjadřuje stupeň svařitelnosti (1a, 1b, 2, 3) [3, s.86,87].

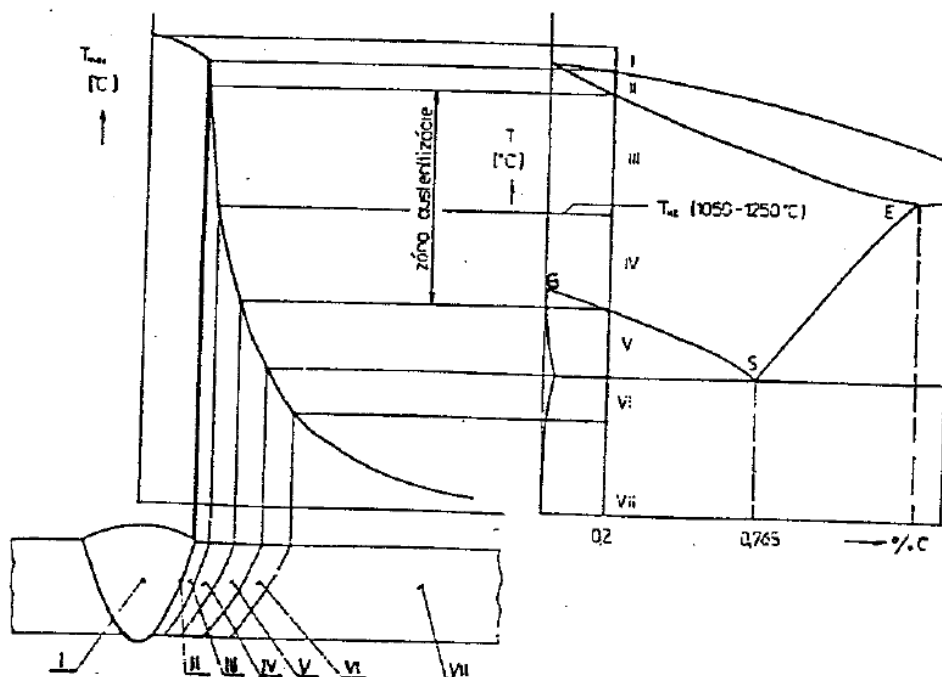
Obecně je dána třemi aspekty [3, s.87]:

- materiálových vlastností spoje (metalurgická svařitelnost),
- použitelnou technologií svařování,
- konstrukčním řešením spoje.

Metalurgická svařitelnost

Posuzuje vhodnost materiálu na svařování, tj. vyjadřuje reakci materiálu na proces svařování. Pro její stanovení je potřebná identifikace základního materiálu s ohledem na způsob výroby, chemické složení a tepelné zpracování oceli. Pod tepelným účinkem dochází ke změnám chemického složení svarového spoje a tepelného ovlivnění základního materiálu. S ohledem na toto působení rozlišujeme ve spoji tři základní části podle obr. 1 [3, s.87].

Obr. 1 Tvorba strukturních pásem svarového spoje v závislosti od teploty



Zdroj: Nauka o materiálu I.-II.

Chemické změny v průběhu svařování jsou výsledkem složitého komplexu dějů a účinků různých činitelů. Podstatou probíhajících chemických reakcí je redukce oxidů železa, přičemž dochází ke spalování prvků jako C, Si, Mn. Zároveň při hoření oblouku do roztaveného kovu vnikají některé nežádoucí plyny, rozpustné v oceli (O, H, N) [3, s.88].

Prvek, který nejvýrazněji působí na vlastnosti, především plasticitu, svarového spoje je uhlík. Nepříznivý účinek tohoto prvku spočívá v tom, že při obsahu vyšším jako 0,3% a vyšších rychlostech ochlazování z teplot nad A_{r3} , začne ve struktuře vznikat křehký martenzit, který svými vlastnostmi znemožní plastické přetvoření materiálu, nacházejícího se v přechodové oblasti, vlivem vnitřních pnutí od svařování. Pro dobrou svařitelnost se vyžaduje obsah uhlíku do 0,2-0,25%. Další podmínkou dobré svařitelnosti je nízký obsah síry a fosforu. Pokud se síra v oceli vyskytuje, způsobuje svou nerozpustností vytváření sloučenin s nízkým bodem tavení (FeS), což má za následek ztrátu soudržnosti oceli za vysokých teplot a tím tak vznik prasklin za tepla. Fosfor vytváří fosfidy, ty způsobují lámavost oceli za studena.

2 Vliv teplotního cyklu svařování na vlastnosti ovlivněné oblasti

2.1 Popis teplotního cyklu

Elektrický oblouk mezi elektrodou (u ručně aplikovaných technologií), nebo přídatným drátem (u poloautomatických a automatických způsobů navařování) je zdrojem teplotního cyklu -vlivy:

- V **stadiu ohřevu** při natavování přechází navařený objem kovu polymorfni přeměnou, která je termálně aktivovaným procesem. Proto rychlost ohřevu ovlivňuje velikost teplotní hystereze bodů přeměny, tj. posouvá austenitizaci k vyšším teplotám (o 50-300°C v závislosti na rychlosti ohřevu). Rychlost ohřevu a následná teplotní hystereze rovněž působí na kinetiku přeměny a následně na velikost zrna a stupeň homogenizace tuhého roztoku.
- **Dobu výdrže** na maximální teplotě je možno považovat za míru růstu zrna.
- **Ochlazovací větve** teplotního cyklu má vliv na dva rozhodující procesy, tj. na strukturní přeměny tuhajícího svarového kovu a difúzní procesy a především na difúzi vodíku. Pro oceli o vyšší pevnosti, dané převážně vysokým obsahem uhlíku, znamená zvýšení rychlosti ochlazování vyšší pravděpodobnost vzniku nerovnovážných strukturních složek (bainit, martenzit, troostit). Oproti tomu nižší ochlazovací rychlost při nižších teplotách (pod 300 °C) zvýší možnost oddifundování vodíku z oblasti svarového spoje.

Strukturní změny v oblasti svarového spoje jsou charakteristické tím, že probíhají při existenci teplotních gradientů a následně gradientů koncentračních a deformačních (napět'ových). Poznání a predikce tvaru, resp. parametrů působícího teplotního cyklu má pro posuzování svařitelnosti materiálu zásadní význam a vychází z řady teorií vedení tepla v spoji.

Během svařování dochází k teplotnímu ovlivnění nejbližšího okolí svaru. Charakter tepelného ovlivnění podstatně závisí na konkrétním typu oceli, zejména obsahu uhlíku, stupni a způsobu legování a výchozího stavu tepelného zpracování.

2.2 Tepelně ovlivněná oblast základního materiálu

V zóně tepelného ovlivnění rozeznáváme oblasti s charakteristickými teplotami od působení svarového cyklu – pod A_1 , mezi A_1 a A_3 , nad A_3 .

Při teplotách nad A_{C3} dochází k úplné fázové přeměně, proto při ochlazování může vzniknout celá škála mikrostruktur, jejíž jedním extrémem je perliticko-feritická a druhým čistě martenzitická mikrostruktura. V podhousenkové zóně (na hranici ztavení základní materiál-návar) se k plné austenitizaci přidružuje růst zrna, zejména u technologií navařování pod tavidlem. Tento efekt znamená nevýhodné:

- snížení plasticity podle Hall-Petchova vztahu,
- zbrzdění kinetiky rozpadu austenitu směrem k bezdifúzním přeměnám (často za vzniku Widmannstättenovy struktury),
- zvyšuje náchylnost oceli k defektům.

Limitujícím faktorem jakosti teplem ovlivněné zóny (dále TOO) je dostatečná houževnatost výsledné mikrostruktury pro potřebnou únosnost při působení značných teplotních a deformačních napětí. V sledovaném objemu kovu spolupůsobí více degradačních mechanismů plasticity. Vedle uváděného zhrubnutí mikrostruktury a segregace některých povrchově aktivních prvků na hranicích γ -zrna (především u více-vrstvých návarů) má rozhodující účinek průběh transformace γ na α . Jako kritérium dostatečné rezervy houževnatosti se v praxi pro hodnocení jakosti návarů používá měření tvrdosti TOO podél linie ztavení a limitování nárůstu hodnot tvrdosti ve srovnání se základním materiálem. Všeobecný limit maximální dovolené hodnoty tvrdosti podhousenkové zóny v současnosti není definován. Přípustná tvrdost bude záviset od chemického složení konkrétní navařované oceli a obsahu difúzního vodíku. Literatura uvádí parametrické rovnice pro výpočty tvrdosti podhousenkové zóny pro různý sortiment ocelí a v různém pojetí – pouze z chemického složení, nebo v závislosti na rychlosti ochlazování, vyjádřené časem $t_{8/5}$.

Pro tvrdost martenzitu v konstrukčních ocelích platí, že je daná pouze obsahem uhlíku v oceli, s rostoucím procentem uhlíku se zvyšuje jeho pevnost, tvrdost i mez kluzu.

Na jakost TOO, a tedy i na jejich svařitelnost, má rovněž výrazný vliv mikročistota oceli, zejména dva základní typy inkluzí - oxidy a sulfidy. Oxidy

vyložené v tepelně ovlivněné zóně jsou stabilní i při maximálních teplotách ovlivnění. Mohou tvořit překážky migrace hranic zrn v podhousenkové zóně, uvádí se i jejich možné působení jako krystalizačních zárodků při přeměně austenitu na ferit, nebo jako iniciačních míst případných porušení matrice. Při obsahu vyššího podílu FeO v komplexních oxidech, nebo jiných nízkotavitelných oxidů, přispívají k likvační praskavosti oceli. Výraznější negativní vliv na jakost TOO mají sulfidy. Až na výjimky se jedná na rozdíl od netvárných oxidů o tvárné vměstky, vedoucí k anizotropii vlastností oceli a spolupůsobí při vzniku řady defektů.

Možné rozdělení ocelí:

- nízkouhlíkové nelegované oceli,
- nízkouhlíkové středně legované oceli o vyšší pevnosti,
- vysocelegované oceli,
- vysoce až středně uhlíkové.

Vzhledem k aplikaci připadají v úvahu první dva typy ocelí, které svým chemickým složením a technologií zpracování základního materiálu nejlépe vyhovují pro výrobu karosářských částí a rámových konstrukcí automobilů včetně výztuží pro rámy samotné.

Z uvedených ocelí z důvodu rozboru po teoretické stránce jsou dále uvažovány oceli vysocelegované a vysoce až středně uhlíkové. Prvně zmíněné oceli se nachází v třídě 17. S jejich praktickou aplikací se setkáváme např. v opláštění karoserií, antikoročních nádobách pro přepravu potravin a chemicky stálých látek při styku s povrchem těchto ocelí.

2.2.1 Nízkouhlíkové nelegované ocele

Na obr. 1 můžeme rozlišit několik základních struktur.

I. – MIKROSTRUKTURA SVAROVÉHO KOVU

Svarový kov je tvořený kolumnárními krystaly, kterých krystalizace začíná na stěnách neroztaveného nebo částečně roztaveného základního materiálu. Klasifikace svarového kovu můžeme provést následovně:

Primární ferit – může být vyloučený po hranicích zrn nebo polygonální ferit uvnitř zrn, původně austenitických. Polygonální ferit (polyedrický) se vyskytuje taky v teplotně ovlivněné oblasti mikrolegovaných ocelí.

Postranní ferit – jeho struktura je charakteristická místem nukleace a způsobem růstu látek feritu. Tyto nukleují na primárně vyloučeném feritu po hranicích zrn původního austenitu. Vytvářejí paralelně uspořádaný komplex jehlic feritu, rostoucí směrem do zrna původního austenitu. Mezi lačkami je možné pozorovat perlit – je podobný jako Widmanstattenický ferit.

Acikulární ferit jemný – je nepolyedrická struktura, která se vyskytuje především ve svarovém kovu a může se vyskytovat v podhousenkové zóně mikrolegované oceli. Má dobré plastické vlastnosti.

Acikulární ferit hrubý – je charakterizován většími polyedrickými zrny spolu s nepravidelnými ostrovy pseudoperlitu. Vyskytuje se především v teplotně ovlivněné oblasti.

Ve svarovém kovu se může dále vyskytovat horní bainit, dolní bainit a martenzit. Jedná se o struktury světelným mikroskopem nerozlišitelné.

II – MIKROSTRUKTURA ZÓNY ČÁSTEČNÉHO NATAVENÍ

Oblast teplot mezi likvidem a solidem příslušné oceli. Morfologie vylučujících se fází není v úzkém pásmu metalograficky pozorovatelná. V důsledku přímého kontaktu se svarovým kovem je zde možnost intenzivní difúze vodíku a tedy i možnost iniciace trhlin za studena.

III – MIKROSTRUKTURA PODHOUSENKOVÉ ZÓNY

Interval teplot mezi $A_{C3}+150^{\circ}\text{C}$ až solidem. V této oblasti nastává zhrubnutí austenitického zrna v důsledku ohřevu na vysoké teploty u ocelí, náchylných na růst austenitického zrna, svařovaných s vysokým tepelným příkonem (růst zrna je vyvolán výdrží na vysoké teplotě). U nízkouhlíkových ocelí vzniká feriticko-perlitická struktura s výraznou Widmanstattenovou strukturou, která vzniká v důsledku orientovaného vylučování feritu.

IV – MIKROSTRUKTURA ZÓNY NORMALIZACE

V oblasti s $T_{\max} = A_{C3}$ až $A_{C3} + (100 \text{ až } 150)^{\circ}\text{C}$ se vytvoří jemnozrnná feriticko-perlitická polyedrická struktura.

V – MIKROSTRUKTURA ZÓNY ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE

Oblast s T_{\max} mezi A_{C1} až A_{C3} je charakteristická u nízkouhlíkových ocelí výskytem transformovaného perlitu – „chumáčkovitého“, který vzniká zpětným ochlazením austenitického perlitu.

VI – MIKROSTRUKTURA ZÓNY ŽÍHÁNÍ NA MĚKKO

Oblast teplot $T_{\max} = 500^{\circ}\text{C}$ až A_{C1} . Při běžných metodách svařování (elektrodou v ochranné atmosféře) změny mikrostruktury nenastávají. U metod s velkým tepelným příkonem může dojít k částečné sferoidizaci perlitu.

VII – MIKROSTRUKTURA ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU

Moderní konstrukční oceli jsou charakterizované tím, že se u nich ve vysoké míře využívají fyzikální metody zpevňování, jako je především zjemnění zrn, optimalizace mikrostruktury, termomechanické zpracování a disperzní zpracování. Toto umožňuje snížit průměrný obsah C v oceli, proto současné oceli této kategorie mají typický obsah uhlíku do 0,15%.

2.2.2 Vysocepevné martenzitické

Takovýmto typem oceli se vyznačuje právě námi zkoušený výlisek vysecepevnostního materiálu, který je svým chemickým složením typický pro oceli nízkouhlíkové, legované Mn + B s procentuálním obsahem prvků:

- 0,2% C
- 1,2% Mn
- 0,3% Si
- 0,002% B

Pro tyto oceli je význačná právě jejich zaručená svařitelnost, která je řadí mezi jedny z nejpoužívanějších materiálů ve strojnictví a konstrukci.

Při svařování ocelí vyšších pevností a vyšším obsahem Mn je vhodné použít převážně nelegované přídavné materiály.

V ocelích, které obsahují Mn, Ti, Zr, je nejvyšší aktivita vazby síry na zirkon, dále na titan a nakonec mangan. Ocele, které jsou mikrolegované Nb + V a obsahují Mn a Cr, je postupnost vazby v pořadí nejvyšší pro mangan, niob, vanad a v poslední řadě chrom.

Pokud je požadováno zvýšení pevnostních vlastností legovaných ocelí, lze toho dosáhnout dvěma technologickými postupy:

- Zjemněním zrn – dosahuje se zpomalením rekrystalizace austenitu nebo zábrany při přemístování hranic zrn.

- Precipitačním vytvrzováním blokáce postupu dislokací a tím omezení plastické deformace, tj. v podstatě zvýšení Re (meze kluzu).

Tento typ oceli byl experimentálním zdrojem práce, proto se jimi budeme podrobněji zabývat v následujících kapitolách 3 a 4.

2.2.3 Vysocelegované oceli

Svařitelnost může být limitovaná procesy:

- Zhrubnutí zrna u linie ztavení (zejména feritické oceli, vysocechromové oceli).
- U austenitických ztráta korozní odolnosti v souvislosti s precipitací karbidů chromu $Mn_{23}C_6$ po hranicích zrna.
- Tzv. trhliny „za horka“, popř. likvační trhliny – mají souvislost s obsahem zejména síry ve svarovém kovu.

Svarový kov

Svarový kov je u sledovaného okruhu technologií svařování, včetně navrhované, tvořen austenitickým přídatným materiálem. Austenitická stavba návarového kovu znamená odlišné podmínky zejména při tuhnutí a ochlazování kovu a přináší specifické požadavky na parametry aplikovaného tepelného cyklu.

Stěžejním materiálem pro návarové vrstvy je ocel $Cr_{18}Ni_8Mn_6$. Tato ocel použitá jako přídatný materiál poskytuje podle jednotlivých producentů svarový kov vhodný pro spojování obtížně svařitelných materiálů; dále pak je vhodná k aplikaci jako mezivrstva pro tvrdé návary a nehomogenní svarové spoje. Literatura dále uvádí daný přídatný materiál pro aplikace ke svařování rozměrných, vysoko zatěžovaných konstrukcí (stavbu lodí, tlakových nádob, pancéřovaných zařízení, apod.) pro dosažení požadované vysoké odolnosti proti dynamickému namáhání, obvykle vyjádřené hodnotou vrubové houževnatosti a současně mezními hodnotami pevnosti. Charakteristická je uváděná vysoká odolnost proti studeným a horkým trhlinám ve svarovém kovu.

Horké trhliny

Nejčastěji se vyskytují v objemu svarového kovu při teplotách blízkých solidu, přičemž austenitické oceli jsou k jejich iniciaci nejvíce náchylné. V určitém stadiu krystalizačního procesu je vznikající pevná fáze ve tvaru dendritů obklopená taveninou. Tahové napětí, vnesené do systému rozdílem tepelné roztažnosti návaru (austenit) a okolního materiálu (feritická báze) má tendenci kompenzovat se deformací, soustředěnou do mezidendritických prostor (již vyloučené dendrity mění pouze svou orientaci). V případě již vysoké viskozity, nebo nedostatečného objemu okolní taveniny vznikají kavity a jejich koalescencí trhliny – tzv. *krystalizační horké trhliny*. Defekt je vedle vnějších podmínek (geometrie propojení a materiálů a rozměry součástí definují charakter kontrakčních napětí, parametry svařování ovlivňují rychlost ochlazování a úhel rostoucích krystalů) ze strany materiálu podporovaný segregáčnými procesy a mikročistotou. Nízkotavitelné sulfidy a eutektika jsou příčinou poklesu kohézní pevnosti dendritů v poslední fázi tuhnutí; účelné je vázání nečistot na fáze s dostatečně vysokou teplotou tavení (např. MnS). U složení daného návarového kovu představují stejné riziko mezidendriticky vyloučené karbidy (především karbidy chromu Cr_{23}C_6).

Dalším typem horkých trhlín jsou *likvační praskliny*. Vyskytují se obvykle v teplem ovlivněné zóně, u vícevrstevného navařování jsou podmínky pro řídicí mechanismus jejich vytvoření i samotném návaru. Likvující fázi jsou opět nejčastěji nízkotavitelné sulfidy nebo sulfidická eutektika, natavená postupně na sebe kladenými housenkami svarového kovu a penetrující po hranicích austenitických zrn, kde jsou zdrojem interkrystalických trhlín.

Posledním typem horkých trhlín, typických pro austenitické ocele - *trhliny polygonizační* (z poklesu tažnosti), jsou spojeny s dislokačním mechanismem. Tahová deformace při vysokých teplotách tuhnutí je při zvyšování hustoty dislokací doprovázena polygonizačními procesy. Polygonizační síť je překážkou dalšího pohybu dislokací a při vynucené deformaci následně zdrojem mikroskopických trhlín.

U ocelí náchylných na uvedenou skupinu trhlín je vhodné limitovat měrný příkon svařování (omezení difúzních procesů). Dalším vhodným řešením pro dané chemické složení navařované oceli je použití pulzního režimu svařování. Vhodná frekvence pulzů ovlivňuje krystalizaci svarového kovu směrem k celulární struktuře, která je podstatně odolnější proti vzniku všech typů horkých trhlín.

2.2.4 Vysoce až středně uhlíkové

Studené trhliny

Studené trhliny (jinak označované jako transformační, vodíkem indukované, nebo opožděné) vznikají při teplotách pod 200°C a to nejčastěji v podhouseňkové zóně, méně ve svarovém kovu. Zdrojem je vzájemné působení třech rozhodujících faktorů:

- *Přítomnost vodíku ve svarovém spoji.* Zdrojem vodíku je především svarový kov (obal elektrody, difúze do roztaveného kovu z atmosférické vlhkosti). Vodík je v disociovaném stavu při teplotě cca 200°C, což se využívá jako opatření na jeho zpětné uvolnění – řízené ochlazování, resp. dohřev svaru nebo návaru. Poklesem teploty přechází do molekulárního stavu, vylučující se v mikropórech, na rozhraních inkluze-matrice, dislokacích, popř. na povrchu již iniciovaných trhlín jako zdroj dalšího napětí. Difúze, a tedy i okamžitá koncentrace vodíku, je pod vlivem především strukturní transformace TOO (rozpadem austenitu klesá rozpustnost vodíku a opačně stoupá jeho difúzní rychlost ve feritu), v menší míře stavem napětí a deformace.

Za působení vysokých teplot vzniká tzv. „up hill“ efekt, kdy uhlík vytváří koncentrační skok proti přirozenému koncentračnímu spádu na styku základního materiálu a návaru. Tímto mechanismem tak vlastně uhlík může vytvořit mezi jednotlivými vrstvami bariéry, blokující přerozdělení vodíku při chladnutí svarového spoje. Tento model redistribuce uhlíku v oblasti ztavení dvou ocelí odlišných fází by znamenal jednako nehomogenní koncentraci uhlíku v návaru, což spolu se značným sklonem k odmišení hlavních legujících prvků může vést ke strukturní nestabilitě austenitu, jednako zvýšení nežádoucí lokální koncentraci vodíku v TOO, kde jeho přítomnost podporuje riziko vzniku opožděných trhlín.

- *Mikrostrukturní vlivy* – tj. přítomnost mikrostruktury citlivé na účinky vodíku, tj. především martenzitické, méně struktury dolního bainitu a rozměr zrna. Hrubé výchozí zrna austenitu prodlužuje jeho stabilitu a podporuje vznik křehkých strukturních složek.
- *Přítomnost tahových zbytkových pnutí v oceli*, kterých míru určuje tuhost svarového spoje. Hladina zbytkových napětí je výsledkem superpozice

původních napětí od výrobního procesu, případného dalšího zpracování a napětí vnesených svařovacím tepelným cyklem.

Jako nejúčinnější technologické opatření na zamezení studených podnávarových trhlin se doporučuje předehřev základního materiálu. Jednotlivé přístupy pro stanovení teploty předehřevu zohledňují vliv uvedených činitelů zavedením parametrů, které jsou výrazem:

- stavu mikrostruktury, daném chemickým složením (vyjádřeným uhlíkovým ekvivalentem C_E), kritickou rychlostí ochlazování a tepelným příkonem svařování,
- obsahu vodíku, stanovený experimentálně,
- obsahem zbytkových pnutí vyjádřeného rozměry svařovaného uzlu.

2.3 Limitace svařitelnosti

U nízkouhlíkových, nelegovaných ocelí, které se používají na výrobu „obyčejných“ karoserií se dosahuje efektu zpevnění zjemněním zrna v TOO. U vysoceuhlíkových ocelí se tohoto zpevnění dosáhne zakalením. Tento proces je však nežádoucí, proto je potřeba předehřevu. V případě vysocepevných materiálů se naopak odpevnění základního materiálu dosahuje popouštěcími procesy. Jedná-li se o vysocelegované oceli, zde dochází k redistribuce uhlíku a následné ztrátě korozní odolnosti (interkrystalická koroze).

3 Představení řešeného problému svarového spoje

Předmětem experimentální části jsou vysocepevné legované oceli. Tyto materiály se převážně spojují bodovými svary. Proto se následná kapitola zabývá právě vadami bodových svarů.

3.1 Případné vady bodových svarů

Plynové dutiny

Bublina: dutiny kulového tvaru v jádru svaru vyplněné plynem, které po ztuhnutí svaru zůstaly v roztaveném kovu.

Póra: dutiny protáhnutého tvaru v jádru svaru vyplněné plynem, který po ztuhnutí zůstávají v roztaveném kovu a jeho zjištěná délka je větší jak jeden a půl násobek jeho šířky.

Řádek dutin: dutiny kulového (bubliny) nebo protáhnutého (póry) tvaru uspořádané v řádku.

Vměšky

Oxidické vměšky: nepravidelné útvary kyslíčků, případně jiných nekovových vměšků, které po ztuhnutí svaru zůstaly ve ztuhlém kovu.

Vady natavení

Studený spoj: nedokonalé spojení svařovaných materiálů v požadovaném průřezu.

Výstřík roztaveného kovu: kov vystříknutý z bodového svaru mezi svařované materiály.

Netěsný svar: svar, přes který proniká zkušební látka, nebo švový svár, při kterém je překrytí bodů menší jak jedna třetina průměru čoček.

Trhliny

Podélné trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu svaru orientovaného podél nebo v rovině styku.

Příčné trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu svaru orientovaného napříč svaru nebo styku.

Rozvětvené trhliny: prasklé místo uvnitř nebo na povrchu bodového svaru vycházející zpravidla z jednoho místa a šířící se v různých směrech.

Vady tvaru a rozměru svarů

Malý rozměr svaru: rozměr čocky bodového svaru je oproti předepsanému menší víc jak o deset procent.

Nízká čocka: čocka bodového svaru rozvinutá do hloubky menší jak třicet procent hloubky tenčího z materiálů.

Vysoká čocka: čocka bodového svaru rozvinutá do hloubky větší jak sedmdesát procent hloubky tenčího z materiálů.

Nesymetrický tvar svaru: čocka bodového svaru v příčném řezu k rovině styku nebo k ose kolmé na rovinu styku je výrazně nesymetrická.

Vady povrchu svarových spojů

Hluboké vtisky: nepřiměřená hloubka stopy po elektrodách, která je větší jak patnáct procent tloušťky tenčího z materiálů.

Natavení povrchu materiálů: natavení v místě styku elektrod s materiálem.

Výstřik z povrchu materiálů: natavený kov zpravidla jehlicovitého tvaru, který po ztuhnutí zůstává na povrchu.

3.2 Použitá metodika hodnocení

Pro určení a vymezení vstupních mezních parametrů a velikostí veličin, bylo nutno realizovat vstupní a prvotní experiment svařitelnosti materiálů o vyšší pevnosti. Tento experiment byl a je v zásadě rozhodující pro další uvažování při realizaci svarů samotných. Poněvadž se vstupním (prvotním) experimentem veličiny typu svařovací proud, svařovací síla, svařovací čas atd. teprve vymezují, je tedy potřeba mít na paměti, že ačkoliv se svar podařilo vytvořit a materiál tvoří svařenec, není jisté, že jeho pevnost a provedení bude z hlediska dalšího rozboru v pořádku. Pokud by se ukázalo, že pevnost svaru není dostačující, vedlo by to k dalšímu experimentu, který by měl za úkol tyto limitující efekty změnit a odstranit jeho nedostatky tak, aby při dalším rozboru svaru bylo zřejmé, že jsme podmínky pro vytvoření pevnostně vyhovujícího spoje dokázali realizovat, nebo je potřeba je dále upravovat a navzájem mezi sebou měnit.

Zkušební metody

Nedestrukční:

- pohledová zkouška,
- klínová zkouška,
- ultrazvuková zkouška,
- adaptivní vizualizace procesu.

Destrukční zkoušky:

- zkouška sekáčem,
- zkouška loupáním a odvíjením,
- stříhává zkouška,
- zkouška vrcholového tahu.

Hodnocení výsledků destrukčních zkoušek

Známka 1 = v pořádku

Známka 3 = ještě použitelné; prověřit proces

Známka 6 = oprava (pokud je přípustná)

3.2.1 Metodika tvrdosti HV 10

Byla provedena zkouška tvrdosti na tvrdoměru Brinell-Vickers. Zatížení bylo 10N což odpovídá přibližně váze 100kg. Podrobený materiál byl výlisek vysocepevnostní oceli.

Otisk čtyřbokého jehlanu (typický tvar vtisknutého tělesa pro zkoušku dle Vickerse) se vytvořil na příčném řezu vzorku, které byly nejprve podrobeny tahové zkoušce. Abychom dosáhly co možná nejpřesnějšího vpichu, bylo nutno na vzorku a jeho příčném řezu naznačit osu, v jejíž blízkosti se vtisk provedl. Vzorky, které byly podrobeny tvrdostní zkoušce pocházejí ze stejné série, jejichž povrchová úprava se provádí např. prvky jako jsou hliník a křemík. Před samotným tvrdostním testem bylo nutno na příčném řezu vytvořit přijatelné podmínky. Ty byly vytvořeny vyleštěním podrobeného řezu na vysokou čistotu z hlediska viditelnosti vpichu. Na samotnou odečtenou a přepočtenou hodnotu tvrdosti tento zásah vliv samozřejmě neměl.

Vtisknutím tělesa (čtyřbokého jehlanu) do vzorku vznikl otisk, který bylo nutno odměřit na stupnici, která je přímo součástí tvrdoměru. Po změření velikosti úhlopříčky (pro přesnější hodnoty se změří obě úhlopříčky a tyto hodnoty nám dají průměrný rozměr vtisku) se tato hodnota vydělila velikostí zvětšení, což v našem případě činilo 20-ti násobek skutečné velikosti. Dle této hodnoty se z tabulek následně určila hodnota tvrdosti. Na jeden vzorek bylo umístěno několik vpichů (zpravidla 4-5 z důvodu většího a později přesnějšího výpočtu průměrné hodnoty tvrdosti ačkoliv tato hodnota není pro stanovení závěru analýzy nikterak zásadní). Tyto vpichy byly od sebe umístěny v rozteči 0,5mm na prvních dvou vzorcích a 3-5mm na vzorcích ostatních. Délka plochy na niž byly vpichy provedeny měla cca 15mm. Lepší a přesnější následné hodnoty tvrdosti bychom mohli považovat u těch vzorků, které měli větší rozteč vpichů. Postihla se tím totiž rozsáhlejší a jakostně rozdílnější plocha než u prvních dvou vzorků.

Cílem tohoto experimentu bylo zjištění, zda existuje přímá závislost mezi pevností v tahu a tvrdostí téhož vzorku. Byl tedy potřeba zjistit korelační koeficient za pomoci lineární regrese. Hodnota tohoto korelačního koeficientu by tím pádem měla být obecně použitelná při zjištění např. pevnosti v tahu za předpokladu znalosti tvrdosti

vzorku. Pokud by se tato hypotéza potvrdila, měli bychom k dispozici universální konstantu všeobecně použitelnou jak k zjištění pevnosti v tahu, tak naopak tvrdosti podrobeného vzorku za předpokladu znalosti jedné z těchto vstupních hodnot.

3.2.2 Statické tahové zkoušky

Jak již bylo naznačeno v úvodu této kapitoly, byl potřeba provést prvotní experiment, který by nám vymezil vstupní veličiny. V následujícím rozboru lze vidět, jak bylo postupováno při realizaci experimentu. Hodnoty u jednotlivých vzorků se mění na základě uvážení bez toho, aniž bychom již měli nějaké poznatky o svařovaných druzích oceli tohoto typu. Výsledné vzorky svařenců byly podrobeny statické zkoušce pevnosti v tahu.

Všechny realizované svary měli společné jen prvotní požadavky, které jsou:

- svařovací proud (velikost tohoto proudu činila 7400A),
- průměr elektrod (5mm),
- tloušťka plechu (1,8mm).

Další veličiny typu svařovací síla a svařovací čas se u jednotlivých svařenců liší.

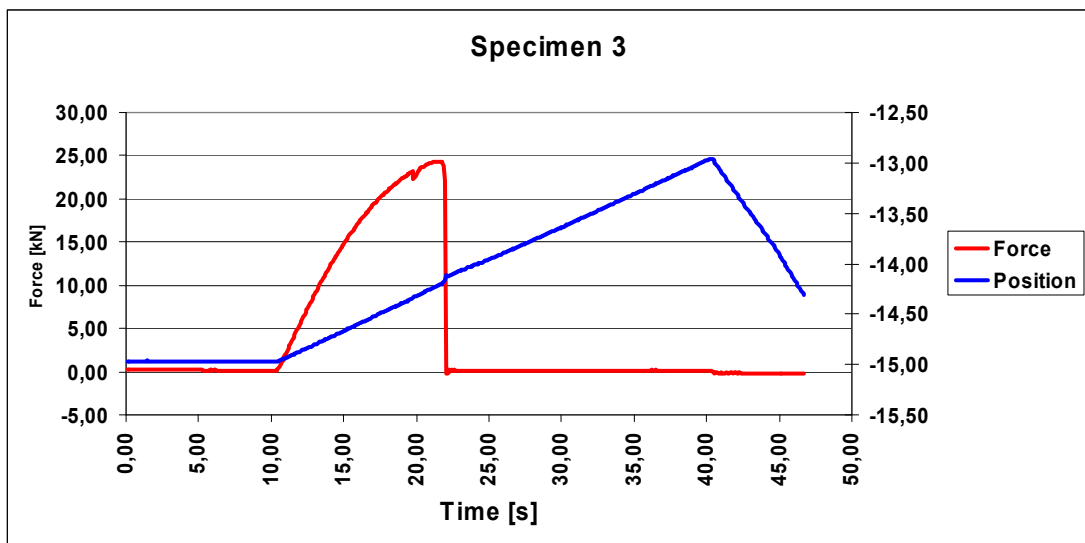
Ačkoliv se vzorky materiálu odebírali ze všech možných míst výlisku, nebylo k tomuto rozhodnutí nikterak přihlíženo z hlediska úpravy výše zmíněných prvotních požadavků (svařovací proud, průměr elektrody).

Tab. 1 Hodnoty vstupního experimentu a výsledné pevnosti svarových čoček

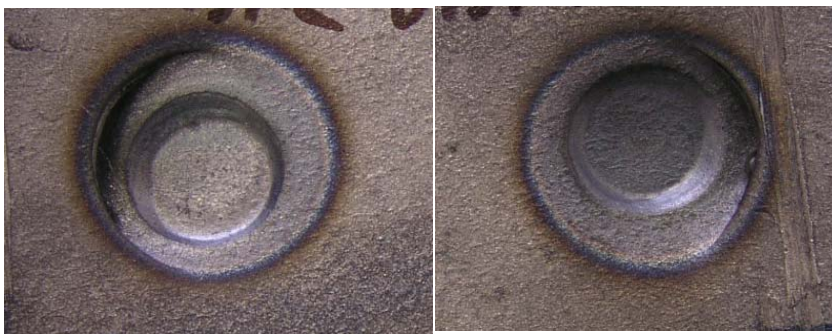
Číslo vzorku	Svařovací čas [ms]	Svařovací síla [kN]	Rm [kN]
1	15	1,8	20,6
2	18	1,8	25,4
3	21	1,8	24,3
4	21	1,0	x
5	21	0,4	x
6	13	0,4	x

x – předčasný lom vlivem velkého množství vad svarové čocky

Obr. 2 Závislost síly a dráhy na čase při zkoušce pevnosti bodového svaru



Obr. 3 Ukázka bodového svaru prvotního experimentu před destruktivní zkouškou



Obr. 4 Ukázka bodového svaru prvotního experimentu po destruktivní zkoušce

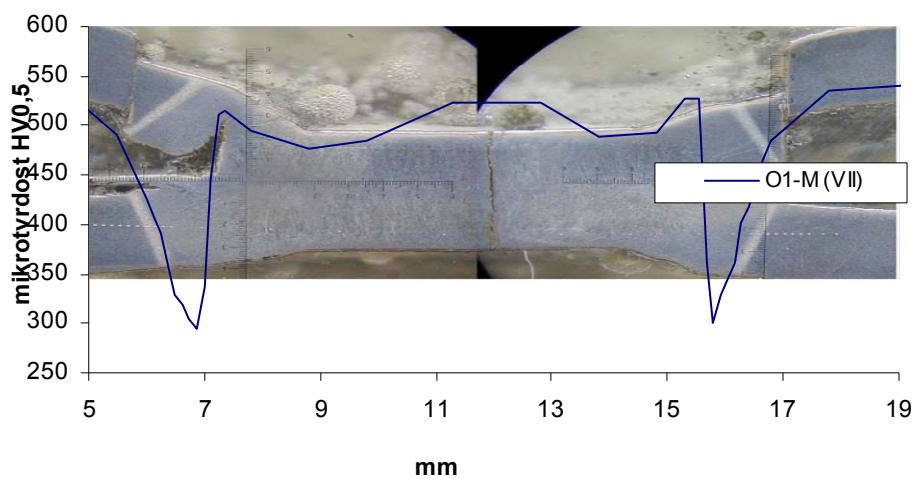


4 Hodnocení změn tvrdosti vybraných vzorků základního materiálu a svarového spoje

4.1 Metodika mikrotvrdomosti a její hodnocení

Metodika mikrotvrdomosti se velice blízko podobá metodice měření tvrdosti samotné. Specifické pro tuto metodu je však to, že se vpichy, nebo otisky do zkoušeného vzorku tvoří několikanásobně menší a s menší zatěžovací silou resp. závažím.

Obr. 5 Průběh mikrotvrdomosti v oblasti řezu čočky a nejbližší TOO



Zdroj: Svařování vysokopevnostních materiálů

4.2 Hodnocení tvrdosti HV 10

Z tabulky bude možno zjisti hodnoty velikostí jednotlivých vpichů, tomu odpovídající tvrdost v místě vpichu a průměrná hodnota tvrdosti povrchové vrstvy vzorku. Následně bude vypočítán i korelační koeficient z předem známých hodnot pevnosti v tahu.

Tab. 2 Velikost vtisku a tomu odpovídající tvrdost materiálu (série U)

Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost	Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost
U1	4,28	403	U2	3,88	493
	3,84	503		3,87	498
	4,00	464		3,87	498
	4,10	442		3,88	493
				3,87	498
		Průměr: 453,5			Průměr: 496
Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost	Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost
U4	4,03	459	U5	4,16	429
	4,15	433		4,19	425
	4,16	429		4,15	433
	4,16	429		4,19	425
	3,94	478		4,19	425
		Průměr: 445,6			Průměr: 427,4

Tab. 3 Velikost vtisku a tomu odpovídající tvrdost materiálu (série O)

Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost	Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost
O1	4,2	421	O3	4,16	429
	4,31	401		4,06	450
	4,28	405		4,14	433
	4,29	405		4,1	442
	4,23	417		4,13	437
		Průměr: 409,8			Průměr: 438,2
Číslo vzorku	Velikost vtisku [μm]	Tvrdost			
O4	4,28	405			
	4,31	401			
	4,34	394			
	4,25	413			
	4,2	421			
		Průměr: 406,8			

V tabulce je možno odečíst příslušnou hodnotu pevnost v tahu pro daný vzorek, který byl podroben experimentu.

Tab. 4 Pevnost v tahu a průměrná tvrdost základního materiálu

Č.vzorku	Pevnost v tahu zákl. mat.	Průměrná tvrdost zákl. mat.
U1	1436	453,5
U2	1494	496,0
U4	1491	445,6
U5	1481	427,4
O1	1516	409,8
O3	1518	438,2
O4	1471	406,8

Tab. 5 Korelační koeficient vypočítaný lineární regresí ze vstupních hodnot

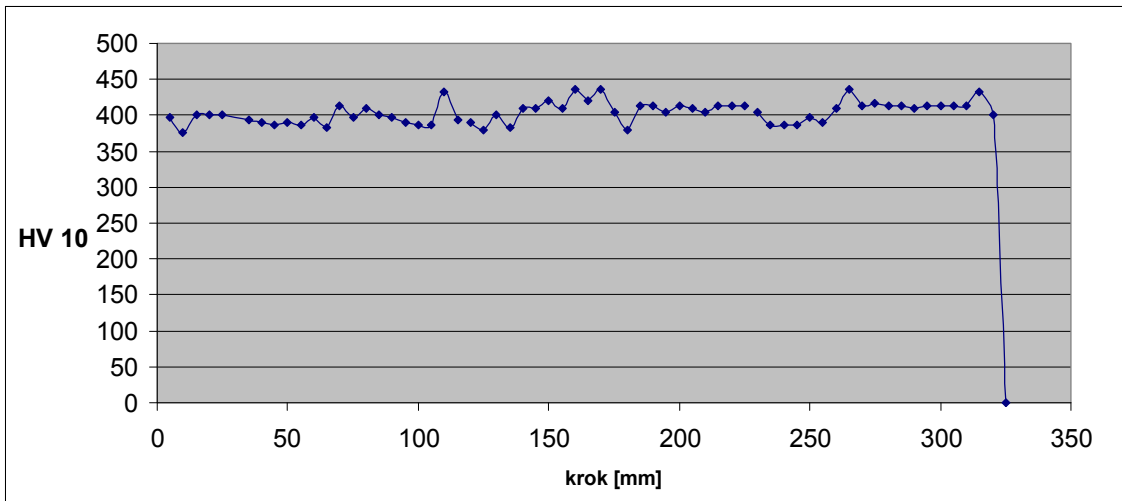
Korelační koeficient	Označení vzorků
0,2218	U
0,6035	O
-0,1169	U+O

Tab. 6 Tabulka hodnot tvrdosti trhaného základního materiálu po svařování

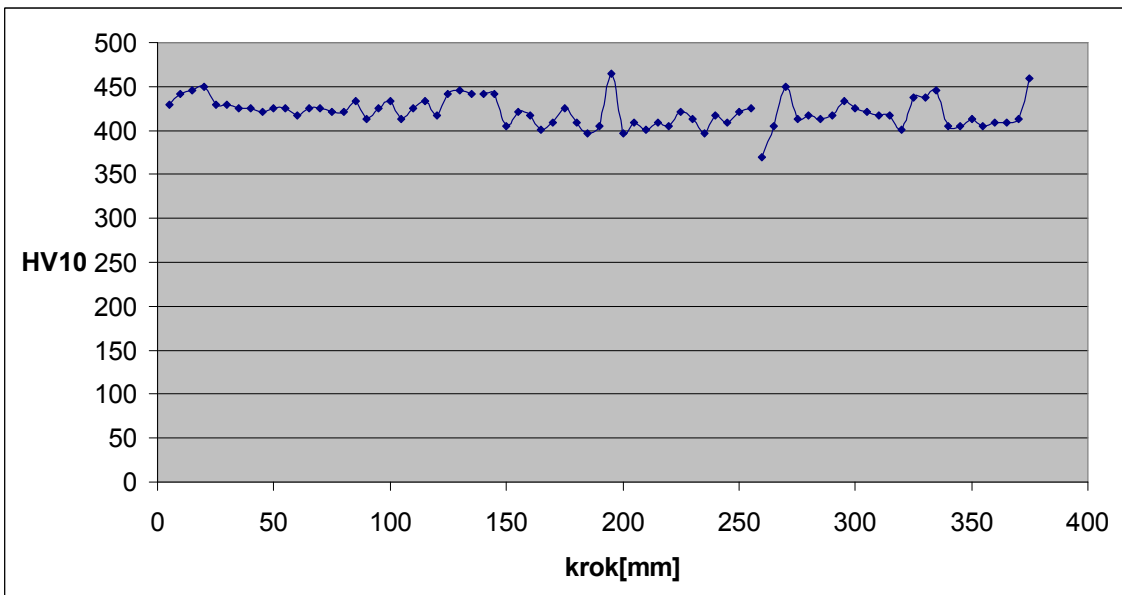
Vzorek	Rm*[MPa]	HV10							Φ
I	29120	429	417	442					429,3
III	21355	437	437	421					431,6
IV	24506	409	425	417					417
V	23398	376	376	383	390	433	409	405	396
VI	30777	390	390	401					393,6

* pevnost svaru

Obr. 6 Průběh tvrdosti na linii základního materiálu u vzorku O



Obr. 7 Průběh tvrdosti na linii základního materiálu u vzorku U



Obrázky 6 a 7 jsou vytvořeny z hodnot tvrdosti stejného materiálu, identické šarže, avšak rozdílné pozice na výlisku, ze kterého byly vzorky odebrány. Vzorek U se nacházel v horní části výlisku a vzorek O v dolní části výlisku.

Vzájemná závislost mezi pevností a tvrdostí jednotlivých vzorků se nám dle výsledků tvrdostní zkoušky potvrdila. Avšak hodnoty jsou zkresleny díky průměrné hodnotě tvrdosti, která z důvodu nemožnosti provedení více vpichů (omezená délka měření) je pouze orientačním ukazatelem. Dále byla sledována heterogenita základního materiálu. Zde bylo zjištěno, že se hodnoty tvrdosti v jednotlivých částech měřené plochy liší. To způsobilo vlivem malého počtu výsledků zkreslení průměrné hodnoty tvrdosti.

Velmi významným výsledkem bylo zjištění, že se pevnostně významně liší dva testované typy materiálů. Oba materiály se navzájem lišily pouze povrchovou úpravou. Avšak ve výsledku to sehrálo důležitou roli při objasňování vzájemné závislosti mezi pevností a tvrdostí materiálu.

Závěr

Jeden ze záměrů práce byl rozbor možností vyjádření závislosti pevnosti na tvrdosti pro hodnocení vlivu svařitelnosti u dané aplikace.

Na základě provedených zkoušek na trhacím stavu bylo zjištěno, že svar, ač na vnější pohled vypadal precizně proveden, ve výsledku nesplnil ani jedno z kritérií, kterou jsou běžně na dnešní bodové svary kladeny. Pro námi realizované bodové svary byly vstupními hodnotami pouze svařovací čas, svařovací proud a přitlačná síla svařovacích elektrod. Právě tímto způsobem jsme ovlivnili první vzorky vstupního experimentu, který byl nezbytný pro zjištění optimálních hodnot technologie bodového svařování. Cílem bylo vymežit technologický rozptyl svařitelnosti pro námi uskutečněný experiment vyvoláním extrémů, které mohou nastat a tím tak ovlivnit výslednou kvalitu bodového svaru.

Jedním ze základních nedostatků bodového spoje, který jsme podrobili zkoušce je jeho nedostatečné provaření již v počátku stisknutí svařovacích elektrod a průchodu svařovacího proudu. Jako další příčinu selhání svaru lze označit vnitrostrukturní vady, jako jsou trhlinky nebo dutinky, typů ředin, pórů nebo interkristalických trhlin. Je důležité si uvědomit, že svařování neprobíhá v ochranné atmosféře, jako např. svařování technologického typu MIG, MAG, TIG, WIG.

Práce se v teoretické části zabývá studiem rozdílů vlivu svarového cyklu u různých typů materiálů v dopravní technice.

Praktická část názorně ukazuje a zhodnocuje možnosti zpracování výsledků získaných metodou měření tvrdosti. Z výsledků je patrné, že v otázce týkající se pevnosti a tvrdosti, jsme dospěli k jednoznačnému závěru. I přesto, že lze statisticky vypočítat korelační koeficient ze získaných hodnot pevnosti a tvrdosti základního materiálu, který byl použit pro předmětnou kombinaci bodového svaru, je jeho použití omezené rozdíly v závislosti na šarži a zároveň na části profilu výlisku. Upozorňují, že závěrem této práce nebylo získání či hodnocení statistické závislosti (málo vzorků)

mezi pevností a tvrdostí, ale zjištění reálných pevnostních rozdílů svařovaných profilů, které mají přímý vliv na svařitelnost.

Tyto rozdíly jsou vyvolány lokálními heterogenitami chemické a následně strukturní povahy, které nelze hodnotit potřebnými materiálovými rozbory v každé pozici pro svařování. Rovněž standardní statické zkoušky jsou v praktické aplikaci hodnocení svařitelnosti omezené. Měření tvrdosti je tedy možným ukazatelem vlivu rozdílů některých materiálových parametrů (chemie, struktura, následné mechanické vlastnosti atd.)

Byl zjištěn rozptyl pevnosti základního materiálu po celé délce profilu. Ten byl způsoben jak heterogenitou struktury, ale i chemickým složením povrchové vrstvy a samotného materiálu výlisku.

Z hodnocení pevnosti vyplynulo:

- Vzájemný vztah pevnosti základního materiálu na tvrdosti základního materiálu byl potvrzen.
- V daném rozsahu experimentu nebyla zjištěna jednoznačná závislost mezi pevností spoje a tvrdostí základního materiálu. Byla ověřena možnost použití přímé korelace pro výpočet korelačního koeficientu; problém s jeho aplikací je způsoben různým poměrem sledovaných parametrů, tj. potřeba analyzovat více vlivů.
- Navíc byl zjištěn pevnostní rozdíl v jednotlivých dodávkách svařovaného materiálu.

Použitá literatura

- [1] HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Veda, Bratislava 1988. ISBN 80-224-0016-5.
- [2] AHMED, N. *New Developments in Advanced Welding*, Woodhead Publ. Ltd., Cambridge, England, 2005. ISBN 1-85573-970-4.
- [3] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I.-II*. CERM, s.r.o. Brno 1999. ISBN 80-7204-193-2.
- [4] ČSN 05 1309 *Zváranie. Zvariteľnosť kovov a jej hodnotenie. Všeobecné ustanovenia*. 1991
- [5] ČSN 05 0005 *Zváranie. Chyby zvarových spojov: Základné pojmy*. 1969
- [6] ČSN EN ISO 18 265 *Kovové materiály: Převod hodnot tvrdosti*. 2004
- [7] SCHMIDOVÁ, E a kol. *Svařování vysokopevnostních materiálů*, Technická zpráva 2008.
- [8] SCHMIDOVÁ, E; ŠVANDA, P. *Efekty překrytí odporových svarových spojů*. In: sborník TechMat'08, s. 83-89, Svitavy, ČR, 2008. ISBN 978-80-7395-136-8.

Seznam obrázků

Obr. 1	Tvorba strukturních pásem svarového spoje v závislosti od teploty	9
Obr. 2	Závislost síly a dráhy na čase při zkoušce pevnosti bodového svaru	26
Obr. 3	Ukázka bodového svaru prvotního experimentu před destruktivní zkouškou . .	26
Obr. 4	Ukázka bodového svaru prvotního experimentu po destruktivní zkoušce	26
Obr. 5	Průběh mikrotvrdomosti v oblasti řezu čočky a nejbližší TOO	27
Obr. 6	Průběh tvrdosti na linii základního materiálu u vzorku O	30
Obr. 7	Průběh tvrdosti na linii základního materiálu u vzorku U	30

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty vstupního experimentu a výsledné pevnosti svarových čoček	25
Tab. 2 Velikost vtisku a tomu odpovídající tvrdost materiálu (série U)	28
Tab. 3 Velikost vtisku a tomu odpovídající tvrdost materiálu (série O)	28
Tab. 4 Pevnost v tahu a průměrná tvrdost základního materiálu	29
Tab. 5 Korelační koeficient vypočítaný lineární regresí ze vstupních hodnot	29
Tab. 6 Tabulka hodnot tvrdosti trhaného základního materiálu po svařování	29

Seznam zkratk

TOO

Teplotně ovlivněná oblast