

UNIVERZITA PARDUBICE

Dopravní fakulta Jana Pernera

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti hodnocení strukturních heterogenit svarových spojů

Vypracoval/a/:

Bc. Martin Hegr

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Hanus

Studijní program:

Dopravní inženýrství a spoje

Studijní obor:

Dopravní prostředky – zaměření Silniční vozidla

Rok:

2015

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Hegr**
Osobní číslo: **D12741**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Možnosti hodnocení strukturních heterogenit svarových spojů**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor zavedených přístupů dimenzování svarových spojů s ohledem na vyvolané strukturní a pevnostní změny v tepelně ovlivněné zóně.
2. Procesy zpevnění, resp. odpevnění materiálu vlivem svařování.
3. Specifika působení svarového cyklu na vysokouhlíkové nelegované oceli vs. nízkolegované vysokopevnostní oceli pro bezpečnostní prvky autokaroserií.
4. Návrh experimentálních svarů a analýz pro hodnocení lokálních pevnostních rozdílů.
5. Realizace navržených experimentů a materiálových analýz.
6. Vyhodnocení výsledků analýz, posouzení možností použití testovaného způsobu hodnocení strukturních heterogenit při dimenzování svařenců.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. Kuncipál, J.: Teorie svařování, SNTL, 1986
2. Pluhář J., Puškár A., Koutský J., Macek K., Beneš V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu, SNTL/Alfa, 1987
3. Podrábský, T.-Fremunt, P.: Konstrukční oceli, CERM Brno, 1996, ISBN 80-85867-95-8

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Hanus

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: 25. února 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 22. května 2015



doc. Ing. Ivo Dražanský, Ph.D.
děkan

L.S.



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

V Pardubicích dne 25. února 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Možnosti hodnocení strukturních heterogenit svarových spojů vykonal samostatně pod vedením Ing. Petra Hanuse a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Pardubicích květen 2015

Bc. Martin Hegr

.....

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hanusovi a dále prof. Ing. Evě Schmidové, Ph.D. za odbornou pomoc, připomínky, rady, velkou trpělivost a metodické vedení diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

ANOTACE:

Předmětem této závěrečné práce „Možnosti hodnocení strukturních heterogenit svarových spojů“ vyhotovené v rámci magisterského studia oboru Silniční vozidla je seznámení se svarovými heterogenitami, které jsou zapříčiněny teplem vneseným při svařování. Diplomová práce je členěná do dvou fází. V první teoretické části byly popsány heterogenity, které jsou způsobeny nedodržením technologické kázně, dále jsou stručně popsány jednotlivé zkoušky, kdy se zjišťují vady, poté vliv prvků na svar a mechanismy, které mají za následek změnu pevnosti. Dále je popsána technologie bodového svaru, protože patří k nejrozšířenějším způsobům spojování částí karoserií v automobilovém průmyslu. V praktické části této diplomové práce jsou stručně rozebrány způsoby určování pevnostních rozdílů v tepelně ovlivněných oblastech vznikajících jako důsledek procesu svařování. Aby byly splněné požadavky na dokonalý svar bez vad a zatěžovaná prostým tahem byla kritická oblast experimentálně simulovaná. Cílem této práce je určení trendu zpevnění resp. odpevnění materiálu s návazností na dimenzování svarových spojů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Tepelně ovlivněná oblast, svařitelnost, struktura, konstrukční oceli, zkoušky, vady.

TITTLE:

Options evaluate structural heterogeneity of welded joints.

ANNOTATION:

The subject of this thesis „ Options evaluate structural heterogeneity of welded joints " produced during the master study of road vehicles is familiar with the findings of welding heterogeneities which are caused by the introduced heat during welding. The thesis is divided into two phases. In the first part were described heterogeneity caused by non-observance of technological discipline, as well as brief descriptions of individual tests, which detect the defect, then the influence of elements to the weld and mechanisms that result in a change of strength. Furthermore, technology is analyzed spot welding, since it belongs to the most widespread methods of jointing bodywork parts in the automotive industry. In the practical part of this thesis are briefly discussed ways of determining the strength of differences in heat affected areas emerging as a result of the welding process. To meet the requirements for a perfect weld without defects and loaded by simply pulling the critical area experimentally simulated. The aim of this study is to determine the trend of firming resp. softening material traceable to the dimensioning of welded joints.

KEYWORDS:

Heat-affected zone, weldability, structure, structural steel, tests, defects.

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE	11
3	VLIV NĚKTERÝCH PRVKŮ NA VLASTNOSTI OCELÍ.....	11
4	KONTROLA KVALITY SVAROVÉHO SPOJE	11
4.1	DRUHY VAD A JEJICH PŘÍČINY	11
4.1.1	<i>Povrchové vady.....</i>	<i>11</i>
4.1.2	<i>Vnitřní vady.....</i>	<i>11</i>
4.2	ZKOUŠENÍ SVÁRŮ.....	11
4.2.1	<i>Destruktivní zkoušky svarových spojů</i>	<i>11</i>
4.2.2	<i>Nedestruktivní zkoušky svarových spojů.....</i>	<i>11</i>
5	SVAŘITELNOST	11
6	TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST SVAROVÉHO KOVU	11
7	VÝPOČET SVAROVÝCH SPOJŮ	11
8	OCELI V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	11
8.1	DVOUFÁZOVÉ OCELI	11
8.2	MARTENZITICKÉ OCELI	11
9	PROCESY ZPEVNŮVÁNÍ MATERIÁLU.....	11
9.1	ZPEVNĚNÍ HRANICEMI ZRN A SUBZRN	11
9.2	PRECIPITAČNÍ ZPEVNĚNÍ	11
9.3	ZPEVNĚNÍ SUBSTITUČNÍMI A INTERSTICIÁLNÍMI ATOMY	11
9.4	DEFORMAČNÍ ZPEVNĚNÍ.....	11
10	PROCESY ODPEVNŮVÁNÍ	11
10.1	ZOTAVOVÁNÍ.....	11
10.2	REKRYSTALIZACE.....	11
11	ODPOROVÉ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	11
11.1	TECHNOLOGIE BODOVÉHO ODPOROVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	11

11.2	METALURGIE BODOVÉHO SVARU	11
11.3	ZKOUŠENÍ BODOVÝCH SVARŮ	11
11.3.1	<i>Statická stříhová zkouška</i>	11
11.3.2	<i>Dynamická stříhová zkouška</i>	11
12	NÁVRH EXPERIMENTU SVARŮ A ANALÝZ PRO HODNOCENÍ LOKÁLNÍCH PEVNOSTNÍCH ROZDÍLŮ.....	11
12.1	TECHNOLOGIE VÝROBY VÁLCOVANÝCH PLECHŮ ZA TEPLA	11
12.2	MATERIÁL S 235 JR	11
12.3	MATERIÁL DOMEX 700 MC.....	11
12.4	PROCES ZPEVNĚNÍ DOMEXU MC 700.....	11
13	REALIZACE NAVRŽENÝCH EXPERIMENTŮ A MATERIÁLOVÝCH ANALÝZ.....	11
13.1	VYTVOŘENÍ VZORKŮ	11
13.2	SIMULACE SVARU	11
13.3	VZORKY PRO METALOGRAFICKÉ ANALÝZY A HODNOCENÍ TVRDOSTI.....	11
14	PREZENTACE VÝSLEDKŮ	11
14.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	11
14.1.1	<i>Tahová zkouška ocel S 235 JR</i>	11
14.1.2	<i>Tahová zkouška ocel Domex 700 MC</i>	11
14.2	MĚŘENÍ INDENTAČNÍ METODOU.....	11
14.2.1	<i>Tvrdość ocel S 235 JR</i>	11
14.2.2	<i>Tvrdość ocel Domex 700 MC</i>	11
14.3	METALURGICKÁ ZKOUŠKA	11
14.3.1	<i>Mikrostruktura ocel S 235 JR</i>	11
14.3.2	<i>Mikrostruktura ocel Domex 700 MC</i>	11
15	ZÁVĚR	11
16	POUŽITÁ LITERATURA.....	11

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Možnosti zkoušení svarů [17]	11
Obrázek 2 Přímé zkoušení svarů	11
Obrázek 3 Vyhodnocení ultrazvukové zkoušky	11
Obrázek 4 Zkoušení svaru prvním echem	11
Obrázek 5 Zkoušení svaru druhým echem	11
Obrázek 6 Závislost tvrdosti na obsahu uhlíku [25]	11
Obrázek 7 Struktura svarového spoje [12]	11
Obrázek 8 Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje [13]	11
Obrázek 9 Souhrn mezí kluzu a mezí pevnosti v tahu [30]	11
Obrázek 10 Stádia zotavení v deformovaném stavu [33]	11
Obrázek 11 Schématické zobrazení rekystalizace [33]	11
Obrázek 12 Princip odporového svařování tzv. bodování [35]	11
Obrázek 13 Zobrazení namáhání bodového svaru tahem [32]	11
Obrázek 14 Princip zkušebního přístroje – systém pružné tyče [32]	11
Obrázek 15 Technologie výroby oceli válcovaných za tepla [36]	11
Obrázek 16 Schéma řízeného válcování [42]	11
Obrázek 17 Průběh strukturních změn v diagramu napětí – deformace [43]	11
Obrázek 18 Rozměry vyrobeného vzorku	11
Obrázek 19 Simulace svaru	11
Obrázek 20 Barvy a teploty pro konstrukční oceli [28]	11
Obrázek 21 Metalografický vzorek	11
Obrázek 22 Mikrostruktura vzorku oceli S235JR – tepelně neovlivněný	11
Obrázek 23 Mikrostruktura vzorku oceli S235JR – tepelně ovlivněný	11
Obrázek 24 Mikrostruktura vzorku oceli DOMEX MC 700 – tepelně neovlivněný	11
Obrázek 25 Mikrostruktura vzorku oceli DOMEX MC 700 – tepelně ovlivněný	11

Seznam rovnic

Rovnice 1 Výpočet uhlíkového ekvivalentu	11
Rovnice 2 Rovnice pro výpočet ekvivalentního uhlíku [27]	11
Rovnice 3 Výpočet ekvivalentního obsahu uhlíku	11

Seznam tabulek

Tabulka 1 Maximální kombinovaná tloušťka bez přehřevu [25].....	11
Tabulka 2 Teplota přehřevu v závislosti na obsahu uhlíku [24].....	11
Tabulka 3 Chemické složení oceli S235 JR [37].....	11
Tabulka 4 Chemické složení Domex 700 MC [39].....	11
Tabulka 5 Tahová zkouška S235 JR v MPa.....	11
Tabulka 6 Tahová zkouška Domex 700MC.....	11
Tabulka 7 Mikrotvrdost S235 JR.....	11
Tabulka 8 Mikrotvrdost Domex MC 700.....	11

Seznam grafů

Graf 1 Typický průběh tahové zkoušky.....	11
Graf 2 Mikrotvrdost S 235 JR.....	11
Graf 3 Tvrdost S235 JR.....	11

Seznam zkratk a značek

A1	Eutektoidní teplota systému železo – uhlík
A3	Křivka vymezující dolní hranici oblasti stability austenitu systému železo – uhlík
AHSS	Pokročilé vysokopevné oceli (Advanced High Strength Steels)
C _e	Uhlíkový ekvivalent
DP	Dvoufázové oceli (Dual Phase Steels)
HRB	Tvrdost dle Brinella
HRC	Tvrdost dle Vickerse
MART	Martenzitické oceli
TOO	Tepelně ovlivněná oblast

1 Úvod

V poslední době je v automobilovém průmyslu kladen velký důraz na zlevnění nákladů na výrobu automobilů, na zlepšení pasivní bezpečnosti a na snižování spotřeby paliva a tím i emisí. Je zde několik možností, jak těchto nároků dosáhnout. Jednou z možností je zmenšit co nejvíce hmotnost vozidel při zachování užitných vlastností. Aby bylo požadavkům na vývoj automobilů co nejvíce vyhověno, inovují se materiály, které mají vysokou pevnost. V důsledku toho se zlepšují prvky pasivní bezpečnosti, při stejném podílu hmotnosti automobilu nebo ke snížení váhy karoserie při zachování mechanických vlastností. Tím dochází ke snížení spotřeby materiálů a výrobních nákladů.

V teoretické oblasti jsou stručně popsány typy heterogenit svarových spojů a možnosti jejich zkoušení. Vady, které se mohou vyskytnout při nedodržení technologické kázně včetně zkoušek, kterými chyby svarů odhalujeme. Pro kvalitu svaru je důležitý nejen technologický postup, ale chemické složení, proto této problematice byla věnovaná úzká oblast práce. Dále jsou zobrazeny procesy, díky nimž dochází k pevnostním změnám v oblasti svaru a ke změnám struktury zapříčiněné vlivem teplotního pole. Jelikož při výrobě aut je s výhodou používaná technologie bodového svaru, tato práce tuto skutečnost zohledňuje.

Cílem této práce je zkoumání strukturních heterogenit ve svarovém spoji. Pro experiment byl vytvořen simulovaný svar. Jedním z důvodů proč k simulování došlo, byl především požadavek na namáhání prostým tahem a tím vyloučení účinků momentů u přeplátovaných bodových spojů. Byly vybrány dvě oceli s rozdílným chemickým složením a podrobeny statickým zkouškám. Tahová zkouška a jako srovnávací metoda byla zvolena vnikající metoda měření, kde se určuje tvrdost. Díky výsledkům těchto metod se vytvořily závěry, které nám poskytují informace o tom, jak se mění jejich mechanické vlastnosti.

2 Heterogenní svarové spoje

Heterogenní svarové spoje vznikají ve třech aplikacích:

- O heterogenních svarových spojích mluvíme i při svařování stejných materiálů, kde je výhodné použít odlišný přídavný materiál. Většinou se jedná o přídavný materiál austenitických vlastností, může být i použit přídavný materiál nízkouhlíkový, který je legovaný niklem. Oba uvedené přídavné materiály jsou využívány tam, kde stav svařitelnosti je obtížný.
- Podstatné chemické rozložení daný konstrukcí, kdy svarový kov je odlišný alespoň od jednoho základního materiálu, nebo spoje odlišných typů materiálu (tím myslíme ocel).
- Návary nízko legovaných ocelí či nelegovaných ocelí, za účelem zlepšení odolnosti při provozu, nejčastěji se jedná o zvyšování vlastnosti pevnosti, ale i odolnosti proti korozi. [7]

3 Vliv některých prvků na vlastnosti ocelí

Uhlík

Patří k dominantním prvkům při výrobě ocelí. Ovlivňuje mechanické vlastnosti a strukturu uhlíkatých ocelí. Větší množství vede ke zvýšení vnitřního pnutí a sklon ke vzniku trhlin při tepelném zpracování. Kromě toho má vyšší obsah uhlíku nepříznivý vliv na tváření za studena i za tepla. Při zvýšení obsahu uhlíku dochází ke zvýšení tvrdosti a pevnosti v tahu, tím se ale snižuje tvárnost a houževnatost. [1]

Pokud má ocel vysoký obsah uhlíku tak je vhodný pro kalení a popouštění. Po této tepelné úpravě je materiál vysoce pevný a odolný vůči opotřebení. Vliv uhlíku také zhoršuje obrobiteľnosť a svařitelnost. Nízkolegované oceli jsou charakteristické dobrou tažností, přiměřenou pevností a dobrou tvárností v normalizačním stavu. Jsou hojně využívány ke konstrukci mostů, lodí a automobilů. [1]

Křemík

Přidává se do materiálů jako dezoxidační přísada v celkovém množství do 0,5 %. Pro zlepšení slévateľnosti v ocelích na odlitky je nutný. Zabraňuje segregaci fosforu a feritu. Křemík je značně feritotvorný. Oceli s vyšším obsahem křemíku (tzn. nad 3 %) jsou čistě feritické od teploty solidu až do pokojové teploty. Křemík zvyšuje mez únavy a mez kluzu a zhoršuje svařitelnost oceli. [1]

Mangan

Přidává se do oceli kvůli odsíření a jako dezoxidační přísada. Mangan má dobrý vliv na svařitelnost a také zvyšuje u oceli pevnost v tahu. Bohužel způsobuje nežádoucí růst zrn při tváření za tepla a tepelném zpracování. [1]

Síra

Je nežádoucí kvůli sulfidům, dochází tak ke vzniku zárodků trhlin. Díky sulfidům dochází k výraznému zvýšení rizika ke křehnutí oceli při tváření za tepla. Obsah síry by neměl překročit limit 0,02 %. Síra zhoršuje únavovou pevnost a svařitelnost. Sírou se leguje ocel pouze pro zlepšení obrobitelnosti - zlepšují lámavost třísek. [1]

Kyslík

Pokud má vzduch volný přístup k tavné lázni a do svarového oblouku, může se kyslík nacházet ve třech formách: atomární, molekulární a ionizovaný. Atomární i molekulární kyslík reaguje přímo s kovovými prvky a tím se tvoří oxidy s vysokou teplotou tavení. Příkladem je hliník, který má teplotu tavení kolem 657 °C, vytváří oxid hlinitý, který se taví při teplotě 2050 °C. [9]

Při obloukovém svařování se část odvede do strusky a část se rozpustí ve svarovém kovu. Největší procento kyslíku je v FeO, který se ve svarové lázni rozpouští, ale díky tomu, že je lehčí, stoupá k povrchu svarového spoje a vytváří na povrchu vrstvičku okují. Nepříznivý účinek kyslíku se projeví precipitačními procesy oxidů železa, v důsledku rozdílné rozpustnosti v železe α a γ . [9]

Dusík

Obsah dusíku ve svarovém spoji je úměrný podle toho, v jakém množství byl přítomen vzduch v přítomnosti svaru. Svar v největší míře ovlivňuje právě dusík. Ve vzduchu je až 78 % dusíku. Příčinou obsahu dusíku mohou být vznikající póry nebo vznik nitridů. Nitridy i póry výrazně ovlivňují svarový spoj. Pokud teplota svaru klesá pozvolna, dochází k uvolňování dusíku, aniž by docházelo k tvorbě pórů. Pokud nejsou splněny podmínky pro pozvolný únik tohoto plynu, je zde vyšší pravděpodobnost k pórovitosti. [9]

Vodík

Vodík se dostává do svarů z atmosféry nebo z nedostatečného vysoušení elektrod, tavidel, ze znečištěného povrchu základního materiálu. Díky přeměně své modifikace

dochází ke vzniku mikronapětí, která je důsledkem vzniku trhlin za studena. V železe se rozpouští v atomárním stavu, při vysokých teplotách. [9]

Při změnách teploty, kdy tekutý kov mění svoji strukturu z tekuté fáze na pevnou, dochází k tomu, že klesá rozpustnost vodíku nejdříve rychle a následně při dalším ochlazení pomaleji. Vodík se následně uvolňuje a difúzí vyplňuje nečelistvosti svaru. Tam se mění na molekulární vodík, který zvyšuje svůj tlak. Uzavřený vodík v místech s porušenou mřížkou je pod velkým tlakem a zvyšuje v oblasti svaru napětí, které může vytvářet i trhliny a tím snižovat pevnost spoje. Aby se zmenšilo ovlivnění svarové lázně vodíkem, používají se (tavidla), strusky nebo ochranné atmosféry. [9]

4 Kontrola kvality svarového spoje

Vady, které mohou nastat ve svarových spojích, se dělí:

- rovinné (nepodařený kořen, studený spoj, trhliny, ...)
- prostorové (bubliny, vměstky, strusky, ...)

Kontrola před svářením

Pro dokonalý svářecí proces je tato kontrola důležitá, je zapotřebí, aby bylo zkontrolováno:

- jakost základního materiálu
- sestavení dílců, kořenová mezera
- teplota předehřevu
- u náročnějších konstrukcí i kvalifikace svářeče
- dodržení úkosů dílů a jejich jakost [3]

Kontrola v průběhu sváření

Kontrola se zabývá:

- dodržení teploty předehřevu
- splnění technologických parametrů jako je rychlost, intenzita proudu, průměr elektrod, převaření kořenu
- správné očištění svarových housenek od strusky
- vytvoření krycí housenky bez povrchových vad [3]

Kontrola po sváření

Jedná se o kontrolu:

- vizuální prohlídka
- rozměry a tvar zejména u koutových svarů [3]

4.1 Druhy vad a jejich příčiny

4.1.1 Povrchové vady

- **Vruby** se mohou vyskytovat u všech typů svarů. Jedná se o chybu, která se vyskytuje na rozhraní základního materiálu a svaru. Tuto chybu vyvolá nesprávné vedení elektrody či hořáku, foukání oblouku, nedostatečné překrytí hrany úkosu. Vruby snižují průřez materiálu a díky nim se v oblasti svarového spoje koncentruje napětí. [20]
- **Neprovařený kořen** je způsoben např. nesprávnou úpravou nebo malým úhlem rozevření svarových ploch, malou kořenovou mezerou, velkým průměrem elektrody, nízkou intenzitou svarového proudu, příliš dlouhým obloukem, nesprávným sklonem elektrody nebo hořáku, velkou rychlostí sváření nedostatečnou intenzitou plamene. Neprovařený kořen patří mezi závažné chyby, protože vzniklý vrub velmi snižuje mechanické vlastnosti. [20]
- **Prohlubně** jsou zapříčiněny nevhodným průměrem elektrody, nedostatečným počtem vrstev, nevhodným sklonem elektrody nebo hořáku. Tato vada se vyznačuje sníženým průřezem, proto se snižuje pevnost svaru. [20]
- **Kráter** svaru vzniká při prudkém oddálení elektrody nebo hořáku. Dochází tím k tvorbě povrchové trhliny a můžou vzniknout také trhliny ve svarovém spoji.
- **Nedodržení rozměru svaru** je způsobeno nesplněním délky a rozestupů při přerušovaných svarech a opomenutím rozměrů koutových svarů. [20]
- **Krápníky** vznikají při velké intenzitě svařovacího proudu či plamene, malou svařovací rychlostí, nadměrnou kořenovou mezerou. [20]
- **Neúměrné převýšení svaru** je zapříčiněné nevhodnou rychlostí svařování, nebo nesprávným vedením elektrody při příčně kývavém pohybu. Může se tato vada stát i při nevhodném výběru elektrody nebo drátu. [20]
- **Zápaly** jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Častěji se vyskytují u koutových svarů. Mezi hlavní příčiny patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody, případně její špatné vedení. [21]

4.1.2 Vnitřní vady

- **Trhliny** vznikají při nesprávném technologickém postupu (předehřev, kladení svarových housenek, průměr přídavného drátu (elektrody) intenzita svařovacího proudu). Příčinou vzniku trhlin je velké vnitřní napětí tam, kde chladne svarový kov. Pokud je konstrukce svařence tuhá, nemá materiál dostatečnou plasticitu, aby deformaci vyrovnala. Díky tomu vznikají trhliny. [20]

Trhliny vznikají za tepla okolo 1300 až 1100 °C. Vznikají mezi tvořícími se zrny při současném působení vnitřního napětí. Nebo vznikají za studena okolo 100 °C v materiálech, které jsou náchylné na kalení při působení vodíku ve svarovém kovu. Trhlina se může vytvořit při nedodržení technologického postupu. Tím myslíme předehřev, nevhodný svařovací proud, průměrem elektrody, tvorbu housenek. Vliv má také velká kořenová mezera, vlhká elektroda, vlhký ochranný plyn, nesprávné nastavení plamene. Příčinou vzniku zárodku trhliny by mohlo být i rychlé oddálení elektrody nebo hořáku, protože se tím vytvoří nevyplněný kráter s vlasovou trhlinou. Takovéto vady se mohou dále šířit do oblasti celého svaru. [20]

- **Póry a bubliny** jsou objemové vady kulovitěho nebo protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Příčinou vzniku může být rychlé tuhnutí lázně v důsledku nízkého svařovacího proudu a vysoké rychlosti svařování, nebo špatně vysušená elektroda, vlhkost v plynu, nečistoty na svarových hranách, příliš dlouhý oblouk, vysoká rychlost svařování.[21]
- **Vměstky** neboli inkluze mohou být různého typu. Především jsou to struskové vměstky, které vznikají především nedokonalým odstraňováním strusky mezi jednotlivými svařovanými vrstvami, když struska předbíhá oblouk nebo je špatně položená svarová housenka. Oxidické vměstky vznikají především v důsledku nedokonalého čištění povrchu. Vyskytují se především u oxidů hliníku a hořčíku (mají vysoký bod tání). Kovové vměstky (především wolframové) vznikají v důsledku vysokých proudů, dotyku elektrody s tavnou lázní nebo porušením plynové ochrany. [21]

4.2 Zkoušení svárů

Destruktivní zkoušky	Nedestruktivní zkoušky
<input type="checkbox"/> zkoušky mechanických vlastností zkouška tahem zkouška lámavosti zkouška tvrdosti zkouška vrubové houževnatosti únavová zkouška	<input type="checkbox"/> defektoskopické metody zkouška prozařovací RTG a γ zářením zkouška vířivými proudy zkouška tahem zkouška ultrazvukem magnetická metoda prášková indukční metoda kapilární zkouška
<input type="checkbox"/> technologické zkoušky zkouška odolnosti proti tvoření krystalizačních trhlin zkouška odolnosti proti tvoření trhlin za studená	
<input type="checkbox"/> metalografické zkoušky hodnocení mikrostruktury zjišťování vad	

Obrázek 1 Možnosti zkoušení svarů [17]

4.2.1 Destruktivní zkoušky svarových spojů

Jedná se o zkoušky, kdy nedochází k porušení celistvosti svaru. Destruktivní zkoušky se provádějí ještě před výrobou na vzorcích. [4]

- **Zkoušky tvrdosti**

Provádějí se podle normy ČSN EN 1043-1. Tvrdost všech částí svarového spoje se měří tvrdostí dle Vickerse při předem stanoveném zatížení 48 a 98 N – HV 5, HV 10. Pro zkoušku je stanovena teplota okolí $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Tato zkouška se provádí tak, že mechanickým řezáním se vyjme vzorek, který je následně vizuálně kontrolován. Řezy jsou kolmé na osy svarového spoje. Vzorek by měl obsahovat tepelně neovlivněný materiál, obě tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov. [4]

Jakost povrchu se upravuje nejdříve broušením. Pro lepší viditelnost oblastí svarového spoje můžeme i naleptávat. Rozmístění a počet vtisků by měl být stanoven tak, že bychom po zkoušce měli vidět spektrum tvrdostí, které bylo zapříčiněno tepelným účinkem sváru. Vzdálenost stanovují normy. Výsledek tvoří závislost tvrdosti na

vzdálenosti od tepelně ovlivněné oblasti. Zjištěné výsledky se dále porovnávají s přípustnými hodnotami obsažené v normách. [4]

- **Zkoušky mikrotvrdomosti**

Provádějí se na příčných řezech svarových spojů materiálů s velkými gradienty tvrdosti. Základní požadavky na tyto zkoušky jsou obsaženy v normě ČSN EN 1043-2, část 2. Tvrdomost se měří podle Vickerse v rozmezí zatížení od 0,98 do 49 N – HV 0,1 až HV 5. Vpichy jsou blíže u sebe než u předchozí metody, tím se lépe stanovuje minimální a maximální tvrdost ve sledované oblasti. Postup a výsledky jsou stejné jako u běžné metody zkoušky tvrdosti. [4]

- **Zkoušky tahem**

Při zkoušce je normovaný zkušební vzorek zatěžován osovou silou. Při zkoušce dochází obvykle k přetrhnutí vzorku. Tahová zkouška nám zjišťuje deformační charakteristiku. Z ní pak zjišťujeme tažnost a kontrakci. Dále při tahové zkoušce se dá vyvodit napěťová charakteristika, ze které se zjišťuje mez pevnosti a mez kluzu. [2]

- **Zkoušky rázem v ohybu svarových spojů**

Při dynamickém zatěžování dochází mnohdy k destrukci součásti podstatně při nižších zatížení, než je statická pevnost materiálu. Pokud nastane smíšené namáhání, mohou tato zatížení vyvolat křehký lom rázy. Zkouška rázem v ohybu je měřítkem citlivosti materiálu vůči místní koncentraci napětí při rázovém namáhání. [2]

Při zkoušce zjišťujeme, jakou potřebujeme práci k přeražení zkušebního vzorku. Ve zkušebním vzorku je vytvořen příslušný vrub. Jednotkou vrubové houževnatosti je J/cm^2 . Tato jednotka nemá fyzikální charakter, proto je tato zkouška pouze porovnávací. Výsledky můžeme porovnávat pouze tehdy, pokud byly vytvořeny stejné vzorky s příslušnými parametry a pokud jsme zajistili při zkouškách stejné podmínky. Tvar a rozměry vzorků i podmínky jsou normalizovány. Důležitá je teplota, při které se zkouška provádí. [2]

- **Zkoušky lámavosti**

Podstatou zkoušky je ohybová deformace. Svar je vystaven příčnému zatěžování, z boku nebo podélně. Dále rozlišujeme zatěžování ze strany kořene a líce svaru. Průměr ohýbacího trnu nebo vnitřních válečků je dán normou, přičemž musí být dosažen předepsaný úhel ohybu. V průběhu zkoušení nesmí zkušební kus vykazovat žádné samostatné vady větší než 3 mm v jakémkoli směru. Vyhodnocuje se druh a rozměry zjištěných vad a úhel ohybu. Provedení zkoušky lámavosti se řídí normou ČSN EN 910.

[11]

- **Metalografické zkoušky**

Doplňují mechanické zkoušky při zjišťování struktury materiálu a tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Rozděluje je podle citlivosti zobrazení na makroskopickou a mikroskopickou metodu. Pro odhalení struktury se používá elektronový a optický mikroskop. Před samotným pozorováním je nutné mechanicky upravit materiál a vytvořit vzorek s předepsanou drsností. Někdy pro zobrazení struktury je zapotřebí povrch naleptat. Výsledky se často uchovávají v podobě fotografií. [4]

Makrostruktura svarového spoje

Nejdříve je připravený vzorek, s předem upravenou jakostí povrchu, naleptán pro zvýraznění struktury. Nejčastěji se používají roztoky kyseliny dusičné o koncentraci 10 %, nebo může být použit persíran amonný. Strukturní změny se vyhodnocují pouhým okem, popřípadě s použitím lupy či optickým mikroskopem. Při vyhodnocování svaru musí být ve zkoušce zahrnut základní materiál, obě tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov. [4]

Při zkoušce se zaměřujeme na:

- tvar svaru
- šířku tepelně ovlivněné oblasti
- provaření kořene
- způsob kladení svarových vrstev
- výskyt nedokonalostí ve svaru

Mikrostruktura svarového spoje

Při rozborech zvětšujeme připravený vzorek 30-krát až 2000-krát. Mikrostrukturální rozbory zahrnují výbrusy zkušebních vzorků a jejich následné naleptání. Leptáme obvykle nelegované a nízkolegované oceli „Nitalem“ (4% roztok HNO_3 v etylalkoholu). Pokud se jedná o vysocelegované oceli používají se speciální leptadla. Tím se zviditelní struktura, kterou pozorujeme v optickém mikroskopu. [4]

Ze zkoumání se vyvozují závěry a podkládáme je fotodokumentací. Vlivem zjištění mikrostruktury si můžeme udělat obrázek o přítomnosti a množství vměstků – rozložení strukturálních fází (ferit, austenit, apod.) nebo strukturních složek (perlit, bainit) ve svarovém kovu, v pásmech tepelně ovlivněné oblasti i v základním materiálu. Můžeme i stanovovat velikost zrna. [4]

Elektromikroskopická studia

Použití bývá při testování nových materiálů včetně jejich svarových spojů. Jejich zvětšení bývá v rozmezí 1 000-krát až 200 000-krát. Tímto elektromikroskopickým zkoumáním lze hodnotit kvalitu a kvantitu přítomných fází a složek. Můžeme díky němu zkoumat i rozložení dislokačních čar. [4]

4.2.2 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů

- **Kapilární metoda**

Princip této metody spočívá ve vzlínání nebo prolínání detekční kapaliny, která nám ukazuje povrchovou necelistvost svarových spojů. Při metodě barevné indikace se necelistvost projeví vznikem obrazu necelistvosti barevné odlišného od pozadí. Při fluorescenční indikaci využíváme tmavé místnosti pod filtrovaným ultrafialovým zářením k zobrazení necelistvostí. [6]

Touto metodou zobrazujeme vady u všech druhů materiálu o minimální šířce 0,001 mm. Postupujeme tak, že očistíme a odmastíme povrch. Následně na povrch aplikujeme detekční kapalinu (penetrant), ten vniká do povrchových necelistvostí. Poté se penetrant z povrchu odstraní. Po osušení se nanese vývojka, která má za úkol zlepšit kapilární vlastnosti a tím vystoupí penetrant z povrchových necelistvostí. Indikační kapalina následně ukazuje povrchové vady ve zkoušeném sváru. [6]

- **Magnetické metoda**

Magnetickou metodou se zjišťují povrchové i podpovrchové (do hloubky 2 mm) necelistvosti ve feromagnetických materiálech. Povrchové vady ve svarech rozptylují magnetický tok. Po nasypání magnetického detekčního prášku se nám vykreslují. [6]

Pro vykreslení se nejvíce používají suspenze feromagnetických prášků rozptýlených ve vodě, petroleji nebo v parafínovém oleji. Poté se povrch touto suspenzí polévá. Indikovaný prášek odkrývá vady tím, že dochází k lokální deformaci vlastního magnetického pole sledované oblasti a následnému vykreslování siločar pomocí prášku. Touto metodou lze zjistit trhliny o minimální hloubce a šířce 0,025 mm a s minimální délkou 0,5 mm. Pro tvorbu magnetického pole se využívá buď permanentní magnet nebo elektromagnet. [6]

- **Akustická a magnetoakustická metoda**

Spočívá v šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem. Těleso je poklepáno kladívkem a je sledována odezva. Pro zvětšení citlivosti se využívají indukční cívky, umístěné v magnetickém poli, spojené se sluchátkem. Změna zabarvení tónu ve sluchátku nám udává výskyt chyby. Podobně je založená metoda, která využívá vířivé proudy. Její využití bývá tam, kde se vyskytuje nemagnetický materiál. [3]

- **Radiografická metoda**

Princip spočívá v prozařování svaru za použití rentgenového a γ -záření. Rentgenové a γ -záření je příčné elektromagnetické záření o malých vlnových délkách 10^{-12} až 10^{-9} m. Energii záření je třeba volit v závislosti na zkoušeném svaru. [6].

Nastavení ovlivňuje zjizvitelnost vad pro zvolený způsob prozařování. Metoda je založená na rozdílné propustnosti záření ve svarech bez vad v porovnání s vadami. Pohlcení záření je větší v materiálu bez vad než v trhlině. Na prozařování se používají rentgenové aparáty. [8]

Rentgenové záření se dá použít u ocelí do tloušťky 75 mm prozařované stěny, zatímco γ -záření u ocelí do tloušťky 120 mm. Pro ještě větší tloušťky se může použít lineární urychlovač nebo betatron. Citlivost závisí na prozařovací metodě. Radiografickou metodou lze zjistit prostorové vady o velikosti přibližně 2 % tloušťky prozařovaného materiálu. Zjištění plošných vad je obtížné typu studených spojů, trhlin apod. V některých případech je nedokážeme zjistit, protože jsou orientovány kolmo na prozařovací svazek. Kontrola u koutových svarů je značně obtížná, protože je zde nižší rozeznatelnost vad. Způsoby prozařování udává norma ČSN 05 1150. [6]

- **Ultrazvukové metoda**

Ultrazvuková metoda je charakteristická tím, že je vysoce citlivá k plošným vadám. Jsou zde kladeny vysoké požadavky na zkušenosti personálu, který metodu provádějí. Hlavně u podporových vad, austenitických ocelí a při kontrole koutových svarů jsou důležité znalosti a zkušenosti v tomto odvětví. [6]

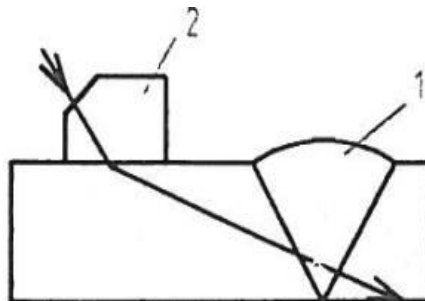
Minimální plocha zjistitelných vad pomocí ultrazvuku je daný kontrolovanou tloušťkou, např. do tloušťky svaru 40 mm je ekvivalentní obsah vady $1,8 \text{ mm}^2$, při tloušťce 120 až 200 mm odpovídá 6 mm^2 . Pro kontrolu svaru se nastavují frekvence 0,5 až 20 MHz. Vady jsou nejlépe rozpoznány, když jejich plocha leží kolmo na směr ultrazvukových vln. Úhlové ultrazvukové sondy vysílají vlny příčně v rozpětí 35° až 80° . Čelní ultrazvukové sondy vysílají signál podélně. U této metody je předepsaná mez drsnosti povrchu, její hodnota nemá překročit $6,3 \mu\text{m}$. [6]

Ke zjištění typu vad ve svarech je nutno použít zkoušení:

- Podélného, kdy sonda se posouvá rovnoběžně s osou svaru
- Příčného, kdy sonda se posouvá ve směru kolmém k svaru
- Směrového, kdy sonda se pohybuje po kruhovém oblouku se středem ve zjišťované vadě. [6]

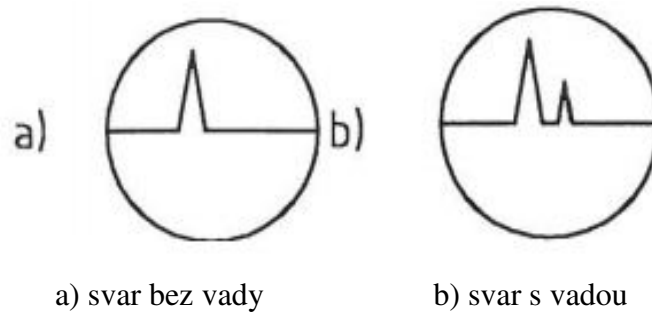
Zkoušení podélné se dělí na:

- zkoušení přímé – na krátkou vzdálenost



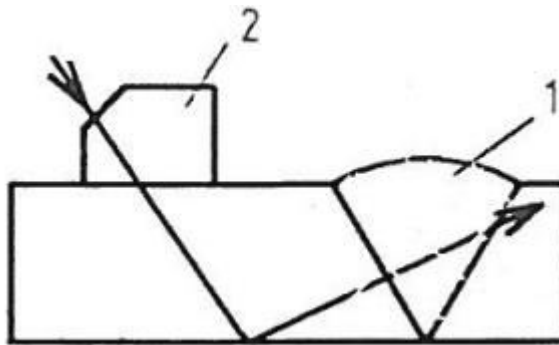
1. zkoušený svar, 2. ultrazvuková sonda s nástavkem z umaplexu

Obrázek 2 Přímé zkoušení svarů [6]



Obrázek 3 Vyhodnocení ultrazvukové zkoušky [6]

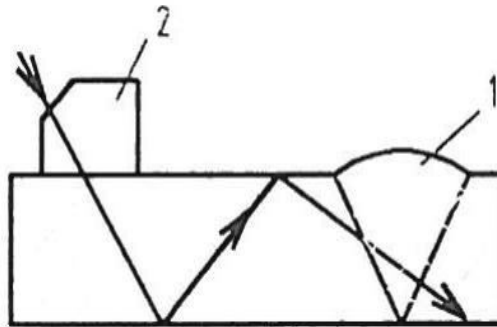
- zkoušení prvním echem



1. zkoušený svar 2. ultrazvuková sonda s nástavkem z umaplexu

Obrázek 4 Zkoušení svaru prvním echem [6]

- zkoušení druhým echem



1. zkoušený svar 2. ultrazvuková sonda s nástavkem z umaplexu

Obrázek 5 Zkoušení svaru druhým echem [6]

Zkouška na krátkou vzdálenost spočívá v tom, že dopadají ultrazvukové vlny rovnou na svar a od vady se odrážejí zpátky k sondě. Při zkoušce 1. echem se vlny odrážejí nejprve od spodní stěny základního materiálu a potom prochází svárem. Díky rozptylu svazku ultrazvukových vln stačí k vyzkoušení celého svaru po celé jeho výšce vést sondu podél jedné nebo dvou rovnoběžek s osou svaru. U svaru do tloušťky přibližně 40 mm postačuje vést sondu podél jediné rovnoběžky. Zkoušky druhým echem jsou použity, tam kde je malá tloušťka základního materiálu, že je nelze zkoušet 1 echem. [18]

Bližší charakter vady se zjišťuje příčným zkoušením. V provozu se využívají obě metody zjišťování vad, tak, že se sonda pohybuje po lomené čáře uvnitř pruhu o stanovené šířce. [18]

5 Svařitelnost

Je schopnost materiálu vytvořit za jistých podmínek kvalitní nerozebíratelný svarový spoj požadované kvality. Svařitelnost je závislá především na chemickém složení a tloušťce průřezu.

Hodnocení svařitelnosti:

Zaručená svařitelnost – stupeň 1a. Svařovací cyklus probíhá při teplotách nad 0 °C bez zvláštních opatření, pod touto teplotou jen při dodržení zvláštních opatření

Zaručeně podmíněná svařitelnost – stupeň 1b. Svařování lze provádět pouze za předepsaných podmínek. U uhlíkových ocelí se jedná o ruční svařování. Pro staticky namáhané svařence a u slitinových součástí se předepisuje především předehřev popřípadě žihání, které se provádí po sváření.

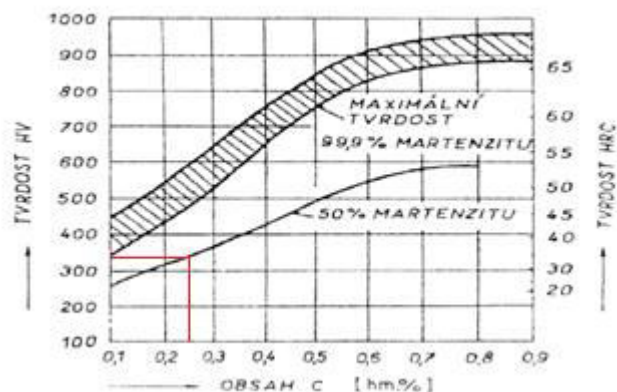
Dobrá svařitelnost – stupeň 2. Není zde zaručena svařitelnost, ale většinou můžeme svařovat.

Obtížná svařitelnost – stupeň 3. V této skupině nedosáhneme kvalitního spoje, ani při dodržení zvláštních opatření. [16]

Údaje o svařitelnosti nám udávají materiálové normy.

- **Svařitelnost uhlíkových ocelí**

Obsah uhlíku má na svařitelnost největší vliv. Čím více obsahuje ocel uhlíku, tím sice je vyšší tvrdost, mez kluzu a mez pevnosti, ale dochází ke snížení plasticity. Uhlík má také vliv na citlivost k zakalení při svařování. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje i tvrdost martenzitu, který právě vzniká. Tím se zvyšuje nebezpečí k tvorbě studených trhlin a to především v TOO svarového spoje. Maximální přípustná tvrdost v TOO svarového spoje odpovídá 350 HV. Dle obrázku níže tomu odpovídá při 50% podílu martenzitu ve struktuře obsah uhlíku 0,25% ve svařovaném materiálu. [4]



Obrázek 6 Závislost tvrdosti na obsahu uhlíku [25]

Ze zmiňovaných důvodů je obsah uhlíku v ocelích omezován hodnotou $C \leq 0,25 \%$. Při této hodnotě obsahu uhlíku není obvykle potřebné svarové spoje menších tloušťek předežhřívát. Nutnost předežhřevu je závislá na obsahu uhlíkového ekvivalentu, na tloušťce materiálu, na obsahu difundujícího vodíku i na tepelném příkonu. Hodnoty těchto veličin udává norma ČSN EN 111-2. [25]

Tabulka 1 Maximální kombinovaná tloušťka bez předežhřevu [25]

Obsah difúzního vodíku (ml/100g svarového kovu)	Maximální kombinovaná tloušťka (mm)			
	CE = 0,49		CE = 0,43	
	Tepelný příkon		Tepelný příkon	
	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm	1,0 kJ/mm	2,0 kJ/mm
> 15	25	50	40	80
$10 \leq 15$	30	55	50	90
$5 \leq 10$	35	65	60	100
$3 \leq 5$	50	100	100	100
≤ 3	60	100	100	100

^a Měřeno podle ISO 3690

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu platí:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024.S [\%] [27]$$

Příčemž S představuje tloušťku materiálu [27]

Rovnice 1 Výpočet uhlíkového ekvivalentu

Pro obsah uhlíku do 0,25 % byl navrhnut dle mezinárodního svářečského institutu vzorec pro výpočet ekvivalentního uhlíku.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%]$$

Rovnice 2 Rovnice pro výpočet ekvivalentního uhlíku [27]

Maximální hodnoty uhlíkového ekvivalentu jsou uvedeny v materiálových listech. [27]
Pokud ocel bude vykazovat vysoký podíl uhlíku je zapotřebí předehřívát základní materiál.

Tabulka 2 Teplota předehřevu v závislosti na obsahu uhlíku [24]

Obsah uhlíku [hm. %]	Teplota předehřevu [°C]
0,2 až 0,3	100 až 150
0,3 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,8	275 až 425

Dohřev se doporučuje při vysokém podílu uhlíku, ale většinou se nepoužívá.

- **Svařitelnost mikrolegovaných ocelí**

Jedná se o uhlíkové oceli, které jsou dolegované nízkým podílem (Al, Ti, Nb a V) za účelem zlepšení mechanických vlastností. Dolegováním se při dobré houževnatosti, zvyšuje mez kluzu a pevnosti, při zachování svařitelnosti. Dobré vlastnosti dolegováním těchto prvků spočívá v tom, že se vážou na uhlík, dusík a formou precipitačního zpevnění zvyšují pevnostní charakteristiky a umožňují také vznik jemnozrnné struktury. Všechny prvky tvoří s uhlíkem a dusíkem karbidy, nitridy nebo karbonitridy. Svařitelnost těchto ocelí bývá podobná jako u uhlíkových ocelí. [25]

Pokud se jedná o volbu materiálu, je důležité vybrat si z nepřeberného množství sortimentu. Správná volba materiálu, technologického postu apod. je důležitým faktorem pro spolehlivost, životnost a bezpečnost svařované konstrukce. Obecně platí, že čím větší množství uhlíku, tím horší svařitelnost, ale lepší prokalitelnost. Pro svařování je důležité, aby obsah síry v ocelích byl max. 0,02 hm. %, kvůli náchylnosti na tepelné likvační trhliny. Při dolegování Nb nastává problém. Při vysokém promísení roztaveného základního a svarového kovu dochází při migraci Nb do svarového kovu ze základního materiálu. Tím se svar stává citlivým na zkřehnutí vlivem precipitačního zpevnění Nb. Proto je vhodné změnit technologii, aby nedocházelo k vysokému promísení svarového kovu se základním materiálem. [25]

Po svaření se svarové spoje mikrolegovaných ocelí pouze žihají na snížení vnitřních napětí obvykle 560 až 600 °C, tyto hodnoty jsou optimální pro plastické a pevnostní vlastnosti. [25]

- **Svařitelnost nízkolegovaných ocelí**

Obsah legur bývá do 5 %. K hlavním legujícím prvkům patří: Ni, V, Cr, Mo. Nízkolegované oceli se vyznačují vyšší mezí kluzu a mezí pevnosti při normálních i vyšších teplotách než nízkouhlíkové oceli.

Vysoké hodnoty mechanických vlastností jsou zapříčiněny:

1. Zpevněním tuhého roztoku
2. Jemnozrnnou strukturou
3. Dislokačním zpevněním
4. Precipitačním zpevněním

Díky prvkům jako je C, Mn, Mo, Cr se zvyšuje riziko k zakalení ve svaru nebo v TOO. Abychom předešli tvorbě trhlín, je výhodné snížit tepelný příkon díky malému průměru přídavného materiálu. Svarové spoje nízkolegovaných ocelí se svařují s předehřevem a u větších tloušťek i s dohřevem. Svarové spoje nízkolegovaných ocelí se většinou pouze popouštějí, tím se snižují zbytková napětí a zlepšují strukturu. Nízkolegované oceli jsou při popouštění náchylné na rychlost ohřevu na popouštěcí teplotu a na rychlost ochlazování. [25]

- **Svařitelnost vysocolegovaných ocelí**

Vysokolegované oceli obsahují více než 10 hm. % celkového obsahu legur.

Nejdůležitější legující prvky rozdělujeme na:

- Austenitotvorné, které rozšiřují v rovnovážném diagramu oblast γ : C, Ni, Cu, Mn, N
- Feritotvorné, které zužují v rovnovážném diagramu oblast γ : Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V

Dále je možno vysokolegované oceli rozdělit podle obsahu hlavních legur na:

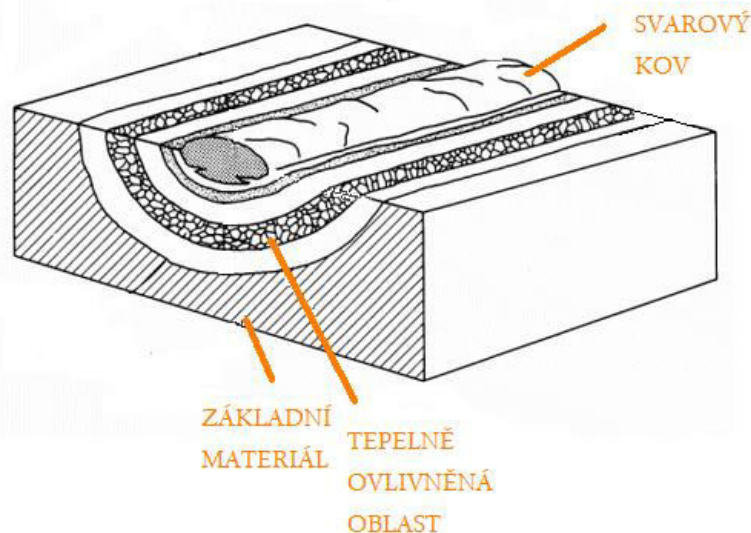
- Feritické chromové oceli
- Martenzitické chromové oceli
- Austenitické Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli
- Austeniticko-feritické oceli (duplexní) Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli [25]

6 Tepelně ovlivněná oblast svarového kovu

Ideálním stavem, který by přináležel svarovému kovu je takový, který by byl podobný, ne-li stejný jako základní materiál. Skutečnost je taková, že svarový kov se liší strukturálně i chemicky od základního materiálu. Chemickou strukturu ovlivňuje zejména vypalování prvků. Především se jedná o prvky uhlík, mangan, křemík, chrom apod. [14]

Svařování je složeno z ohřevu na teplotu tavení, vlastního svařování, chladnutí popřípadě i tepelného zpracování a ohřevu na odstranění vnitřního pnutí. Svařujeme-li, dochází k ovlivňování malé části materiálu, ale protože konečná teplota přesahuje bod tavení, prochází materiál a jeho okolí během ohřevu všemi stupni přeměn. Při vysokých teplotách nad překryštalizační teplotu A_3 dochází k růstu a následnému zhrubnutí zrna již během ohřevu. Svarový kov při procesu svařování je neustále ovlivňován zplodinami, kterými jsou plyny, tekutá struska i páry. [16]

Dochází tak k rozpouštění plynů ve svarové lázni i k chemickým reakcím, při kterých se tvoří oxidy, nitridy. Tvorba oxidů a nitridů je doprovázena mísením základního a přídavného materiálu. Mechanické vlastnosti ovlivňuje nerovnoměrnost chemického složení při vrstvení krystalů. Středy krystalů tvoří kovový materiál o vyšší tavicí teplotě než materiál zkrystalizovaný na jejich okrajích, tím se soustřeďují nečistoty v tepelných uzlech. Během tuhnutí taveniny dochází k vylučování plynů z tuhnoucího kovu. Při dalším ochlazení vznikají tepelná pnutí, která mohou překračovat i mez pevnosti a následně se mohou tvořit trhliny ve sváru a blízkém okolí. V důsledku měnící se struktury dochází ke změně mechanických vlastností, zejména vnitřního pnutí způsobující i deformaci svařence. [16]



Obrázek 7 Struktura svarového spoje [12]

Pásma tepelně ovlivněné oblasti

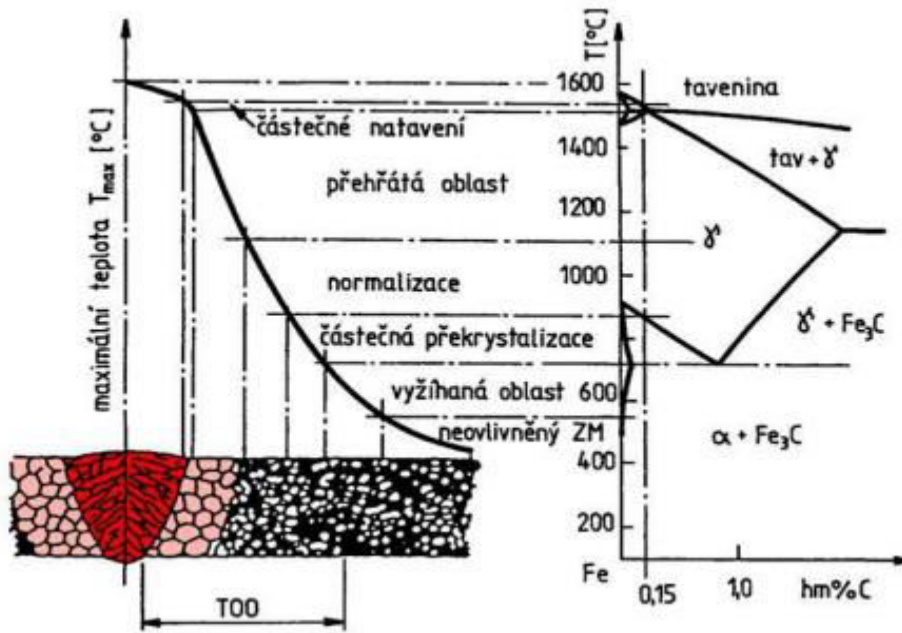
Pásmo částečného natavení představuje přechod mezi tepelně ovlivněnou oblastí a svarovým kovem. U většiny ocelí je rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu minimální.

Pásmo přehřátí, se vyznačuje tím, že se teploty pohybují nad teplotou A_3 . Jedná se o oblast, která převyšuje teplot rychlého růstu primárních zrn, tak zvanou teplotu přehřátí. Pro nelegované oceli platí, že teplota přehřátí se pohybuje kolem $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro mikrolegované oceli je přibližná hodnota teploty 1250 až $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro nízkolegované oceli přibližně $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pásmo normalizace je spjaté s teplotami A_3 a teplotou přehřátí s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

Pásmo částečné překrystalizace se nachází mezi teplotami A_1 do A_3 s neúplnou polymorfní přeměnou.

Při svařování dochází ke snižování pevnosti a to v tepelně ovlivněné oblasti úzce nad teplotou A_1 . Tento vliv se nejvíce projeví při svařování legovaných zušlechťených ocelí. U těchto ocelí se doporučuje dodržet určitý použitý tepelný příkon svařování. Tím se sníží šířka popuštěné oblasti. Je snaha, aby tato šířka byla co nejmenší. Pro zjištění informací o pevnosti v tepelně ovlivněné zóně, kde je tepelně ovlivněná oblast s malou šířkou, využíváme simulaci svaru nebo další možností je měření tvrdosti. [19]



Obrázek 8 Vliv teplotního účinku na strukturu svarového spoje [13]

7 Výpočet svarových spojů

Výpočty svarových spojů se řídí normou dle ČSN 05 0120, která je platná již od roku 1972. Norma se používá na dimenzování svarových spojů, která jsou strojního charakteru. Používá se především u konstrukcí, tam kde dílce jsou vyrobeny z uhlíkových ocelí. Pevnostní řada zmíněných ocelí by měla být 35 až 52 kp/mm², za předpokladu, že konstrukce se pohybuje v rozmezí provozních teplot od -20 až do +150 °C. Norma nebere ohled na změnu mechanických hodnot materiálu zapříčiněnou změnou teploty. Vliv teploty, díky kterému se změní jejich pnutí a nezabývá se náhlými křehkými lomy. Norma uvádí zatížení svarových spojů, výpočet koutových svarů, tupých, děrových a žlábkových svarů a také výpočet bodových svarů. [15]

8 Oceli v automobilovém průmyslu

Typické představitelé ocelí pro automobilový průmysl, které po tepelném ovlivnění svarem mění své mechanické vlastnosti, byly vybrány dvoufázové a martenzitické oceli.

8.1 Dvoufázové oceli

Jak již název napovídá, jedná se o oceli, které jsou složené ze dvou fází. První fáze je jemnozrnná feritická matrice a druhá tvrdá martenzitická fáze. Se zvyšujícím se obsahem tvrdé sekundární fáze se zvyšuje i pevnost těchto ocelí. Dvoufázové oceli jsou vyrobeny tak, že jsou podrobeny řízeným ochlazováním z austenitické fáze nebo také z dvoufázové austenitické a feritické fáze, při čemž část austenitu se přeměňuje na ferit a při dostatečně rychlém ochlazení se zbytkový austenit přeměňuje na martenzit. [29]

Dvoufázové oceli se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi, jako např. výrazná mez kluzu, vysoká mez pevnosti, při dobré plasticitě a tvařitelnosti. Mez pevnosti dosahuje hodnot až 1200 MPa. Všechny dvoufázové oceli se vyznačují tím, že mají nízký obsah uhlíku a to do 0,18 %. [29]

Díky těmto mechanickým vlastnostem se tyto materiály obzvlášť hodí do automobilového průmyslu. Vykazují také absorpční vlastnosti a vysokou odolnost vůči únavě materiálu. Tyto materiály vlivem vysoké pevnosti a svým absorpčním vlastnostem se obzvlášť hodí na výrobu autokaroserií. [29]

Mechanické vlastnosti:

- tažnost 15 – 35 %
- mez kluzu 300 – 500 MPa
- mez pevnosti do 1200 MPa

Chemické složení:

- C 0,08 – 0,18 %
- Si 0,25 – 0,7 %
- Mn 1 – 2,9 % [29]

8.2 Martenzitické oceli

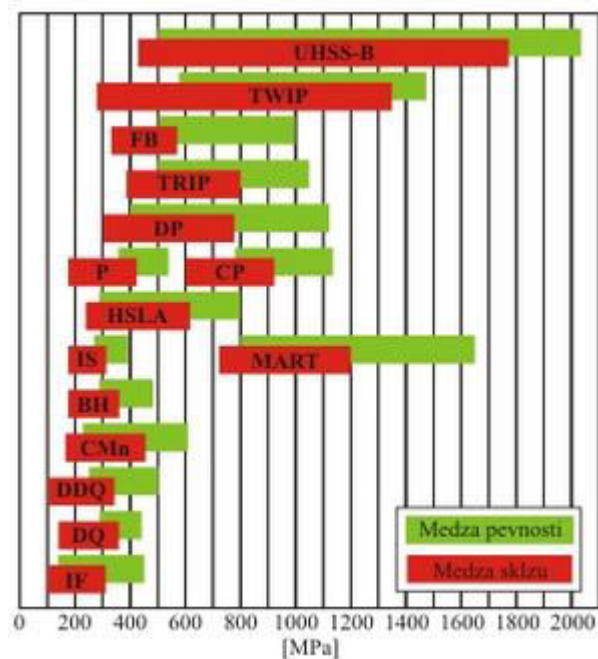
Martenzitické oceli obsahují martenzitickou matici s malým obsahem feritu či bainitu. Ve skupině vícefázových ocelí se martenzitické oceli řadí mezi vysoce pevnostní. Martenzitické oceli se upravují temperováním kvůli zlepšení tvárnosti při vysoké pevnosti. Pokud zvýšíme obsah uhlíku v martenzitických ocelích, docílíme zvýšení prokalitelnosti. Tento účinek mají mimo uhlíku i mangan, křemík, bór, chrom, molybden, vanad, nikl a to buď jednotlivě anebo v jejich kombinaci. [29]

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu 950 – 1250 MPa
- mez pevnosti do 1700 MPa
- tažnost 3 – 7 %

Chemické složení:

- C do 0,2 %
- Cr 11,5 – 18 % [29]



Obrázek 9 Souhrn mezí kluzu a mezí pevnosti v tahu [30]

9 Procesy zpevnování materiálu

Zvyšování pevnosti je důsledek pohybu dislokací. Jedná se o zvyšování odporu proti vytvoření a růstu dislokací. Tedy plastická deformace je závislá na rozložení typu a množství překážek. Jedná se především o hranice zrn a subzrn, hranové dislokační smyčky, precipitáty, atomy příměsí a jejich shluky, dislokační sítě apod. Interakce dislokací s těmito překážkami odpovídají zpevňovací mechanismy. K nim patří zpevnění legováním, zpevnění hranicemi zrn a subzrn, které jsou spjaty se zpevněním dislokačním, precipitačním. Výsledná pevnost bývá také ovlivněna i strukturou matrice. [22]

9.1 Zpevnění hranicemi zrn a subzrn

Hranice zrn a subzrn zabraňují pohybu dislokacím, velkoúhlové hranice jsou překážkou, která je svými vlastnostmi neprůchodná, a tudíž jejich celková plocha vede k plošnému omezení pohybu dislokací. Díky tomuto jevu se zpevňuje materiál. Čím je materiál jemnozrnější, tím je plocha hranic zrn vyšší, a tudíž je vyšší i mez kluzu sledovaného materiálu. [22,23]

9.2 Precipitační zpevnění

Pokud dochází v matrici k vylučování patřičně malého precipitátu, stává se, že při plastické deformaci iteruje pohybujících se dislokací právě s tímto jemnozrným precipitátem. Tím se materiál precipitačně zpevňuje. Pokud částice, která vznikla rozpadem tuhého roztoku, není koherentní s matricí (tím myslíme mřížku), jedná se o nedeformovatelné částice. Při styku s těmito částicemi se dislokace tak prohýbá, že dochází k jejímu rozdělení na uzavřené dislokační smyčky kolem částic a dislokační čáru. Ta pokračuje po překonání překážek ve svém pohybu. Mezičásticová vzdálenost je nepřímo úměrná napětí, které je zapotřebí k protlačení dislokace přes částice nedeformovaného precipitátu. [22]

Pokud je mřížka precipitátu koherentní nebo semikoherentní s matricí jsou tyto částice deformovatelné. Tyto částice či shluky atomů protínají při svém pohybu dislokace. V tomto případě se jedná o procházení a vnikání dislokace do částice. V této fázi se vyruší energeticky nejvýhodnější meziatomové vazby uvnitř částice. Pro představení, vznikne plocha odpovídající řezu částice skluzovou rovinou dislokace. Tato plocha má určitou

energii, o níž se zvětší volné entalpie zmíněného systému. Fázové rozhraní mezi maticí a částicí se zvětší o další energii. Nárůst těchto energií je součet obou zmiňovaných energií. [22]

9.3 Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy

Pokud atom, který tvoří se železem tuhý roztok rozpuštěné legury, způsobuje distorzi mřížky železa, dochází ke zpevňování – zvyšuje se mez kluzu a mez pevnosti. Substitučně rozpuštěnými atomy je pohyb dislokací brzděn. Důsledkem je iterace napětěvého pole, které je způsobené distorzi mřížky s napětěvým polem dislokace. Pokud se atomy legujícího a základního prvku neliší velikostí, jen modulem pružnosti ve smyku, nedochází k distorzi mřížky. Ale přesto pohyb dislokací ztížen vlivem tzv. pružné modulové interakce. Vlivem intersticiálních cizích atomů vznikají nesouměrná napětěvá pole v jejich blízkém okolí. Tím se řádově zvýší zpevnění v porovnání se souměrnými napětěvými poli, v blízkosti substitučních atomů. [22]

Obecně při zpevňování dochází k poklesu tažnosti a zvyšování tvrdosti. [23]

9.4 Deformační zpevnění

Je docíleno plastickým tvářením za studena, tím myslíme teplotu, která je nižší než teplota rekrytalizační. Při plastické deformaci dochází ke skluzu dislokací, také dochází ke vzniku nových dislokací. Podmínkou činnosti zdroje je existence překážek pohybu dislokace. Jako překážky pohybu dislokace myslíme částice, které jsou jiné fáze v mikrostruktuře a jsou dostatečně tvrdé. Pokud dislokace při pohybu skluzem narazí, potom se chová jako pružná guma, která se prohýbá. [23]

Výsledek je takový, že vzniká nová dislokace připomínající tvar smyčky. Zbylý úsek zakotvený mezi částicemi se znovu prohýbá a celý proces se opakuje. Celková hustota narůstá vlivem zdrojů dislokací. Z jediné dislokace může vzniknout až několik stovek dalších dislokací. Při určité plastické zátěži si dislokace navzájem překážejí ve skluzovém pohybu, tím se materiál zpevňuje. Je patrné, že čím je víc dislokací, tím je obtížnější pohyb dislokací ve skluzových rovinách. [23]

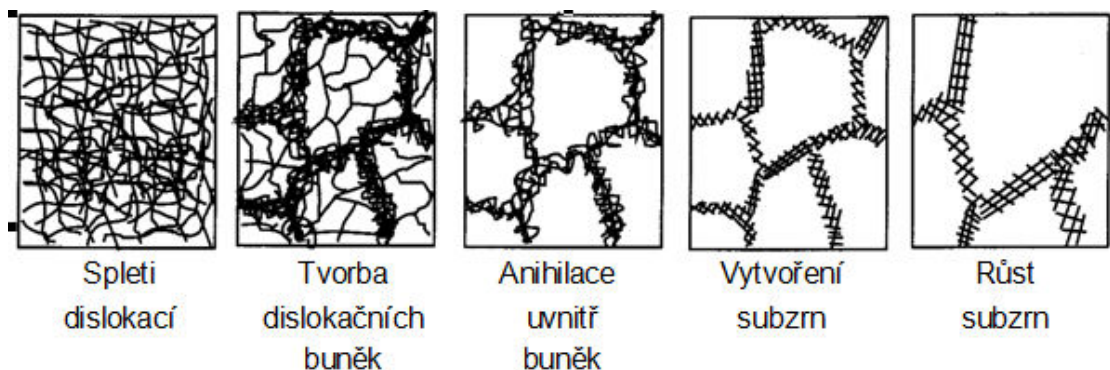
10 Procesy odpevňování

Deformačně zpevněný kov je oproti kovu nedeformovanému bohatší o uloženou deformační energii. Tento jev je připisován vysoké poruchovosti mřížky a je termodynamicky nestabilní. Při žhacích procesech s dostatečnou teplotou dochází k uvolňování nahromaděné energie vlivem snížení poruchovosti mřížky. Takovýmto dějům říkáme odpevňovací poruchy. [31]

10.1 Zotavování

Vlivem zotavování dochází k odstraňování přebytečných koncentrací bodových poruch, kdy se mění uspořádání dislokací při změně hustoty. Koncentrace bodových poruch se snižují vlivem sblížení vakancí s intersticiály, migrací poruch a jejich dočasným zachytáváním. Zotavovací děje probíhají při teplotách v závislosti na zkoumaném materiálu. Bývají většinou v rozmezí od 240 do 280 °C. Zotavovacím principem je tedy migrace poruch. [32]

Migrací poruch dochází k zániku a uspořádání hranových dislokací stejných znamének do dislokačních stěn, které jsou kolmé k rovině skluzu. Zprva se pohybují pomocí skluzu, poté se pohybují šplháním. Rychlost pohybu dislokací je dána pohybem vakancí k dislokacím a vznikem skoků na dislokace. Vlivem pohybu dislokací může docházet k tvorbě pravidelných zrn až subzrn s malouhlovými hranicemi a následně se vytvoří téměř mřížka bez poruch. Pokud se malouhlové hranice začnou pohybovat, může dojít ke spojování subzrn a tím se mohou tvořit zárodky rekrystalizace. [32]



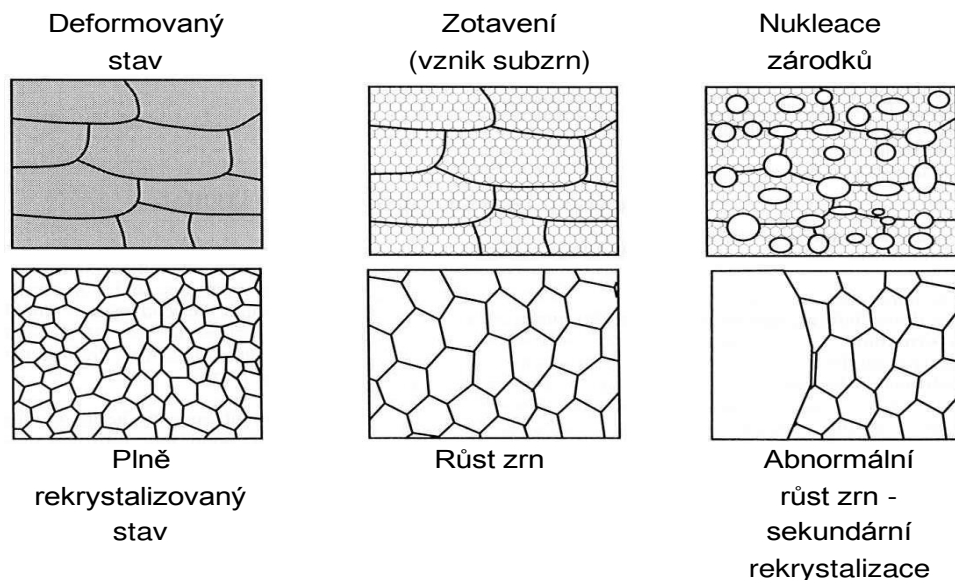
Obrázek 10 Stádia zotavení v deformovaném stavu [33]

10.2 Rekrystalizace

Zvyšujeme-li teplotu až nad 330 °C, dochází ve svařovaném materiálu, zejména pak v tepelně ovlivněné oblasti k primární rekrystalizaci. Primární rekrystalizace má za následek snížení zbytku akumulované energie. Při relaxaci se většinou dávají do pohybu dislokace, které mají velkoúhlové hranice zrn. Pohybují se z oblastí s nižší hustotou dislokací do míst s vyšší hustotou dislokací. V tomto okamžiku dochází k začleňování původních dislokací do velkoúhlové hranice. Důsledkem toho jsou změněny mechanické vlastnosti, jako je pevnost, tažnost, apod. [32]

Primární rekrystalizace představuje vznik a růst nových zrn se shodnou krystalovou mřížkou a s nízkou hustotou dislokací. Růst probíhá do doby, kdy se zrna začínají dotýkat. Tím se vytvoří hranice zrna, kde se hromadí poruchy. Zrna s menší velikostí mizí. Rostoucí zrna snižují celkovou plochu hranic a vytváří energetický rozdíl, který zapříčiňuje další růst. Následně dochází ke hrubnutí zrna. [32]

Sekundární rekrystalizace se vyznačuje růstem určitých zrn na úkor jiných a lokálnímu hrubnutí struktury. Rostoucí zrna jsou větší než v jejich blízkém okolí a mají jinou orientaci než původní. Růst probíhá při potlačení vývoje ostatních částic v jiné fázi vyloučených na hranicích zrn, které se nezvětšují. [32]



Obrázek 11 Schematické zobrazení rekrystalizace [33]

11 Odporové tlakové svařování

Odporové svařování se uplatňuje tam, kde se svařují tenké ocelové plechy. Hojně se využívají při svařování v automobilovém průmyslu při výrobě karoserií. Na ocelových konstrukcích automobilů jsou až tisíce takových svarů. V automobilovém průmyslu byla tato technologie zautomatizována díky robotům. Robotizací se eliminují pochybení ze strany svářeče a rovněž se zvýšila produktivita. [34]

Bodové svařování se využívá pro svařování rovinného plechu a to buď bodově, nebo švově. Při švovém svařování se plechy svařují dlouhým svarem za pohybu kotoučových elektrod. Tímto způsobem lze svařovat i tyče. [34]

11.1 Technologie bodového odporového svařování

Při svařování elektrickým odporem je zdrojem tepla elektrický odpor vzniklý v místě styku svařovaných dílů. Někdy se tomuto odporu říká přechodový odpor. K lokálnímu ohřevu materiálu dochází vlivem procházejícího elektrického proudu. Vlivem tepla se svařované materiály nataví, při jejich dostatečně silném stlačení. Po čase chladnutí, vzniká nerozebíratelný spoj – svarová čočka. Teplo, které takto vzniká je dán Joulovým vztahem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [35]}$$

Q = množství vytvořeného tepla (J)

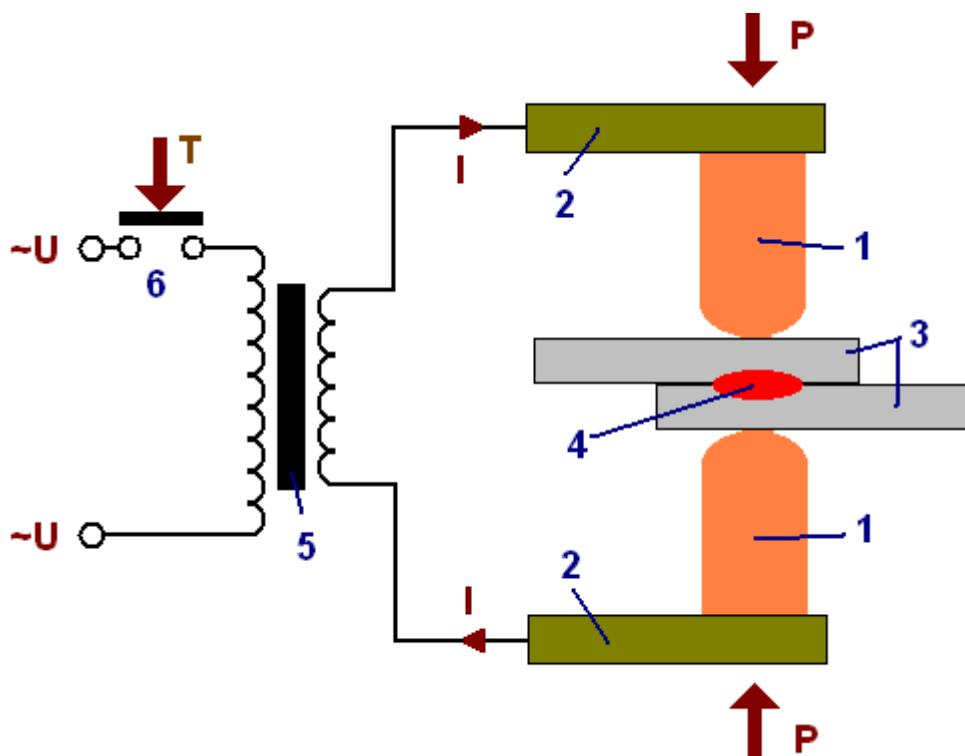
R_c = celkový odpor soustavy (Ω)

I = elektrický proud (A)

t = doba průchodu proudu odporem (s)

Joulov vztah nám říká, jaké teplo vznikne při průchodu proudu za čas. Lze upravovat velikost proudu nebo čas, který je potřebný k natavení. Pokud je proud vyšší v kratším čase, mluvíme o tvrdém režimu a v opačném případě o měkkém režimu.[35]

Z předešlého textu je patrné, že je třeba ke svařování elektrickým odporem dostatečně silný zdroj elektrické energie s elektrodami, které vytvoří tlak na oba svařované materiály. Elektrody jsou značně zatěžovány elektrickým proudem. Musí být z kvalitního materiálu, aby snesly přenášený elektrický proud, tlak vzniklý mezi elektrodami a nadměrně se neopotřebovávaly. [35]



Obrázek 12 Princip odporového svařování tzv. bodování [35]

Svařované díly (3) jsou přidržovány tlakem mezi elektrodami (1). Elektrody jsou přichyceny k ramenům (2), které svým pohybem k sobě vytvoří tlak a jsou napájené zdrojem elektrické energie. Většinou se k tomuto účelu využívá transformátor, který má za úkol změnit napětí ze sítě. Do primárního vinutí je přivedené napětí ze sítě. V sekundárním vinutí se indukují napětí. Sekundární napětí je tvořeno nízkým počtem závitů a bývá chlazené. Spojuje svařovací zdroj s elektrodami. Napětí v sekundárním vinutí je malé oproti vznikajícímu svařovacímu proudu, které dosahuje až několik desítek tisíc ampér. [35]

Ke svařování dochází až po sepnutí zdroje spínačem (6) na čas **T**. Sepnutím kontaktů prochází přes svařovací aparát vysoký elektrický proud **I**. V místě kontaktu materiálu dochází k natavení při současném působení síly **P** od ramen (2) na svařované díly. Tvorba bodového svaru se vytvoří právě v tomto místě. [35]

V technické praxi můžeme počítat s velikostí těchto veličin:

- Velikost přitlačné síly **P** - 0,5 až 10 kN
- Velikost elektrického proudu **I** 1 – 150 kA
- Doba průchodu proudu **T** 0,04- 4 s

11.2 Metalurgie bodového svaru

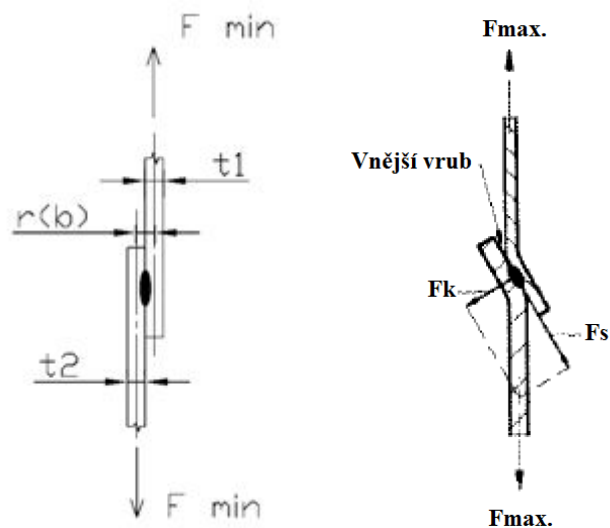
Pro bodové svařování je typickým znakem rychlý ohřev na teplotu tavení a následné rychlé zchladnutí. Místo svaru je ke všemu zatěžované tlakem od svařovacích elektrod. Pokud se stane, že maximální odpor vlivem svařovacích podmínek je v blízkosti styku svařovaných součástí, pak tavení postupuje dále od této oblasti. Z roztaveného kovu dojde ke spojení ve tvaru čočky. Její tloušťka bývá menší než součet tloušťek materiálů, které se tímto procesem svařily. Úkol elektrod bývá zabránění rozstříku při expandování svarového kovu, plynů a díky elektrodám dochází i k ochlazení svaru z povrchu materiálu. Také důležitou funkcí elektrod je, že brání úplnému protavení. Svar tedy vzniká v dutině ohraničeným nenataveným materiálem. [10]

11.3 Zkoušení bodových svarů

Zkoušení bodových svarů demonstruje zatížení, se kterým se setkáváme běžně v provozu. Bodové svary jsou zatěžovány tahem a stříhem, neměly by být namáhané krutem. Krut je u bodových svaru nepříjemný, protože se sníží rapidně jeho únosnost. [32]

11.3.1 Statická stříhová zkouška

Je založena na destrukci nerozebíratelného spojení součástí zatížených tahem na zkušebním trhacím přístroji, v němž dochází k simulaci osového zatížení. Při zkoušce je zaznamenávána působící síla a vzájemná vzdálenost upínacích čelistí přístroje. Ukončení zkoušky probíhá při přetržení vzorku nebo při 10-ti procentním snížení zatěžující síly. [32]



Obrázek 13 Zobrazení namáhání bodového svaru tahem [32]

F_{min} představuje minimální střižovou tahovou sílu, která tvoří u jednostřížného spoje ohybový moment (viz obr. výše), který roste se zvyšujícím se zatížením. Ohybový moment bodu je dán součinem F - síly a $r(b)$ - průměru tloušťek t_1 a t_2 . Limitní pro růst momentu M_b je síla maximální F_{max} . Osová síla F_{max} se rozkládá na složky F_k a F_s . [32]

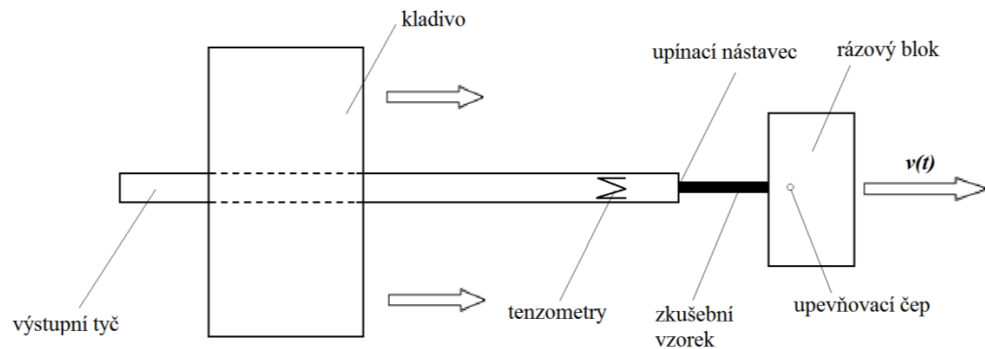
Pro získání informace o minimální střižové síle F_{min} při různých tloušťkách a pevnostech plechů se vychází z nejnižší hodnoty. Pro případ, že leží dva body ve směru síly, může být použit vztah pro nosnost $1,8 F_{min}$. [32]

11.3.2 Dynamická střižová zkouška

Při dopravní nehodě je část karoserie podrobená dynamickým účinkům. Karoserie automobilu slouží jako prvek pasivní bezpečnosti a vzhledem k tomu, že spojení plechů karoserie bývá nejčastěji spojené bodovými sváry, je účelné se touto problematikou dále zabývat. [32]

Při nárazu vozidla na překážku dochází k rychlosti deformaci plechů až do 1000 ms^{-1} . Proto je třeba, aby u dynamických zkoušek tato skutečnost byla zohledněna. Je zapotřebí, aby tuhost zařízení a upnutí vzorku bylo dostatečné. K simulaci byla využita přesná a rychlá měřidla, kvůli zachycení extrému. Je také potřebné, aby rozložení zatížení bylo co nejvíce rovnoměrné. [32]

Pro dynamické měření a získání tak hledané veličiny, jako je napětí a deformace se používá systém pružné tyče. Měření spočívá v tom, že kyvadlo vytvoří úder do rázového bloku a tím k deformaci ve zkoušeném tělese, které je s ním spojené. Měření se ukončuje ještě před navrácením elastické vlny. [32]



Obrázek 14 Princip zkušebního přístroje – systém pružné tyče [32]

Dalším způsobem jak získat při dynamickém zatížení hledané parametry je úpravou Charpyho kladiva. Některé díly klasického Charpyho kladiva musely být vyměněny z důvodu dosažení vyšších rychlostí. Princip spočívá (viz. kap.4.2.1) zkoušení rázem v ohybu svarových spojů. [32]

12 Návrh experimentu svarů a analýz pro hodnocení lokálních pevnostních rozdílů.

Jak již bylo řečeno, v automobilovém průmyslu se hojně využívá technologie svařování autokaroserií bodovým svarem. Aby bylo dosaženo dokonalého svaru bez vad, který může být zapříčiněn nedodržením technologické kázně, a také aby byl svar namáhán pouze na jednoosý tah, je přistoupeno k vytvoření simulace tohoto svaru na zkušebním vzorku.

Pro získání důležitých mechanických informací o tom, jestli materiál mění své mechanické vlastnosti při svařování, byly vzorky vystaveny statickému zatěžování a to tahovou zkouškou a zkouškou mikrotvrdomosti. Ta nám udává informace o lokálních změnách pevnosti v teplem ovlivněné zóně v závislosti na vzdálenosti od svaru. Pokud je rozdílná, dochází k vytvoření heterogenity při svařovacím procesu.

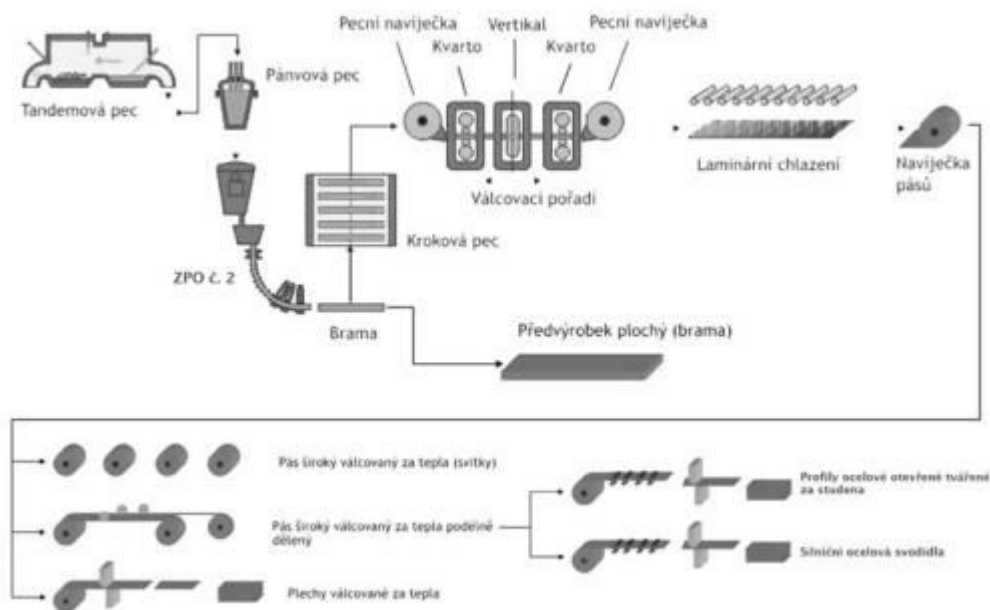
Materiály, které byly použity, se navrhly dle dostupnosti s úzkou vazbou na cenu a dle uplatnění v automobilovém průmyslu. Dalším důvodem pro výběr těchto materiálů je rozdílné složení: Ocel S 235 JR představuje nelegovanou ocel, která se hojně používá ve strojním průmyslu, dříve se využívala i v konstrukcích automobilů. Ocel řady Domex 700 MC se vyrábí mikrolegováním a dnes se hojně používá v automobilovém průmyslu. Obě oceli se vyrábějí válcováním za tepla.

12.1 Technologie výroby válcovaných plechů za tepla

Tekutá ocel vyrobená kyslíkovým procesem je z tandemových pecí dopravována do pánvové pece. Na pánvové peci se ocel teplotně i chemicky homogenizuje, dezoxiduje, leguje, odsiřuje a upravuje se obsah nekovových vměstků a předepsaná licí teplota.

Pokud sekundární proces je ukončen, je licí pánve s tekutou ocelí umístěna do otočného licího stojanu, který slouží k plynulému odlévání a z licí pánve je ocel odlévána přes mezipánve do krystalizátoru. Na bramovém zařízení plynulého odlévání je možné odlévat plynule lité předlitky. Plynule litý plochý předlitek je hořákem dělen na požadované délky a válečkovým dopravníkem dopraven v teplém stavu ke krokové přehřívací peci. [36]

Tam se předlitky ohřívají a dále jsou dopravovány k válcovacím stolicím. Válcovací trať obsahuje dvě pecní navíječky, které homogenizují teplotu válcovaného pásu v průběhu válcování. [36]



Obrázek 15 Technologie výroby oceli válcovaných za tepla [36]

12.2 Materiál S 235 JR

Jako první testovaný materiál byl zvolen plech materiálu S235JR dle ČSN EN 10025-2:2005. Dříve tato ocel se označovala jako 11 375 dle ČSN. Jedná se o ocel nelegovanou jakostní konstrukční ocel, která je díky svým vlastnostem vhodná ke svařování obvyklými způsoby. S rostoucí tloušťkou roste i velikost uhlíkového ekvivalentu, a tím se zvyšuje nebezpečí vzniku trhlin za studena v okolí svaru. Proto musíme dodržet podmínky, které nám dávají doporučení pro proces svařování. Podmínky pro svařování s vyššími podíly ekvivalentního uhlíku se zabývá norma EN 1011.

Tabulka 3 Chemické složení oceli S235 JR [37]

Chemické složení S235 JR v % hmot.	C max.pro tl. ≤ 16 mm	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	N max.
Rozbor tavby	0,17	1,4	-	0,035	0,045	0,012
Složení hotového výrobku	0,19	1,5	-	0,045	0,045	0,014

V automobilovém průmyslu se svařují díly, které mají obvykle nízké hodnoty tloušťek, proto obsah uhlíku uvažujeme do tloušťky 16 mm. Maximální hodnota ekvivalentního obsahu uhlíku se vypočítá dle vzorce, (viz níže) při čemž jmenovitá tloušťka je ≤ 30 mm. Využíváme hodnot chemického složení tavby. Pro jmenovitou tloušťku do 30 mm je maximální hodnota ekvivalentního obsahu uhlíku stanovena na 0,35. [37]

$$C_{ekv} = C + Mn : 6 + (Cr+Mo+V) : 5 + (Ni+Cu) : 15 [37]$$

Rovnice 3 Výpočet ekvivalentního obsahu uhlíku

Zjištěné mechanické vlastnosti:

- Mez pevnosti 360 - 510 MPa
- Mez kluzu 235 MPa
- Maximální tvrdost dle Brinella 225 HB
- Tažnost pro plechy nad 3 mm 26 % [37,38]

12.3 Materiál Domex 700 MC

Jako druhý zkoušený materiál byla vybrána pevnostní ocel (HSS) Domex 700 MC. Jedná se o pásy, které jsou válcované za tepla s dobrými mechanickými vlastnostmi, které se vyrábějí mikrolegováním. Domex 700 MC řadíme mezi vysoce pevné ocele s výbornou tvařitelností za studena a s dobrou svařitelností. Díky vysoké pevnosti dochází ke snižování hmotnosti vozidla a tím i k úspoře pohonných hmot a užitných vlastností, zejména pak zvýšení zatížení, při stejném hmotnostním podílu karoserie. Mají široké pole působnosti ve výrobě. Využívají se jako podvozky nákladních automobilů, části jeřábů i zemních strojů. [39]

Tabulka 4 Chemické složení Domex 700 MC [39]

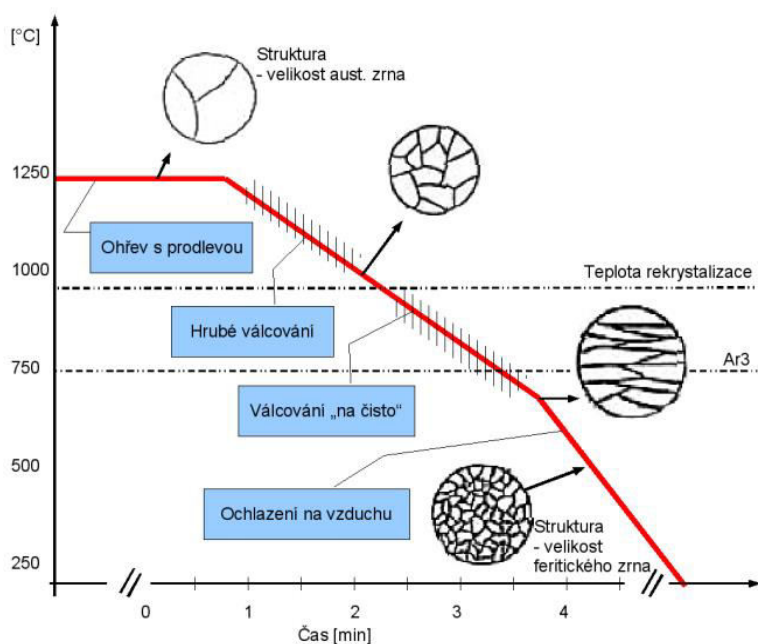
Chemické složení Domex 700MC v % hmot.								
C max.	Si max.	Mn max	P max	S max	Al min	Nb max.	V max.	Ti max.
0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	0,015	0,09	0,2	0,15

Zjištěné mechanické vlastnosti

- Mez pevnosti 750 – 950 MPa
- Mez kluzu 700 MPa
- Tvrdost
- Tažnost A5 min. 12 % [39]

12.4 Proces zpevnění Domexu MC 700

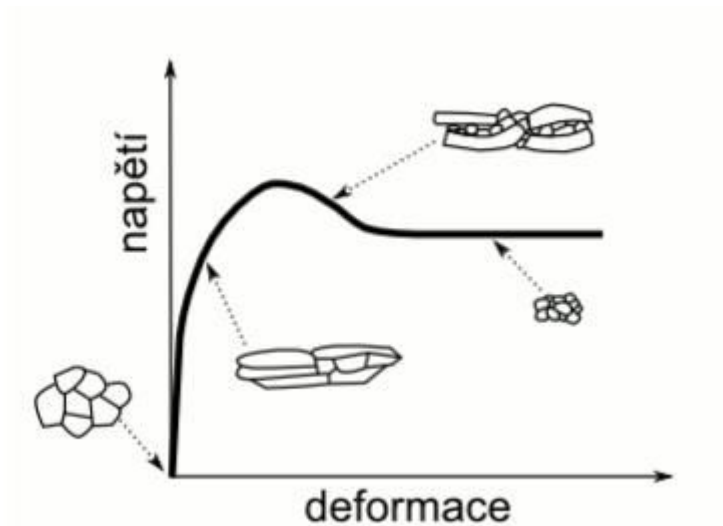
Jak již bylo zmíněno výše pásy DOMEXU MC 700 jsou vyráběné válcováním za tepla.



Obrázek 16 Schéma řízeného válcování [42]

Při tváření za tepla dochází k dynamické rekrytalizaci. Pokud dojde k dosažení kritické úrovně deformace, vytvoří se stav pro tvorbu zárodků a jejich růst během plastické deformace. Tvorba zárodků probíhá především po hranicích původních zrn a u hrubých intermetalických fází. [43]

Dynamická rekrytalizace oproti statické rekrytalizaci se vyznačuje růstem zrn do určité velikosti, která odpovídá velikosti deformace. U statické rekrytalizace zrna rostou do doby, než se zrna vzájemně dotýkají. Při dynamické rekrytalizaci vznikají nová zrna, odstraní se zpevnění a zvyšují se plastické vlastnosti. Pokud se vyskytují ve struktuře karbidy, dochází vlivem tváření k jejich lámání a přesouvají se ve směru deformace. Po tváření lze potom pozorovat řádkovitou strukturu, kdy z rozložení karbidů je patrný tok materiálu během tváření. [43]



Obrázek 17 Průběh strukturních změn v diagramu napětí – deformace [43]

Teploty tváření v praxi jsou stanovené nad 0,6 až 0,7 teplotou tavení. Při tváření za tepla probíhají dva děje, a to uzdravování a zpevňování. Tyto procesy jsou závislé na struktuře, na chemickém složení a na termomechanických vlastnostech jako je teplota, velikost a rychlost deformace. Zpevnění se může odstranit během tváření za tepla. Častěji bývá odstraněno jen částečně a další uzdravení se děje statickými uzdravovacími procesy po tváření. V tomto případě hraje velkou roli vliv deformační rychlosti a doba mezi jednotlivými deformacemi. [43]

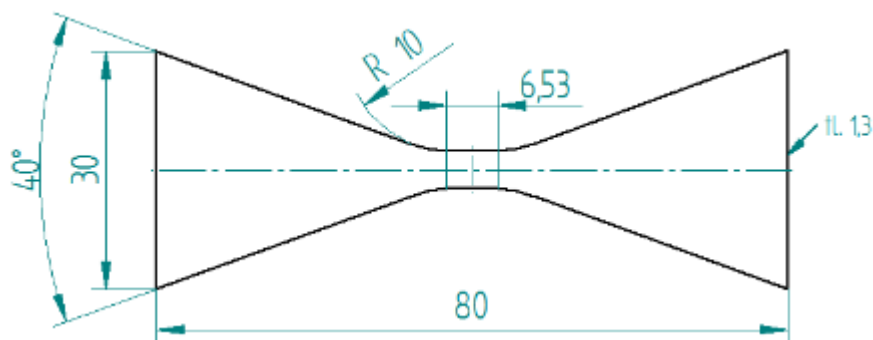
Obecně je známo, že při zvyšující se rychlosti deformace se tvařitelnost zmenšuje a odpor proti deformaci stoupá. Vliv rychlosti tváření je větší při tváření za tepla než za studena. Ocel si zachovává plastické vlastnosti během tváření za tepla, proto se dosahuje velkých stupňů deformace při zachování mechanických vlastností. [43]

13 Realizace navržených experimentů a materiálových analýz

13.1 Vytvoření vzorků

Z tabule plechu, zkoumaného materiálu, která byla obvyklého formátu, se nastříhaly na ručních nůžkách pásky o šířce cca 50 mm. Dále tyto pásky byly rovnány a upínány do frézky FCM 19 CNC. Tento přístroj je ovládán pomocí počítačového systému programem frézka- Mikroprog-F.

V tomto programu již byl vytvořen technologický postup a frézou o průměru 5 mm byl zhotoven vzorek (mašlička), který odpovídal rozměrům (viz obr. 18). Geometrie tohoto vzorku byla vybrána s ohledem na upnutí při statických i dynamických zkouškách. Takto vytvořené vzorky se použily v tahové zkoušce.



Obrázek 18 Rozměry vyrobeného vzorku

Takto vytvořené vzorky byly upravené na stanovenou drsnost a kvalitu hran. Důraz byl kladen na průřez, který bude následně přetržen. Měl by mít zachovány rozměry, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků. Také by nemělo dojít k vytvoření vrubu či jiných nežádoucích kazů. Následně tyto vzorky byly odmaštěné lihem.

Pro každý materiál a každou zkoušku bylo vyhotoveno deset vzorků. Z celkového počtu byla následně polovina zatížena tepelným působením. Aby nedošlo k vytvoření vad ve vzorku, nebylo možné je klasicky svařovat elektrodou. Bylo třeba, aby tepelně zatížené vzorky neměly ani povrchové, ani vnitřní vady a byly zatížené prostým tahem. Proto jsme přikročili k simulaci svařování.

13.2 Simulace svaru

K simulaci svaru bylo využito transformátorového svařovacího zdroje, který vlivem elektrického proudu ohříval vzorek, kde na jednu upínací část vzorku byla přivedena anoda a katoda byla připevněna v polovině vzorku přes podložky, které zvýšily celkový odpor. V zeslabeném místě s vysokým odporem došlo k zahřívání až na teplotu 1250 °C (dle barvy vzorku = světle žlutá). Na svařovacím aparátu bylo nastaveno 130 A. Doba procesu trvala přibližně 5 sekund.

Po dosažení stanovené teploty došlo k přerušení obvodu odpojením katody svařovacího zdroje. Při simulování svaru došlo k zobrazení tří pásem tepelně neovlivněné, tepelně ovlivněné oblasti a právě simulovaného svaru. Podle barev (obr 20) se stanovilo spektrum teplot, které při simulaci vznikly. Je patrné, že při běžném svařování těchto teplot svařovací proces dosahuje.



Obrázek 19 Simulace svaru

Barva	Teplota
	1200°C
	1100°C
	1050°C
	980°C
	930°C
	870°C
	810°C
	760°C
	700°C
	650°C
	600°C
	550°C

Obrázek 20 Barvy a teploty pro konstrukční oceli [28]

13.3 Vzorky pro metalografické analýzy a hodnocení tvrdosti

Pro další zkoumání (stanovení mikrotvrdosti a analýza metalurgie ovlivněné oblasti) bylo účelné vytvořit vzorek, se kterým by se lépe manipulovalo. Proto byly jednotlivé vzorky nařezány tak, aby spektrum ovlivněné oblasti mohlo být podrobené dalšímu zkoumání. Výřez se realizoval pomocí metalografické pily MTH MIKRON 110. Jednalo se o rozpůlení výchozího vzorku, jak v podélném, tak i příčném směru, a také odříznutí přebytečné neovlivněné oblasti. Při řezání pilou byl vzorek dostatečně chlazen, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku.

Takto vytvořené výřezy nejdříve byly zbaveny ostrých hran a otřepů, poté příčně zalisovány metalografickým lisem SimplyMet 3000 do bakelitu. Bylo velmi důležité označit orientaci zalisovávaných výřezů. A také, aby nedošlo k záměně vzorků, bylo účelné vyrobené bakelitové vzorky vhodně označit.



Obrázek 21 Metalografický vzorek

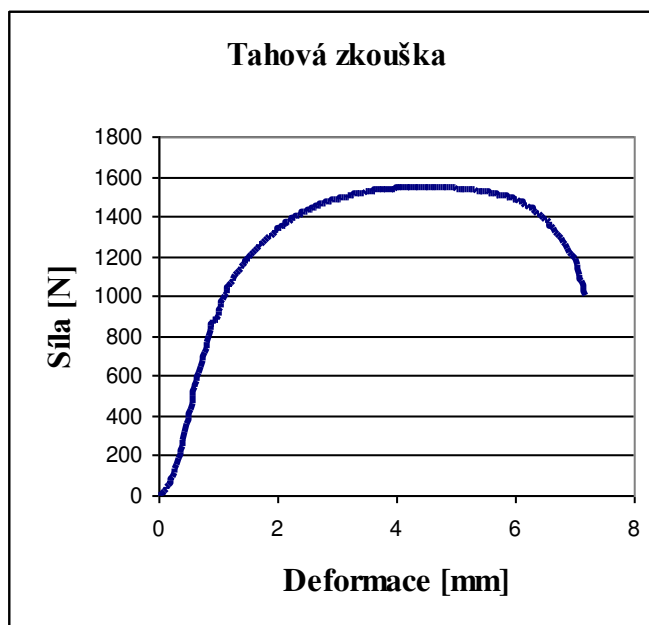
Abychom vytvořily rovinnou plochu vzorku s malou drsností, byly vzorky podrobeny výbrusem. V našem případě se vzorky brousily ručně na metalografické brusce, a poté se leštily s použitím diamantové pasty se zrnitostí od 5 do 1 μm .

14 Prezentace výsledků

14.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla již stručně popsána v kapitole 4.4.1. Udává nám základní mechanické vlastnosti, jako je pevnost, mez kluzu, tažnost, kontrakce. Jak již bylo řečeno, jedná se o vyvození jednoosé tahové síly, která ve vzorku vyvolá deformaci.

Trhací stroj, kterým byly přetřhány vzorky, je vybaven softwarem. Tím získáme diagram síly v závislosti na deformaci (viz graf 1). Abychom eliminovali toleranci výroby vzorku, je účelné sílu přepočítat na tahové napětí. To se spočítá jako podíl tahové síly k nejmenšímu průřezu vzorku. Zkouška probíhá za běžných pokojových teplot a obvykle končí přetržením zkušebního vzorku. Vzhledem k tomu, že u přetržených vzorků byly podobné průběhy zatěžující křivky, je použit obrázek zatěžování pouze jednoho vzorku.



Graf 1 Typický průběh tahové zkoušky

Zbytek vzorků měl rozdílné maximální síly na přetržení v závislosti na použitém materiálu, nedokonalosti v geometrii a teplem ovlivněném či neovlivněném vzorku. Jednalo se o průběh s nevýraznou mezí kluzu. Nás zajímá především mez pevnosti.

14.1.1 Tahová zkouška ocel S 235 JR

Tabulka 5 Tahová zkouška S235 JR

Tahová zkouška S 235 JR v MPa					
Neovlivněný					
Vzorek SA	Vzorek SB	Vzorek SC	Vzorek SD	Vzorek SE	Průměr
264	265	259	247	252	257,4
Ovlivněný					
Vzorek S1	Vzorek S2	Vzorek S3	Vzorek S4	Vzorek S5	Průměr
285	282	280	279	281	281,4

Z tab. 5 je patrné, že materiál S235 JR, který je tepelně ovlivněn vlivem simulovaného svaru se nepatrně zpevňuje oproti neovlivněnému vzorku.

14.1.2 Tahová zkouška ocel Domex 700 MC

Tabulka 6 Tahová zkouška Domex 700MC

Tahová zkouška Domex 700 MC v MPa					
Neovlivněný					
Vzorek DA	Vzorek DB	Vzorek DC	Vzorek DD	Vzorek DE	Průměr
694	707	702	713	694	702
Ovlivněný					
Vzorek D1	Vzorek D2	Vzorek D3	Vzorek D4	Vzorek D5	Průměr
326	330	321	325	323	325

Neovlivněné vzorky, z materiálu DOMEX 700 MC (dle tab. 6), vykazují téměř o polovinu vyšší meze pevnosti oproti tepelně ovlivněnému vzorku od svaru.

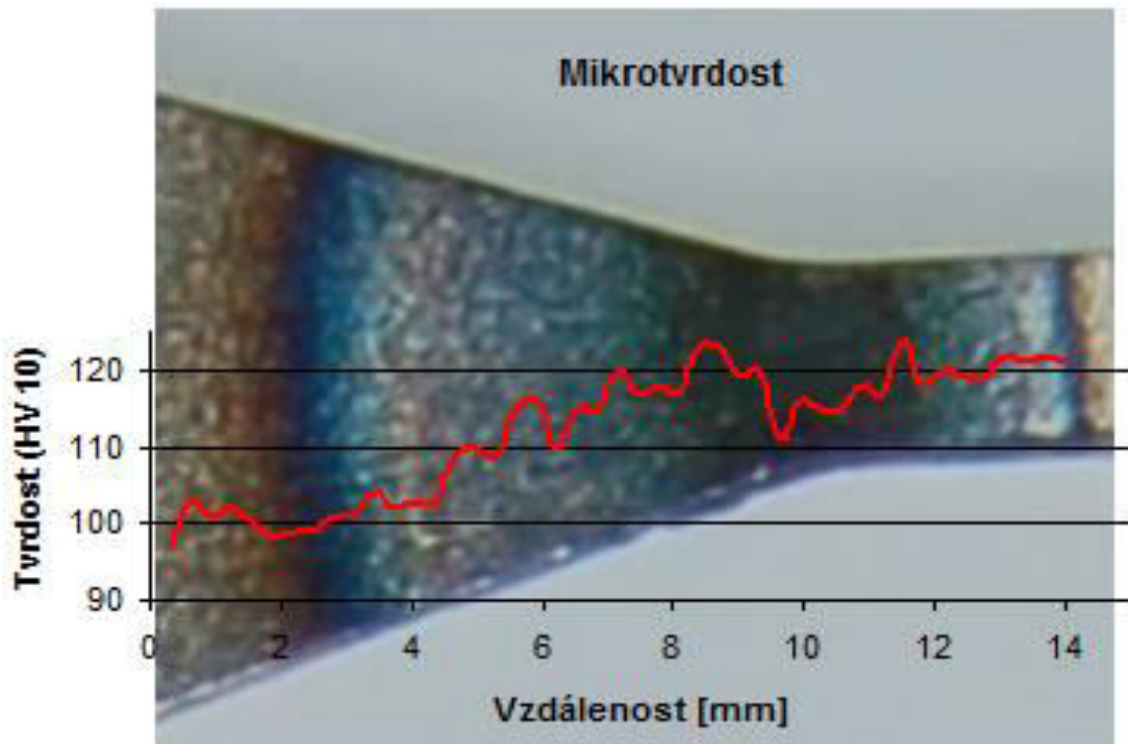
Výsledek této zkoušky je, že materiál S235JR zpevňuje a DOMEX 700MC odpevňuje. Rozdíly v mezích pevnosti u jednotlivých skupin vzorků mohou být zapříčiněné geometrií vzorku a jejich jakostí a nepřesnému přerušení tepelného zdroje, tudíž může docházet k nepatrnému rozdílu teplot simulovaného svaru.

14.2 Měření indentační metodou

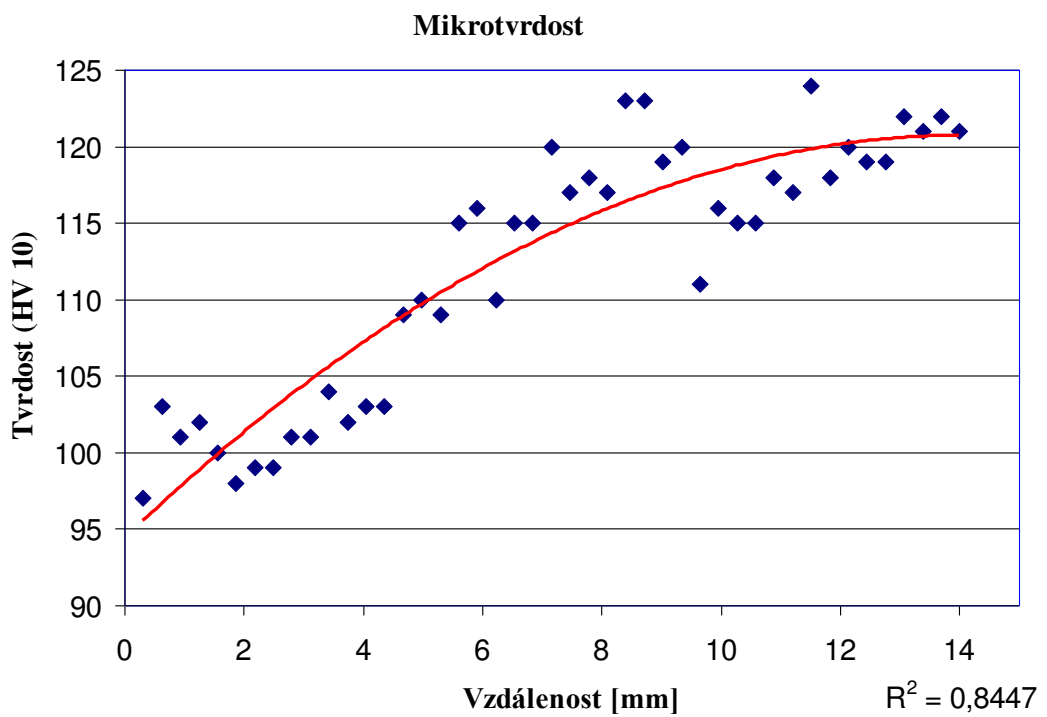
Pro zjištění mikrotvrdosti byl použit přístroj Zwick roel ZHU2,5. Na pracovní stůl indentoru se umístí vzorek. Následně se vzorek s pomocí mikroskopu vystředí tak, aby rovina zkoumaného vzorku byla rovnoběžná s rovinou pohybu indentačního zařízení. Následně se změří pomocí programu testXpert ZHU2,5 délka sledované části vzorku a nastaví se v programu počet vpichů na určité délce. Aby nedocházelo k deformaci jednoho vtisku druhým, jsou stanoveny minimální vzdálenosti mezi vtisky a mezi prvním vtiskem a okrajem. Následně zařízení zobrazuje místa, kde se vytvoří budoucí vpichy. Jedná se o kontrolu, aby nedošlo k vytvoření vpichu v oblasti, kde jej není třeba měřit. Tím by došlo ke zkreslení výsledků.

V následujícím textu jsou v tabulkách zobrazeny výsledky zmiňovaného měření. Tabulky jsou členěny do dvou oblastí: neovlivněná a ovlivněná. Nejprve byly zjištěné hodnoty pro ocel S 235 JR a pro porovnání se provedl test také dle indentační metody mikrolegované oceli DOMEX MC 700. Test probíhal pouze na vzorcích se simulovaným svarem, protože neovlivněný materiál nevykazuje významnou heterogeničnost.

Pro představu jak teplota ovlivnila materiál, byl vytvořen graf tvrdostí (viz graf 2, 3) v závislosti na délce zkoumaného místa. Vzhledem k tomu, že Domex MC 700 má podobný charakter, ale opačný. Byl zobrazen pouze u oceli S 235 JR. Bylo vytvořeno 43 od sebe dostatečně vzdálených vtisků. Nejmenší hodnoty tvrdosti představují oblast, která není tepelně ovlivněná. V grafu (graf 2) je zobrazen skutečný průběh tvrdostí, zatímco v (graf 3) jsou hodnoty proloženy polynomickou spojnici trendu druhého stupně. Vzhledem k tomu, že ostatní vzorky vykazovaly téměř shodné výsledky tvrdostí, je v grafech zobrazen výsledek pouze jednoho reprezentativního vzorku.



Graf 2 Mikrotvrđost S 235 JR



Graf 3 Tvrđost S235 JR

Pro posouzení elasticko–plastického chování materiálu postačují hodnoty v jednotlivých pásmech. Pro srovnání byly vytvořeny tabulky.

14.2.1 Tvrdoost ocel S 235 JR

Tabulka 7 Mikrotvrdoost S235 JR

<i>S235 JR</i>	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Průměr
Ovlivněný	124	122	123	124	122	123,8
Neovlivněný	97	95	97	96	95	96

Z tabulky 7 je patrné, že ocel S 235 JR má vyšší tvrdoost v tepelně ovlivněné oblasti oproti oblasti neovlivněné. Má rostoucí trend tvrdoosti, tudíž se jedná o zpevňující proces. Jeho pevnost vlivem tepla se zvyšuje.

14.2.2 Tvrdoost ocel Domex 700 MC

Tabulka 8 Mikrotvrdoost Domex MC 700

<i>DOMEX MC 700</i>	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Průměr
Ovlivněný	179	180	178	182	180	179,8
Neovlivněný	288	290	293	288	291	290

Nízkolegovaná ocel DOMEX MC 700 vykazuje tepelně ovlivněná oblast nižší tvrdoost oproti tepelně neovlivněné oblasti - má klesající trend tvrdoosti, tudíž se jedná o odpevňující proces.

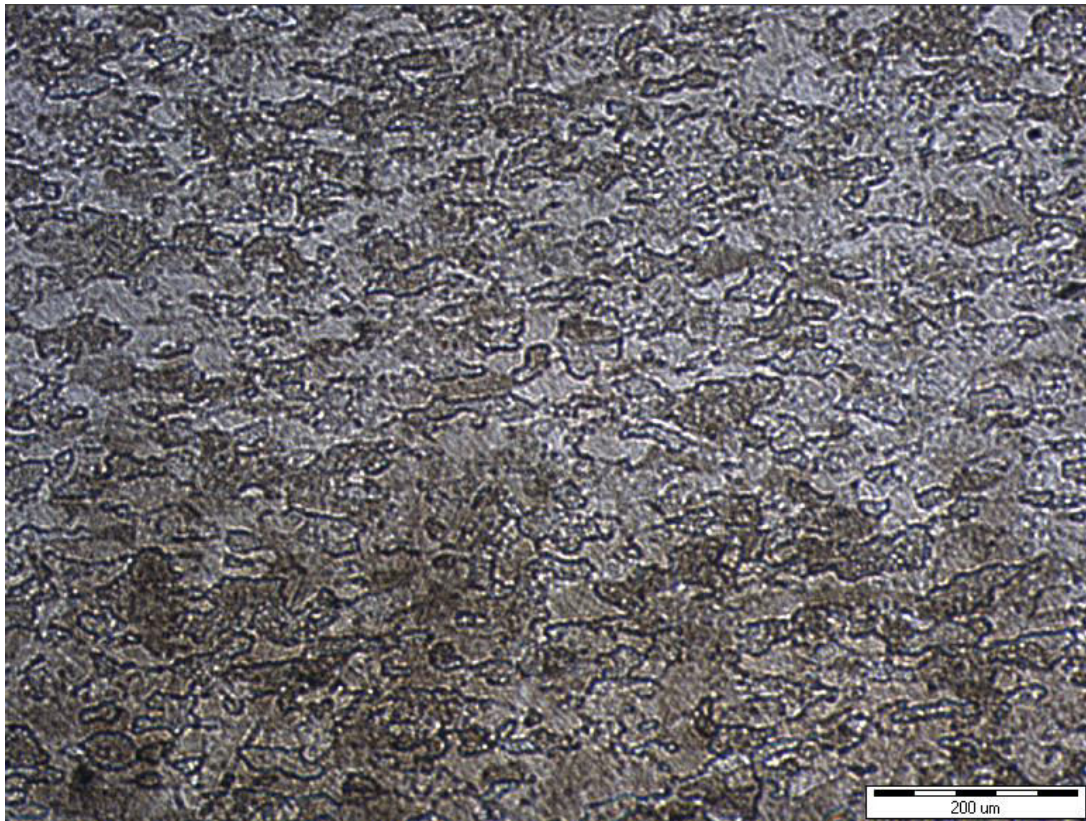
Odpevňující proces má za následek snížení pevnosti svaru. Proto by mělo být přihlíženo k dimenzování svaru. Možnost pro zvětšení únosnosti svaru je větší činná délka svaru, nebo zvětšení přepony svaru.

14.3 Metalurgická zkouška

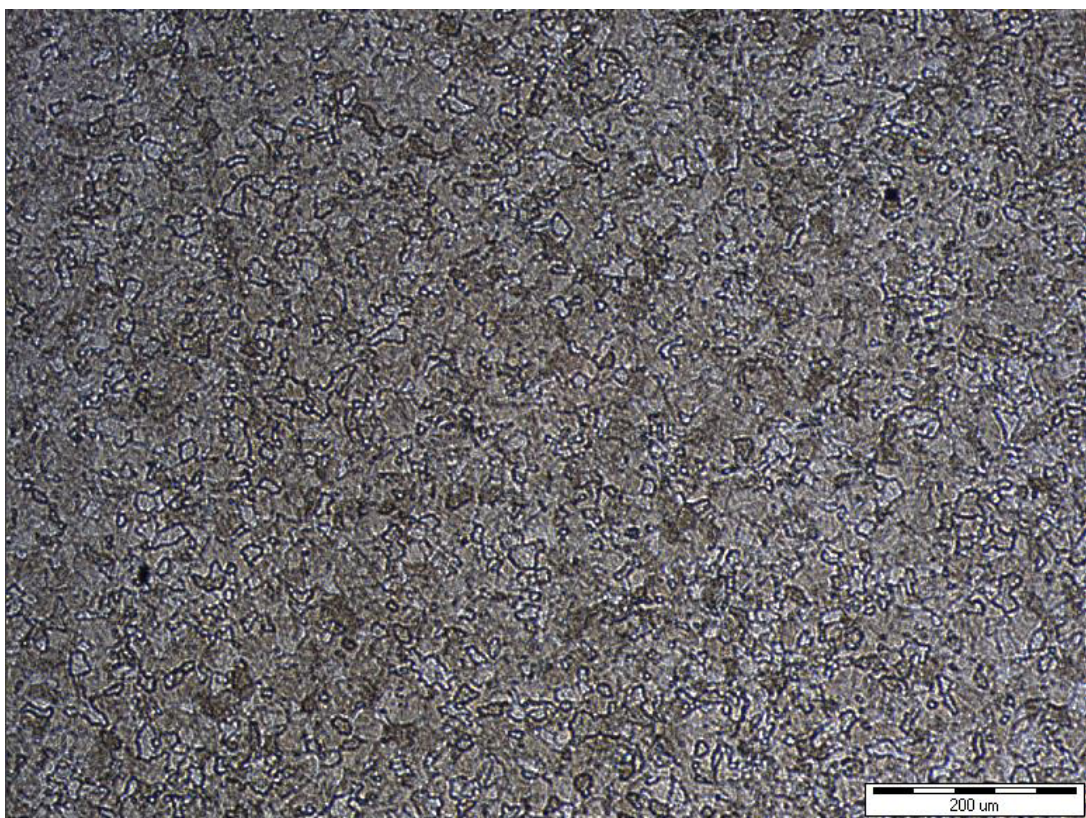
Pro posouzení metalurgie se připravovaly vzorky jako u mikrotvrdomosti. Jediný rozdíl byl ten, že pro vyvolání mikrostruktury byl použit Nital , tj roztok kyseliny dusičné v ethanolu, jímž bylo docíleno plošného leptání. Získané vzorky, které se tímto způsobem vytvořily, byly dále zkoumány metalografickým mikroskopem Neophot 32 značky CARL Zeiss, který je vybaven digitální kamerou. Pro analyzování mikrostruktury byla využita kamera ColourView III se software AnalySIS.

14.3.1 Mikrostruktura ocel S 235 JR

Konstrukční ocel s označením S235 JR s její přirozenou mikrostrukturou je zobrazena na (obr. 22). Naproti tomu na (obr. 23) je k vidění oblast tepelně ovlivněná simulovaného svaru. Nutno podotknout, že tato mikrostruktura oproti základnímu vykazuje značné zjemnění zrna. Tento efekt zapříčiňuje změnu mechanických vlastností – zvýšení meze pevnosti.



Obrázek 22 Mikrostruktura vzorku oceli S235JR – tepelně neovlivněný

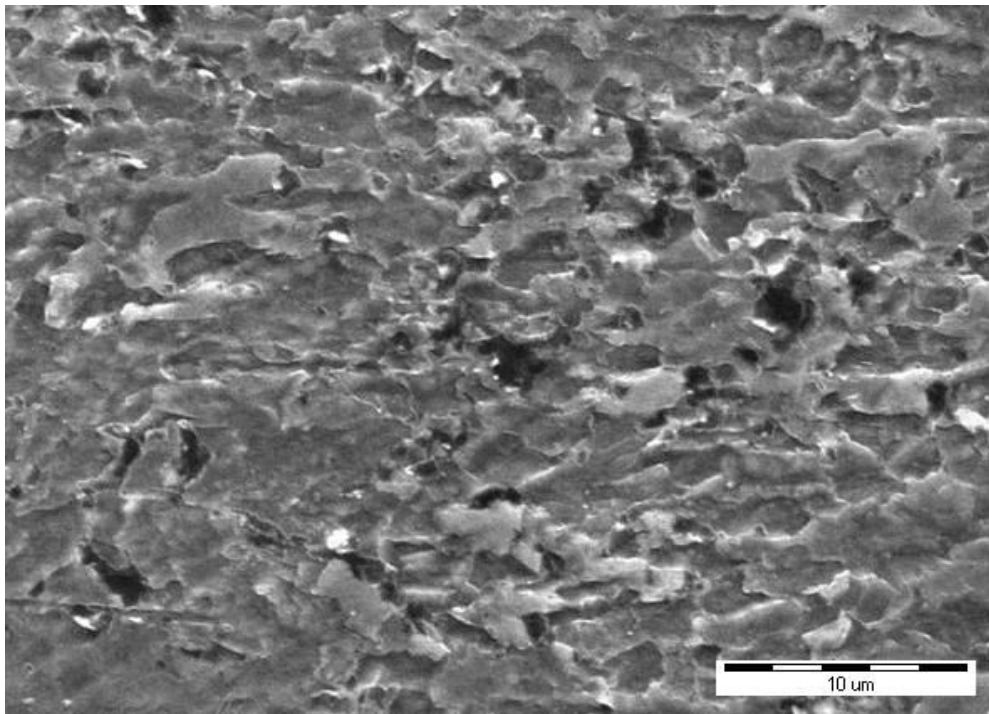


Obrázek 23 Mikrostruktura vzorku oceli S235JR – tepelně ovlivněný

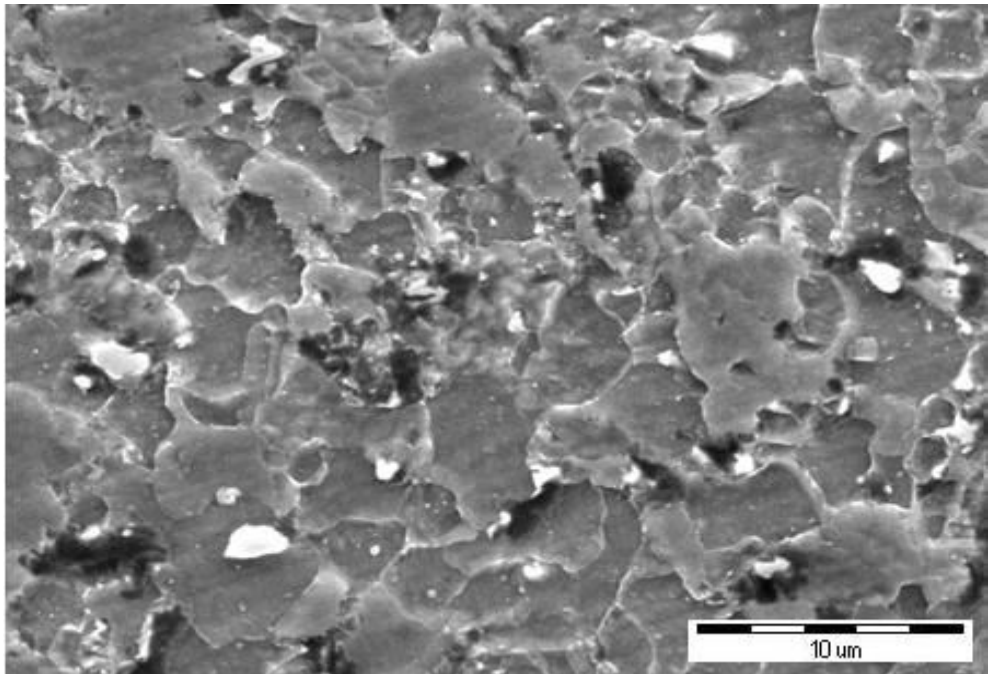
14.3.2 Mikrostruktura ocel Domex 700 MC

Domex 700 MC získal své mechanické vlastnosti pomocí procesu kalení. (Obr. 24) zobrazuje jeho přirozenou mikrostrukturu. Nepravidelné, místy hrubé karbidy byly pozorovány v tepelně ovlivněné oblasti simulovaného svaru. Rekrystalizace primárních deformovaných zrn a mírné hrubnutí bylo pozorováno na (obr. 25). Všechny tyto způsoby mají za následek snížení pevnosti a rázové houževnatosti. [40]

Vlivem tepelných účinků se dislokační zpevnění, které bylo vytvořeno při válcování za tepla, vytratilo.



Obrázek 24 Mikrostruktura vzorku oceli DOMEX MC 700 – tepelně neovlivněný



Obrázek 25 Mikrostruktura vzorku oceli DOMEX MC 700 – tepelně ovlivněný

15 Závěr

Diplomová práce je zaměřená na možnosti hodnocení strukturních heterogenit ve svarových spojích. Byly vybrány dvě oceli. Ocel S235 JR se dříve používala v konstrukcích automobilů a dnes stále se rozšiřující ke karosářským účelům automobilů ocel Domex 700MC, která se využívá především ke snížení hmotnosti vozidla při zachování lepších mechanických vlastností. Oceli byly také vybrány s ohledem na jejich dostupnost a cenovou relaci nákupu.

V praktické části došlo k vytvoření simulovaných svarů, které byly následně zkoušeny. Pro zjištění základních mechanických vlastností se využila tahová zkouška a druhá byla zvolena indentační metoda dle Vickerse. Pro posouzení mikrostruktury a vytvoření fotodokumentace byly vytvořeny snímky. Následně byla zjištěna charakteristická pásma pro svařování.

Provedené zkoušky jevíly známky korelace a shodně bylo zjištěno, že ocel S235 JR, která reprezentuje jakostní konstrukční oceli, se vlivem tepelného ovlivnění zpevňuje. Naproti tomu u druhé vybrané nízkolegované oceli s názvem DOMEX 700 MC při tepelném účinku dochází ke snížení meze pevnosti. Díky zpevňujícímu trendu oceli S235 JR se v praxi vlivem svařování vytvoří rezerva pevnosti. Takže podle normy ČSN 05 0120 dochází k předimenzování svaru. Zpevňující trend není tak vysoký, aby byla snížena velikost svaru. Naproti tomu při trendu odpevnění u oceli DOMEX 700 MC je zapotřebí, aby dimenzování svarů bylo přizpůsobeno této skutečnosti a ve výpočtech byla zohledněna snížená pevnost svaru, která je zapříčiněna vlivem tepla vneseným při svařovacím procesu.

Použitá literatura

- [1] Beneš, L.; et al. *Technické materiály (nejen) pro dopravní techniku*, 1st ed.; Univerzita Pardubice: Pardubice, 2010.
- [2] Beneš, L.; et al. *Hodnocení základních mechanických vlastností kovových materiálů*, 1st ed.; Institut Jana Pernera: Pardubice, 2007.
- [3] Veselko, J.; et al. *Technológia zvarania*, 1st ed.; Alfa: Bratislava, 1989.
- [4] Koukal, J.; *Svařování I*, 1st ed.; VŠB – Technická univerzita v Ostravě: Ostrava, 2005.
- [5] Kruncipál, J. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*, 1st ed.; Ediční středisko Vysoké školy strojní a elektrotechnické: Plzeň, 1980.
- [6] Kovařík, R.; et al. *Technologie svařování*, 1st ed.; Západočeská univerzita: Plzeň, 2008.
- [7] Schmidová, E. *Metalurgické vady svarových spojů*, 2nd ed.; Univerzita Pardubice - Dopravní fakulta Jana Pernera: Pardubice, 2014.
- [8] Benko, B. *Technológia zvaranie I.*; Slovenská vysoká škola technická v Bratislavě: Bratislava, 1978.
- [9] Kuncipál, J. *Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických*; 1st ed.; Státní nakladatelství technické literatury: Praha, 1986.
- [10] Dunovský Jiří, J. *Speciální technologie*, 1st ed.; Ediční středisko Českého vysokého učení technického: Praha, 1984.

- [11] Číp, T. Svařování vysokopevnostních ocelí laserem. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 9.2.2010.
- [12] Different types of corrosion: Intergranular corrosion: weld decay. WebCorr [online]. [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/weld_decay_weldment_corrosion.htm
- [13] Ochodek, V. Struktura svaru. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*, 2nd ed.; Zerros: Ostrava, 2001; Chapter 7, pp 95–101.
- [14] Minařík, V. *Plamenové svařování*, 1st ed.; Scientia: Praha, 1997.
- [15] ČSN 05 0120. *Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství norem, 1990. 38 p.
- [16] Machek, V. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*, 1st ed.; České vysoké učení technické: Praha, 2011.
- [17] Lapšanská, H. Přehled metod svařování. Presentace k projektu, Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.
- [18] Zkoušky bez porušení materiálu. Projekt č.: CZ.1.07/1.1.02/04.0004, Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno [online]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf
- [19] Marvánek, O. Systémy korozní ochrany svarových spojů konstrukčních materiálů. Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, 2012.
- [20] Bernasová, E.; et al. *Zváranie pre 2. a 3. ročník SOU*. Vydavateľstvá technickej a ekonomickej literatury: Bratislava, 1989.

- [21] Barták, J., Bednář, B. Svařování kovů v praxi; Verlag Dashöfer: Praha, 2008
- [22] Macek, K. *Kovové materiály*, 1st ed.; Ediční středisko ČVUT: Praha, 1991.
- [23] Vojtěch, D. *Kovové materiály*. 1 st ed.; Vydavatelství VŠCHT: Praha, 2006.
- [24] Kučera, J. *Teorie svařování*. 2 nd ed.; VŠB – TU Ostrava: Ostrava, 1991.
- [25] Koukal, J., Mohyla, P. Svařitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení. *All for Power* **2008**, (3), 60–66.
- [26] Leinveber, J., Vávra P. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1st ed.; Albra: Úvaly, 2003.
- [27] Soldát, R. Vliv povrchové vrstvy martenzitické vysokopevné oceli na svařitelnost. Diplomová práce, Univerzita Pardubice, 22.5.2014.
- [28] Steel Heating and Tempering Colours Page, 2011. Members. <http://members.optushome.com.au/terrybrown/HeatTemperChartEtc.html> (accessed May 15, 2015).
- [29] Wojcik, R. Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, 24.5.2011.
- [30] Girman, V., Hrabčáková, V. Kovové materiály automobilových konstrukcí - II. Karoséria a karosárske plechy. *Materiálový inžinier* **2012**, 1–10.
- [31] Pluhař, J.; et al. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, 1st ed.; SNTL: Praha, 1987.
- [32] Konečný, M. Dynamická pevnost svarů martenzitických ocelí bezpečnostních prvků automobilů. Disertační práce, Univerzita Pardubice, 1.1.2015.

- [33] Král, R. Zotavení a rekrytalizace. Fyzika materiálů II [Online]. http://material.karlov.mff.cuni.cz/people/janecek/studenti/Fyzika_materialu2/Rekrytalizace_2h_1cast.ppt. (accessed May 16, 2015).
- [34] Svařování, 2015. Wikipedia. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD> (accessed May 09, 2015).
- [35] Bodovky a bodování. *Svar info - magazín praktického svařování* [Online] **2008**. <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008033102> (accessed May 17, 2015).
- [36] Ploché výrobky válcované za tepla. Výrobní program, Arcelor Mittal Ostrava a.s., září 2008.
- [37] ČSN EN 10025-2. Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli. Český normalizační institut, 2005. 36 p.
- [38] Pilgr, M. *Materiál pro ocelové konstrukce a jeho mechanické vlastnosti* [online]; VUT Brno: Brno, <http://www.fce.vutbr.cz/KDK/pilgr.m/Prvky-material.htm> (accessed May 17, 2015).
- [39] Domex 700 MC Hot rolled, extra high strength, cold forming steel. Material list, SSAB EMEA AB, 11.2.2003.
- [40] Hanus, P., Schmidová, E., Schmid, M. The possibility of evaluating the yield strength through indentation. *Metal* **2015**.
- [41] VUT Brno. Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů. *Chempoint*[Online] **2011**. <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost> (accessed May 17, 2015).

[42] Zpracováno s využitím materiálu ASM Internationa Vysoce pevné mikrolegované oceli. Prezentace, Západočeská univerzita v Plzni.

Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/hsla.pdf>

[43] ZČU v Plzni. Základní znalosti k předmětu Nauka materiálu. *Svařování* [Online]199.

<http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf> (accessed May 17, 2015).