

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav materiálového inženýrství

SVAŘITELNOST VYSOKOPEVNÝCH PLECHŮ V KONSTRUKCI OSOBNÍHO AUTOMOBILU

Bakalářská práce

Autor: Jiří Hejduk

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. Libor Beneš, IWE

Konzultant: Ing. Tomáš Pilvousek, IWE; Škoda Auto a.s.

Praha 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 18.6.2015

Hejkal Jiri
.....

podpis

Anotace:

Bakalářská práce se věnuje svařitelnosti vysokopevných materiálů používaných v konstrukci osobního automobilu. V bakalářské práci jsou popsány nejpoužívanější ocelové materiály, jejich vlastnosti, chemické složení a konkrétní aplikace. U ocelí typu 22MnB5 je podrobněji popsána technologie výroby. Dále se práce věnuje obecně definici svařitelnosti ocelí a vlivu chemického složení na svařitelnost a nejpoužívanější metodě svařování používané při výrobě osobního automobilu - bodovému odporovému svařování. V experimentální části jsou prozkoumány vzorky bodového odporového svaru oceli 22MnB5 respektive jejich metalografický výbrus pod mikroskopem.

Klíčová slova:

svařitelnost, vysokopevná ocel, bodové odporové svařování, lisování za tepla, mikrostruktura

Annotation:

Bachelor thesis focuses on weldability of high-strength materials used in the construction of a passenger car. The bachelor thesis describes the most commonly used steel materials, their properties, chemical composition and specific applications. For steels of type 22MnB5 is described in detail the technology. Further bachelor thesis solves a general definition of steel weldability and influence of chemical composition on weldability and most widely used welding process used in the production of passenger car spot resistance welding. In the experimental part the samples of resistance spot weld steel 22MnB5 or their scratch pattern under the microscope are examined.

Key words:

weldability, high-strength steel, resistance spot welding, hot-stamping, microstructure

Obsah:

1. Úvod	6
Cílem	6
2. Oceli používané v automobilovém průmyslu.....	6
2.1. Nízko-pevné oceli	7
2.1.1. Běžná uhlíková ocel (Mild steel)	7
2.1.2. Oceli bez intersticií IF (Interstitial-Free).....	7
2.2. Vysoko-pevnostní oceli HSS (High Strength Steel)	7
2.2.1. Vysoko-pevnostní oceli bez intersticií (IF-HSS)	7
2.2.2. Izotropní oceli (IS)	8
2.2.3. BH oceli (Bake Hardenable).....	8
2.2.4. Vysoko-pevnostní mikrolegované oceli HSLA (High-Strength Low-Alloy)	9
2.3. Ultra-vysoko-pevnostní oceli UHSS (Ultra- High-Strength Steel).....	10
2.3.1. Dvoufázové oceli DP (Dual Phase)	10
2.3.2. CP oceli (Complex Phase)	12
2.3.3. TRIP oceli (Transformation Induced Plasticity)	14
2.3.4. Martenzitické oceli (MS)	16
2.4. Přehled používaných materiálů	17
3. Technologie tváření plechů metodou Hot-stamping	18
3.1. Princip metody Hot-stamping	20
3.2. Ohřev materiálu (austenitizace).....	21
3.3. Technologie Taylored Tempering.....	22
4. Svařování.....	23
4.1. Svařitelnost	24
4.2. Vliv chemického složení ocelí na jejich svařitelnost.....	24
4.3. Tepelně ovlivněná oblast	26
4.4. Uhlíkový ekvivalent	28
4.5. Odporové svařování	30
4.5.1. Princip odporového svařování	30
4.5.2. Parametry odporového svařování.....	31
4.5.3. Rozdělení odporového svařování.....	32
Švové svařování.....	32

Svařování na lisech (výstupkové)	33
Odporové stykové (tlakem a odtavením).....	33
5. Odporové bodové svařování	34
5.1. Odporové bodové svařování v automobilovém průmyslu.....	34
5.2. Parametry svařování	35
5.3. Konstrukce svařovacích strojů	36
5.4. Kontrola svarů	39
6. Experimentální část.....	40
6.1. Popis zkoumaných vzorků	40
6.2. Průběh experimentu	40
6.3. Vzorky.....	42
6.4. Svařovací parametry	42
6.5. Zhodnocení mikrostruktury	42
6.6. Zhodnocení vrstvy Al-Si	44
6.7. Zhodnocení experimentu	44
7. Závěr.....	45
8. Zdroje	46
9. Přílohy	48
9.1. Seznam obrázků	48
9.2. Seznam tabulek	49

1. Úvod

V současném vyspělém světě se klade velký důraz na ekologická, bezpečná a levná řešení při zachování určitých standardů kvality. Tento trend se projevuje v rozličných oblastech, jmenovat lze výrobu, výzkum, zdravotnictví, potravinářský průmysl, zemědělství, dopravu aj. Výrazný vliv má tento trend také na automobilový průmysl.

Výrobci automobilů jsou neustále nuceni hledat nové materiály a postupy pro výrobu automobilů. Na jedné straně to přináší zvýšené náklady, na druhé straně je tato skutečnost hnacím motorem technického rozvoje. Poznatky získané v automobilovém průmyslu se dále uplatňují i v jiných oblastech.

Cílem této práce je především:

- popsat současný stav v oblasti vysokopevných ocelových plechů používaných v konstrukci osobního automobilu,
- popsat požadavky na tyto materiály a jejich konkrétní aplikace,
- posoudit svařitelnost těchto ocelí, zejména těch s povrchovou úpravou na bázi Al-Si,
- provést experiment, který je zaměřen na prozkoumání bodové svaru vysokopevné oceli s povrchovou úpravou Al-Si, kterým budou ověřeny teoretické znalosti z oblasti odporového bodového svařování vysokopevných ocelových plechů používaných v konstrukci automobilu.

2. Oceli používané v automobilovém průmyslu

Je několik způsobů rozdělení ocelí používaných v automobilovém průmyslu [1 str. 13][2 str. 6].

Dělení ocelí podle metalurgie:

- nízko-pevné oceli (bez intersticií a měkké oceli s nízkým obsahem uhlíku),
- konvenční vysoko-pevnostní oceli HSS (High-Strength Steel),
- pokročile vysoko-pevnostní oceli AHSS (Advanced High-Strength Steel).

Dělení podle pevnosti:

- HSS oceli (High-Strength Steel) s mezí kluzu od 210 do 550 MPa a pevností v tahu od 270 do 700 MPa ,
- UHSS oceli (Ultra- High-Strength Steel) s mezí kluzu větší než 550 MPa a pevností v tahu větší než 700 MPa.

Dělení podle mechanických vlastností a parametrů tváření:

- celková průtažnost,
- deformační zpevnění, roztažnost.

2.1. Nízko-pevné oceli

2.1.1. Běžná uhlíková ocel (Mild steel)

Tato ocel s feritickou strukturou se v minulosti hojně využívala při konstrukci automobilu. Podíl této oceli v konstrukci vozu neustále klesá [1 str. 13].

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu maximálně 220 MPa,
- tažnost 30 – 45 %.

Chemické složení:

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Al [%]	Cu [%]	Ni [%]	Cr [%]	Be [%]
0,13-0,15	0,5 – 1,2	0,08-0,11	0,1-1,5	0-0,5	0-1,0	0,1-1,0	0,014-0,08

Tab. 1 Chemické složení Mild oceli dle patentu z roku 1959 [2]

2.1.2. Oceli bez intersticií IF (Interstitial-Free)

Oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku, které jsou mikrolegované Ti a Nb. Tyto legury slouží jako karbonitridační stabilizátory, které se používají pro úplné vyčištění feritu od interstiticky rozpuštěného C a N. snížení obsahu těchto prvků vede ke zvýšení hodnoty koeficientu normálové anizotropie¹, tím dojde ke zlepšení hlubokotažných vlastností oceli. Konečné vlastnosti IF ocelí jsou dány nejenom chemickým složením, ale i technologickým postupem výroby plechu [3 str. 40].

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu $R_{p0,2}$ 100 – 200 MPa,
- mez pevnosti 300 MPa,
- tažnost 40 – 55 %.

Chemické složení:

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]	N ₂ [%]	B [%]
0,002	0,12	0,007	0,008	0,004	0,029	0,095	0,0048	0,001

Tab. 2 Příklad chemického složení IF oceli [4 str. 6] [5]

2.2. Vysoko-pevnostní oceli HSS (High Strength Steel)

2.2.1. Vysoko-pevnostní oceli bez intersticií (IF-HSS)

Vysoko-pevnostní oceli bez intersticií obsahují malé množství uhlíku. Jsou mikrolegované titanem, niobem. Struktura oceli je tvořena čistým feritem, vlastnosti jsou ovlivněny velikostí feritického zrna. Oceli jsou odolné vůči stárnutí, použití pro extrémně hluboké tažení, jsou vhodné pro výrobu velkých, tvarově složitých karosářských výlisků. (1 str. 14) Ke zvýšení meze kluzu oproti IF oceli se překvapivě používá přísada fosforu. Zhoršení vlastností vlivem

¹ Normálová anizotropie-vyjádřena koeficientem r , který charakterizuje odpor plechu proti zeslabování tloušťky při jeho tváření. Koeficient je poměr skutečné deformované šířky ke skutečné deformaci tloušťky zkušebního tělesa při jednoosém zatížení [3 str. 40].

segregace P na hranici zrn je kompenzována přísadou 0,001 - 0,003 B. Zpevnění lze dosáhnout i legováním Mn, Si případně Cu [3 str. 41].

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu $R_{p0,2}$ 200 – 300 MPa,
- mez pevnosti 400 MPa,
- tažnost 30 - 42 %.

Chemické složení:

C [%]	Mn [%]	N [%]	P [%]	Al [%]	Nb [%]	Ti [%]	B [%]
0,003	0,35	0,003	0,05	0,03	0,035	0,02	0,001

Tab. 3 Příklad chemického složení IF-HSS oceli [3 str. 41]

2.2.2. Izotropní oceli (IS)

Izotropní oceli jsou nízkouhlíkové oceli. Vyskytují se pouze ve formě plechů a pásů. Orientace strukturálních elementárních buněk je u těchto ocelí rozložena rovnoměrně, proto jsou mechanické vlastnosti ve všech směrech stejné. Mají tedy při lisování jednoosou a dvojosou napjatostí výbornou tvařitelnost. Jejich základní matrice je feritická [6 str. 55].

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu $R_{p0,2}$ 200 – 300 MPa,
- mez pevnosti 400 MPa,
- tažnost 32 - 38 %.

Chemické složení:

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]	N [%]
0,031	0,179	<0,005	0,0088	0,0098	0,026	0,045	0,037

Tab. 4 Příklad chemického složení IS oceli [6 str. 55]

2.2.3. BH oceli (Bake Hardenable)

Nevýhodou IF ocelí (někdy také 1. generace IF) je jejich nízká mez kluzu. Proto byly vyvinuty IF oceli vykazující tzv. BH (Bake Hardening) efekt. Jedná se o proces, při kterém se zvýší mez kluzu. Toho je dosaženo při teplotě vypalování laku karoserie vozu (cca 20 minut při 180°C). Při vypalování dojde k precipitaci atomů N a C a tím k blokování pohybu dislokací. Předpokladem existence BH efektu je přítomnost volných atomů C, popř. N ve feritické matici [6 str. 56].

Z hlediska chemického složení je BH efekt ovlivněn obsahy C, Mn, P. Velikost efektu je dále závislá na způsobu tváření a parametrech tepelného zpracování. V závislosti na uvedených vlivech lze dosáhnout zvýšení meze kluzu až o 120 MPa [6 str. 56].

BH oceli není úplně přesné pojmenování názvu oceli, spíše se jedná o oceli vykazující BH efekt. K BH efektu může docházet i u DP oceli a TRIP oceli. Tyto materiály jsou popsány v dalších bodech této kapitoly.

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu $R_{p0,2}$ 200 – 300 MPa,
- mez pevnosti 350 - 450 MPa,
- tažnost 30 - 40 %.

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Nb [%]	Ti [%]	N [%]
0,002	0,03	1,06	0,088	0,005	0,042	0,01	0,02	0,004

Tabulka 1: příklad složení BH oceli [7 str. 76]

2.2.4. Vysoko-pevnostní mikrolegované oceli HSLA (High-Strength Low-Alloy)

HSLA oceli jsou nízko nebo mikrolegované oceli. Legujícími prvky jsou Mn (až 2% obsahu), Cr, Ni, Mo, V, Ti a další. Vysoké pevnosti oceli je dosaženo kombinací zjemnění zrna řízeným válcováním a precipitačním zpevněním vlivem legujících prvků (Ti, V, Ni) [1 str. 15]. Oceli se vyrábějí jak válcováním za studena tak válcováním za tepla [8].

Výhodou HSLA ocelí je kombinace vlastností vhodných pro použití v konstrukci automobilu, jsou to zejména pevnost, houževnatost, tvárnost, svařitelnost a odolnosti proti atmosférické korozi. Tyto oceli nejsou považovány za legované i přesto, že dosahují vlastností legovaných ocelí. Ceny těchto ocelí se tedy odvíjejí od cen základních uhlíkových ocelí. Důležitým faktorem výběru tohoto materiálu (kromě ceny) je velmi výhodný poměr nízké hmotnosti k velmi dobrým mechanickým vlastnostem [9].

Tyto oceli jsou vhodné pro konstrukční díly, jako jsou závěsné výztuhy, příčníky, podélné nosníky. Jsou odolné proti únavě a odolné proti nárazu (8). Příklad použití viz.: Obr. 1 a Obr. 2.

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu 260 – 650 MPa,
- mez pevnosti 350 – 730 MPa,
- tažnost 10 – 28 %.

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Nb [%]	Ti [%]	Al [%]
max 0,11	max 0,5	max 1,0	max 0,03	max 0,025	max 0,09	max 0,12	max 0,1

Tab. 5 Příklad chemického složení HSLA oceli (HX300LAD) [10]



Obr. 1 Tlumič nárazu přední výztuže z materiálu HSLA 300 [8]

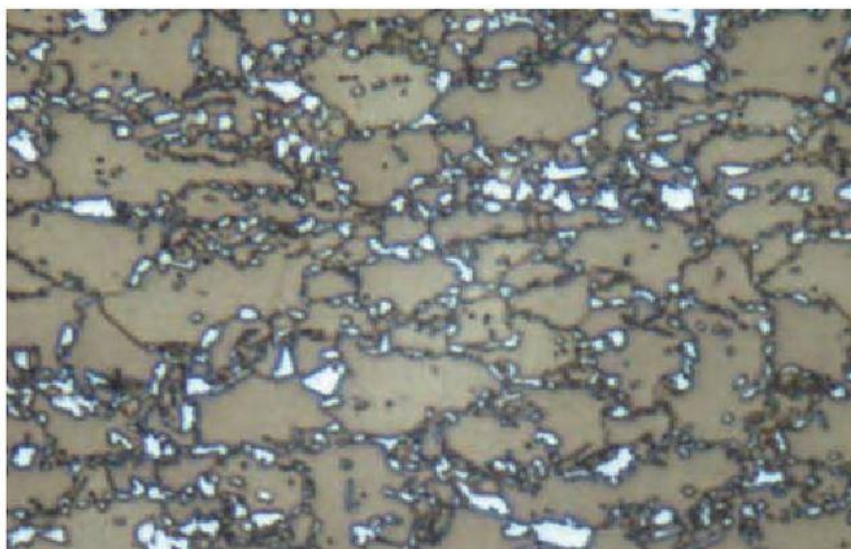


Obr. 2 zádňi přičník z materiálu Extragal®-coated HSLA 300 [8]

2.3. Ultra-vysoko-pevnostní oceli UHSS (Ultra- High-Strength Steel)

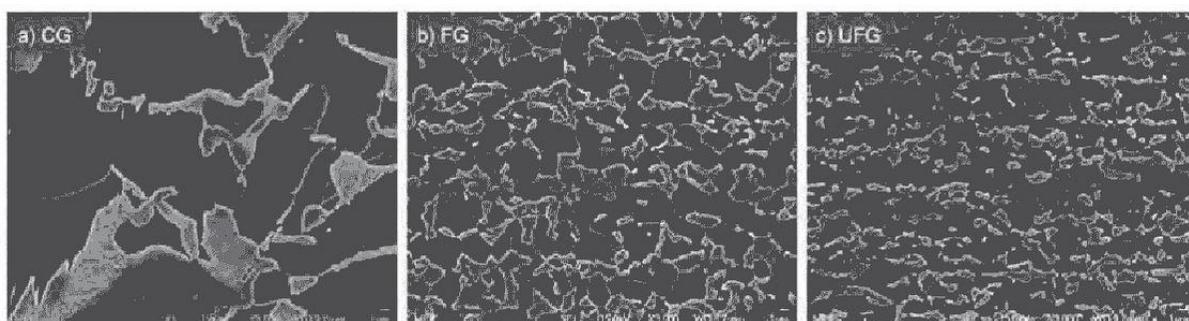
2.3.1. Dvoufázové oceli DP (Dual Phase)

Dvoufázové oceli tvoří skupinu vysoce pevných ocelí pro tváření za studena. Jedná se o nízkouhlíkové materiály na bázi Mn-Si, které dále mohou obsahovat Mo, Cr nebo V. Jak již název napovídá, struktura těchto ocelí je tvořena dvěma fázemi, feritickou a martenzitickou. Podíl martenzitu může být maximálně 20%. Martenzit musí tvořit ostrůvky ve struktuře, jinak by došlo k poklesu plastických vlastností oceli. Nositelem plastických vlastností je ferit, martenzitická fáze ovlivňuje pevnost. Mez kluzu lze zvýšit také pomocí BH efektu (až o 30 MPa). Na Obr. 3 je mikrostruktura DP oceli. Menší světlejší ostrůvky jsou martenzit a zbytek je tvořen feritem.



Obr. 3 Mikrostruktura oceli DP 600 (ferit+ostrůvky martenzitu) [11]

Mechanické vlastnosti DP ocelí mají velké rozpětí. Je to dáno velikostí zrn, která se může velmi lišit. Velikost zrn je dána zpracováním při výrobě plechů. Velikosti zrn jsou vidět na Obr. 4. V následující Tab. 6 jsou patrné rozdíly v mechanických vlastnostech DP oceli v závislosti na velikosti zrn.



Obr. 4 a) CG coarse grains; b) FG fine grains; c) UFG ultra fine grains [11]

Mikrostruktura	Velikost zrna [μm]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Exponent zpevnění n^2
Coarse grain	12,4	445	870	7,7	0,21
Fine grain	2,4	483	964	8,9	0,18
Ultra fine grain	1,2	525	1037	7,3	0,18

Tab. 6 Mechanické vlastnosti DP oceli s rozdílnou velikostí zrna [11]

² Hodnotu n lze definovat jako exponent závislosti mezi napětím a deformací. Čím větší je tento exponent, tím více se bude materiál mechanicky zpevňovat. Exponent n lze také vyjádřit pomocí poměru pevnosti a meze kluzu. Se zvyšující se hodnotou n se zvětšuje poměr R_m/Re [30].

Uvedené materiály jsou vhodné pro bezpečnostní díly v konstrukci automobilu, jako jsou podélné nosníky, příčníky a výztuhy. Tyto materiály lze dále použít pro výrobu disků kol (8). Příklady použití viz.: Obr. 5 a Obr. 6.

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu 280 – 1100 MPa
- mez pevnosti 450 – 1180 MPa
- tažnost 5 – 27 %

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	V [%]	Al [%]	B [%]	Cr+Mo [%]	Nb+Ti [%]
max 0,15	max 0,8	max 2,5	max 0,08	max 0,015	max 0,2	max 2,0	max 0,005	<1,0	<0,15

Tab. 7 příklad chemického složení DP oceli (Dual Phase 980 LCE Y600) [10]



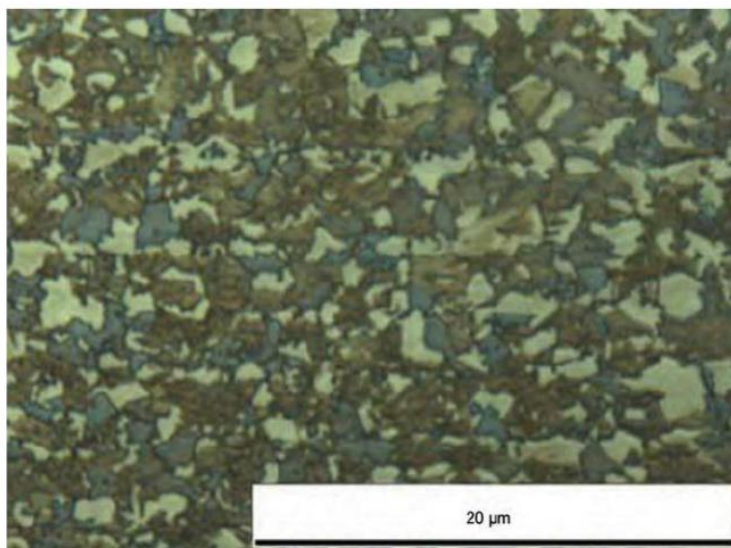
Obr. 5 Výztuha předního nárazníku DualPhase 1180 [8]



Obr. 6 Kolo tvářené za tepla DualPhase 600 (HDT580X) [8]

2.3.2. CP oceli (Complex Phase)

Struktura CP ocelí je tvořena malým množstvím martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu ve feriticko-bainitické matici. Pomalou rekrystalizací se dosahuje zjemnění zrna. Též lze dosáhnout precipitací mikrolegujících prvků Ti nebo Co (12 str. 10). Na Obr. 7 je mikrostruktura oceli CP800, ve které je 42% feritu, 40% bainitu, 13% martenzitu a 5% zbytkového austenitu. V Tab. 8 jsou uvedeny některé typy CP ocelí včetně mechanických vlastností.

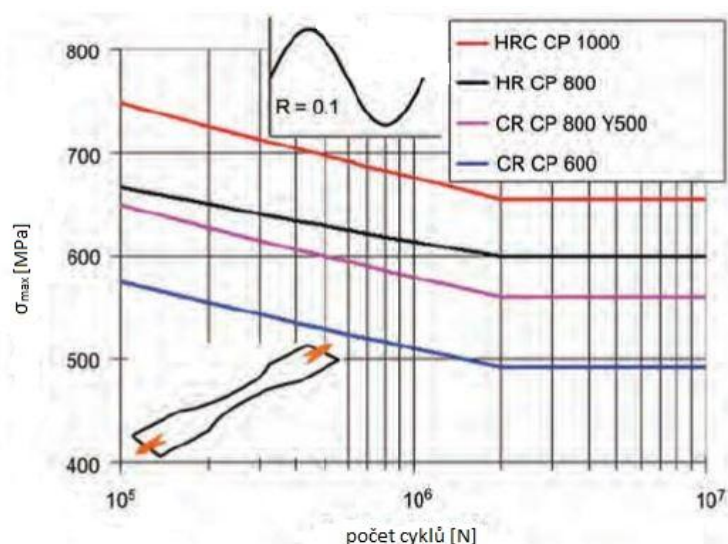


Obr. 7 Tvářeno za tepla, materiál CP 800 [11]

Označení oceli	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
HR CP590 SF	510	590	28
CR CP590 HY	515	690	23
CR CP980 HY	795	1005	15
GA CP590 HY	505	620	26

Tab. 8 Mechanické vlastnosti vybraných CP ocelí

Tyto oceli mají vysoké absorpční schopnosti a vysokou únavovou pevnost, jsou tedy zkoušeny na odolnost proti cyklickému namáhání. Pro představu jsou na Obr. 8 Křivky únavové pevnosti [8] vyobrazeny Wohlerovy křivky materiálů z CP ocelí pro $R^3=0,1$.



Obr. 8 Křivky únavové pevnosti [8]

Mechanické vlastnosti:

³ R je napěťový poměr $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ [34]

- mez kluzu 360 – 950 MPa
- mez pevnosti 600 – 1200 MPA
- tažnost 6 – 28 %

Chemické vlastnosti:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	V [%]	Al [%]	B [%]	Cr+Mo [%]	Nb+Ti [%]
max 0,15	max 0,8	max 2,2	max 0,08	max 0,015	max 0,22	max 2,0	max 0,005	<1,0	<0,15

Tab. 9 Příklad chemického složení CP oceli (Complex Phase 1000) [10]

Vzhledem k vysoké absorpční schopnosti a únavové pevnosti, jsou tyto oceli v hodné pro bezpečnostní komponenty v konstrukci automobilu, zejména ty, které vyžadují dobrou odolnost proti nárazu. Příklady použití viz.: Obr. 9, Obr. 10.



Obr. 9 Výztuha bočních dveří z materiálu Complex Phase 1000 (tloušťka 2 mm) [8]

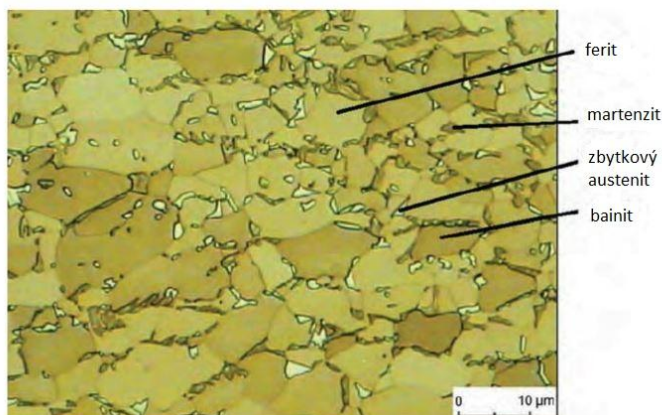


Obr. 10 závěsné rameno z materiálu Complex Phase 800 (tloušťka 3,1 mm) [8]

2.3.3. TRIP oceli (Transformation Induced Plasticity)

Oceli TRIP, také nazývané jako oceli s transformačně indukovanou plasticitou, jsou jedním z nejnovějších a nejzajímavějších materiálů vyvinutých v ocelářském průmyslu. Jejich mikrostruktura je tvořena feritem a zbytkovým austenitem. Zbytkový austenit se může podle obsahu C transformovat na martenzit nebo bainit, jednak během procesu tváření do hotového

výlisku nebo při velké deformaci (náraz vozidla). Na Obr. 11 je typická mikrostruktura TRIP oceli. TRIP oceli obsahují více uhlíku než DP oceli, uhlík slouží ke stabilizaci zbytkového austenitu při teplotě okolí.



Obr. 11 Mikrostruktura TRIP oceli; přeloženo [13]

V Tab. 10 jsou uvedeny mechanické vlastnosti vybraných materiálů z TRIP oceli, u těchto ocelí lze také dosáhnout zpevnění v důsledku BH efektu. Hodnoty zpevnění jsou v Tab. 10.

Označení oceli	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Exponent zpevnění n	BH [MPa]
TRIP 590	380-480	590-700	≥26	≥0,20	40
TRIP 690	410-510	690-800	≥25	≥0,19	40
TRIP 780	450-550	780-900	≥23	≥0,18	40

Tab. 10 Mechanické vlastnosti vybraných TRIP ocelí; přeloženo, upraveno [11]

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu: 350 – 600 MPa,
- mez pevnosti 500 – 1050 MPa,
- tažnost 12 – 32 %.

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	V [%]	Al [%]	B [%]	Cr+Mo [%]	Nb+Ti [%]
max 0,32	max 2,2	max 2,5	max 0,12	max 0,015	max 0,2	max 2,0	max 0,005	<0,6	<0,2

Tab. 11 Příklad chemického složení TRIP oceli HCT780T(EN 10338:2009) (10)

Přítomnost zbytkového austenitu způsobuje zpevnění při nárazu. Tato vlastnost je výhodná pro použití v konstrukci automobilu [6 str. 57]. Tento materiál je využíván například jako výztuha nárazníku viz.: Obr. 11.



Obr. 12 Příčný nosník nárazníku z materiálu TRIP 780 (tloušťka 1,6 mm) [8]

2.3.4. Martenzitické oceli (MS)

Martenzitické oceli jsou typické tím, že téměř všechny austenit je zde přeměněn na martenzit. Martenzit vzniká ochlazením z austenitické fáze na teplotu M_s (rychlost ochlazování obvykle rychleji než 27K/s). Tažnost této oceli je omezená a pohybuje se okolo 10 %. Proto se obvykle zpracovává tažením za tepla na konečný tvar dílu. Materiál má před zpracováním na martenzitickou strukturu má feriticko-perlitickou strukturu. Složení těchto ocelí je v tabulce, typickým představitelem je ocel typu 22MnB5 (prodává se pod různým označením podle výrobce). Pevnost se pohybuje kolem 600 MPa, až dalším mechanicko-teplným zpracováním se vytvoří martenzitická struktura. Materiál se ještě obvykle temperuje při teplotě kolem 700°C pro zlepšení houževnatosti materiálu. Mez pevnosti po zpracování se pohybuje okolo 1500 MPa a výše. Metoda zpracování těchto ocelí se nazývá hot-stamping, princip metody je popsán v další kapitole této práce. Na Obr. 13 je martenzitická struktura oceli.



Obr. 13 Martenzitická mikrostruktura [11]

Mechanické vlastnosti:

- mez kluzu 950 – 1500 MPa,
- mez pevnosti 1200 – 1700 MPa,
- tažnost 6 – 10 %.

Chemické složení:

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	V [%]	Al [%]	B [%]	Cr+Mo [%]	Nb+Ti [%]
max 0,25	max 0,8	max 2,0	max 0,06	max 0,015	max 0,22	max 2,0	max 0,005	<1,2	<0,15

Tab. 12 příklad chemického složení MS oceli (HDT1200M) [10]



Obr. 14 Nejběžnější použití B-sloupek tloušťka 1,85mm (8)

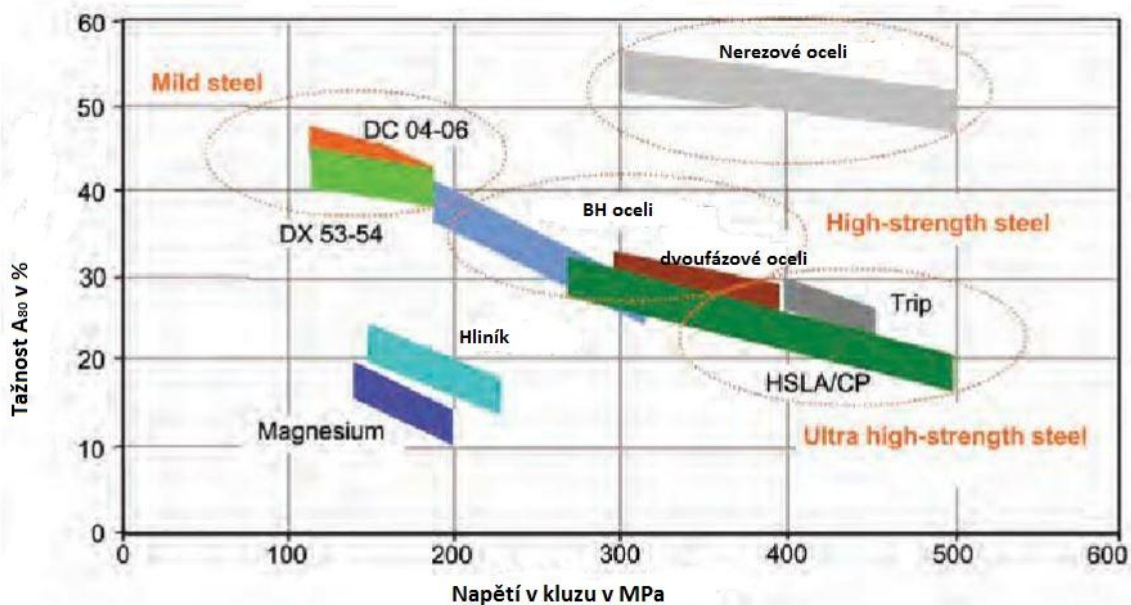
Typické použití těchto ocelí je na dveřní výtuhy, B-sloupek, středový tunel, ale i na další části. Příklad použití viz.: Obr. 14. Některé martenzitické oceli a jejich mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 13.

Označení oceli	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
MS 130	923	1054	5,4
MS 160	1020	1178	5,1
MS 190	1213	1420	5,1
MS 220	1350	1585	4,7

Tab. 13 Mechanické vlastnosti martenzitických ocelí; přeloženo, upraveno [11]

2.4. Přehled používaných materiálů

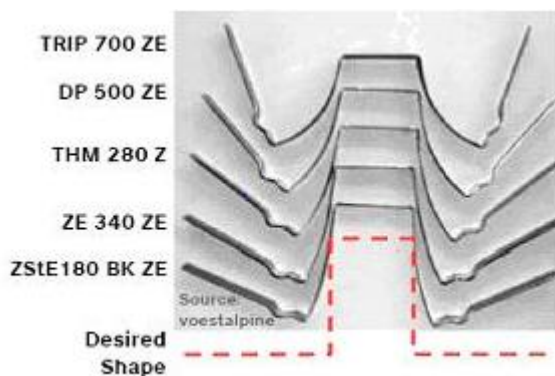
Kromě ocelí se v konstrukci vozu používají ještě další materiály. Přehled těchto materiálů je na Obr. 15. V současné době se stále vyvíjejí další pokročilé materiály.



Obr. 15 Přehled materiálů používaných v konstrukci osobního automobilu; přeloženo [13]

3. Technologie tváření plechů metodou Hot-stamping

Technologie tváření plechů metodou Hot-stamping byla vyvinuta pro použití v automobilovém průmyslu pro tváření vysokopevných plechů. Při tváření plechů o vysoké pevnosti dochází k tzv. spring-back efektu, plech má po tváření za studena tendenci vracet se do svého původního tvaru. Čím větší pevnost má daný plech, tím je spring-back efekt větší. Toto je patrné z Obr. 16.



Obr. 16 Spring-back efekt [14]

Pro tváření těchto plechů byla vyvinuta metoda tváření za tepla s následným ochlazením. Speciálně pro martenzitické oceli typu 22MnB5 je tato metoda vhodná, protože tažnost těchto materiálů je velmi nízká. Po tváření jsou tedy plechy s tohoto materiálu zchlazeny. Aby bylo možné plechy bezprostředně po tváření dostatečně rychle ochladit, byly sestaveny speciální

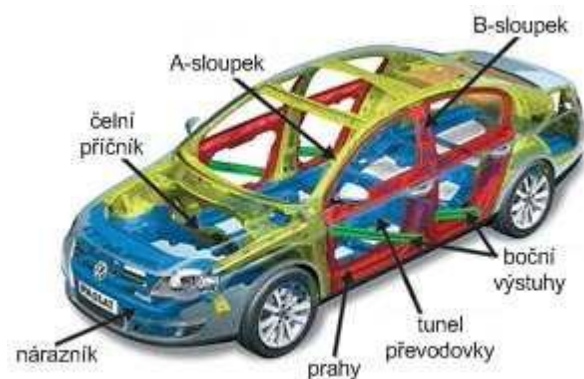
chlazené nástroje. V jedné operaci tedy dojde k tváření a zároveň dojde i k zakalení na martenzitickou strukturu. Tato technologie má ještě jednu výhodu, lze jednu součást ochladit v různých částech rozdílnou rychlostí. Jedna část může být tepelně zpracována na vysokou pevnost a druhá část spíše na pružnost. To má další pozitivní efekt: části, které byly dříve svařovány s několika díly, mohou být nyní nahrazeny jedním kusem. Tento postup se velmi často používá u B-sloupku.

Samotná technologie Hot-stamping byla vyvinuta již v roce 1977 (patentu číslo GB1490535) ve švédské společnosti Plannja. Tuto technologii používala firma Plannja na výrobu pilových listů a nožů do sekaček. První automobilka, která použila plechy tvářené metodou Hot-stamping, byl švédský SAAB a to již v roce 1984. První vozem, ve kterém se začali používat díly vyrobené touto metodou, byl SAAB 9000 Obr. 17. Od roku 1984 podíl takto tvářených plechů v automobilovém průmyslu neustále stoupá. [11]

V současně vyráběných vozech se díly vyráběné touto technologií objevují už zcela běžně. Je to dáno poptávkou po snížení hmotnosti vozidla, zvýšení bezpečnosti a odolnosti proti nárazu. Nejvíce se tyto díly používají na A-sloupek, B-sloupek, nárazník, střešní výztuž, výztuž dveří, středový tunel. Příklad použití dílu vyrobených metodou hot-stamping je na Obr. 18.



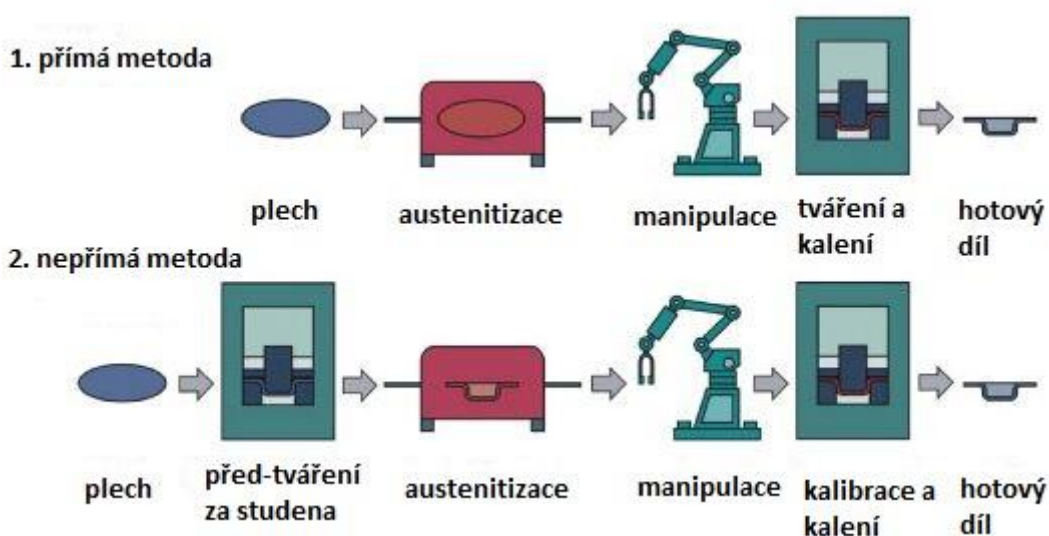
Obr. 17 SAAB 9000 [15]



Obr. 18 Díly vyráběné metodou hot stamping; (11) [16 str. 5]

3.1. Princip metody Hot-stamping

U metody Hot-stamping je možné využít jedné ze dvou metod. Jedna metoda je přímá a druhá je nepřímá. V přímém procesu se polotovar nejprve ohřeje na teplotu tváření a poté se ihned tvaruje do požadovaného tvaru se současným ochlazením. V nepřímém procesu se polotovar nejprve tváří za studena, poté se ohřeje na teplotu tváření za tepla. Následuje konečné tváření a kalibrace na požadovaný rozměr a stejně jako u přímé metody k ochlazení. Princip těchto metod je zobrazen na Obr. 19. Tvářecí nástroje jsou speciálně upravené pro tuto technologii tváření. Součástí tvářecího lisu je i chladicí okruh, v nástrojích jsou kanálky, které slouží k rychlému ochlazení. Nástroje jsou značně namáhány, aby se co nejméně opotřebovaly, opatřují se povlaky na bázi Ti. Celý proces ohřevu, lisování a chlazení musí být přesně načasován, aby ohřev, lisování a chlazení trval přesně stanovený čas a podařilo se vyrobit díl požadovaných vlastností.



Obr. 19 Princip metody hot-stamping; přeloženo [13]

Po vychladnutí jsou tvářené díly ještě oříznuty na konečný tvar, obvykle laserem. Celý proces výroby dílů metodou Hot-stamping je obvykle plně automatizován. Nejdůležitější fází tohoto procesu je rychlost ochlazení. Tvářený materiál musí být ochlazen dostatečně rychle, aby bylo dosaženo potřebné martenzitické struktury.

Výzkumy ukázaly, že nevhodnějšími materiály pro tuto metodu jsou borové oceli, které jsou schopny vytvořit plně martenzitickou strukturu po lisování za tepla. Nejvíce používanou ocelí je 22MnB5, která byla také použita v experimentální části této práce. Další borové oceli včetně chemického složení jsou v Tab. 14 [11].

Ocel	C [%]	B [%]	Al [%]	Cr [%]	Mn [%]	N [%]	Ni [%]	Si [%]	Ti [%]
20MnB5	0,16	0,001	0,04	0,23	1,5	–	0,01	0,40	0,034
22MnB5	0,23	0,002	0,03	0,16	1,18	0,005	0,12	0,22	0,040
27MnCrB5	0,25	0,002	0,03	0,34	1,24	0,004	0,01	0,21	0,042
37MnB4	0,33	0,001	0,30	0,19	0,81	0,006	0,02	0,31	0,046

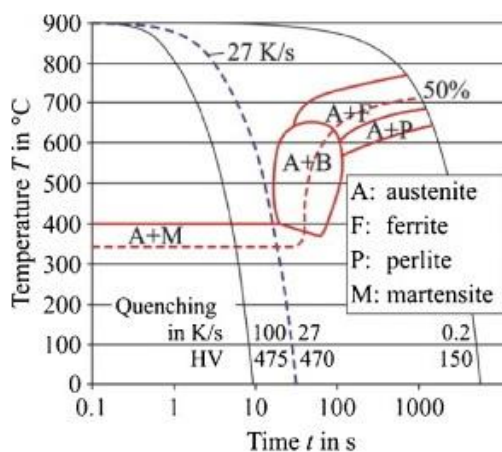
Tab. 14 Některé typy tzv. „bórových ocelí“; přeloženo, upraveno [11]

Před tvářením vykazuje materiál feriticko-perlitickou strukturu a jeho pevnost v tahu je zhruba 600 MPa. Po tváření má konečnou martenzitickou strukturu a pevnost pohybující se kolem 1 500 MPa. Což je 2,5 krát větší než původní mez pevnosti, hodnoty meze pevnosti a kluzu společně s parametry tváření jsou uvedeny v Tab. 15.

Ocel	Teplota M_s [°C]	Kritická rychlost ochlazování [K.s ⁻¹]	Mez kluzu [MPa]		Mez pevnosti [MPa]	
			Před tvářením	Po tváření	Před tvářením	Po tváření
20MnB5	450	30	505	967	637	1354
22MnB5	410	27	457	1010	608	1478
27MnCrB5	400	20	478	1097	638	1611
37MnB4	350	14	580	1378	810	2040

Tab. 15 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů; přeloženo, upraveno [11]

Jak je již zmíněno, rozhodujícím parametrem při tváření metodou Hot-stamping je rychlost ochlazování. Aby došlo k vytvoření martenzitické struktury, musí být tato rychlost větší, než kritická viz.: tabulka. K vytvoření martenzitické struktury dojde v celém objemu materiálu, jelikož se jedná o tenké plechy. V případě, že by tato rychlost byla menší, v materiálu by došlo k nežádoucím strukturním změnám a mohla by se tvořit bainitická či jiná struktura viz: Graf 1.



Graf 1 ARA (anizotropický rozpad austenitu) diagram; teplota [°C]/čas [s] [11]

3.2. Ohřev materiálu (austenitizace)

Ochlazování musí předcházet ohřev na teplotu austenitizace po dobu 5 minut na teplotu nad 900 °C. Doba a teplota austenitizace má vliv na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti materiálu. V Tab. 16 jsou uvedeny parametry ohřevu oceli 22MnB5 a zjištěné mechanické vlastnosti a podíl jednotlivých struktur. Díl je bezprostředně po ohřevu vložen do lisu, kde je obvykle 5 – 10 s. Při ohřevu materiálu na teplotu austenitizace a styku s okolním

vzduchem by docházelo k oxidaci povrchu a tvorbě okují, což by bylo nežádoucí. Proto jsou polotovary ještě před austenitizací a tvářením povrchově chráněny vrstvou Al-Si. Tato vrstva se vytváří kontinuálním žárovým pokovovacím procesem zvaným žárové hliníkování. Vrstva se skládá z 10 % křemíku, 3 % železa a 87 % hliníku. Samotný Al-Si povlak má teplotu tavení 600°C, což by bylo pro tuto metodu nevhodné, avšak přítomnost Fe vytvoří vrstvu, která vydrží teplotu austenitizace. Vrstva Al-Si neposkytne katodickou ochranu jako třeba zinek. V případě Al-Si se jedná o bariérovou ochranu. Tuto metodu vyvinula společnost Thyssen. Dále se používá speciální ochranná nanovrstva zvaná x-tec®, tuto vrstvu je potřeba před svařováním odstranit [17].

Chemické složení a uhlíkový ekvivalent											
Ocel	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	B [%]	N [%]	Ti [%]	CEN ⁴
22MnB5	0,225	0,211	1,229	0,018	0,008	0,289	0,001	0,0041	0,0049	0,037	0,515
Mechanické vlastnosti a mikrostruktura											
Čas a teplota [min. a °C]	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A ₅₀ [%]	Tvrdoost HV10 [kg.mm ⁻²]	Ferit [%]	Martenzit [%]	Ferit [μm ²]				
1 – 800	568 ±79	1104 ±106	9,4±1,7	375	21,8	78,2	1,0				
3 – 800	595 ±88	1137 ±150	8,9±1,9	409	37,1	62,9	1,9				
5 – 800	782 ±79	1274 ±52	8,5±3,0	478	15,0	85,0	2,2				
1 – 850	1163 ±15	1590 ±7	7,2±0,1	534	0,0	100,0	0,0				
3 – 850	1151 ±12	1572 ±19	7,3±0,2	517	0,0	100,0	0,0				
5 – 850	1145 ±53	1555 ±2	8,0±0,2	510	0,0	100,0	0,0				
1 - 900	1088 ±13	1515 ±21	7,4±0,2	496	0,0	100,0	0,0				
3 - 900	1068 ±23	1470 ±52	7,4±2,5	477	0,0	100,0	0,0				
5 - 900	1066 ±7	1463 ±18	8,1±0,1	476	0,0	100,0	0,0				

Tab. 16 Mechanické vlastnosti a mikrostruktura oceli 22MnB5 po tepelném zpracování; přeloženo, upraveno [18]

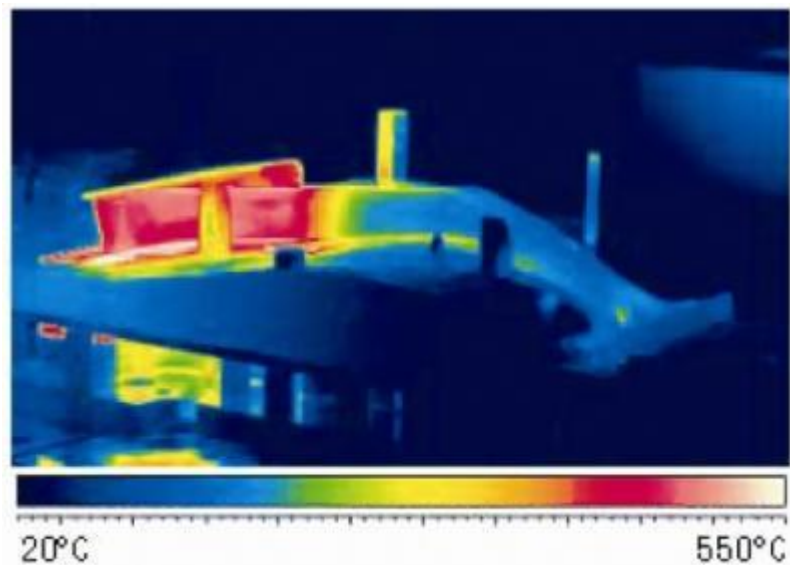
3.3. Technologie Taylored Tempering

Požadavky na vlastnosti jednotlivých částí vozů mohou být někdy protichůdné. Konstrukce vozu musí mít absorpční schopnosti kvůli tlumení nárazu, zároveň však musí být konstrukce vozu pevná. U B-sloupku se to řešilo tak, že sloupek byl složen z několika dílů, které se

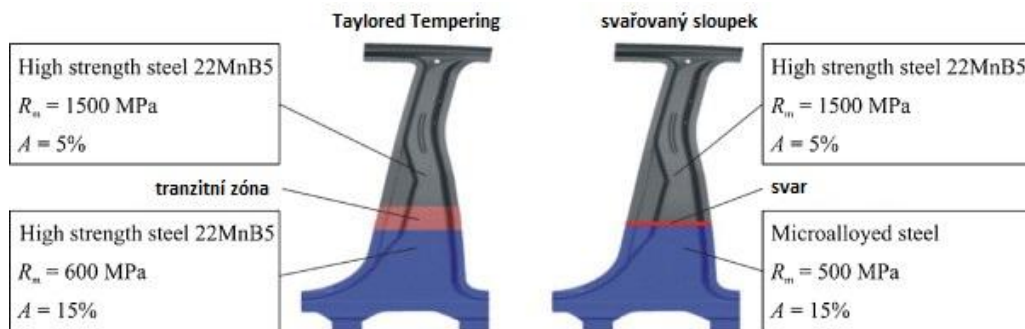
⁴ CEN – uhlíkový ekvivalent se používá k posouzení svařitelnosti; podrobněji vysvětleno v kapitole 4.4

překrývaly. Společnost Audi používala B-sloupek, který byl svařen laserem ze dvou odlišných materiálů a poté byl ještě tepelně zpracováván.

Nejnovějším postupem je tzv. technologie taylored tempering. Kombinace dílů nebo svařování jednoho dílu ze dvou kusů už není u této technologie potřeba, tím se jednak zjednoduší výroba a díl má i lepší požadované vlastnosti. Při tváření se ve fázi ohřevu postupuje stejně jako při klasickém procesu hot-stamping, avšak liší se ochlazováním. Díl není v celém objemu chlazen stejnou rychlostí, tvářecí stroj je uzpůsoben tak, že může v různých částech ochlazovat díl jinou rychlostí. Takto vytvoření díl v sobě spojuje požadavky na vysokou pevnost a houževnatost. Nejčastěji se tento proces používá při tváření B-sloupku. Na Obr. 20 je vidět snímek termokamery a na něm je patrný rozdíl teplot při výrobě B-sloupku. Na dalším obrázku jsou pro srovnání vyobrazené dva B-sloupky. Každý z uvedených sloupků je vyrobený jinou technologií. U varianty svařované je patrný ostrý přechod mezi spodní méně pevnou částí a horní pevnější částí.



Obr. 20 Snímek B-sloupku pořízený termokamerou [17]



Obr. 21 Porovnání B-sloupku temperovaného na míru a svařovaného; částečně přeloženo [11]

4. Svařování

Při sériové výrobě automobilů je v současné době nejvíce používanou metodou spojování dílů svařování, speciálně odporové bodové svařování. Pro automatizaci výroby automobilů je tato

technologie velmi výhodná. Svařovací roboti a plně automatizované linky jsou dnes už zcela běžné. Výhodou této technologie svařování je možnost kompenzace určitých nepřesností lisovaných dílů při jejich montáži. Dnešní osobní automobily mají na sobě obvykle několik tisíc bodových svarů.

V současné době se pro jejich spojování používají dokonce lepidla. Zatím je ale nejpoužívanější technologií svařování odporové bodové. Proto musí mít všechny tyto materiály jednu společnou technologickou vlastnost, a to je jejich svařitelnost. Ty nejpevnější materiály se pohybují na hranici svařitelnosti díky většímu obsahu uhlíku a dalších legujících prvků. Proto je kladen vysoký důraz na kvalifikaci svářečského personálu. Parametry svařování musí být velmi přesně nastaveny a i v průběhu svařování sledovány.

4.1. Svařitelnost

„Svařitelnost je komplexní charakteristika materiálů, která určuje za daných podmínek svařování jejich technickou vhodnost pro spoje předepsané jakostí“ [19 str. 151].

Definice svařitelnosti podle ISO (International Organisation for Standardisation) zní: „Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, lze-li odpovídajícím technologickým postupem svařování dosahovat kovové celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, jež se týkají jak vlastností samotných spojů, tak i vlivu těchto spojů na konstrukční celek, jehož součástí tyto spoje jsou [20 str. 96].“

Svařitelnost se velmi složitě definuje, protože svařitelnost je ovlivněna mnoha faktory. Tyto faktory lze shrnout do tří základních skupin:

- materiál základního a svarového kovu,
- použitá metoda a výrobní podmínky,
- konstrukce svařence.

4.2. Vliv chemického složení ocelí na jejich svařitelnost

Na svařitelnost ocelí mají vliv zejména tyto chemické prvky:

Uhlík

Uhlík je přítomen ve všech ocelích, ovlivňuje především jejich mechanické vlastnosti. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty meze kluzu a pevnosti, avšak snižují se jejich plastické vlastnosti. Uhlík také rozhodujícím způsobem ovlivňuje svařitelnost. Oceli zaručeně svařitelné jsou ty, které mají obsah uhlíku do 0,25hm%. Při svařování uhlíkových ocelí s obsahem větším než 0,25hm% je nutné předepsat předehřev, dohřev a tepelně zpracovat pro zabránění vzniku studených trhlin [21 str. 87; 20 str. 96].

Křemík

V nelegovaných uhlíkových ocelích křemík zvyšuje pevnost feritu. Křemík působí silně desoxidáčně. Nedostatek uhlíku způsobuje to, že je ocel neuklidněná (pod 0,1hm%). Horní hranice je omezena na 0,45hm% [20 str. 96].

Mangan

Mangan zvyšuje mez kluzu i pevnosti, aniž by byla do určitého obsahu snížena plasticita. Nelegované nízkouhlíkové oceli obvykle obsahují 0,3 – 1,7hm% manganu. Mangan působí také jako desoxidací prvek. Pomocí manganu se snižuje obsah síry v oceli nebo ve svarovém kovu. Síra může působit negativně [20 str. 96].

Fosfor

Fosfor zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, také zvyšuje ve spojení s mědí odolnosti proti atmosférické korozi. Na druhou stranu ovšem snižuje plasticitu oceli a způsobuje zkřehnutí za studena. Zkřehnutí feritu vede ke křehkým lomům, které lze prokázat prudkým poklesem vrubové houževnatosti [20 str. 97].

Síra

Síra se někdy přidává úmyslně pro zlepšení obrobiteľnosti. Co se týče svařitelnosti, tak je síra prvek škodlivý. Dostává se do oceli z rud a paliva při výrobě. Sloučení Fe a S vznikne FeS (sulfid železnatý), který vytvoří v austenitu eutektikum s nízkou teplotou tavení (985°C). Toto eutektikum se soustřeďuje v nejposlednějších místech tuhnutí. FeS se tedy soustřeďuje na hranicích austenitických zrn. Při teplotě blízké 985°C (při tváření za tepla nebo svařování) dojde ke zkřehnutí materiálu, kdy vznikají v oceli mezikrystalické trhliny. Tento jev je nazýván náchylností na vznik teplých likvidačních trhlin. Při vysokém obsahu S působí pozitivně přítomnost Mn. Síra má větší afinitu k Mn než k Fe, takže se vytváří sulfid manganu. Sulfid manganu při tuhnutí vytváří krystalické zárodky, které jsou rozděleny v zrnech oceli. U nelegovaných ocelí má být obsah S pod 0,04hm% [20 str. 97; 21 str. 88].

Dusík

Dusík je stejně jako uhlík austenitotvorný prvek, jeho přítomnost způsobuje rozšíření pole γ . Vznik nitridů má vliv na mechanické vlastnosti oceli, zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost. Současně nitridy zhoršují plastické vlastnosti, zejména tažnost a vrubovou houževnatost. Stárnutí uhlíkových ocelí je způsobeno vylučováním nitridů, které také způsobují křehkost v oblasti 100 až 350°C. Zvláště je nebezpečné vylučování nitridu v úzkém pásu v okolí svaru, které může vést k úplnému porušení konstrukce [20 str. 97].

Vodík

Vodík je ve slitinách železa nežádoucí příměsí. Rozpouští se v nich při výrobě a také při svařování. Největší rozpustnost vodíku je v železe γ . Vodík je v kovu rozpuštěn nebo tvoří hydridy. Vodík je příčinou pórovitosti svaru, oduhličení svarového kovu, vzniku trhlin ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Zdroje vzniku vodíku při svařování, kterým je nutné se vyvarovat: vlhkost obalu elektrody a tavidel, vlhkost na povrchu základního materiálu, zbytky maziva, vlhkost ochranného plynu, zbytky po povrchových úpravách, korozní produkty, barvy apod. [20 str. 97].

Hliník

Hliník působí silně desoxidačně a denitrifikačně. Oxidy a nitridy hliníku fungují jako krystalizační zárodky při tuhnutí oceli. Navázáním dusíku snižuje náchylnost oceli ke stárnutí. Silně uklidněná ocel má min. 0,02hm.% hliníku [20 str. 98; 21 str. 92].

Měď

Měď se do nelegovaných ocelí dostává společně se šrotem. Obsah do 0,26hm% se pokládá za neškodný. Při obsahu 0,15 až 0,5 hm. % se snižuje rychlost koroze, měď vytváří nepropustnou oxidickou vrstvu. Toto se využívá u konstrukčních ocelí, které jsou odolné proti atmosférické korozi [20 str. 98].

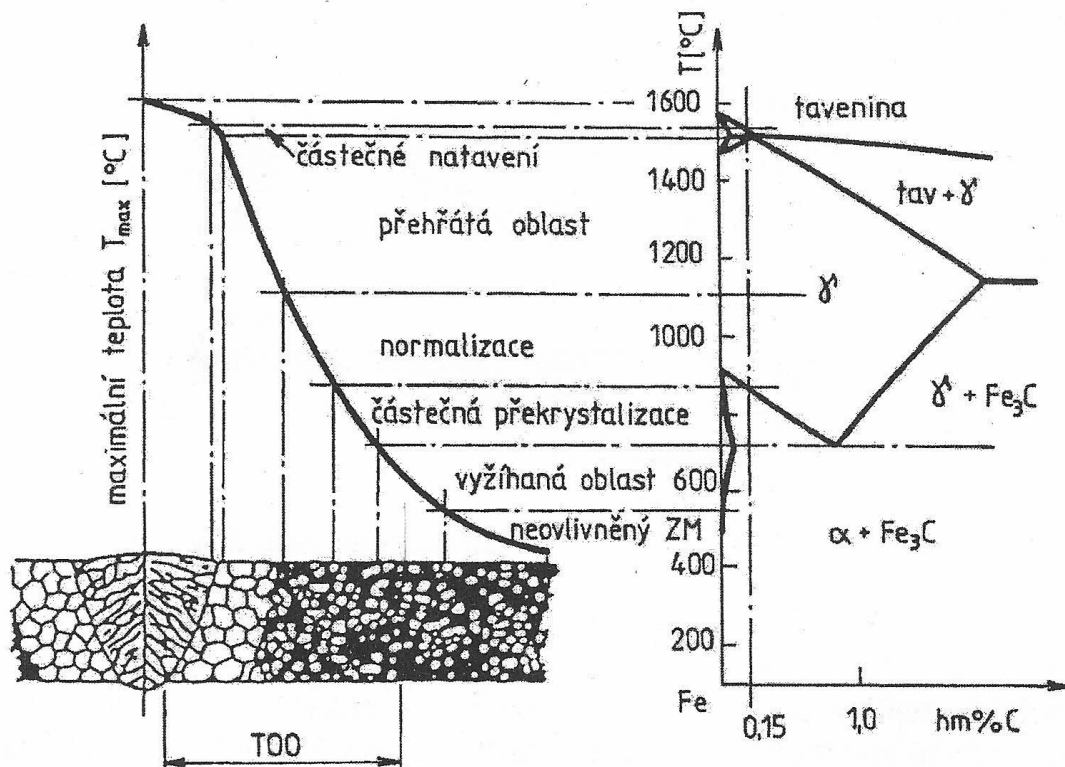
Chrom, Molybden, Vanad

Tyto prvky jsou karbidotvorné, výrazně precipitačně zpevňují oceli i svarové kovy. Molybden, pokud je rozpuštěn v tuhém roztoku, substitučně zpevňuje materiál. S rostoucím obsahem Cr se také zvyšuje odolnost proti korozi.

4.3. Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast (TOO), je oblast svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury způsobené působením tepla vzniklého při svařování. V případě svařování materiálů bez polymorfni přeměny jako je například měď, nikl, hliník a jejich slitiny, nedochází ke změně mikrostruktury, probíhají pouze substrukturní změny, rekrystalizace, růst zrn. V kovech a slitinách s polymorfni přeměnou (oceli) dochází k výrazným strukturním změnám, které ovlivňují svarový spoj [20 str. 10].

Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfni přeměnou můžeme tepelně ovlivněnou oblast rozdělit na několik charakteristických pásem, jak je patrné na Obr.



Obr. 22 Tepelně ovlivněná oblast (TOO) [20 str. 10]

22.

Oblast taveniny je oblast, kde došlo k úplnému natavení kovu (svarový kov a přídatný materiál). Svarový kov se skládá z dlouhých krystalů narůstajících směrem od svarového kovu do středu svaru. Krystaly jsou velké, což způsobují vysoké teploty.

Oblast částečného natavení je rozhraní základního materiálu a svarového kovu. V této oblasti nemůže dojít v důsledku rychlého ochlazování k pravidelnému rozložení jednotlivých složek taveniny. Vzniká zde oblast chemicky nestejnorodá, která obsahuje řadu nečistot a má velký vliv na vlastnosti svarového spoje.

Oblast přehřátí základního materiálu. Teplota této oblasti překračuje teplotu intenzivního růstu austenitických zrn. Pro mikrolegované oceli je tato teplota asi 1250°C [20 str. 11]. V důsledku růstu zrn dochází k výraznému zhoršení mechanických vlastností.

Oblast normalizace leží v diagramu Fe-Fe₃C nad teplotou A₃, kde dochází k normalizačnímu vyžhání, přičemž při teplotách těsně nad A₃ je zrno nejjemnější a směrem k vyšším teplotám se zrno zvětšuje.

Oblast částečné překrystalizace v diagramu Fe-Fe₃C leží v oblasti rozmezí teplot A₁ a A₃, zde dochází k neúplné polymorfní přeměně.

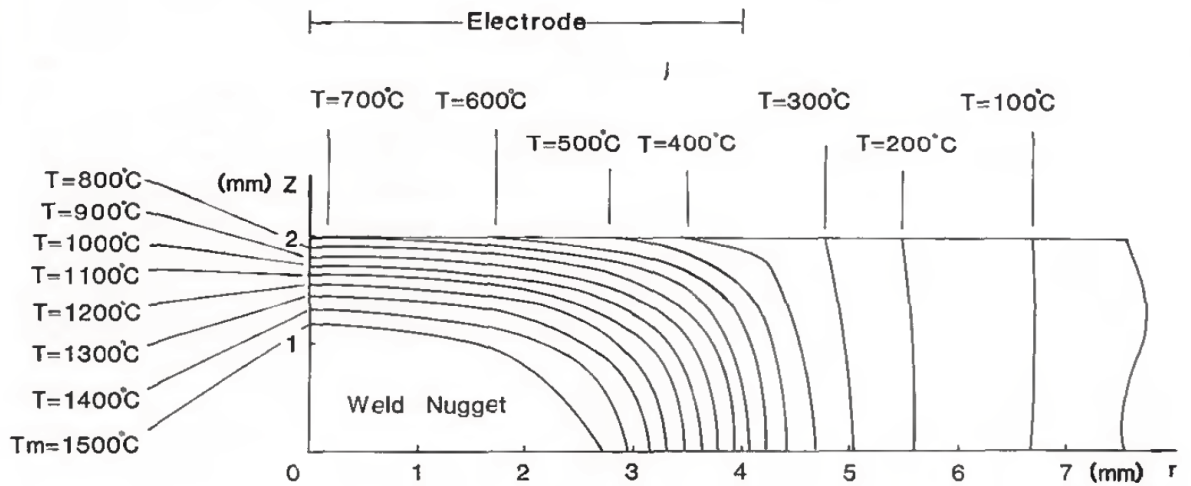
V dalších oblastech je v podstatě zachována původní struktura zejména u nízkouhlíkových ocelí se struktura a velikost zrn nemění. V oblasti teplot 150 až 300°C může u nízkouhlíkových ocelí dojít k tzv. stárnutí oceli, zejména v místech, která byla tvářena za studena (např. ohyb). Příčinou stárnutí je intersticiální dusík a také jeho nitridy a karbo-nitridy ve formě precipitátů. Důsledkem je pokles plasticity [22 str. 32].

Tepelně ovlivněná oblast u bodového svaru je, co se týče rozdělení jednotlivých oblastí, v podstatě stejná jako na Obr. 22, liší se pouze velikostmi jednotlivých oblastí a rozmístěním. Orientační šířky oblastí podle metody svařování jsou uvedeny v Tab. 17. Příklad rozložení oblastí v TOO bodového svaru plechu tloušťky 2mm je na obrázku, osa Z je střed svaru. Na následujícím Obr. 23 jsou jednotlivé struktury HSLA oceli společně s diagramem Fe-Fe₃C.

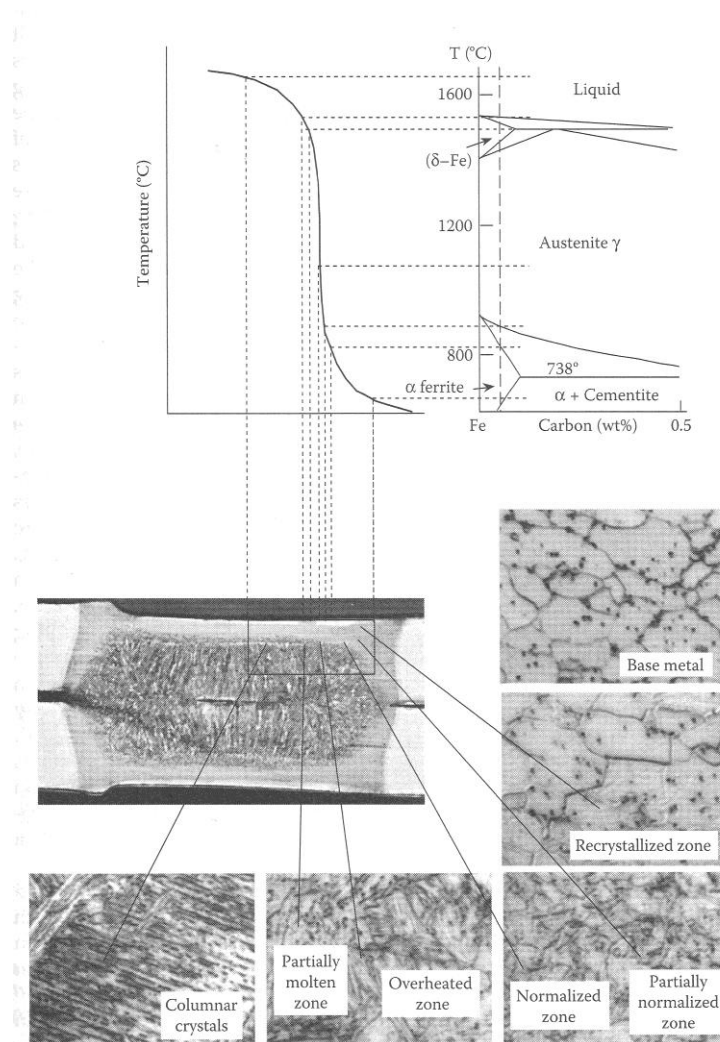
Metoda svařování ⁵	Šířka TOO [mm]		
	nad A ₁	nad A ₃	přehřátá oblast
111	3 – 8	0,3 – 1	0,1 – 0,3
135, 131	3 – 8	0,3 – 1	0,1 – 0,3
121	3 – 15	0,3 – 2	0,1 – 05
72	5 – 50	1 – 10	0,5 - 5

Tab. 17 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO [20 str. 11]

⁵ Značení metody dle ČSN EN ISO 4063: 111 - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou; 135,131 – obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním/aktivním plynu; 121 – svařování pod tavidlem drátovou elektrodou; 72 – elektrostruskové svařování.



Tab. 18 Tepelně ovlivněná oblast bodového svaru [23]



Obr. 23 TOO bodového svaru včetně mikrostruktury [24 str. 10]

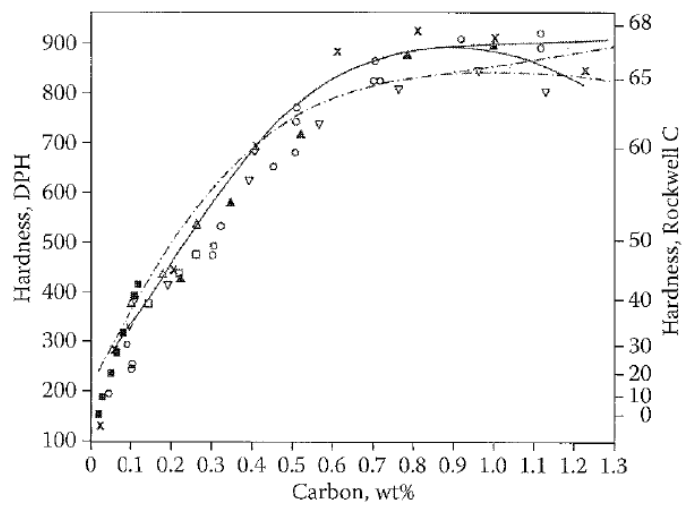
4.4. Uhlíkový ekvivalent

Vliv chemického složení na svařitelnost ocelí se vyjadřuje pomocí uhlíkového ekvivalentu CE. Tento ekvivalent vyjadřuje příspěvek jednotlivých prvků na kalitelnost oceli. Čím se ocel

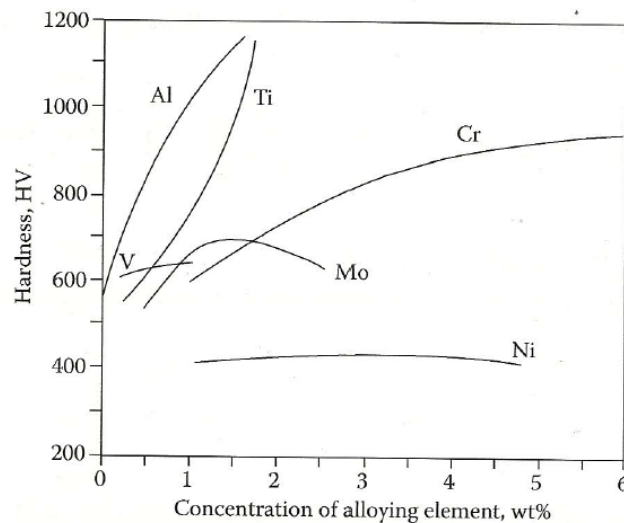
snadněji zakalí v TOO svarového spoje, tím obtížněji se daná ocel svařuje. Dominantní úlohu ve všech vyjádřeních uhlíkového ekvivalentu má obsah uhlíku. Do některých vztahů je zahrnuta i tloušťka svařovaného materiálu. Čím je hodnota CE vyšší, tím je svařitelnost horší. Obsahy jednotlivých prvků se do vzorců pro výpočet CE dosazují v hm% [20 str. 98].

Mikrotvrdot v TOO stoupá téměř úměrně s obsahem uhlíku. Tato závislost je znázorněna viz.:Graf 2. Symboly v grafu značí různé zdroje dat.

Na mikrotvrdot v TOO mají vliv i ostatní prvky. Vliv jednotlivých prvků se liší, jak je vidět viz.:Graf 3. Při sestavování vzorců pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je odlišný vliv prvků zohledněn. Jelikož chemické složení oceli se může lišit, neexistuje jeden univerzální výpočet uhlíkového ekvivalentu. Jak se postupně vyvíjejí nové materiály s novým složením, mění se také postup výpočtu uhlíkového ekvivalentu.



Graf 2 Dole hm% uhlíku, vlevo tvrdost dle Vickerse, vpravo tvrdost dle Rockwella [24 str. 12]



Graf 3 Dole koncentrace, vlevo tvrdost dle Vickerse; základní prvky: 0,25% C, 0,30% Si, 0,70% Mn [24 str. 13]

Podle původní ČSN 051310 se hodnota CE vypočítala takto:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad (1)$$

[hm%] (*s* – tloušťka materiálu)

Tato rovnice (1) platí pro materiály do obsahu prvků v hm%: C=0,22%, Mn=1,6%, Cr=1%, Ni=3,0%, V=0,14%, Cu=0,30% (20 str. 99).

Vzorec navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW) pro oceli s C<0,25%:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\text{hm}\%] \quad (2)$$

Vzorec podle Ito a Bessyo platný pro mikrolegované oceli s C<0,22hm%:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad [\text{hm}\%] \quad (3)$$

Vzorec podle Yurioka platný pro mikrolegované oceli s C<0,26hm%:

$$CE = C + A(C) \cdot \left\{ 5 \cdot B + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{Nb}{5} + \frac{V}{5} \right\} \quad [\text{hm}\%]$$

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20 \cdot (C - 0,12)] \quad (4)$$

Když neznáme obsah některých prvků lze použít zjednodušený vzorec:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + 0,05 \quad [\text{hm}\%] \quad (5)$$

V případě, kdy budou svařovány dva různé materiály, se uvažuje uhlíkový ekvivalent vyšší hodnoty.

4.5. Odporové svařování

4.5.1. Princip odporového svařování [19 str. 180]

Odporové svařování patří do skupiny tlakového svařování. Průchodem proudu za současného působení tlaku vzniká v místě styku dvou materiálů odporové teplo, které způsobuje natavení materiálu potřebné pro vznik svaru. Odporové teplo vzniká průchodem proudu vysoké

intenzity (až 100 000 A) a nízkého napětí (5 až 15 V). Množství tepla vzniklého průchodem proudu je dáno Jouleovým-Lenzovým zákonem:

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

(6)

kde:	Q	množství vzniklého tepla	[J]
	R	celkový odpor svarového spoje	[Ω]
	I	svařovací proud	[A]
	t	čas svařování (doba průchodu svařovacího proudu)	[s]

Celkový proud je součtem přechodových odporů a odporů svařovaných materiálů. V místě, kde je největší odpor mezi povrchem svařovaných materiálů, se vyvine nejvíce tepla, a společným působením tlaku vznikne bodový svar [25].

4.5.2. Parametry odporového svařování [19 stránky 180, 181]

Parametry odporového svařování mají rozhodující vliv na kvalitu svarového spoje. Těmito parametry jsou: svařovací proud, čas a tlak. Celkový odpor nelze během svařovacího procesu příliš měnit (je dán hlavně druhem svařovaného materiálu, jakostí povrchu svařovaných součástí a elektrodami). Potřebné množství tepla lze získat pomocí tzv. měkkého svařovacího režimu nebo pomocí tzv. tvrdého svařovacího režimu.

Měkký svařovací režim: nízký svařovací proud (proudová hustota 200 A/mm²), dlouhý svařovací čas (asi 25 period 0,5 až 1,5 s), nižší tlak (do 1000 N).

Díky delším časům dochází u měkkého režimu k větším ztrátám energie, způsobeným vedením a sáláním tepla do okolí. Elektrody jsou více tepelně namáhány, a proto se také rychleji opotřebují. Deformace svarového spoje jsou větší, delším působením tepla vzniká hrubozrnná struktura, která je méně pevná. Výhodou tohoto způsobu je menší riziko zakalení materiálu. Tímto způsobem lze svařovat i znečištěné nebo deformované součásti [25].

Tvrký svařovací režim: vysoký svařovací proud (proudová hustota 200 – 500 A/mm²), velmi krátký svařovací čas (3 až 8 period – 0,16 s), vyšší tlaky (cca 2000 N).

Při větších tlacích je menší přechodový odpor mezi elektrodou a materiálem, proto se elektrody méně zahřívají a díky tomu se méně opotřebovávají. Tento režim má vyšší účinnost a produktivitu. Tím, že je TOO menší, vznikají menší deformace. Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady (svařovací stroj musí být vybaven hydraulickým nebo pneumatickým systémem, který vyvodí potřebný tlak). Je nutná pečlivější příprava svařovaných dílů. V současné době se v hromadné výrobě používá převážně tvrdý režim [25].

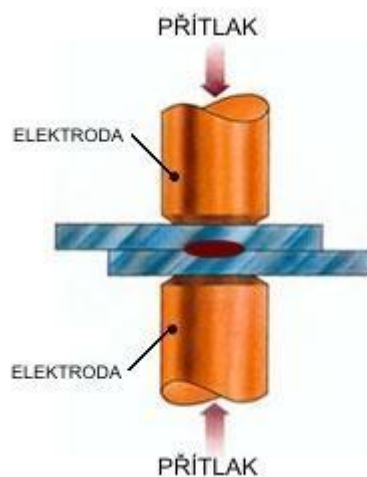
Svařovací proud a tlak se během svařovacího procesu mění v určité časové závislosti. Tyto změny v průběhu času se nazývají svařovací cykly. Nejjednodušší cyklus se používá pro svařování uhlíkových ocelí. Pro svařování větších tloušťek či legovaných materiálů se používají kombinované cykly [19 str. 181].

Odporovým svařováním lze svařovat uhlíkové oceli, legované oceli, slitiny hliníku, mosaz a bronz. Svařování se rozděluje na bodové, švové, svařování na lisech (výstupkové) a stykové (tlakem a odtavením) [19 str. 181].

4.5.3. Rozdělení odporového svařování

Bodové svařování

Bodové svařování je nejpoužívanějším druhem odporového svařování. V současnosti je v sériové výrobě vozů nejpoužívanější metodou odporové bodové svařování. Například na jednom voze Škoda Octavia III. generace vyráběné v Mladé Boleslavi je asi 5000 bodových svarů. Je to v současnosti nejefektivnější způsob svařování při výrobě automobilů. Největší výhodou této technologie je vysoký podíl automatizace. Automatizace výroby je cesta jak snižovat výrobní náklady, automatizací se také dosahuje lepší kvality vyráběných vozů. Princip metody viz.: Obr. 24.

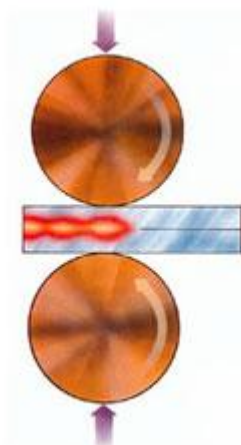


Obr. 24 Odporové bodové svařování (26)

Metodou bodového svařování se obvykle svařují plechy tloušťky 0,4 až 5 mm někdy až 8 mm. Svařované plechy se vloží mezi elektrody, které jsou bez proudu a napětí. Poté jsou plechy přitlačeny elektrodami a zapne se proud. V místě styku plechů vznikne největší přechodové teplo, protože v těchto místech je přechodový odpor největší. V místě s největším přechodovým odporem dojde k natavení plechů a po vychladnutí se vytvoří nerozebíratelný spoj. V místě svaru vznikne tzv. svarová čočka [19 str. 181][26].

Švové svařování

Svařované plechy jsou u této metody odporového svařování stlačovány dvěma měděnými kladkami, kterými je také přiváděn proud do materiálu. Odvalováním kladek s přerušovaným průchodem proudu se vytvoří řada bodů, buď jednotlivých, nebo vzájemně překrytých. Pracovní plocha kladky je buď rovná při svařování ocelových plechů, nebo se zaobljuje při svařování neželezných kovů, zejména hliníku a jeho slitin [26]. Princip metody viz.: Obr. 25.

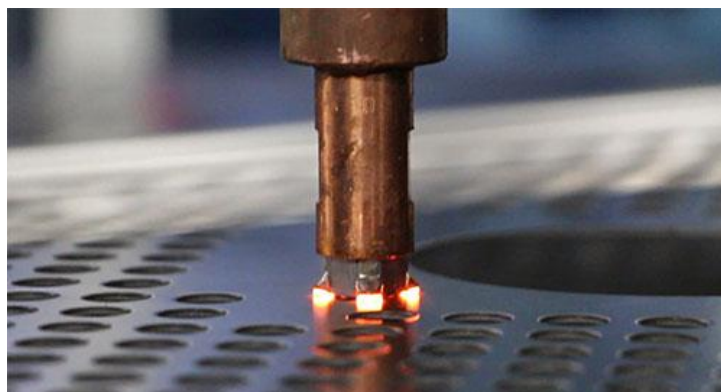


Obr. 25 Odporové švové svařování [26]

Svařování na lisech (výstupkové)

Princip tohoto svařování je naznačen na Obr. 26. Na jedné ze svařovaných součástí se vytvoří výstupek nebo více výstupků. Součásti jsou k sobě přitlačeny lisem, jehož čelisti jsou zároveň elektrodami. Všechny výstupky na sebe musejí dosednout. Podobně jako u bodového a švového svařování dojde v místě styku výstupků s protilehlým materiálem ke vzniku tepla způsobeného přechodovým odporem a dojde k natavení materiálu a jeho následnému spojení [26].

Tento způsob je vhodný pro sériovou a hromadnou výrobu, zejména drobnějších součástí. Přivařují se takto speciálně upravené šrouby a matice k plechu. Ve svařovacím lisu lze součásti i vyžít. Touto technologií lze dosáhnout vysoké produktivity. Aplikace výstupkového svařování je na Obr. 26.



Obr. 26 Přivařování matice k plechu [27]

Odporové stykové (tlakem a odtavením)

Podle způsobu ohřevu místa svaru se rozeznává svařování stykové tlakem nebo odtavením. Při svařování stykovém se svařované součásti přitisknou k sobě a nechá se jimi procházet proud. Dojde podobně jako u ostatních metod odporového svařování ohřevu materiálu v místě styku působením přechodového odporu. Jakmile je dosaženo potřebné teploty, materiál je plastický a oba díly se působením tlaku spojí. Při tomto dojde k napěchování (vydutí) materiálu. Před

svařováním je nutno součásti obrobit, aby byly plochy v místě spoje rovné a vzájemně rovnoběžné. Příprava součásti je náročná, jakost svaru není příliš dobrá, proto se tato metoda příliš nepoužívá [19 str. 185].

Většinou se používá metoda odtavení, kdy hlavním zdrojem je elektrický oblouk, který vznikne v mezeře mezi svařovanými součástmi. V místě přiblížení svařovaných součástí se materiál postupně ohřívá na potřebnou teplotu a postupně se vzájemně přibližuje, až dojde k natavení a spojení součástí. Při tomto svařování musí konstruktér počítat s přírůstkem na odtavení materiálu, součásti musí být stejného průřezu, případně se musí konstrukčně upravovat [19 str. 185].

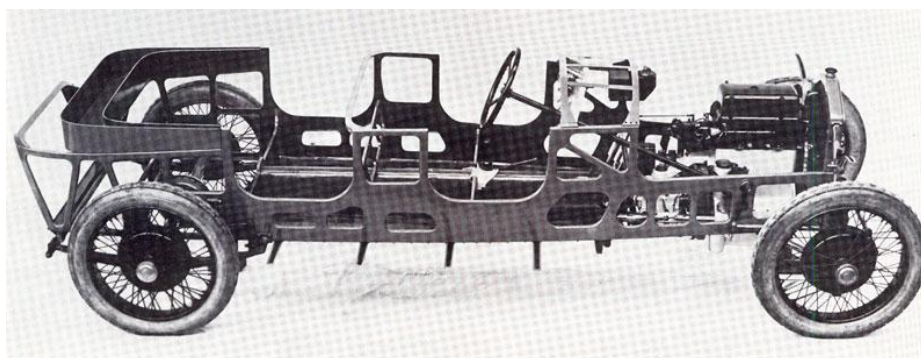
Nejčastěji se metoda stykového odporového svařování odtavení v současnosti používá při svařování kolejnic [19 str. 185].

5. Odporové bodové svařování

5.1. Odporové bodové svařování v automobilovém průmyslu

Odporového bodového svařování je v současné době nejpoužívanější metodou při výrobě karoserie vozu. Mimo této metody se používají i další, např.: svařování v ochranných atmosférách nebo svařování laserem. Často se tato metoda spojení plechů bodovým svarem kombinuje s technologií lepení.

Konstrukce vozu se postupně vyvíjela, v současné době se u osobních automobilů využívá samonosné konstrukce. Na této konstrukci jsou přímo upevněny další součásti vozu. Prvním vozem se samonosnou kosterou byla Lancia Lambda vyrobená již v roce 1922 viz: Obr. 27, tato konstrukce se postupně vyvíjela až do dnešní podoby. Dnešní samonosná konstrukce je svařena s plechů různé tloušťky a různých mechanických vlastností, tvořící jeden celek – svařence (27).



Obr. 27 Lancia Lambda vyrobená v roce 1922 (27)

Nejvýhodnější metodou svařování takovéto konstrukce složené s plechů je metoda odporového bodového svařování. Jednou ze zásadních výhod pro použití v automobilovém průmyslu je možnost automatizace celého procesu svařování. Automatizace přináší velké úspory nákladů, přesnost a kvalitu.

5.2. Parametry svařování

Pro svařování vysokopevných plechů se používá tzv. tvrdý svařovací režim. Výhodou tohoto režimu je jeho rychlost a menší TOO než u tzv. měkkého režimu. Faktory ovlivňující nastavení svařovacích parametrů jsou zejména tloušťka svařovaných plechů, materiál a také povrchová antikoroziční úprava. Při svařování se předpokládá, že spojované materiály jsou dokonale očištěny. Většina dnes vyráběných dílů je chráněna proti korozi, nejpoužívanější metodami jsou povrchové úpravy na bázi zinku, ale také hliníku a křemíku. Přehled nejpoužívanější povrchových úprav a jejich značení je v Tab. 19.

Povrchová úprava	Značka (přidává se ke značce materiálu)
Žárově pozinkováno	+Z nebo +GI
Elektrolyticky pozinkováno	+ZE nebo +EG
Zinkový povlak difúzně nanesený	+ZF nebo +GA
Žárově hliníkováno	+A
Povlak ze slitiny Al-Si	+AS

Tab. 19 Nejpoužívanější metody povrchových úprav [9]

Tyto povrchové úpravy mají vliv na svařovací proces. Parametry svařování povrchově upravených plechů se liší od neupravených plechů. V Tab. 20 jsou uvedeny typické svařovací parametry pro ocel bez povrchové úpravy a oceli s povrchovými úpravami. Povrchová úprava jednak ovlivňuje svařovací parametry. Působením Joulova tepla dochází k metalurgické interakci a mezi svařovaným plechem a elektrodou. Proto elektrické a tepelné procesy ovlivňují opotřebení a životnost elektrod (čepiček). Elektrody jsou proto pravidelně čištěny po určitém počtu svarů.

Svařovací parametr	Povrchová úprava			
	Ocel bez povrchové úpravy	Žárově pozinkováno	Elektrolyticky pozinkováno	Zinkový povlak nanesený difuzním žháním
Svařovací síla [kN]	2,5	2,8	2,8	2,7
Svařovací proud [kA]	8	10	9,5	9
Svařovací čas [cykly]	8	10	10	8

Tab. 20 Svařovací parametry odporového bodového svařování; přeloženo, upraveno [29 str. 246]

Čepičky se po určitém počtu svarů vymění, tyto počty svarů se mohou výrazně lišit podle použité technologie povrchové úpravy. Nejdelsí životnost čepiček je při svařování povrchově nechráněného povrchu. V Tab. 21 jsou uvedeny orientační životnosti čepiček.

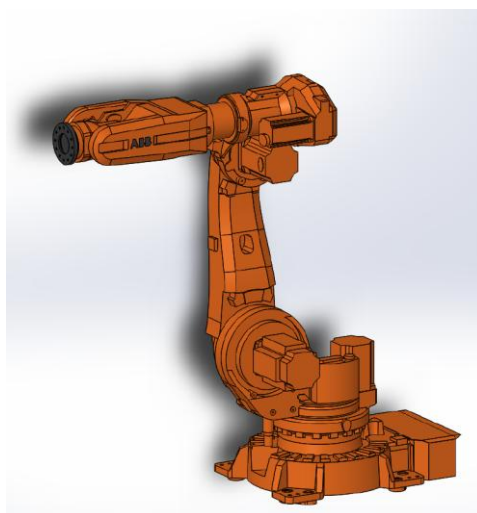
Povrchová úprava oceli	Životnost elektrody [počet svarů-přibližně]
Bez povrchové úpravy	10 000
Elektrolyticky pozinkovaná	2000
Žárově pozinkovaná	1000
Zinkový povlak nanesený difúzním žháním	2000 – 3000

Tab. 21 Životnost elektrod; přeloženo, upraveno [29 str. 248]

5.3. Konstrukce svařovacích strojů

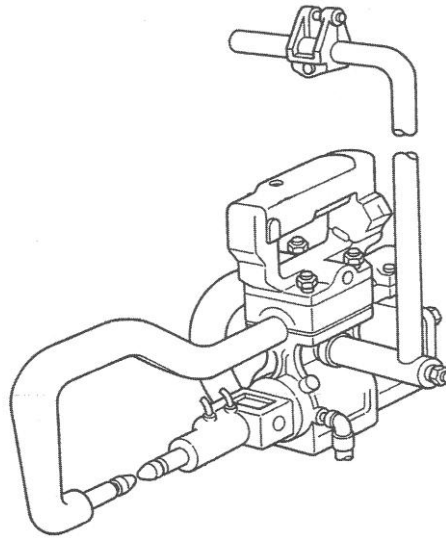
Svařování probíhá pomocí průmyslových robotů různých konstrukcí. Na rameni robota jsou připevněny svařovací kleště. Automobilový průmysl je právě odvětví kde se jako první začalo používat robotizované svařování. Důvod byl jediný potřeba výrobců zefektivnit a zkvalitnit výrobu velkých sérií vyráběných dílů. Bylo to právě odporové bodové svařování, které se začalo používat jako první. Později se průmysloví roboti začali používat pro další technologie svařování, ale i pro jiné účely jako je např. lepení, tváření, manipulaci, povrchové úpravy a v neposlední řadě měření a kontrola (28).

Svařovací roboty můžeme rozdělit do dvou základních skupin na roboty pro obloukové svařování roboty pro odporové bodové svařování. Hlavní rozdíl je v nosnosti robotů, u obloukového svařování si obvykle vystačíme s nosností 4 – 8 kg, kdežto u odporového svařování se obvykle používají roboti s nosností 120 – 150 kg což odpovídá hmotnosti svařovacích kleští [30]. Typická konstrukce robota použitelná pro odporové bodové svařování je na Obr. 28.

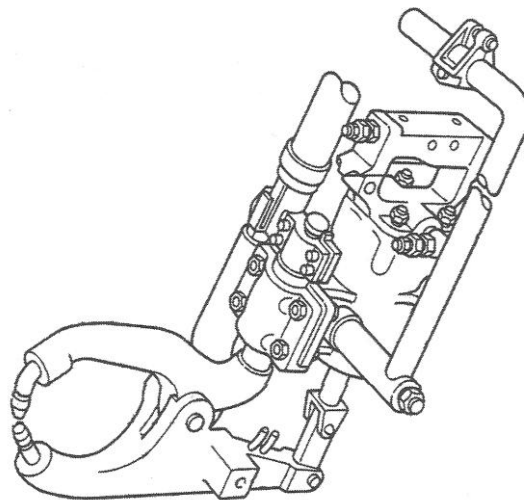


Obr. 28 Robot vhodný pro odporové svařování [30]

Používá se několik typů svařovacích kleští. Lze je rozdělit podle pohonu na hydraulické a pneumatické. Pneumatické jsou pomalejší. Konstrukčně se dají rozdělit na kleště typu C a kleště typu X. Používají se i jiné typy konstrukcí, ale tyto dva typy jsou nejpoužívanější, viz.: Obr. 29 a Obr. 30.

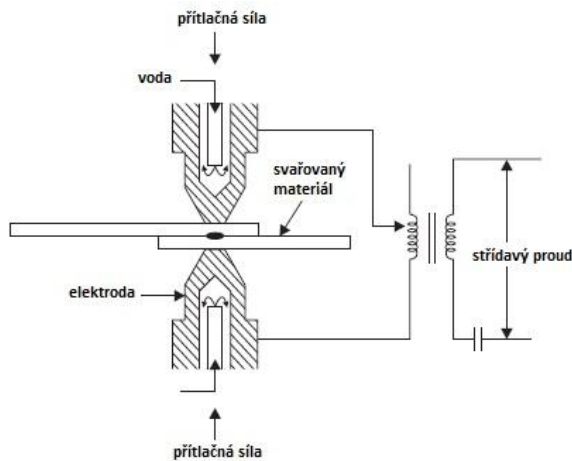


Obr. 29 Svařovací kleště typu C [24 str. 308]



Obr. 30 Svařovací kleště typu X [24 str. 21]

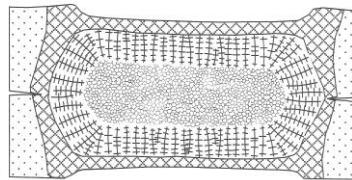
Svařovací kleště pro velkosériovou výrobu jsou kromě jiného vybaveny chladícím okruhem. Teplota elektrod by se při velkém množství svarů neustále zvyšovala a ovlivňoval by tak svar. Chladicí kapalina je přiváděna až do dutiny elektrod. Chladícím médiem bývá obvykle voda. Schéma fungování chlazení je na Obr. 31.



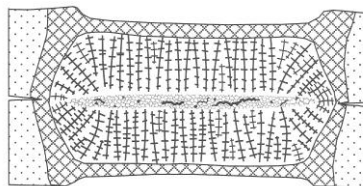
Obr. 31 Princip chlazení; přeloženo [31]

Svařovací robot na lince provádí obvykle v krátkém sledu více bodových svarů. V místě kontaktu svařovacích kleští a základního materiálu jsou tzv. čepičky. Tyto čepičky se při svařování zahřívají, proto je nutné je chladit. Chlazení je realizováno chladicí kapalinou přivedenou k čepičkám. Při nastavování parametrů svařování je nutné počítat s rychlostí ochlazování elektrod.

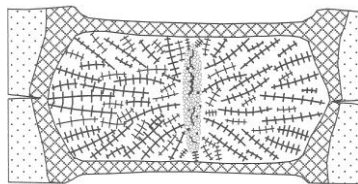
Teplota elektrod může nepříznivě ovlivnit strukturu teplem ovlivněné oblasti svaru. Na dalších obrázcích (Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34) je znázorněno, jak může ovlivnit rychlost ochlazování svaru jeho vnitřní strukturu [32 str. 2].



Obr. 32 Schéma struktury ideálně chladnoucího svaru [32 str. 3]



Obr. 33 Schéma struktury svaru, který je rychleji ochlazován elektrodami [32 str. 3]

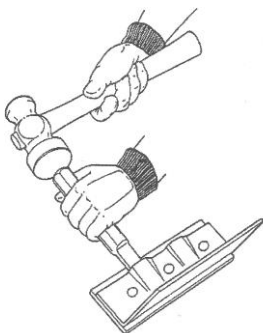


Obr. 34 Schéma struktury svaru, který je ochlazován rychleji základním materiálem [32 str. 4]

5.4. Kontrola svarů

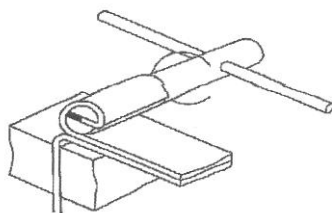
Jako v každém výrobním procesu je potřeba i u svařování vysokopevných plechů kontrolovat kvalitu svarů. Nelze provádět kontrolu každého svaru. Jednak by muselo být použito nedestruktivních metod a ty jsou velmi nákladné, zejména při představě kontroly několika tisíc svarů na jednom automobilu. Proto se obvykle používá namátková kontrola svarů, a to destruktivními metodami. Mezi destruktivní metody patří i prozkoumání mikrostruktury výbrusu svaru pod mikroskopem. Na základě zkoušek se stanovují parametry svařování nejvhodnější pro daný materiál a technologii. Každý výrobní závod má vypracované postupy jak vybírat a kontrolovat svary.

Často používanou zkouškou je tzv. odsekávací metoda pomocí sekáče. Zkouší se, zda svar vydrží vniknutí sekáče. Princip je na Obr. 35.



Obr. 35 Odsekávací metoda (Chisel test) [24 str. 140]

Další často používaná je odvalovací metoda, viz.: Obr. 36. Princip je podobný jako u předchozího způsobu, avšak v tomto případě vždy dojde k odtržení, a měří se velikost svaru a tvar trhliny po odtržení. Další možnou metodou kontroly je výbrus svaru a prozkoumání jeho mikrostruktury pod mikroskopem. Tato metoda zkoumání mikrostruktury svaru bude popsána podrobněji v experimentální části této práce.



Obr. 36 Odvalovací metoda (Peel test) [24 str. 140]

6. Experimentální část

6.1. Popis zkoumaných vzorků

Vzorky byly z hlediska chemického složení prozkoumány kolegyní z jiné univerzity. Svaření vzorků také zajišťovala kolegyně. V experimentu jsem se věnoval prozkoumání mikrostruktury svaru a jeho okolí a také povrchové vrstvě v místě svaru.

Zkoumané vzorky byly dodány firmou Škoda Auto a.s. Mladá Boleslav (dále jen Škoda Auto). Jednalo se o části plechů tažených dílu z oceli 22MnB5, které jsou vyráběny ve firmě Benteler. V závodech Škoda Auto se tváření těchto dílů neprovádí, díly z této oceli se vozí již připravené k montáži a svařování. Povrchová úprava těchto plechů je Al-Si, tento povrch chrání plechy před oxidací při tváření za tepla.

Mechanické vlastnosti nebyly zkoumány, ale měly by se pohybovat okolo meze pevnosti 1500 MPa a meze kluzu 1100MPa. Tažnost těchto materiálu je velmi nízká, pohybuje se okolo 5 %. Materiál vzorku působil velmi pevně při relativně mále tloušťce plechů a nebylo možné je rukou ohnout. Vzorky pro svařování se museli uříznout z větších částí na menší (praktičtější) vzorky. Vzhledem k vlastnostem materiálu nebylo možné tyto vzorky stříhat, proto musely být nařezány za pomoci ruční brusky.

Chemické složení obsahy C a B jsou hodnoty dodané firmou Škoda Auto. Ostatní hodnoty byly změřené přenosným spektrometrem Delta Premium:

C [%]	B [%]
0,22	0,05

Tab. 22 Hodnoty oceli 22MnB5 od Škoda Auto a.s.

Fe [%]	Al [%]	Si [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]
54,08	41,25	3,92	0,05	0,12	0,41

Tab. 23 Chemické složení oceli 22MnB5 s povlakem Al-Si, naměřené spektrometrem

Fe [%]	Si [%]
98,45	0,5

Tab. 24 Chemické složení oceli 22MnB5 bez povlaku Al-Si, naměřené spektrometrem

6.2. Průběh experimentu

Příprava a zkoumání vzorků probíhala v laboratoři Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze (UMI ČVUT) pod odborným dohledem pí. Vlasty Voňkové techničky laboratoří UMI ČVUT.

Zkoumání mikrostruktury vzorků lze rozdělit na několik fází, stejně tak tomu bylo i v tomto případě. Jednotlivé fáze jsou tyto:

- **Uříznutí vzorku** na velikost vhodnou pro zkoumání a rozříznutí zkoumaného svaru tak aby zůstala polovina svaru. Pila je opatřena chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění řezu, které by mohlo ovlivnit zkoumaný vzorek. Byla použita METALOGRAFICKÁ PILA LECO VC50.
- **Zalisování vzorků.** Vzorky se zalévají do různých pryskyřic nebo se mohou zalisovat do plastu. V daném případě to byl fenolformaldehydový polykondenzát, známý spíše pod obchodním názvem Bakelit™, běžně označován jako „BAKELIT“. Vzorky byly zalisovány v lisu na LECO PR-4. Zalisované vzorky jsou Obr. 37.



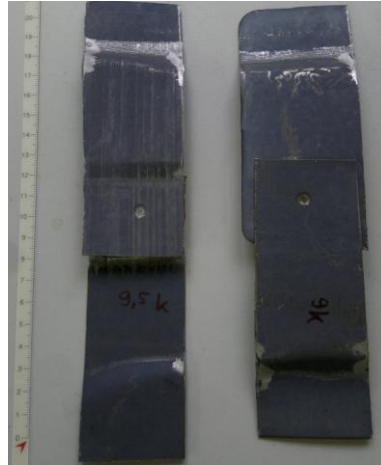
Obr. 37 Zalisované vzorky

- **Broušení.** Aby bylo možné zkoumat vzorek, je potřeba zkoumanou plochu nejprve obrousit na potřebnou drsnost, bez viditelných rýh. Brouší se na speciální brusce určené pro broušení vzorků. Do brusky se vkládají brusné papíry o různé zrnitosti, bruska je opatřena přívodem vody. Broušení vzorku začíná nejhrubším brusným papírem. Při jedné zrnitosti se vzorek obrousí nejprve v jednom směru, poté co zmizí rýhy, otočí se o 90° a opět se brouší. Poté se vymění za jiný s jemnější zrnitostí. Pokračuje se postupně až k nejjemnější zrnitosti. V případě tohoto experimentu se začalo u zrnitosti 80 a postupně se pokračovalo až k zrnitosti 1000.
- **Leštění.** Aby byl vzorek dokonale připraven, tak se ještě musí leštit. Leštění se provádělo stejně způsobem jako broušení, ale použil se leštící kotouč. Na kotouč se nanasla leštící emulze o zrnitosti 3 μ m.
- **Leptání.** Pro zvýraznění mikrostruktury vzorku je potřeba vzorek naleptat. Vzorek se leptal Nital⁶ po dobu cca 10 minut. Poté bylo třeba vzorek osušit. Následně bylo možné přejít ke zkoumání vzorku. Vzorek bylo třeba několikrát sušit. Zbytky tekutin po broušení, leštění a leptání zůstaly mezi plechy a postupně se uvolňovaly. Sušení bylo třeba několikrát zopakovat, a i přesto se objevily na fotkách zkoumaného vzorku skvrny. Jednalo se o viditelné skvrny. Na prozkoumání mikrostruktury to však nemělo zásadní vliv.
- **Prozkoumání** a nafocení vzorku pod mikroskopem.

⁶ Nital je 3% roztok HNO₃ v etanolu.

6.3. Vzorky

V rámci experimentu se zkoumaly dva vzorky, jednalo se o plechy tloušťky 1,7mm svařené pomocí bodových svarů. Jednalo se o vysokopevný materiál 22MnB5 s povrchovou úpravou Al-Si. Tyto dva vzorky jsou uvedeny na Obr. 38.



Obr. 38 Vzorky celkový pohled

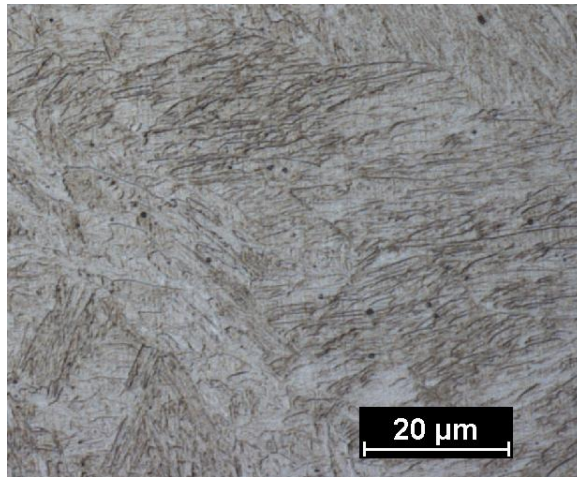
6.4. Svařovací parametry

Označení vzorku	Svařovací proud [kA]	Čas [ms]	Přítlačná síla [N]
9K	9	200	2600
9,5K	9,5	200	2600

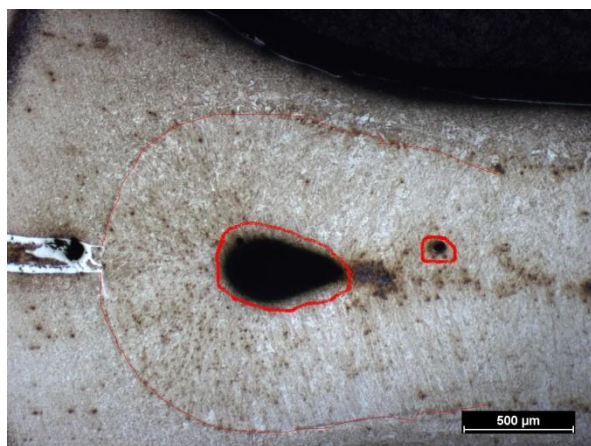
Tab. 25 Svařovací parametry

6.5. Zhodnocení mikrostruktury

Mikrostruktura zkoumaných vzorků je martenzitická. V oblasti svaru je zrno hrubší viz.:Obr. 39 a ze vzdáleností od středu svaru se zrno zmenšuje, jemnější zrno je vidět na Obr. 42. Rozeznatelné jsou také oblasti svaru. Zřetelná je zejména oblast taveniny. U vzorku 9,5K se vytvořily v oblasti taveniny bubliny, po výbrusu viditelné pouhým okem viz.: Obr. 40.

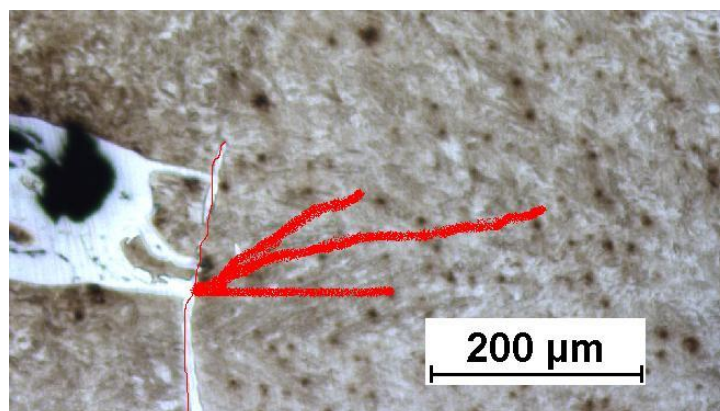


Obr. 39 Mikrostruktura v oblasti taveniny



Obr. 40 Bodový svar 9,5K; zvýrazněna hranice taveniny a bubliny

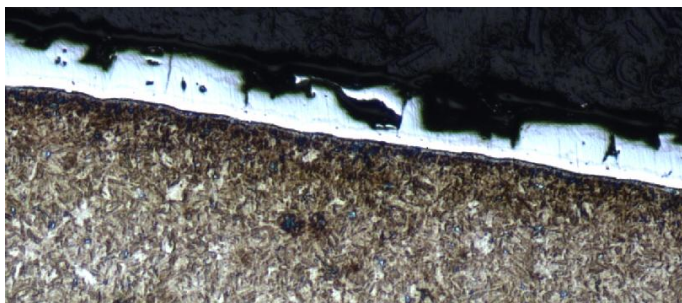
Na snímcích je možné vidět hnědo-černé skvrny. Jedná se s největší pravděpodobností o zbytky vody, která se udržela v mezeře mezi plechy i přesto, že se vzorky sušily. Na dalším snímku je viditelná prasklina, vzniklá pravděpodobně při tuhnutí svaru vlivem pnutí. Tato trhlina se objevila u obou zkoumaných vzorků.



Obr. 41 Trhlina na hranici taveniny

6.6. Zhodnocení vrstvy Al-Si

Na dalších snímcích je viditelná povrchová vrstva Al-Si. V místech mimo svar byla povrchová vrstva kompaktejší. V místě kontaktu elektrody a materiálu jsou viditelné rozdíly v tloušťce ochranné vrstvy. Jak se předpokládalo v místě kontaktu došlo k poškození povrchové vrstvy. Na Obr. 42 je vrstva v oblasti mimo TOO a na Obr. 43 je vrstva v oblasti bodového svaru.



Obr. 42 Vzorek 9K povrchová vrstva mimo oblast TOO



Obr. 43 Vzorek 9K povrchová vrstva v místě kontaktu s elektrodou

6.7. Zhodnocení experimentu

V rámci experimentu se podařilo ověřit několik předpokladů:

1. Při bodovém odporovém svařování dochází v místě kontaktu elektrody s materiálem k poškození ochranné vrstvy Al-Si.
2. Mikrostruktura se vlivem svařování změní, dojde ke zhrubnutí zrna.
3. Svařování vysokopevných ocelí může být problematické, u vzorku 9,5K se objevily bubliny a u obou vzorků trhliny na hranici taveniny. Uhlíkový ekvivalent těchto ocelí je 0,515, což naznačuje, že svařování by mohlo být problematické.

7. Závěr

Problematika svažitelnosti plechů se zpočátku jevila jako velmi úzký problém zaměřený pouze na svažitelnost jako takovou. V průběhu vypracování práce a hledáním dalších informací jsem zjistil, že tato problematika zasahuje do více oblastí. Už samotná svažitelnost je velmi široký pojem, ovlivňuje ji mnoho faktorů. Nelze tedy posuzovat svažitelnost vysokopevných plechů například pouze z pohledu materiálového. Při hledání optimální volby materiálu a technologie svařování je nutné brát v potaz tyto faktory: svažitelnost materiálu, možnost automatizace svařování, cenu materiálu, mechanické vlastnosti materiálu, hmotnost a odolnost proti korozi.

Tímto směrem se ubírá i současný vývoj nových materiálů. Výsledkem těchto snah jsou právě vysokopevné plechy na bázi B. I přes všechny snahy nejsou tyto materiály dokonalé a je potřeba je stále zkoumat a hledat další řešení.

V rámci experimentu jsem si ověřil, že při odporovém bodovém svařování dochází k poškození ochranné vrstvy materiálu, jelikož se zkoumané materiály používají u části vozu, které nejsou přímo vystaveny dešti nebo posypové soli, jeví se i takto narušená vrstva jako dostačující.

Větší problémy způsobuje samotný materiál a jeho svažitelnost, podle uhlíkového ekvivalentu se ocel 22MnB5 pohybuje na hranici svažitelnosti, proto jsou u těchto ocelí nastaveny parametry svařování tak, že v rámci svařovacího cyklu se místo svaru předejde.

Ocel 22Mn5B je tedy svažitelná, ale je potřeba mít přesně zmapovaný rozsah svařovacích parametrů a mít nastavené mechanismy, jak tyto parametry kontrolovat v průběhu výroby. Jak se tedy ukazuje, je potřeba s vývojem nových materiálů připravovat i spolehlivé postupy kontroly v samotném průběhu výroby.

8. Zdroje

1. **Wojcik, Rudolf.** Bakalářská práce. *Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
2. **Ulfketel, Huddle Roy Alfred.** *Mild steel.* US2901346 (A) USA, 25. srpen 1959. Patent.
3. **Janovec, Jiří, Cejp, Jiří a Seidl, Josef.** *Perspektivní materiály.* Praha : ČVUT v Praze, 2008.
4. **Průcha, Vojtěch.** Diplomová práce. *Vývoj mikrostruktury vícefázové oceli s TRIP efektem.* Plzeň : ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2013.
5. **Jonas, John Joseph.** *Interstitial free steels.* WO9321351 Kanada/McGill University, 28. říjen 1993. Patent.
6. **Machek, Václav a Sodomka, Jaromír.** *Nauka o materiálu 3.část - Speciální kovové materiály.* Praha : ČVUT v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
7. **CHEN, Yin-li, a další.** Effects of Rolling Parameters on Texture and Formability of Hight Strenght Ultra-Low Carbon BH Steel. *Journal of iron and steel research, International.* Vol. 20, 2013.
8. **ArcelorMittal.** [Online] [Citace: 14. prosinec 2014.]
<http://automotive.arcelormittal.com/Lexicon>.
9. **ASM International, The Materials Information Society.** [Online] [Citace: 14. prosinec 2014.]
http://www.asminternational.org/documents/10192/3466171/06117_Chapter%203B.pdf/a764507a-3499-4d23-b348-5536d31c0ba2.
10. **National Technical University KhPI.** European steel and alloy grades. *Database of Steels and Alloys.* [Online] [Citace: 14. prosinec 2014.] <http://www.steelnumber.com/index.php>.
11. **Karbasian, H. a Tekkaya, A.E.** A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology.* 2010, Sv. 210, 15.
12. **Průcha, Vojtěch.** *Diplomová práce - Vývoj mikrostruktury vícefázové oceli s TRIP efektem.* Plzeň : ZČU, 2013.
13. **Demeri, M.Y.** *Advanced Hight-Strenght Steels:Science, Technology and Applications.* [Online] 2013. [Citace: 12. červen 2015.]
<http://site.ebrary.com.ezproxy.techlib.cz/lib/techlib/detail.action?docID=10885557>.
14. **University, RWTH Aachen.** *Institut für Eisenhüttenkunde.* [Online] <http://www.iehk.rwth-aachen.de/index.php?id=317&L=2>.
15. **Favcars.** SAAB 9000. [Online] <http://www.favcars.com/wallpapers-saab-9000-turbo-1984-91-65310.htm>.

16. **Kapsa, Vlastimil, Ing.** Disertační práce. *Analýza parametrů kvality svarových spojů vysokopevných ocelí při stavbě karoserií*. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009.
17. **Šanovec, Jan.** MM Průmyslové spektrum. *Současný stav a perspektivy tváření za tepla*. [Online] březen 2011. [Citace: 10. červen 2015.]
<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasny-stav-a-perspektivy-tvareni-za-tepla.html>.
18. **Taylor, T, a další.** Maney Online. *Materials Science and Technology*. [Online] 2014. [Citace: 10. červen 2015.]
<http://www.maneyonline.com.ezproxy.techlib.cz/doi/full/10.1179/1743284713Y.0000000409>.
 ISSN: 1743-2847.
19. **Novotný, Jiljí, a další.** *Technologie 1 (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-02351-6.
20. **Koukal, Jaroslav a Zmydlený, Tomáš.** *Svařování I*. Ostrava - Poruba : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80 - 248 - 0870 - 6.
21. **Machek, Václav a Sodomka, Jaromír.** *Nauka o materiálu 2. část - Kovy a kovové materiály*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02568-3.
22. **Kovařík, Rudolf a František, Černý.** *Technologie svařování*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN - 978-80-7082-697-3.
23. **Han, Z, a další.** Welding Research Supplement. *Resistent Spot Welding: A Heat Transfer Study*. [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
http://www.aws.org/wj/supplement/WJ_1989_09_s363.pdf.
24. **Zhang, Hongyan a Senkara, Jacek.** *Resistance welding: fundamentals and applications, 2nd ed.* Boca Raton : Taylor & Francis Group, LLC, 2012. ISBN 978-1-4398-5371-9.
25. **Kolařík, Ladislav.** Studijní podklady. [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/odporove_svarovani.pdf.
26. **Schinkmann.** [Online] Svářecí technika, Schinkmann s.r.o.
<http://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>.
27. **Veterán auto cz.** [Online] [Citace: 12. červen 2015.] <http://veteran.auto.cz/auta/to-unese-karoserie%E2%80%A6/>.
28. **Roboti cz.** Vše a průmyslových robotech. [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
<http://www.roboti.cz/robotizace-v-prumyslu/svarovani-kovovyroba>.
29. **Davies, Geoff F.I.M., M.Sc.** *Materials for Automobile Bodies*. Great Britain : Butterworth-Heinemann, 2012.
30. **ČSN ISO10275.** *Kovové materiály-Plechý a pásy-Stanovení exponentu deformačního zpevnění*. Česká technická norma : autor neznámý, 2008.

31. **Svarforum.** www.svarforum. [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
<http://www.svarforum.cz/forum/viewtopic.php?id=5102>.
32. **4MechTech.** [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
<http://4mechtech.blogspot.cz/2011/11/spot-welding-process.html>.
33. **Zhang, Hongyan a Senkara, Jacek.** *Resistance welding: fundamentals and Applications.* Boca Raton : Taylor and Francis, 2006. ISBN 0-8493-2346-0.
34. **Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.** Cyklické namáhání VUT. *Přednáška.* [Online] [Citace: 12. červen 2015.]
<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska2.pdf>.

9. Přílohy

9.1. Seznam obrázků

Obr. 1 Tlumič nárazu přední výztuže z materiálu HSLA 300	10
Obr. 2 zádň příčník z materiálu Extragal®-coated HSLA 300.....	10
Obr. 3 Mikrostruktura oceli DP 600 (ferit+ostrůvky martenzitu)	11
Obr. 4 a) CG coarse grains; b) FG fine grains; c) UFG ultra fine grains	11
Obr. 5 Výztuha předního nárazníku DualPhase 1180	12
Obr. 6 Kolo tvářené za tepla DualPhase 600 (HDT580X)	12
Obr. 7 Tvářeno za tepla, materiál CP 800	13
Obr. 8 Křivky únavové pevnosti	13
Obr. 9 Výztuha bočních dveří z materiálu Complex Phase 1000 (tloušťka 2 mm).....	14
Obr. 10 závěsné rameno z materiálu Complex Phase 800 (tloušťka 3,1 mm)	14
Obr. 11 Mikrostruktura TRIP oceli; přeloženo	15
Obr. 12 Příčný nosník nárazníku z materiálu TRIP 780 (tloušťka 1,6 mm).....	16
Obr. 13 Martenzitická mikrostruktura	16
Obr. 14 Nejběžnější použití B-sloupek tloušťka 1,85mm.....	17
Obr. 15 Přehled materiálů používaných v konstrukci osobního automobilu; přeloženo	18
Obr. 16 Spring-back efekt	18
Obr. 17 SAAB 9000	19
Obr. 18 Díly vyráběné metodou hot stamping;	19
Obr. 19 Princip metody hot-stamping; přeloženo	20
Obr. 20 Snímek B-sloupku pořízený termokamerou	23
Obr. 22 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	26
Obr. 23 TOO bodového svaru včetně mikrostruktury	28
Obr. 24 Odporové bodové svařování.....	32
Obr. 25 Odporové švové svařování.....	33
Obr. 26 Přivařování matice k plechu.....	33
Obr. 27 Lancia Lambda vyrobená v roce 1922.....	34
Obr. 28 Robot vhodný pro odporové svařování	36
Obr. 29 Svařovací kleště typu C.....	37

Obr. 30 Svařovací kleště typu X.....	37
Obr. 31 Princip chlazení; přeloženo	38
Obr. 32 Schéma struktury ideálně chladnoucího svaru	38
Obr. 33 Schéma struktury svaru, který je rychleji ochlazován elektrodami	38
Obr. 34 Schéma struktury svaru, který je ochlazován rychleji základním materiálem	38
Obr. 35 Odsekávací metoda (Chisel test).....	39
Obr. 36 Odvalovací metoda (Peel test).....	39
Obr. 37 Zalisované vzorky	41
Obr. 38 Vzorky celkový pohled	42
Obr. 39 Mikrostruktura v oblasti taveniny.....	43
Obr. 40 Bodový svar 9,5K; zvýrazněna hranice taveniny a bubliny	43
Obr. 41 Trhlina na hranici taveniny.....	43
Obr. 42 Vzorek 9K povrchová vrstva mimo oblast TOO.....	44
Obr. 43 Vzorek 9K povrchová vrstva v místě kontaktu s elektrodou.....	44

9.2. Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení Mild oceli dle patentu z roku 1959.....	7
Tab. 2 Příklad chemického složení IF oceli	7
Tab. 3 Příklad chemického složení IF-HSS oceli.....	8
Tab. 4 Příklad chemického složení IS oceli	8
Tab. 5 Příklad chemického složení HSLA oceli (HX300LAD)	9
Tab. 6 Mechanické vlastnosti DP oceli s rozdílnou velikostí zrna	11
Tab. 7 příklad chemického složení DP oceli (Dual Phase 980 LCE Y600).....	12
Tab. 8 Mechanické vlastnosti vybraných CP ocelí.....	13
Tab. 9 Příklad chemického složení CP oceli (Complex Phase 1000).....	14
Tab. 10 Mechanické vlastnosti vybraných TRIP ocelí; přeloženo, upraveno	15
Tab. 11 Příklad chemického složení TRIP oceli HCT780T(EN 10338:2009)	15
Tab. 12 příklad chemického složení MS oceli (HDT1200M).....	17
Tab. 13 Mechanické vlastnosti martenzitických ocelí; přeloženo, upraveno	17
Tab. 14 Některé typy tzv.: „bórových ocelí“; přeloženo, upraveno.....	20
Tab. 15 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů; přeloženo, upraveno	21
Tab. 16 Mechanické vlastnosti a mikrostruktura oceli 22MnB5 po tepelném zpracování; přeloženo, upraveno	22
Tab. 17 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO	27
Tab. 18 Tepelně ovlivněná oblast bodového svaru.....	28
Tab. 19 Nejpoužívanější metody povrchových úprav	35
Tab. 20 Svařovací parametry odporového bodového svařování; přeloženo, upraveno.....	35
Tab. 21 Životnost elektrod; přeloženo, upraveno.....	36
Tab. 22 Hodnoty oceli 22MnB5 od Škoda Auto	40
Tab. 23 Chemické složení oceli 22MnB5 s povlakem Al-Si, naměřené spektrometrem.....	40
Tab. 24 Chemické složení oceli 22MnB5 bez povlaku Al-Si, naměřené spektrometrem.....	40
Tab. 25 Svařovací parametry.....	42