

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Vysokopevné materiály pro automobilový průmysl

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Bakalář: Zarrina Uteulina

PRAHA 2018



Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autorka práce: Zarrina Uteulina
Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích
Obor: Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí práce: doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.
Garantující pracoviště: Katedra materiálu a strojírenské technologie
Jazyk práce: Čeština

Název práce: **Vysokopevné materiály pro automobilový průmysl**
Název anglicky: **High strength materials for automotive industry**
Cíle práce:

- 1) Úvod
- 2) Podstata vysokopevných materiálů
- 3) Vysokopevné materiály v konstrukci automobilu
- 4) Závěr

Metodika: Rešerše v oblasti vysocepevných materiálů pro konstrukci automobilů. Vysvětlit podstatu vysokopevnostních materiálů, možnosti vývoje nových vysokopevných materiálů a kompozitů. Zaměření na vysokopevnostní oceli, které se používají v konstrukci automobilu.

Doporučený rozsah práce: 40 stran

Klíčová slova: ocel, vysokopevný materiál, mikrostruktura, automobil

Doporučené zdroje informací:

1. CALLISTER, William D., et al. Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley, 2007.
2. Další literatura podle vlastního výběru
3. DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vysoká škola chemicko-technologická, 1995.
4. GAY, Daniel. Composite materials: design and applications. CRC press, 2014.
5. MALLICK, Pankar K. Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design. CRC press, 2007.
6. PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth E.; SHERIF, Mohamed. Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint). CRC press, 2009.
7. WARD, Ian M.; SWEENEY, John. Mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons, 2012.

Předběžný termín 2017/18 LS - TF
obhajoby:

Elektronicky schváleno: 8. 1. 2017
doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 23. 1. 2017
prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.
Děkan

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: **Vysokopevné materiály pro automobilový průmysl** vypracovala samostatně a použila jen prameny, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědoma, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

Poděkování

Mé poděkování patří především doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za každou konzultaci, odborné vedení, obrovskou trpělivost a pomoc, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Také bych chtěla poděkovat svým rodičům za podporu, za možnost studovat v zahraničí a víru, že to určitě zvládnu.

Vysokopevné materiály pro automobilový průmysl.

Abstrakt: Bakalářská práce se zaměřuje na rešerše v oblasti vysokopevných materiálů pro konstrukci automobilů. Každá součást nosných částí automobilu se vyrábí z různých typů vysokopevných materiálů. Zejména z toho důvodu, že jednotlivé součásti s vysokou pevností v tahu zlepšují odolnost proti nárazu. Práce se zabývá podstatou vysokopevnostních materiálů. Jejich chemickým složením a mechanickými vlastnostmi. V práci jsou popsány různé druhy vysokopevných materiálů s uvedenými příklady od společnosti SAAB, které se v současné době používají v automobilovém průmyslu.

Klíčová slova: ocel, vysokopevný materiál, mikrostruktura, automobil.

High strength materials for automotive industry.

The object of this bachelor thesis is the high strength materials for automotive industry. The subject of the research of high strength materials describes a different type of high strength materials and their significance for the construction of automobiles. One of the main reasons are high tensile strength components which improve impact resistance. Every part of vehicle's car's parts is made of various types of high-strength materials. The main objective of the thesis is analysis and describing chemical compositions, mechanical properties, various types of high-strength materials with an example of SAAB which are currently used. The significance of the study lies in the possibility to use findings and conclusions contained in it for a deeper understanding of the prospects of high strength materials in automotive industry.

Key words: steel, high strength material, microstructure, automobile.

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam zkratek | 6 |
| Seznam obrázků | 7 |
| Seznam tabulek | 8 |
| 1. Úvod | 9 |
| 2. Ocel | 10 |
| 2.1 Mechanické vlastnosti oceli | 11 |
| 2.2 Chemické složení oceli | 12 |
| 2.3 Rozdělení oceli | 13 |
| 2.4 Vysokopevnostní ocel | 14 |
| 3. Druhy a vlastnosti vysokopevných oceli. | 15 |
| 3.1 Nízkolegované ušlechtilé oceli. | 15 |
| 3.2 Klasické maraging oceli | 17 |
| 3.3 Korozi-vzdorné maraging oceli | 18 |
| 3.4 Ocel s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP) | 18 |
| 3.5 Dvoufázová ocel (DP) | 23 |
| 3.6 Vícefázové oceli (CP) | 26 |
| 3.7 Ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním (TWIP) | 28 |
| 3.8 Martenzitická ocel (MS) | 30 |
| 3.9 Vysoko-pevnostní ocel (HSS) | 32 |
| 4. Závěr | 33 |
| 5. Seznam použité literatury | 35 |

Seznam zkratek

| <i>Zkratka</i> | <i>Anglický název</i> | <i>Český název</i> |
|----------------|-----------------------------------|---|
| AHSS | Advanced High-Strength Steel | Pokročilé vysoko-pevnostní oceli |
| HSS | High Strength Steel | Vysoko-pevnostní oceli |
| TRIP | Transformation Induced Plasticity | Oceli s transformačně indukovanou plasticitou |
| TWIP | Twinning-induced plasticity | Oceli využívající deformaci dvojčatěním |
| DP | Dual Phase Steels | Dvoufázová ocel |
| CP | Complex Phase | Vícefázové oceli |
| MS | Martensitic Steel | Martenzitická ocel |
| HSLA | High-strength low-alloy steel | Vysoce pevné mikrolegované oceli |
| BH | Baking harding | – |

| <i>Zkratka</i> | <i>Český název</i> | <i>Jednotka</i> |
|----------------|---------------------------------|--|
| M_s | Teplota transformace martenzitu | [°C] |
| C_p | Měrná tepelná kapacita | [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| E | Modul pružnosti v tahu | [GPa] |
| G | Modul pružnosti ve smyku | [GPa] |
| ν | Poissonovo číslo | [–] |
| $R_{p0,2}$ | Smluvní mez kluzu | [MPa] |
| R_m | Mez pevnosti v tahu | [MPa] |
| A_{80min} | Prodloužení | [min%] |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1. Mikrostruktura oceli TRIP | 20 |
| Obrázek 2. Mikrofotografie oceli TRIP 690 | 21 |
| Obrázek 3. Schematické zobrazení ostrovů martenzitu v matici feritu | 25 |
| Obrázek 4. Mikrofotografie oceli DP | 25 |
| Obrázek 5. Mikrofotografie oceli CP 800/1000 | 28 |
| Obrázek 6. Mikrofotografie oceli TWIP (žíhaný) | 30 |
| Obrázek 7. Mikrostruktura oceli MS 950/1200 | 32 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1. Mechanické vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí | 17 |
| Tabulka 2. Fyzikální vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí | 17 |
| Tabulka 3. Mechanické vlastnosti klasických ocelí maraging | 18 |
| Tabulka 4. Fyzikální vlastnosti klasických ocelí maraging (při 20 °C) | 19 |
| Tabulka 5. Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli maraging | 19 |
| Tabulka 6. Oceli TRIP a jejich použití | 24 |
| Tabulka 7. Oceli DP a jejich použití | 26 |

1. Úvod

Automobilový průmysl je jedním z největších spotřebitelů konstrukčních materiálů. Z toho důvodu došlo k nárůstu požadavků a konkurence mezi výrobci materiálů, což stimuluje pokrok ve vývoji nových druhů a kvalitě materiálů. Výroba automobilu je od konce devadesátých let neustále vyvíjena. Mnoho materiálů používaných dnes pro výrobu vozidel se podobá materiálům prvních výrobních vozidel. Tyto materiály se během posledních 100 let vyvíjely.

Moderní auto se skládá z několika set částí, zhotovených z několika desítek rozmanitých kovových a nekovových materiálů. Každá součást funguje za podmínek napětí, opotřebení, koroze, teploty, prostředí atd., které jsou pro ni typické. A tím je výběr materiálu součásti a technologie jeho výroby přísně individuální. Vlastnosti součásti musejí odpovídat podmínkám její práce. Auto musí jet a hlavně poskytovat bezpečnost. Karoserie automobilu přispívá k ochraně cestujících v případě jakékoliv kolize. V důsledku toho musí být zvolena správná strategie výběru materiálu pro jednotlivé části karoserie.

Nárazové zkoušky podle NCAP (European New Auto Assessment Programme) ověřují správnost výběru materiálu pro jednotlivé deformační zóny karoserie. Dobře navržené materiály v konstrukci karoserie vozidla hrají z velké části důležitou roli v ochraně řidiče a dalších cestujících z bezpečnostních důvodů při různých srážkách, jako čelní a boční kolize, náraz do zadní části vozu, ale také při nárazu do piliře a při převrácení vozidla a jízdě po střeše. Pokud jde o bezpečnost cestujících, existují dva základní a nejdůležitější požadavky na konstrukci automobilů, které vyplývají z hlavních deformačních zón karoserie. První a obecně nejdůležitější požadavek je, aby přední a zadní část (oblast kufru a motoru) automobilu v případě kolize absorbovala největší část deformační energie, která vznikla při srážce. Zadruhé musí být dostatečně ztuhlý prostor pro cestující (kabina), aby se zajistil dostatek prostoru pro řidiče a ostatní cestující v autě, aby přežili v případě jakékoliv nehody. Deformační zóny v autě slouží k ochraně posádky auta před zraněním při autonehodě. Úlohou deformačních zón je absorbovat deformační práce a chránit prostor posádky.

Během vývoje a použití se ocel osvědčila jako účinný a univerzální materiál pro výrobu konstrukce karoserií. V automobilovém průmyslu ocel musí splňovat požadavky na bezpečnost, trvanlivost a hospodárnost. V osobních automobilech, nákladních automobilech a traktorech je velká část uzavřených ocelových konstrukcí, jako jsou hřídele, pastorky, ozubená kola atd. Používána je především pro pevnost, houževnatost, únavu a přesnost rozměrů. [1,5]

Následující požadavky musí splňovat návrh konstrukce karoserie, aby u čelních nebo bočních nárazů auto absorbovalo velký objem energie:

- Přední a zadní část vozidla musí pohltit energii nárazu a rozprostřít ji na určitý minimální čas, aby zpoždění kabiny a tedy i posádky při nárazu nepřekročilo kritické hodnoty.
- Vnitřní část prostoru by měla být vyložena materiály tlumící náraz a případné plochy, které mohou přijít do styku s lidským tělem, musí být co největší.
- Prostor pro posádku musí být co nejtuzší, aby se při havárii co nejméně deformoval a umožnil otevření aspoň jedné dveří bez pomoci nástrojů, kabina musí zůstat celistvá.
- Sedačky musí být upevněny tak, aby zůstaly v případě nárazu na svém místě.
- Dveře vozidla se nesmí při nárazu samovolně otevřít, posádka nesmí z auta vypadnout (hrozí až 5x větší riziko úmrtí), bylo nutné změnit konstrukci zámků. [25]

2. Ocel

Téměř 99 % všech ocelí se využívá jako konstrukční materiál v širokém smyslu slova: včetně ocelových stavebních konstrukcí, strojních dílů, elastických prvků, a nástrojů pro zvláštní provozní podmínky - žáruvzdorné, korozivzdorné apod. Jeho hlavní podstatou je pevnost (schopnost odolat při dostatečné provozní napětí),

plasticita (schopnost udržovat dostatečnou deformaci bez lomu při výrobě konstrukcí a místní přetížení v průběhu jejich provozu), viskozita (schopnost absorbovat práci vnějších sil, zamezení šíření trhlin), elasticita, tvrdost, odolnost proti prasklinám, odolnost proti chladu, tepelná odolnost a hlavně tvárnost za vysokých teplot. [5]

2.1 Mechanické vlastnosti oceli

K mechanickým vlastnostem oceli patří pevnost, tvrdost, houževnatost, pružnost a tvárnost.

Pevnost

Pevností rozumíme vnější napětí potřebné k rozdělení materiálu na dvě části. Existují různé druhy pevnosti dle způsobu namáhání: pevnost v ohybu, tahu, tlaku a krutu. [1]

Tvrdost

Tvrdost se definuje jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Tvrdost se měří několika metodami: Brinellova, Rockwellova atd. Je výslednicí elasticity, plasticity a křehkosti. [1, 2]

Houževnatost

Houževnatost vyjadřuje takovou velikost práce, která je potřebná k rozdělení materiálu na dvě části. Je ovlivněná chemickým složením a způsobem výroby oceli, čistotou a mikročistotou materiálu. Houževnatost roste s klesajícím obsahem uhlíku. [1, 3]

Pružnost

Pružnost je vlastnost hmoty deformovat se při působení napětí a vrátit se zpátky do původního stavu po odstranění tohoto napětí. [1]

Tvárnost

Tvárnost popisuje plastickou deformaci tvaru materiálu bez porušení celistvosti při působení vnějších sil. [2]

2.2 Chemické složení oceli

Většina vlastností materiálu je závislá na struktuře, která je odrazem chemického složení. Ocel je chemicky složitá slitina, která kromě základu – železa (jehož obsah je 45 % až 99,5 %) a uhlíku (do 2,0 %) také obsahuje řadu dalších chemických prvků. Jde o doprovodné prvky, dostávající se do oceli během výroby (např. mangan, křemík, fosfor, síra a měď); prvky, které nelze úplně vyloučit (např. síra, fosfor, kyslík, dusík, vodík) a úmyslně přidané prvky (chrom, nikl). Vyrábí se zkujňováním surového železa, které bylo vyrobeno ve vysoké peci. Základním principem zkujňování je snižování obsahu uhlíku a likvidace příměsí surového železa prostřednictvím okysličování. Úkolem ocelářského pochodu je získání dostatečně tvárné oceli s požadovanými mechanickými a technologickými vlastnostmi. [4]

Ocel má další materiálové charakteristiky:

- Modul pružnosti v tahu E nabývá hodnoty 210 GPa
- Modul pružnosti ve smyku $G = 81$ GPa
- Poissonovo číslo $\nu = 0,3$

Modul pružnosti je považován za jednu z nejdůležitějších elastických vlastností oceli z hlediska konstrukce a konstrukčního chování. Modul pružnosti v tahu vyjadřuje myšlené napětí, které by způsobilo prodloužení na dvojnásobek počáteční délky, pokud by neomezeně platil Hookeův zákon. Modul pružnosti ve smyku vyjadřuje závislost mezi poměrnou deformací a napětím při namáhání smykem. Při tváření kovů se jejich modul pružnosti mění málo. Poissonovo číslo popisuje poměr mezi příčným zkrácením a podélným prodloužením při namáhání tahem. [3]

Pomocí tepelného zpracování lze dosáhnout záměrné vytváření stavu struktury za účelem dosažení požadovaných vlastností; zejména efektivní je tepelné zpracování oceli. Takové zpracování se skládá z několika kroků: ohřev na určenou teplotu (přímý nebo stupňovitý), výdrž na této teplotě a ochlazení. [6]

Existují různé druhy tepelných zpracování: kalení, popouštění, žíhání. Každý druh má vlastní technologický postup a změny ve struktuře. Nicméně ne všechny vlastnosti se mění při daném způsobu zpracování. Vlastnosti, které jsou závislé na struktuře, se pozmění. Modul pružnosti není závislý na struktuře, proto se nezmění. Při použití tepelného nebo tepelně – mechanického zpracování materiálu lze zvýšit jeho pevnost a tvrdost několikrát. [6]

2.3 Rozdělení oceli

Ocel lze rozdělit podle různých faktorů:

a. Podle složení:

Uhlík, nízkolegované oceli, nerezové oceli.

b. Podle způsobu výroby:

Ocel získaná základním kyslíkovým procesem nebo elektrickou pecní metodou.

c. Podle způsobu zpracování:

Ocel získaná válcováním za tepla nebo válcováním za studena.

d. Podle výrobní formy:

Plechová deska, plech, pás, hadice nebo konstrukční tvar.

e. Podle mikrostruktury:

Feritické, perlitické nebo martenzitické, duplexní oceli a vícefázové oceli.

f. Podle druhu tepelného zpracování:

Ocel zpracovaná žíháním, kalením a popouštěním nebo termomechanickým zpracováním.

g. Podle chemického složení:

Nelegované (uhlíkové) oceli - jsou slitiny železa a uhlíku bez legujících prvků.

Legované oceli mají ve svém obsahu legující prvky, které zvyšují mechanické vlastnosti.

h. Podle použití:

Konstrukční a nástrojové oceli, oceli k cementaci, na odlitky, k nitridaci, k zušlechťování. [13]

2.4 Vysokopevnostní ocel

Použití vysokopevnostní oceli výrazně snižuje hmotnost automobilu. Hmotnost "typického rodinného sedanu" se za posledních deset let snížila o 14 % a použití vysoce pevných ocelí se ztrojnásobilo. Zvýšené požadavky automobilového průmyslu na kvalitu povrchu a korozní odolnosti tenkého plechu válcovaného za studena urychlují rozvoj nových materiálů založených na základě železa a jejich výrobních technologiích. Vývoj a použití různých typů oceli (vysokopevnostní, dvoufázové, vícefázové, oceli s transformačně indukovanou plasticitou, s různými ochrannými nátěry) umožňují automobilkám úspěšně řešit problémy s lisováním plechů, tak i snížení hmotnosti karoserie, zvýšení bezpečnosti, spolehlivosti a odolnosti proti korozi automobilů. [27]

Kostra sedadla se skládá z rámu předního sedadla a rámu jeho opěradla. Jedná se o poměrně dost hmotnou věc v autě, proto je zde zřejmý potenciál pro snížení hmotnosti sedadla. Použitím pokročilé, vysoce odolné oceli lze ovlivnit hmotnost celého rámu sedadla. [27]

Pevnostní podmínka

Ocel je vysokopevnostní, pokud její mez kluzu splňuje podmínku:

$$R_{p0,2} \geq \frac{E}{150} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Většina ocelí má modul pružnosti $E = 210 \text{ GPa}$ (kromě austenitických ocelí).

Po dosažení této hodnoty do výrazu (1) dostávám následující upravenou pevnostní podmínku, která je uvedena ve výrazu (3) :

$$R_{p0,2} \geq \frac{210 \cdot 10^3}{150} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$$R_{p0,2} \geq 1\,400 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Vysokopevnostní oceli splňují tuto podmínku tím, že mají chemické složení s dostatečným obsahem legujících prvků a prošly tepelným nebo tepelně – mechanickým zpracováním. Tato míra pevnosti může být získána ve středně uhlíkových legovaných ocelích za použití kalení s nízkým popouštěním (při teplotě 200 – 250 °C) nebo užitím izotermického kalení pro získání struktury dolního bainitu. Po izotermickém kalení mají středně legované oceli nižší pevnost, ale větší tažnost a plasticitu. Proto jsou ve výrobě spolehlivější než kalené a nízko popouštěné oceli. Středně uhlíkové oceli mají zvýšenou citlivost na koncentrátoři napětí, tendenci ke křehkému lomu, a proto se doporučuje používat je pro práci za podmínek plynulého zatížení bez rázů. Legování wolframem, molybdenem, vanadem zvyšuje odolnost proti křehkému lomu. [3]

Výroba vysokopevných ocelí

- a. Nízkoteplotním popouštěním (do 350 °C) nízkolegovaných ocelí.
- b. Vysokoteplotním popouštěním (550 – 650 °C) na sekundární tvrdost vysokolegovaných ocelí.
- c. Tepelně mechanickým zpracováním.
- d. Rychlou austenitizací.
- e. Tvářením za studena nebo deformačním stárnutím martenzitu.
- f. Precipitačním zpevněním vysokolegovaných martenzitických ocelí. [3]

3. Druhy a vlastnosti vysokopevných oceli.

3.1 Nízkolegované ušlechtilé oceli.

Nízkolegované ušlechtilé oceli získáváme kalením a popouštěním na nízké teploty 200 – 300°C. Vysokopevná ocel pracující při nízkých teplotách musí disponovat vysokou statickou a únavovou pevností, akceptovatelnou houževnatostí a někdy i dobrou svařitelností. Aby martenzit byl dostatečně transformačně zpevněn, obsah uhlíku musí být v intervalu 0,3 až 0,4 %. Pro zvýšení prokalitelnosti je legujícím prvkem chrom s obsahem 1 až 2 %. Další legující prvek je nikl (do 4 %), který zvyšuje nejen prokalitelnost, ale i houževnatost, křemík (2 %) který zpevňuje ocel, molybden (v desetinách %) který potlačuje popouštěcí křehkost. Vhodná kombinace uhlíku a legujících prvků splňuje výše uvedené požadavky a zabezpečuje přijatelnou prokalitelnost. [3]

3.1.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí jsou uvedeny níže v tab. 1:

Tabulka 1. Mechanické vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí. [3]

| Označení oceli | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | Z [%] | KV [J] | K_{IC} [MPa·m ^{1/2}] | TZ |
|----------------|---------------------|----------------|----------|----------|-----------|-------------------------------------|----|
| 40CrMo4 | 1 740 | 1 965 | 11 | 42 | 15 | 45 | 1 |
| 42CrMo4 | 1 570 | 1 720 | 12 | 46 | 10 | 40 | 2 |
| 40NiCrMo-8-3 | 1 860 | 1 980 | 11 | 39 | 20 | 50 | 1 |
| 30CrNiMo8 | 1 760 | 1 920 | 12 | 40 | 15 | 45 | 2 |

1: Austenitizace 1h při teplotě 845 °C, kaleno a popouštěno na 205 °C po dobu 2 h na vzduchu.

2: Austenitizace 1h při teplotě 845 °C, kaleno a popouštěno na 315 °C po dobu 2 h na vzduchu.

3.1.2 Fyzikální vlastnosti

Se zvýšením teploty měrná tepelná kapacita a teplotní součinitel délkové roztažnosti α rostou. A tepelná i elektrická vodivost naopak klesají. Změnu hustoty oceli této skupiny lze zanedbat. Fyzikální vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých oceli v závislosti na teplotě jsou uvedeny níže v tab. 2:

Tabulka 2. Fyzikální vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí. [3]

| Měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | Teplotní součinitel roztažnosti [-] | Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | Elektrická vodivost [S] |
|--|--|---|----------------------------|
| 460 až 520 (při 200 °C) | (12,2 až 12,4) · 10 ⁶ | 42 až 46 (při 200 °C) | 4 až 5 (při 20 °C) |
| 820 až 840 (při 700 °C) | 20 až 200 °C | 35 až 37 (při 500 °C) | 3 (při 200 °C) |
| 1 500 (při 750 °C) | (14,6 až 15,0) · 10 ⁶ | 24 až 31 (při 700 °C) | 1 (při 700 °C) |
| 540 až 580 (při 900 °C) | 20 až 700 °C | 29 až 31 (při 1 200 °C) | 0,8 (při 1 200 °C) |

3.2 Klasické maraging oceli

Klasické maraging oceli mají mnoho výhod. Při různých teplotách jsou dobře tvařitelné válcováním a kování. Během vysokoteplotní austenitizace téměř nedochází k oxidaci a oduhličení, jsou samokalitelné. Po tváření za tepla je možno ochlazovat jakoukoliv rychlostí bez nebezpečí vzniku trhlin. Při tváření za studena se málo deformačně zpevňují. Vysokou kvalitu povrchu dosáhneme broušením po vytvrzení. [3]

3.2.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti ve vytvrzeném stavu jsou charakterizované odstupňovanou úrovní meze kluzu 1 400 až 2 400 MPa. Jsou uvedené níže v tab. 3:

Tabulka 3. Mechanické vlastnosti klasických ocelí maraging. [3]

| Označení oceli | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | Z [%] | K_{IC} [MPa·m ^{1/2}] | TZ |
|-----------------------------|---------------------|----------------|----------|----------|-------------------------------------|----|
| 18Ni(200) 3NiCoMoTiAl18-8-3 | 1400 | 1500 | 10 | 60 | 160 | 1 |
| 18Ni(250) 3NiCoMoTiAl18-8-5 | 1700 | 1800 | 8 | 55 | 120 | 1 |
| 18Ni(200) 3NiCoMoTiAl18-8-3 | 2000 | 2050 | 7 | 40 | 80 | 1 |

1: Austenitizace 1h při teplotě 820 °C, kaleno a popouštěno na 480 °C po dobu 3 h na vzduchu.

3.2.2 Fyzikální vlastnosti

S rostoucí pevností roste i mez únavy, ale klesá poměr. Při zvýšení teploty odolnost proti růstu trhlin roste. Fyzikální vlastnosti nízkolegovaných ušlechtilých ocelí v závislosti na teplotě jsou uvedeny níže v tab. 4:

Tabulka 4. Fyzikální vlastnosti klasických ocelí maraging. (při 20°C). [3]

| Měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹] | Teplotní součinitel roztažnosti [-] | Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] | Elektrická vodivost [S] |
|--|--|---|---|
| 545 až 560 (při 20 až 600 °C) | (20 až 480 °C) | 19,7 (při 20 °C) 20,9 (při 100 °C) | 14 až 16 (kaleno) 16 až 25 (popouštěno) |

3.3 Korozivzdorné maraging oceli

Korozivzdorné maraging oceli jsou charakterizované přísadou chromu. Chrom zvyšuje podíl zbytkového austenitu, čímž zajišťuje vysokou korozivzdornost. Díky zvýšenému podílu austenitu lze používat tváření za studena před stárnutím k doplňujícímu zpevnění. S rostoucí teplotou stárnutí (nad 400 °C bez kobaltu,

do 500 °C s kobaltem) korozivzdorné maraging oceli ztrácejí své pevnostní vlastnosti. V kaleném stavu oceli tohoto typu mají největší odolnost proti korozi, ale nejmenší odolnost je ve stavu maximálně vytvrzeném. [3]

3.3.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli maraging jsou uvedeny v tab. 5:

Tabulka 5. Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli maraging. [3]

| Označení oceli | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A [%] | Z [%] | K_{IC} [MPa·m ^{1/2}] | TZ |
|-------------------|---------------------|----------------|----------|----------|-------------------------------------|-----------------------|
| 5CrNiNiMoAl14-8-3 | 1410 | 1520 | 6 | 45 | 10 | deformačně zpevněná |
| 9CrNiMoAl15-7-3 | 1380 | 1550 | 4 | 20 | 55 | precipitačně zpevněná |
| 5CrNiCuTiNb15-9-2 | 1450 | 1620 | 8 | 30 | 80 | zmrazovaná |

3.4 Ocel s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP)

Ocel s transformačně indukovanou plasticitou je slibný materiál pro využití v automobilovém průmyslu díky jedinečné kombinaci vysoké pevnosti a vysoké tvařitelnosti. Nahrazují oceli dvoufázové a vysoce pevné mikrolegované oceli, protože mají vynikající absorpci energie při nárazu kvůli vysokému pracovnímu vytvrzení během deformace a schopnosti tvarovat se do složitých součástí hlubokým tažením. [8]

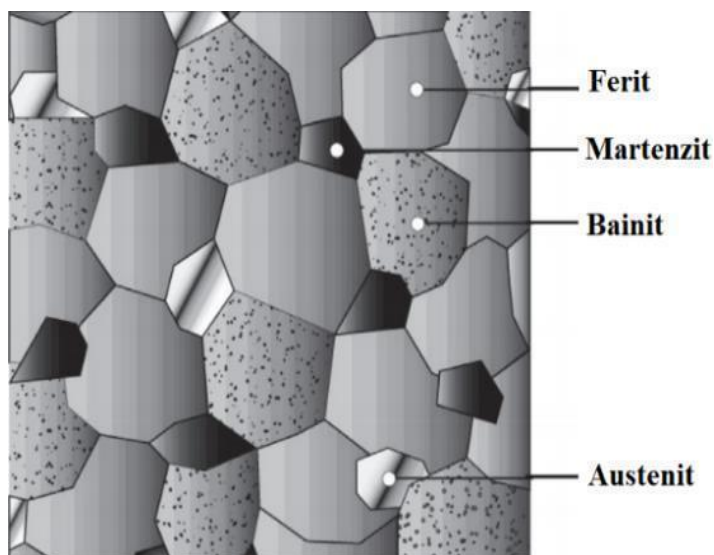
3.4.1 Fyzikální vlastnosti

Ocel s transformačně indukovanou plasticitou patří do skupiny s řízenou transformací. Protože teploty a jsou zvoleny tak, aby došlo ke vzniku martensitu při dalším použití, zkoušení nebo zpracování. [8]

Mikrostruktura oceli s transformačně indukovanou plasticitou je uchovávána austenitem zakotveným v primární matici feritu. Kromě minimálně pěti objemových procent zbytkového austenitu jsou v různých množstvích přítomny tvrdé fáze, jako je

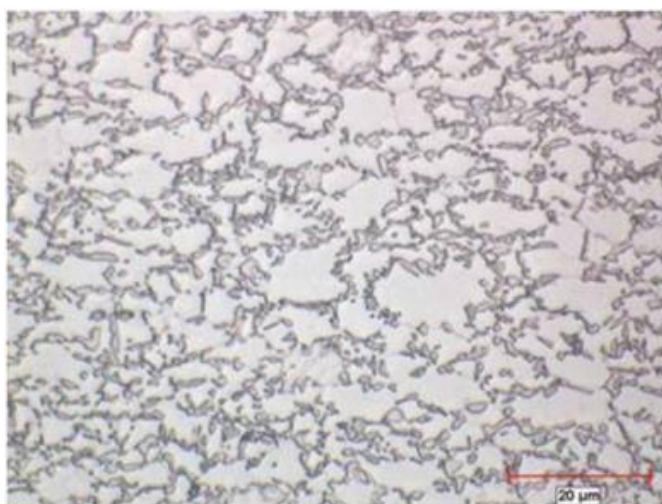
martenzit a bainit. Ocel s transformačně indukovanou plasticitou vyžaduje použití izotermického tepelného zpracování při střední teplotě, která produkuje bainit. Vyšší obsah křemíku a uhlíku v daných ocelích má také za následek významné objemové frakce zbytkového austenitu v konečné mikrostruktuře. [8]

Obrázek 1. Mikrostruktura oceli TRIP. [29]



Dále na obrázku č. 2 vidíme mikrofotografie oceli TRIP 690:

Obrázek 2. Mikrofotografie oceli TRIP 690. [30]



Během deformace se vytváří disperze tvrdých sekundárních fází v měkkém feritu během vytvrzování, jak je patrné z dvoufázové oceli. Nicméně u oceli

s transformačně indukovanou plasticitou se zbytkový austenit také postupně přeměňuje na martenzit s rostoucí deformací, čímž se zvyšuje rychlost vytvrzování při vyšších úrovních deformace. [8]

Rychlost vytvrzování oceli s transformačně indukovanou plasticitou je podstatně vyšší než u konvenční vysoko-pevnostní oceli, čímž je dosaženo výrazného zpevnění. To je obzvláště užitečné, když konstruktéři využívají vysokou rychlost vytvrzování (a zvýšený efekt vytvrzování při vytápění), aby navrhli součást využívající tohoto efektu. Vysoká rychlost vytvrzování v pracovním procesu přetrvává na vyšších deformacích v ocelích s transformačně indukovanou plasticitou, což poskytuje nepatrnou výhodu oproti dvoufázové oceli u aplikací pro součásti namáhané v tahu. [8]

Oceli s transformačně indukovanou plasticitou používají vyšší množství uhlíku než dvoufázová ocel, aby získaly dostatečný obsah uhlíku pro stabilizaci zbytkové fáze austenitu pod teplotu okolí. Vyšší obsah křemíku nebo hliníku zrychluje tvorbu feritu a bainitu. Tyto prvky napomáhají udržení potřebného obsahu uhlíku v zbytkovém austenitu. Potlačení vzniku karbidových fází během bainitické transformace se zdá být rozhodující pro oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Křemík a hliník se používají k zamezení precipitace karbidu v oblasti vzniku bainitu. [8]

Hladina kmenů, při kterých se zachovává austenit, se začíná přeměňovat na martenzit, je řízena pomocí přizpůsobení obsahu uhlíku. Při nižších úrovních uhlíku se zbytkový austenit začne téměř okamžitě přeměňovat při deformaci, což zvyšuje rychlost vytvrzování a tvarovatelnost při procesu lisování. U vyšších obsahů uhlíku je zbytkový austenit stabilnější a začíná se přeměňovat pouze při úrovních deformace nad úrovně, které se vytvářejí během tváření. Při této úrovni obsahu uhlíku zůstává zbytkový austenit nepřeměněn. A tedy přeměna austenitu na martenzit je umožněna deformací např. při nárazu. Ocel s transformačně indukovanou plasticitou proto může být navržena nebo přizpůsobena tak, aby poskytovala vynikající tvařitelnost pro výrobu komplexních součástí z pokročilé vysoko-pevnostní oceli nebo vykazovala vysoké vytvrzování během deformace při nárazu za vynikající absorpci nárazové energie. Dodatečné požadavky

na legování oceli s transformačně indukovanou plasticitou zvyšují jejich odolnost proti bodovému svařování. To lze řešit částečně modifikací používaných svařovacích cyklů (například pulzním svařováním). [8]

3.4.2 Chemické vlastnosti

Oceli s transformačně indukovanou plasticitou obsahují 0,3 % uhlíku, 2 % manganu, 2 % křemíku, 9 až 14 % chromu, 8 až 9 % niklu, 3 až 5 % molybdenu. Mez kluzu a tažnost se dá měnit chemickým složením, podmínkami tepelného mechanického zpracování a dodatečného tváření za studena. [8]

Chemická stabilita zbytkového austenitu je v důsledku obohacování uhlíkem nejvíce obohacována zbytkovým austenitem. Zpomaluje tvorbu cementit během bainitické transformace, výhodou je stabilizace austenitu při pokojové teplotě; optimalizace TRIP efektu během deformace. [14, 15]

Za účelem dosažení nejlepší kombinace mechanické pevnosti a tvárnosti oceli s transformačně indukovanou plasticitou, dalších mikrostrukturních složek, včetně feritu, bainitu nebo martenzitu, by měly být kromě objemové frakce rovněž kontrolována stabilita zbytkového austenitu. Ocel s transformačně indukovanou plasticitou s odpovídajícím zbytkovým austenitem a optimální vícefázovou mikrostrukturou kombinace je nezbytná pro dosažení nejlepších vlastností. [16]

Pro konvenční zpracování válcováním za tepla, oceli s transformačně indukovanou plasticitou je kontrola takové smíšené mikrostruktury běžně prováděna úpravou rychlosti ochlazování a času zpracování prostřednictvím vícestupňového chlazení po válcování austenitu za tepla. [17,18]

Pro získání optimální vícefázové mikrostruktury jsou oceli s transformačně indukovanou plasticitou za studena válcované obvykle dvojitým cyklem tepelného zpracování, tj. interkritické žíhání a zpracování s izotermickým bainitem. [19]

Zpracování působí jako druhý proces obohacování austenitu uhlíkem, při kterém množství austenitu s vysokým obsahem uhlíku, kde teplota transformace martenzitu M_s je pod pokojovou teplotou, zůstane v konečné mikrostruktuře po ochlazení při pokojové teplotě. Izotermické zpracování bainita má významný vliv

na mikrostruktury, a tím i na mechanické vlastnosti oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Technologie tepelného zpracování mohou obvykle poskytovat nejlepší kombinaci pevnosti a tažnosti v ocelích s transformačně indukovanou plasticitou. Největší nevýhodou technologií tepelného zpracování je však obtížnost v přesnosti realizace v průmyslových aplikacích, omezení hromadné výroby oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Jako alternativní a efektivní technologie zpracování je TMP považováno za podstatu mnoha výzkumů, jejichž výsledkem jsou potenciální úspory energie a vyšší produktivita – může minimalizovat nebo dokonce eliminovat potřebu dalšího tepelného zpracování.

[20, 21]

Hlavním cílem TMP je zpřesnit velikost feritického zrna regulací mikrostruktury austenitu na bod transformace. Také TMP má vliv na transformační chování, které může vést k různým morfologiím sekundární fáze. Bylo zjištěno, že základní ferit indukuje významné zvýšení kvality a stability zbytkového austenitu, který zlepšuje mechanické vlastnosti oceli s transformačně indukovanou plasticitou. [22, 23]

Typický postup TMP se skládá ze tří etap:

1. deformace v oblasti austenitické rekrystalizace;
2. deformace v oblasti rekrystalizace austenitu;
3. deformace v oblasti přeměny austenitu na ferit. [24]

3.4.3 Současné použití oceli (TRIP) v automobilovém průmyslu

V tab. 6 jsou uvedeny příklady oceli s transformačně indukovanou plasticitou pro automobilový průmysl.

Tabulka 6. Oceli TRIP a jejich použití. [31]

| Název TRIP oceli | Příklad automobilových aplikací |
|------------------|--|
| TRIP 350/600 | rámové kolejnice |
| TRIP 400/700 | boční lišta |
| TRIP 450/800 | přístrojová deska, střešní lišty |
| TRIP 600/980 | střešní nosič, kolébka motoru, rám sedadla |

3.5 Dvoufázová ocel (DP)

3.5.1 Fyzikální vlastnosti

Dvoufázová ocel se skládá z feritické matrice obsahující tvrdou martenzitickou druhou fází ve formě ostrovů. Zvýšení objemového podílu tvrdých druhých fází obecně zvyšuje pevnost. Dvoufázové oceli se vyrábějí řízeným chlazením z austenitické fáze (válcování výrobku za tepla) nebo z dvoufázové feritické a austenitické fáze (pro kontinuálně žíhané výrobky válcovaných za studena a za tepla ponořené) austenitu k feritu před rychlým chlazením transformuje zbývající austenit na martenzit. Kvůli výrobnímu procesu může být přítomno malé množství dalších fází (bainit a austenit). V závislosti na složení a způsobu zpracování mohou mít oceli vyžadující zvýšenou schopnost odolat praskání na roztažené hraně obsahující významné množství bainitu. [26]

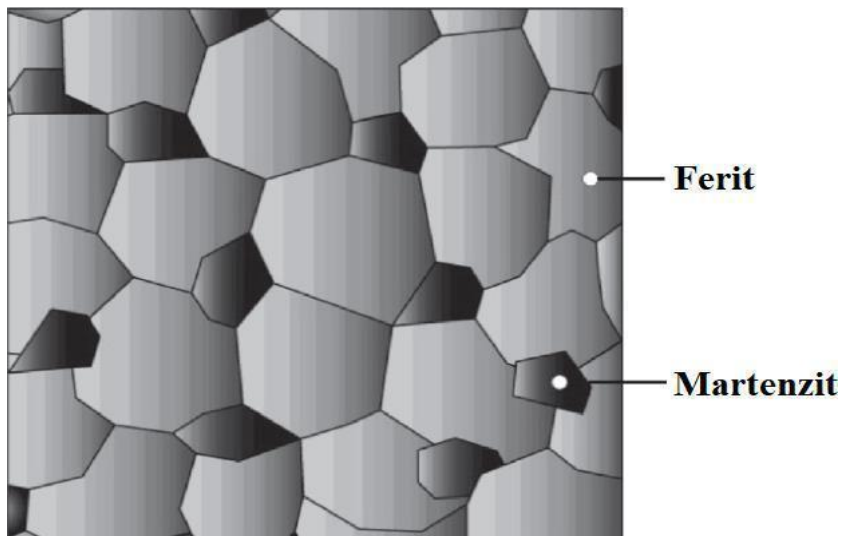
3.5.2 Chemické vlastnosti

Chemické složení je založeno na přibližné hmotnosti 0,1 % uhlíku a 1,5 % manganu. Vyšší uhlík a mangan v porovnání s běžnými ocelovými plechy jsou důležité pro získání potřebné vytvrzovatelnosti, což napomáhá prevenci tvorby perlitu nebo bainitu během zpracování. Může být přidán křemík pro podporu rozdělení uhlíku v austenitu. [26]

Obrázek č. 3 zobrazuje schematickou mikrostrukturu dvoufázové oceli, která obsahuje ferit a ostrovy martenzitu. Měkká feritová fáze je obecně kontinuální, což dává těmto ocelím vynikající tažnost.

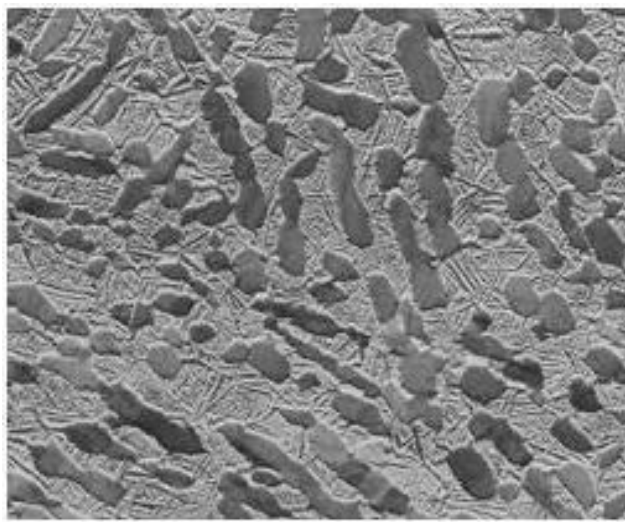
Když se tyto oceli deformují, napětí se soustřeďuje ve feritické fázi s nižší pevností, která obklopuje ostrovy martenzitu, což vytváří jedinečnou vysokou počáteční rychlost vytvrzování (n -hodnota indexu zpevnění) vystavenou těmito ocelmi. [9]

Obrázek 3. Schematické zobrazení ostrovů martenzitu v matrici feritu. [32]



Na obrázku č. 4 vidíme skutečnou mikrofotografii dvoufázové ocele znázorňující složky feritu a martenzitu. Rychlost vytvrzování práce a vynikající prodloužení vytvářejí dvoufázové oceli s mnohem vyšší mezní pevností v tahu než běžné oceli s podobným indexem zpevnění.

Obrázek 4. Mikrofotografie oceli DP. [33]



Dvoufázové oceli a další pokročilé vysoko-pevnostní oceli také mají vliv na “bake hardening“ efekt při procesu vytvrzování, což je důležité ve srovnání s konvenčními oceli s vyšší pevností. Účinnost vytvrzování je dána zvýšením meze kluzu v důsledku stárnutí při zvýšené teplotě (způsobené teplotou ve vytvrzovací peci)

po předběžné deformaci (způsobené vytvrzením v důsledku deformace při lisování nebo jiným výrobním procesem). Rozsah vytvrzovacího účinku v pokročilé vysoko – pevnostní oceli závisí na adekvátní velikosti deformace při lisování a specifickém chemickém složení a historii oceli. [9]

U dvoufázové ocele uhlík umožňuje vytváření martenzitu při praktických rychlostech chlazení zvýšením prokalitelnosti oceli. Mangan, chrom, molybden, vanad a nikl, přidávané jednotlivě nebo v kombinaci, také pomáhají zvýšit prokalitelnost. Uhlík také posiluje martenzit stejně jako křemík a fosfor. Tyto přísady jsou pečlivě vyvážené, a to nejen pro dosažení jedinečných mechanických vlastností, ale také pro zachování obecně dobré odolnosti proti bodovým svařováním. Nicméně při svařování vyšších pevnostních stupňů (DP 700/1000 a vyšších), svařitelnost bodů může vyžadovat úpravy svařovací praxe. [9]

3.5.3 Současné použití oceli (DP) v automobilovém průmyslu

Příklady automobilových aplikací jsou znázorněny v tabulce č. 7:

Tabulka 7. Oceli DP a jejich použití

| Název DP oceli | Příklad automobilových aplikací |
|----------------|--|
| DP 300/500 | vnější střecha, vnější dveře, vnější strana karoserie, zásobník na balení, podlahový panel |
| VDP 350/600 | podlahová deska, vnější kapota, vnější strana karoserie, kryty, blatníky, výztuhy do podlahy |
| DP 500/800 | zadní výztuhy |

Popis dvoufázové oceli je uveden na konkrétním příkladě – Docol 800DP:

Oceli tohoto typu nabízejí dobrou tvářitelnost pro výrobu bezpečnostních detailů v automobilech. Tyto oceli se podrobí speciální tepelné úpravě v kontinuální žihací linii, čímž vzniká dvoufázová struktura. Ferit, který dodává jedinečné tvarové vlastnosti, představuje jednu fázi a martenzit, který představuje sílu, představuje druhou fázi. [9]

V tab. 8 je uvedeno chemické složení dvoufázové oceli:

Tabulka 8. Chemické složení DP oceli

| Název | [max. %] | | | | | | |
|------------------------|----------|-----|-----|------|------|------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al | Nb+Ti |
| Docol CR 500Y 800T -DP | 0,15 | 0,4 | 1,8 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,1 |
| Docol CR 600Y 800T -DP | 0,16 | 0,4 | 1,8 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,1 |

V následující tabulce č.9 je uvedeny mechanické vlastnosti dvoufázové oceli:

Tabulka 9. Mechanické vlastnosti DP oceli

| Název | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A_{80min} [%] |
|-------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Docol CR 500Y 800T - DP | 500 – 650 | 800 – 950 | 10 |

3.6 Vícefázové oceli (CP)

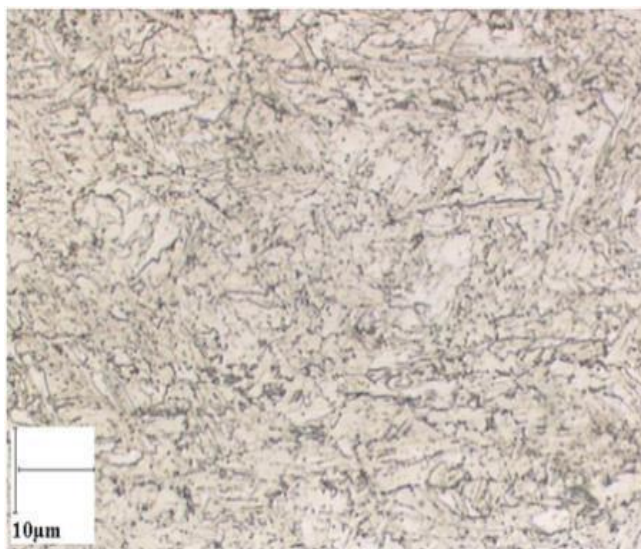
3.6.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Vícefázové oceli představují přechod na ocel s velmi vysokou mezní pevností v tahu. Maximální pevnost v tahu přibližně 800 – 1 200 MPa při zachování rozumné úrovně tažnosti (přibližně 7 – 15 %). Mají vyšší koncentrace uhlíku a manganu než dvoufázové oceli a oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Mají mikrostrukturu, která často obsahuje ferit a bainit, malé množství perlitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Tyto oceli mají velmi jemnou mikrostrukturu získanou legujícími přísadami jako je titan, vanad a niob tvořící precipitáty, které pomáhají předcházet růstu zrna během tepelného zpracování. Vysoká mez kluzu (přibližně 600 – 1 000 MPa) znamená, že tyto oceli mají nižší stupeň vytvrzování ve srovnání s dvoufázovou ocelí a ocelí s transformačně indukovanou plasticitou, i když jsou stále tvarovatelné za použití konvenčních procesů lisování za studena. [27]

Mikrostruktura korozních ocelí obsahuje malé množství martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu v matici z feritu/bainitu. Extenzivní zjemnění zrna vzniká

zpožděnou rekrytalizací nebo vysrážením micro legovacích prvků, jako je titan (Ti) nebo niob (Nb). Obrázek 5 znázorňuje mikrofotografie oceli CP. [10]

Obrázek 5. Mikrofotografie oceli CP 800/1000. [34]



Vícefázové oceli vykazují výrazně vyšší mez kluzu při stejné pevnosti v tahu 800 MPa a vyšší ve srovnání s dvoufázovou ocelí. Vícefázové oceli jsou charakterizovány vysokou absorpcí energie, vysokou zbytkovou kapacitou deformace a dobrým rozšířením otvorů. [10]

3.6.2 Aktuální použití oceli (CP) v automobilovém průmyslu

V tabulce č. 10 jsou uvedeny příklady použití vícefázové oceli při stavbě karoserie aut:

Tabulka 10. Oceli CP a jejich použití. [37]

| Název DP oceli | Příklad automobilových aplikací |
|----------------|-----------------------------------|
| CP 680/780 | součásti podvozku, příčné nosníky |
| CP 750/900 | výztuhy sloupku B |
| CP 800/1000 | zadní závěsy, blatník |

Popis vícefázové oceli je uveden na konkrétním příkladu - Docol 800 CP:

Je určena pro konstrukce, u kterých je požadována vysoká pevnost konstrukce a absorpce energie, vhodné pro chladicí bezpečnostní komponenty a nárazové zařízení v automobilovém a dopravním průmyslu. [10]

Chemické složení oceli komplexní fáze je uvedeno v tabulce č. 11:

Tabulka 11. Chemické složení CP oceli

| Název | [max. %] | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|----|-----|-----|------|-------------|-------|-------|-----|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al | Nb+Ti | Cr+Mo | Cu | B |
| Docol HR 800 CP | 0,18 | 1 | 2,2 | 0,1 | 0,01 | 0,015 - 1,2 | 0,25 | 1 | 0,2 | 0,005 |

Mechanické vlastnosti oceli komplexní fáze jsou uvedeny v tabulce č. 12:

Tabulka 12. Mechanické vlastnosti CP oceli

| Název | $R_{p0,2}$ [MPa] | R_m [MPa] | A_{80min} [%] |
|----------------|---------------------|----------------|--------------------|
| Docol HR 800CP | 660 – 820 | 760 – 960 | 10 |

3.7 Ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním (TWIP)

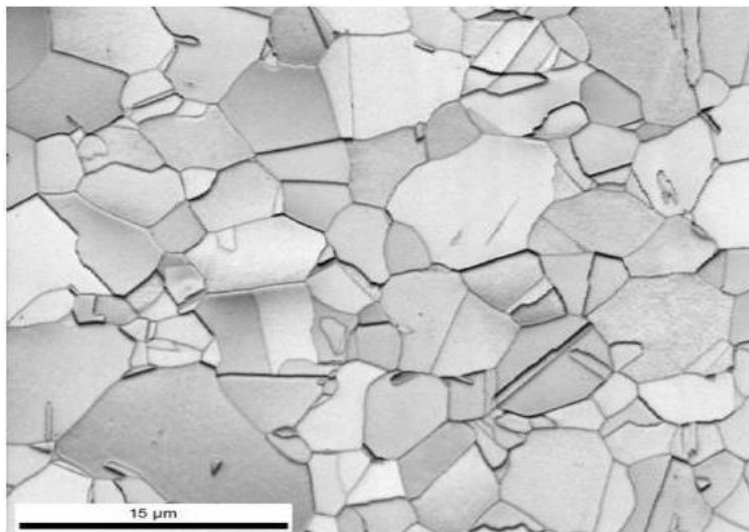
3.7.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním má vysoký obsah manganu

(17 – 24 %), který způsobuje vznik plně austenitické oceli při pokojové teplotě. Velké množství deformací je způsobeno tvorbou deformačních dvojčat.

Tento deformační režim vede k pojmenování této třídy oceli. Dvojčatění způsobuje vysokou hodnotu okamžité rychlosti vytvrzování, protože mikrostruktura se stává jemnější a jemnější. Výsledné dvojče hranice působí jako hranice zrn a posilují ocel. Na obr. 6 je znázorněna struktura mikrostruktury pro ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním. [11]

Obrázek 6. Mikrofotografie oceli TWIP (žíhaný). [35]



Oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním kombinují extrémně vysokou pevnost s extrémně vysokou roztažností. Hodnota n se zvyšuje na hodnotu 0,4 při přibližném inženýrském kmeni o 30 % a potom zůstává konstantní, dokud jednotné a celkové prodloužení nedosáhne 50 %. Pevnost v tahu je vyšší než 1 000 MPa. [11]

3.7.2 Aktuální použití oceli (TWIP) v automobilovém průmyslu

V tabulce č. 13 jsou představeny součásti automobilu, které se vyrábějí z oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním:

Tabulka 13. Oceli TWIP a jejich použití

| Název DP oceli | Příklad automobilových aplikací |
|----------------|---|
| TWIP 500/900 | A – sloup, přední boční člen |
| TWIP 500/980 | spodní ovládací rameno, přední a zadní nárazník |
| TWIP 600/900 | podlahový příčník |
| TWIP 750/1 000 | dveřní nárazový paprsek |
| TWIP 950/1 200 | drážní dvířka |

3.8 Martenzitická ocel (MS)

3.8.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

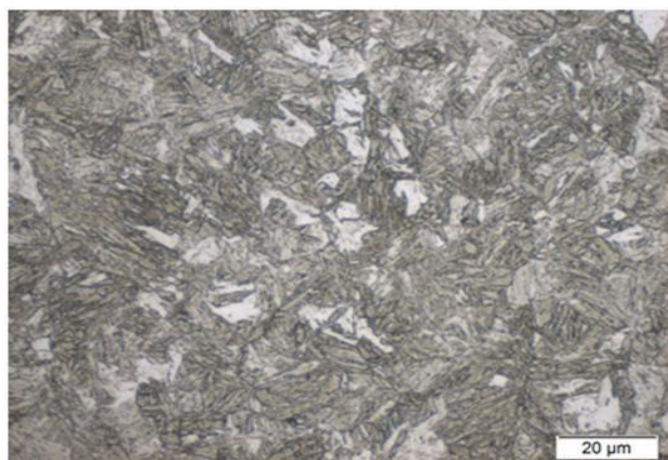
Martenzitické oceli mají převážně podkladovou martenzitovou mikrostrukturu a jsou tvořeny kontinuálním žiháním v oblasti austenitu následované rychlým ochlazením oceli. Vyšší vytvrditelnosti je dosaženo pomocí zvýšení obsahu uhlíku, obvykle v řádu 0,25 % hmotnosti uhlíku. Obsah manganu je také poměrně vysoký a malé přírůstky boru mohou být také zahrnuty pro další zvýšení tvrdosti. Zvýšená vytvrditelnost díky legování snižuje dobu ochlazování, která je nezbytná k dosažení plné martenzitické struktury. Martenzitické plechy mají pevnost v tahu v rozmezí

900 – 1 600 MPa, s celkovým prodloužením přibližně 4 – 7 %. Mezní napětí se pohybuje mezi 800 – 1 350 MPa, což znamená, že tyto oceli mají velmi nízké pracovní vytvrzení. Vytváření martenzitických ocelí je obtížné kvůli mimořádně vysokému namáhání v náběhu a nízké tažnosti. Při pokojové teplotě je formování válcováním primární metodou tváření. [28]

Pro vytváření martenzitické oceli se austenit, který existuje během válcování za tepla nebo žihání, přeměňuje téměř úplně na martenzitu během kalení na válcovacím stolicí nebo v chladicím úseku kontinuální žihací linky. Martenzitické oceli jsou charakterizovány martenzitickou maticí obsahující malé množství feritu a nebo bainitu. Ve skupině vícefázových ocelí vykazují MS oceli nejvyšší úroveň pevnosti v tahu. Tato struktura může být také rozvíjena s následným tepelným zpracováním. Martenzitické oceli poskytují nejvyšší pevnost, až do maximální pevnosti v tahu 1 700 MPa. Martenzitické oceli se často popouštějí po kalení, aby se zlepšila tažnost, a mohou poskytnout přiměřenou tvařitelnost i při extrémně vysokých pevnostech.

Na obrázku č. 7 je znázorněná mikrostruktura oceli MS 950/1 200. [12]

Obrázek 7. Mikrostruktura oceli MS 950/1200. [36]



Obsah uhlíku k martenzitické oceli zvyšuje prokalitelnost a zpevňuje martenzit. Mangan, křemík, chrom, molybden, bór, vanad a nikl se také používají v různých kombinacích pro zvýšení prokalitelnosti. Oceli této skupiny se vyrábějí z austenitické fáze rychlým kalením, aby se přeměnila většina austenitu na martenzit. [12]

3.8.2 Současné použití oceli (MS) v automobilovém průmyslu

Příklady automobilových aplikací jsou uvedeny v tabulce č. 14:

Tabulka 14. Oceli MS a jejich použití

| Název DP oceli | Příklad automobilových aplikací |
|----------------|--|
| MS 950/1200 | příčné nosníky, boční vnikací rámy, nárazníkové nosníky, výztuhy nárazníků |
| MS1150 / 1400 | boční vnikací rámy, nárazníkové nosníky, výztuhy nárazníků |
| MS1250 / 1500 | boční vtokové nosníky, nárazníkové nosníky |

Popis martenzitické oceli je uveden na konkrétním příkladě - Docol 1300M:

Martenzitická ocel s extrémně vysokou pevností v tahu pomáhá zlepšovat odolnost proti nárazu a zajišťuje lehkou konstrukci a nákladově efektivní výrobní metody pro automobilový průmysl. Martenzitická ocel je na trhu jednou z nejpevnějších ocelí s vysokou pevností za studena válcovaných a stala se volbou pro automobilové aplikace, jako jsou bočnice, nárazníky a stavební prvky. [12]

Chemické složení martenzitické oceli je uvedeno v tab. 15:

Tabulka 15. Chemické složení

| Název | [max. %] | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|-----|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al | Nb+Ti | Cr+Mo | Cu | B |
| Docol CR 1030Y1300-MS | 0,16 | 0,4 | 1,8 | 0,02 | 0,01 | 0,015 | 0,1 | 1 | 0,2 | 0,005 |

Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 16:

Tabulka 16. Mechanické vlastnosti

| Název | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A _{80min} [%] |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Docol CR 1030Y 1300T -MS | 1030 – 1300 | 1300 – 1500 | 3 |

3.9 Vysoko-pevnostní ocel (HSS)

S rostoucí poptávkou na snižování hmotnosti vozidla se kovy s vysokou pevností (HSS) staly více a více využívanější v oblasti automobilového průmyslu. Automobilový průmysl nedávno projevil velký zájem o technologii svařovaných polotovarů (TWB). Ve skutečnosti umožňují TWB použít různé materiály k vytvoření jediné součásti, která umožňuje návrháři lépe přizpůsobit použití materiálů a tloušťky pro konkrétní účely. [7]

Tato technologie poskytuje obrovskou flexibilitu při navrhování nových lisovaných konstrukcí. Komponenta TWB je vyrobena ze dvou nebo více vysoce pevných plechů z různých materiálů se stejnými nebo odlišnými tloušťkami, které jsou svařeny dohromady do jednoho komponentu před procesem tváření. Nejen, že tento proces šetří materiály a snižuje náklady na lisování a montáž, ale také zlepšuje odolnost proti nárazu tím, že záměrně zvyšuje tuhost, pevnost a kapacitu absorpce energie. [7]

4. Závěr

Se zvyšujícím se požadavkem na zmenšení hmotnosti vozidla, nižší spotřebu paliva a vyšší bezpečnostní faktor se v oblasti automobilového průmyslu stále více a využívá vysoce pevná ocel. Vzhledem k vysoké tažnosti a vysoké pevnosti v tahu z vysoce pevných ocelí se tvařitelnost lisovacích dílů stává velmi nízkou; může dojít k poškození pružiny a trhliny na lisovacích dílech, které přísně omezují použití vysoce pevných ocelí. Metoda tvarování pomocných proudů se liší od tradičních způsobů zpracování plastů; zpracovává efektivně vysoce odolné ocelové materiály.

V této práci jsem uvedla různé druhy oceli, které se používají v automobilovém průmyslu. V automobilovém průmyslu se používají ještě i další druhy oceli: pokročilé vysoko-pevnostní oceli, vysoko-pevnostní oceli, oceli s transformačně indukovanou plasticitou, oceli využívající deformaci dvojčatěním, dvoufázová ocel, vícefázové oceli, martenzitická ocel, vysoce pevné mikrolegované oceli. Použití vysokopevnostní oceli výrazně snižuje hmotnost automobilu.

Vysokopevnostní ocel pro podvozek musí poskytovat vynikající tvarovatelnost a odolnost proti únavě. Podvozek nese velký potenciál pro snížení hmotnosti. Obecná tuhost a dobré únavové vlastnosti jsou velmi důležité konstrukční faktory a snížení tloušťky může být náročné. Ale s dobrými tvářecími vlastnostmi a optimalizovanou tažností hran v oceli lze zlepšit konstrukci a snížit hmotnost. Díky velké houževnatosti je možné mít také nákladově efektivnější výrobu s možností snížení počtu dílů.

Pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS) mají vyšší pevnost než vysoce pevná ocel (HSS), určené na bezpečnostní a nosné prvky automobilové konstrukce. Při použití oceli této skupiny pro výrobu výztuhy nárazníků dochází k velkým úsporám hmotnosti, neboť výztuha nárazníku musí splňovat vysoké požadavky na silovou absorpci.

Modernizace bočních příklepových nosníků může přispět k významným úsporám hmotnosti. Pro tento účel pevnost oceli pokročilé vysokopevnostní oceli je ideálním řešením.

Také existuje celá řada ocelí nové generace, které vznikají s rozvojem automobilového průmyslu. Oceli využívající deformaci dvojčatěním (TWIP) jsou součástí pokročilých vysoko-pevnostních ocelí (AHSS) druhé generace, které pokrývají stejné rozmezí pevnosti v tahu jako dvoufázové oceli (DP) a oceli s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP), ale mají výrazně vyšší tažnost. Tato větší tažnost zvětšuje náklady na obrábění, což je hlavní překážkou pro širší používání. Jiné varianty vícenásobných fází mikrostruktury jsou také vyvíjeny, zejména založené na austenitu jako dominantní mikrostrukturní složce.

Části, jako je výztuž a příčné nosníky, musí mít vysokou absorpční schopnost a nízkou hmotnost. Tuhost může být udržována s optimalizovaným geometrickým tvarem.

5. Seznam použité literatury

- [1] SKÁLOVÁ, Jana et al. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978–80–7043–417–8;
- [2] VOJTĚCH, Dalibor a Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN 978–80–7080–600–5;
- [3] MACEK, Karel a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 978–80–0103–513–9;
- [4] MACHEK, Václav a České vysoké učení technické v Praze. Dopravní fakulta. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování oceli a litin*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978–80–0105–686–8;
- [5] BOGDANOV, S.G. Charakteristika metallov. *Metallovedenije i termičeskaja obrabotka metallov*. Moskva, 1950, 1959. ISSN 0026-0819.
- [6] ROSSIJSKAJA AKADEMIJA NAUK. OTDELENIJE FIZIČESKICH NAUK. *Metally i stal. Fizika metallov i metallovedenije*. Sverdlovsk, Moskva: Akademie nauk SSSR, 1959, 1955. ISSN 0015-3230.
- [7] *Journal of materials processing technology*. Amsterdam: Elsevier, 1990. ISSN 0924-0136.
- [8] Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steel [online]. WorldAutoSteel — Strong. Safe. Sustainable. [cit. 21.09.2017]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/>
- [9] Dual Phase (DP) Steels [online]. WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [cit. 28.09.2017] Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/>

- [10] Complex Phase (CP) Steels [online]. WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [cit. 01.10.2017]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/complex-phase-cp-steels/>
- [11] Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steel [online]. WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [cit. 01.10.2017]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/twinning-induced-plasticity-twip-steel/>
- [12] Martensitic (MS) Steel [online]. WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [cit. 05.10.2017]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/martensitic-ms-steel/>
- [13] SINGH, Ramesh. Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards [online]. 2;2; US: Butterworth Heinemann, 2016;2015;. ISBN 978–01–2804–176–5;
- [14] Ishida K, Nishizawa T. Effect of alloying elements on stability of epsilon iron. Trans Jpn Inst Met 1974; 15: s.225–231.
- [15] Jacques PJ, Girault E, Mertens A, Verlinden B, Van Humbeeck J, Delannay F. The developments of cold-rolled TRIP-assisted multiphase steels. Alloyed TRIP-assisted multiphase steels. ISIJ Int 2001; 41: s.1068–1074.
- [16] Li LF, Zhang XJ, Yang WY, Sun ZQ. Microstructure and mechanical properties of a low-carbon Mn-Si multiphase steel based on dynamic transformation of undercooled austenite. Metall Mater Trans A 2013; 44: s.4337–4345.
- [17] Hashimoto S, Ikeda S, Sugimoto KI, Miyake S. Effects of Nb and Mo addition to 0.2%C-1.5%Si1.5%Mn steel on mechanical properties of hot rolled TRIPaided steel sheets. ISIJ Int 2004; 44: s.1590–1598.
- [18] Pereloma EV, Timokhina IB, Hodgson PD. Transformation behaviour in thermomechanically processed C-Mn–Si TRIP steels with and without Nb. Mater Sci Eng, A 1999; 273–275: s.448–452.

- [19] Fu B, Yang WY, Li LF, Sun ZQ. Effect of bainitic transformation temperature on the mechanical behavior of cold-rolled TRIP steels studied with in-situ high-energy X-ray diffraction. *Mater Sci Eng, A* 2014; 603: s.134–140.
- [20] TIMOKHINA, I. B., E. V. PERELOMA a P. D. HODGSON. Microstructure and mechanical properties of C–Si–Mn(–Nb) TRIP steels after simulated thermomechanical processing. *Materials Science and Technology*. 2001, vol. 17, no. 2, s. 135-140. ISSN 0267-0836
- [21] Yue S, DiChiro A, Zarei-Hanzaki A. Thermomechanical processing effects on C-Mn-Si TRIP steels. *JOM* 1997; 49: s.59–61.
- [22] Shipway PH, Bhadeshia HKDH. Mechanical stabilization of bainite. *Mater Sci Technol* 1995; 11: s.1116–1128.
- [23] ZRNIK, Jozef et al. Effect of processing conditions on structure development and mechanical response of Si–Mn ‘TRIP’ steel. *Materials Science & Engineering A*. 2008, vol. 483, s. 71-75. ISSN 0921-5093.
- [24] Hosseini SMK, Zaeri-Hanzaki A, Yue S. Effect of austenite deformation in non-recrystallization region on microstructure development in low-silicon content TRIP-assisted steels. *Mater Sci Eng, A* 2014; 618: s.63–70.
- [25] R. Burdzik, P. Folęga, Ł. Konieczny, B. Łazarz, Z. Stanik, J. Warczek, Analysis of material deformation work measures in determination of a vehicle’s collision speed, *Archives of materials Science and Engineering*, Vol. 58, No.1, 2012, s.13-21.
- [26] Davies, R. G. (1978). Influence of martensite composition and content on the properties of dualphase steels. *Metallurgical Transactions A*, 9A, s.671–679.
- [27] Dicello, J. A. G., & George, R. A. (1974). Design criteria for the dent resistance of auto body panels. SAE Technical Paper No. 740081. Detroit, MI: SAE World Congress.

- [28] Wang, W., Li, M., He, C., Wei, X., Wang, D., & Du, H. (2013). Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600–1000MPa dual phase steels and 1200MPa fully martensitic steels. *Materials and Design*; 47: s. 510–521.
- [29] WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [online]. Copyright © [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/AHSS-Fig1-4.jpg>
- [30] [online]. [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/Fig2-7_TripMicrograph.png
- [31] [online]. [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/>
- [32] [online]. [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/AHSS-Fig1-2.jpg>
- [33] [online]. [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/DP_Photomicro.png
- [34] WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [online]. Copyright © [cit. 18.03.2018]. Dostupné z: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/Fig2-10_CPPhotomicro.png
- [35] [online]. [cit. 20.03.2018]. Dostupné z: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/Fig2-12_MSPhotoMicro.png
- [36] WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [online]. Copyright © [cit. 21.03.2018]. Dostupné z: http://www.worldautosteel.org/wp-content/uploads/2012/03/Fig2-12_MSPhotoMicro.png
- [37] [online]. [cit. 25.03.2018]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/complex-phase-cp-steel/>

[38] WorldAutoSteel – Strong. Safe. Sustainable. [online]. [cit. 25.03.2018].

Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel>