

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**MATERIÁLY S MEZÍ KLUZU NAD 500 MPa URČENÉ PRO
TVÁŘENÍ**

Autor: Josef Hejnic
Studijní program: Teoretický základ strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Michal Valeš

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejnic** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **456158**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Materiály s mezí kluzu nad 500 MPa určené pro tváření

Název bakalářské práce anglicky:

Materials with tensile strenght above 500 MPa used in forming

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do problematiky tváření
2. Rešeršní přehled současného stavu
3. Přehled moderních vysokopevnostních materiálů
4. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Valeš, ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. František Tatiček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**


Ing. Michal Valeš
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

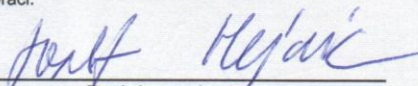

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

9.5.2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací s vedoucím práce Ing. Michalem Valešem a konzultantem Ing. Františkem Tatíčkem, Ph.D. K vypracování jsem použil materiály, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 29. 5. 2018

.....
Josef Hejnic

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Michalu Valešovi za pomoc při vypracování práce, podporu a trpělivost. Rovněž děkuji konzultantovi Ing. Františku Tatíčkovi, Ph.D. za cenné rady při psaní bakalářské práce. Závěrem bych chtěl poděkovat společnosti ŠKODA AUTO, a.s. za poskytnutí vzorku materiálu na testování.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název bakalářské práce:	Materiály s mezí kluzu nad 500 MPa určené pro tváření
Akademický rok:	2017/2018
Autor:	Josef Hejnic
Vedoucí práce:	Ing. Michal Valeš

Abstrakt:

Bakalářská práce pojednává o problematice materiálů s mezí kluzu vyšší než 500 MPa určených pro tváření. Snaha o snížení hmotnosti dílu při zachování užitečných vlastností vede k rostoucímu zájmu o materiály s vysokou mezí pevnosti a jejich zpracování pomocí tvářecích procesů. Zabývá se výrobním procesem těchto materiálů a uvádí možnosti zvyšování jejich pevnosti. Jádrem práce je přehled současného stavu vysokopevnostních materiálů určených pro tváření. Dále jsou sumarizovány moderní způsoby zpracování těchto materiálů. V experimentální části jsou ověřeny tyto vlastnosti na materiálu MBW 1500. Práce by měla přinést užitečný přehled rozvíjející se oblasti vysokopevnostních materiálů.

Klíčová slova: vysokopevnostní oceli, zvyšování pevnosti, mez kluzu, UHSS, hot-forming

Rozsah práce a příloh

Počet stran:	52
Počet obrázků:	25
Počet tabulek:	19

Annotation

University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Title of work:	Materials with tensile strength above 500 MPa use used in forming
Academic year:	2017/2018
Author:	Josef Hejnic
Supervisor:	Ing. Michal Valeš

Abstract:

This work is focused on materials with tensile strength above 500 MPa and their manufacturing and processing. Nowadays a great effort is made to reduce the part weight for automotive industry while preserving the product utility properties. This drives the growing interest for high-tensile-strength materials. They are often processed by forming. This work describes the manufacturing processes of such materials and also describes methods of tensile strength enhancement. The core part of the work overviews property-wise the current materials used for forming and different ways of their processing. In the experimental part, the properties of high-tensile-strength material (MBW 1500) were verified. The work should present a useful review for progressive field of high-tensile-strength materials.

Keywords: high strength steel, increasing strength, yield strength, UHSS, hot-forming

Volume of work

Number of pages:	52
Number of pictures:	25
Number of tables:	19

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Výroba vysokopevnostních plechů.....	12
2.1	Výroba železa.....	12
2.2	Výroba oceli.....	13
2.3	Proces lití a válcování plechů za tepla.....	15
2.4	Válcování plechů za studena.....	17
2.5	Další zpracování plechů.....	17
3	Princip zvyšování pevnosti materiálu.....	18
3.1	Chemické zvyšování pevnosti materiálu.....	18
3.1.1	Čistota materiálu.....	18
3.1.2	Legování materiálu.....	19
3.1.3	Prášková metalurgie.....	20
3.1.4	Homogenita materiálu.....	21
3.2	Mechanické zvyšování pevnosti materiálu.....	21
3.3	Zvyšování pevnosti materiálu pomocí tepelného zpracování.....	23
4	Rozdělení a příklady vysokopevnostních materiálů určených pro tváření.....	25
4.1	Rozdělení vysokopevnostních ocelí.....	25
4.2	Příklady vysokopevnostních materiálů.....	27
4.2.1	HSLA oceli.....	27
4.2.2	TRIP oceli.....	29
4.2.3	TWIP oceli.....	31
4.2.4	TBF oceli.....	32
4.2.5	Q&P oceli.....	33
4.2.6	MART oceli.....	34
4.2.7	UHSS-B oceli.....	36
4.2.8	Neželezné a nekovové materiály.....	38
5	Zpracování vysokopevnostních materiálů.....	40
5.1	Lisování za studena.....	40
5.2	Plošné válcování.....	41
5.3	Hydroforming.....	41
5.4	Lisování za tepla.....	42
5.5	Hot-forming.....	42
6	Ověření vlastností materiálové jakosti MBW1500 + AS150.....	44
6.1	Testovaný materiál.....	44
6.2	Zkušební metoda.....	45

6.3	Naměřené hodnoty	46
7	Závěr	47
	Seznam použité literatury	48
	Seznam obrázků	51
	Seznam tabulek	52

1 Úvod

Pro automobilový průmysl je směrodatná legislativa, která stanovuje normy bezpečnosti a produkce výfukových plynů pro nově vyráběné automobily. V současné době se tato norma neustále zpřísňuje. Jeden z názorných příkladů může být závazná emisní norma EURO, která je platná ve všech zemích Evropské unie. Tato norma stanovuje limitní hodnoty výfukových exhalací – množství oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO_x) a množství pevných částic (PČ). Z tabulky 1 je vidět, jak se jednotlivé generace normy zpřísňovaly u zážehových benzínových motorů, v tabulce 2 je patrné zpřísňování normy u vznětových naftových motorů. Zavedení nové generace normy EURO je platné pro všechny automobily, které byly uvedeny na trh po vydání této normy. [1]

Tabulka 1: Emisní norma pro benzínové motory [2]

Rok/norma	CO [g/km]	NO _x [g/km]	HC + No _x [g/km]	HC [g/km]	
1992	I	3,16	-	1,13	-
1996	II	2,20	-	0,50	-
2000	III	2,30	0,15	-	0,20
2005	IV	1,00	0,08	-	0,10
2009	V	1,00	0,06	-	0,10
2014	VI	1,00	0,06	-	0,10

Tabulka 2: Emisní norma pro naftové motory [2]

Rok/norma	CO [g/km]	NO _x [g/km]	HC + No _x [g/km]	PČ [g/km]	
1992	I	3,16	-	1,13	0,18
1996	II	1,00	-	0,70	0,08
2000	III	0,64	0,50	0,56	0,05
2005	IV	0,50	0,25	0,30	0,025
2009	V	0,50	0,18	0,23	0,005
2014	VI	0,50	0,08	0,17	0,005

Mimo tyto normy EURO výrobci musí dodržet i právě platné limity CO₂, které opět stanovuje legislativa pro trh Evropské unie. Od roku 2015 platí limit 130 g CO₂ na 1 km, od roku 2020 se limit zpřísní na 95 g/km. Hodnoty produkce CO₂ jsou spojené se spotřebou automobilu. Tyto limity na rozdíl od norem EURO nemusí splňovat každé auto, ale automobilka je musí splnit v průměru za všechny značky a modelové řady. [2]

Výše uvedené normy vedly ke zdokonalování spalovacích motorů a soustav výfukových plynů. Příkladem je zavedení filtrů pevných částic do výfukové soustavy, které si vyžádala hlavně změna EURO normy z třídy III na třídu IV v roce 2005. Pro snížení oxidů dusíku byly vyvinuty EGR výměníky, které se využívají k recirkulaci spalin. Při tomto procesu se do směsi paliva a nasátého vzduchu přidají ochlazené spaliny. Díky tomu je v celkové směsi méně kyslíku a tím se snižuje teplota hoření směsi v motoru. Tímto postupem je omezen výskyt oxidů dusíku, které vznikají při dostatku kyslíku za vysokých teplot. Na úkor oxidů dusíku vzniká víc samotného dusíku, který je ovšem pro životní prostředí neškodný.

Již tak drahý vývoj motorů se dál stává ještě nákladnějším a jednotlivé pokroky jsou, co se týče vlivu na splnění norem, čím dál menší. Nastal prostor pro zlepšení dalších vlastností aut, které mají také vliv na vznik jednotlivých škodlivin, případně spotřeby automobilu a tím i vzniku oxidu uhličitého (CO₂). Mezi ně patří například hmotnost nebo aerodynamický odpor při jízdě.

Při poklesu hmotnosti vozidla o 100 kg klesne spotřeba paliva až o 0,7 l na 100 km. Snižování hmotnosti je možné provést dvěma způsoby. První směřuje ke zmenšení celého automobilu. Tím, že se zmenší celá karoserie, klesne celková hmotnost a tím i emise automobilu. Zmenšování hmotnosti na úkor velikosti je pro většinu osobních aut nepoužitelná. Více zákazníků naopak projevuje zájem o prostornější auta, u jednotlivých modelů se s každou generací má tendenci zvětšit jak rozvor, tak rozchod a tím i délka a šířka vozidla. [3]

Druhý způsob snižování hmotnosti vede k použití tenčích a tím pádem i lehčích součástí. Nejtěžší u automobilu mimo pohonné jednotky jsou nosné prvky karoserie, které zaručují její pevnost a tuhost, což se projeví především při nárazu – nehodě automobilu. Při pouhém ztenčení nosných prvků by automobil ztratil svou bezpečnost, a tím nemusel splnit normy, které bezpečnost hodnotí a také se postupně zpřísňují. Výrobci proto nezbývalo než investovat peníze do dražších a pevnějších materiálů, které i při nižší hmotnosti dokáží posádce zaručit dostatečnou bezpečnost.

Tento postup vedl k velkému rozvoji vysokopevnostních materiálů, ke zkoumání struktur a vlastností. Tyto materiály mají značně odlišné vlastnosti od měkkých, tvárných materiálů, které se používaly do té doby. To přineslo i nové technologické způsoby do jejich zpracování, jelikož se vyznačují vysokou mezí kluzu, ale zároveň i nižší tažností a větším odporem při tváření, které patří mezi hlavní způsoby zpracování těchto materiálů.

Tváření spočívá v trvalé změně tvaru, k čemuž dochází pomocí plastické deformace, jejíž velikost musí překonat mez kluzu, ale nesmí překonat tažnost a pevnost materiálu, kdy dojde k porušení soudržnosti materiálu. Druhy tváření rozdělujeme na základě několika kritérií.

První může být podle teploty tváření, kde jsou dvě hlavní kategorie – tváření za studena a za tepla. Při tváření za studena nedochází k překročení 0,3 násobku termodynamické teploty tavení kovu. Mezi jeho výhody patří zpevňování materiálu ve směru deformace, naopak klesá tažnost a homogenita materiálu. Tu můžeme zpětně získat pomocí žíhání. Tváření za tepla se provádí při teplotách vyšších než 0,45 násobku teploty tání kovu, tedy nad teplotou rekystalizace materiálu. Mezi výhody takového zpracování patří menší tvářecí síly, lepší tažnost a absence vzniku nerovnoměrného zpevnění. [4]

Procesy tváření dále rozdělujeme na plošné a objemové tváření. Při plošném tváření dochází pouze ke změně původního tvaru při minimální změně plochy a tloušťky materiálu. Při objemovém tváření dochází k výrazné změně tvaru i tloušťky, tím dochází ke zvětšení plochy původního polotovaru. [4]

Dále můžeme tváření dělit podle působení tvářecích sil a jednotlivých typů, mezi nejběžnější patří válcování, tažení, protlačování, kování a lisování.

V bakalářské práci se budu zabývat právě vysokopevnostními materiály, které mají mez kluzu nad 500 MPa a jsou určeny ke zpracování tvářením, nejčastěji ve formě plechu. Cílem je utvořit jejich přehled, zabývat se budu jejich chemickým složením, výrobou a použitím hlavně z pohledu karosářského průmyslu v současné době, kdy zažívají obrovský rozvoj.

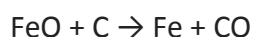
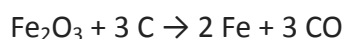
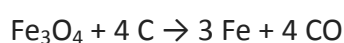
2 Výroba vysokopevnostních plechů

2.1 Výroba železa

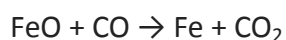
Stejně jako i výroba dalších železných produktů začíná výroba plechů ve vysoké peci. Do pece se umísťuje vsázka v podobě železné rudy, koksu a vápence. Ten ve vysoké peci působí jako struskotvorná přísada. Současně se přidávají přísady, které mají především chránit železo před zpětnou oxidací, případně vyvázat škodlivé prvky a tím omezit jejich množství v železe. [5]

Ve vysoké peci dochází ke dvěma chemickým procesům: [5]

Přímá redukce:

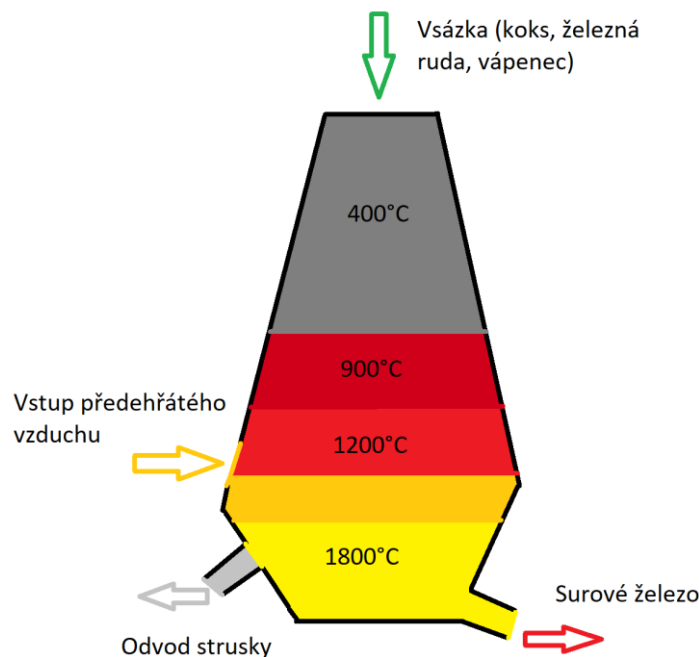


Nepřímá redukce:



V peci k těmto reakcím dochází při teplotách až 2 000 °C, následně je ve spodní části odděleno roztavené železo od strusky. Jedná se o kontinuální proces, kdy se do pece dodává vsázka a odebírá surové železo a struska. Proces se zastavuje pouze kvůli odstávce na opravu vysoké pece, k tomu dochází většinou jednou za pět až deset let. [6]

Proces získávání železa se za poslední desetiletí nijak výrazně neměnil. Jediným rozdílem může být, že se dnes při výrobě železa dbá na větší ekologičnost procesu, a jsou proto kvalitněji zachytávány vysokopecní plyny, které se zároveň využívají pro předehřev vzduchu. Samotné spaliny jsou následně filtrovány, aby se omezil vliv výroby na okolí, ale i tak hutní výroba značně zatěžuje okolní životní prostředí. [7]



Obrázek 1: Proces výroby železa ve vysoké peci

2.2 Výroba oceli

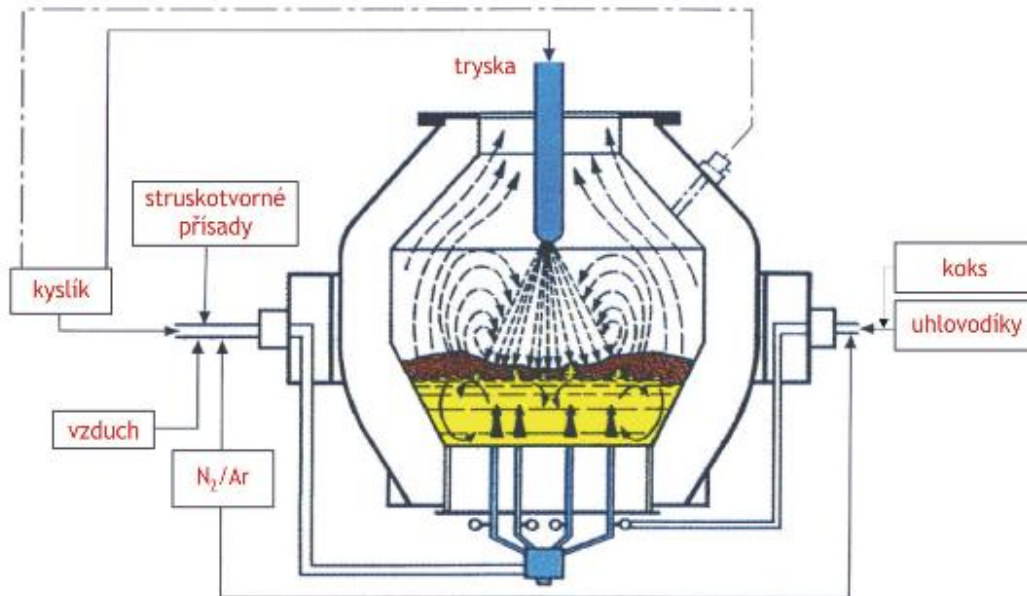
Výroba oceli je proces, kdy se mění chemické složení a tím vzniká ze surového železa ocel. Reguluje se při něm množství uhlíku obsažené v železe z původního obsahu kolem 4 % na výsledné množství, které nepřevyšuje 2,1 %. Při výrobě oceli se odstraňují škodlivé prvky, které jsou obsaženy v surovém železe a měly by negativní vliv na vlastnosti oceli. Naopak je možné ocel legovat dodáním tzv. prospěšných prvků, které zlepšují vlastnosti materiálu. Základní rozdělení oceli podle množství obsažených legujících prvků je následovné:

- nízkolegované – do 4 % legujících prvků
- středně legované – 5 až 10 % legujících prvků
- vysokolegované – nad 10 % legujících prvků [8]

O vlivu chemického složení oceli zejména na mechanické vlastnosti plechu se podrobně zmiňují v kapitole 2.2.1.

V současné době se pro výrobu oceli používají hlavně kyslíkové konvertory, Siemens-Martinské pece a elektricky vytápěné pece.

U kyslíkových konvertorů dochází ke vzniku oceli za pomoci vhánění kyslíku tryskou nad roztavenou vsázkou. Vsázku v tomto případě tvoří surové železo, železný odpad, který se tímto procesem recykluje, a pálené vápno (CaO), které plní funkci struskotvorné přísady. Pomocí vháněného kyslíku dochází ke vzniku oxidu uhličitého i oxidů dalších nežádoucích prvků. [5]



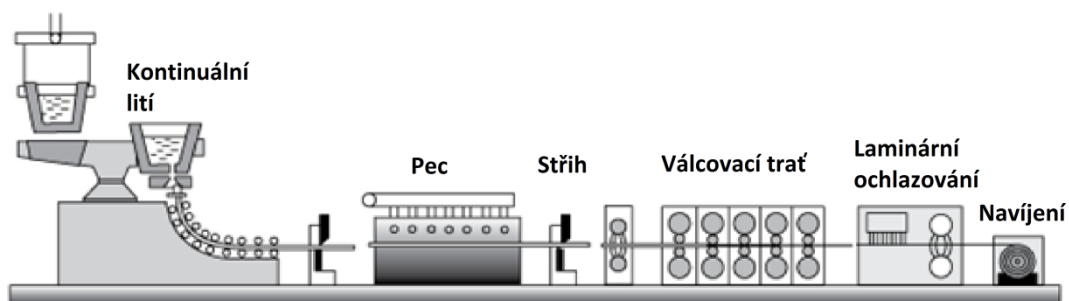
Obrázek 2: Schéma kyslíkového konvertoru [9]

Siemens-Martinské pece používají k roztavení vsázky nejčastěji přehřátý plyn. Vsázku tvoří železný odpad, surové železo a struskotvorné přísady – vápenc (CaCO₃), pálené vápno (CaO) a železná ruda (Fe₂O₃). Při procesu v peci dochází k oxidaci nežádoucích prvků s kyslíkem obsaženým v struskotvorných přísadách a tím ke vzniku oceli. V současné době se Siemens-Martinské pece používají výjimečně, jelikož výroba oceli tímto způsobem je nákladnější oproti kyslíkovým konvertorům. [5] [9]

Poslední možností je zkujňování železa v elektrické peci. Elektrody umístěné těsně nad taveninou vytvoří elektrický oblouk, kterým je dosaženo vysokých teplot, a díky tomu je ocel možné zušlechťovat i pomocí legur s vysokým bodem tání. Tímto způsobem vzniká velice kvalitní ocel s vysokou čistotou. Protože se jedná o nejnákladnější způsob zkujňování železa, používá se pro výrobu vysoce kvalitních ocelí. [9]

2.3 Proces lití a válcování plechů za tepla

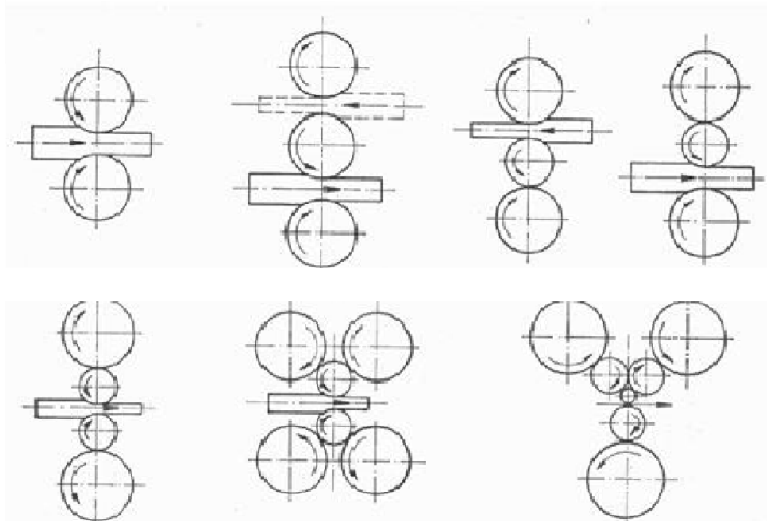
Po tom, co je proces výroby oceli ukončen, přichází na řadu samotná výroba plechů. Tato výroba vždy začíná válcováním za tepla, k čemuž se používají válcovací tratě.



Obrázek 3: Schéma procesu kontinuálního lití [10]

Na začátku válcovací tratě je pánvová pec, do které je průběžně přidávána roztavená ocel z předchozího zpracování. Z výpusti pánvové pece neustále vytéká kov do začátku válcovací tratě. Takto je zaručen nepřetržitý přísun roztavené oceli pro proces kontinuálního lití, který se používá pro výrobu dlouhých pásů plechu. [10]

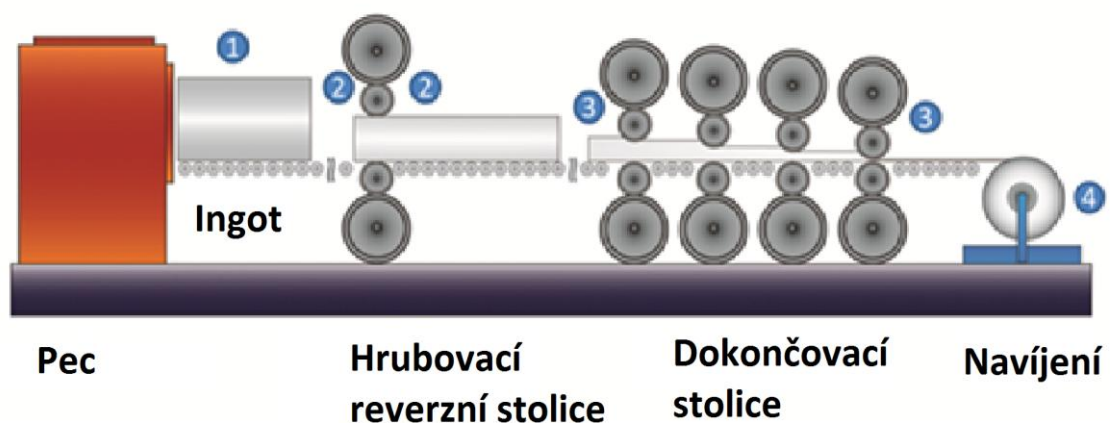
Nejprve je tavenina mírně ochlazena, vedena válci a odlita do pásu - bramy o tloušťce kolem 250 mm. Vzápětí se tyto pásy opět zahřejí na teplotu kolem 1 200 °C a jsou válcovány do finálních tlouštěk plechu. K tomu se používají takzvané válcovací stolice, které se skládají z několika válců. Základní válce provádějí samotné tváření materiálu. Mají malý průměr, aby dokázaly vyvinout co největší měrný tlak na materiál. Tím ale může dojít k prohnutí, čímž by vznikl plech s nerovnoměrnou tloušťkou - tlustý střed a tenké kraje pásu. Aby se tomu předešlo, jsou tyto válce podepřeny dalšími válci o větším průměru. Tím dodávají tuhost základním válcům. Běžně se tak používá spojení až dvanácti válců za sebou. [10]



Obrázek 4: Schéma různých válcovacích pořadí [11]

Poté je plech rovnoměrně ochlazen, aby došlo k co nejmenším deformacím a pnutí materiálu. Na konci procesu je pás plechu namotáván do svitku a dělen dle požadované délky. [10]

Alternativou k procesu kontinuálního lití je metoda rozválcování ingotů, kdy je nejprve odlit ingot do kokily. Následně je opět zahříván a válcován. Pro válcování se opět používají válcovací stolice, kdy se po každém průchodu zmenší odtrh (mezera mezi válci) válců a tím se ztenčuje materiál až do požadované tloušťky. Tento způsob je však časově i nákladově náročnější a navíc vznikají plechy nižší kvality oproti metodě kontinuálního lití, proto se v současné době používá minimálně. [12]



Obrázek 5: Schéma výroby plechu pomocí rozválcování ingotu [12]

2.4 Válcování plechů za studena

Další formou zpracování je válcování plechů za studena. Touto metodou vznikají plechy s vysokou přesností a hladkým povrchem. Díky tomu jsou plechy vhodné na lakování, pokovování nebo smaltování. Toto válcování se používá pro tloušťky plechu do 4 mm. [13] [10]

Jako vstupní polotovary slouží pás válcovaný za tepla, který prošel odstraněním okují (například otryskáním) a mořením. Takovýto pás se dále válcuje do požadované tloušťky, ale již za studena. K válcování slouží opět válcovací stolice, jejich počet je závislý na rozdílu tlouštěk vstupního a výstupního pásu a na pevnosti materiálu. Při procesu je pás plechu mazán, aby nedocházelo k poškození povrchu ve válcovacích stolicích. [10]

2.5 Další zpracování plechů

Po rozválcování plechů na požadovanou tloušťku mohou v postupu výroby plechů následovat další operace, mezi které patří žíhání, úprava povrchu, rovnání a následné dělení plechů.

Žíhání plechů se provádí za účelem změny některých mechanických vlastností, zejména slouží k poklesu tvrdosti, k zvýšení rovnoměrnosti struktury a ke zjemnění zrna. Nejčastěji se plechy žíhají normalizačně, při tomto procesu se materiál zahřeje na teplotu 30 °C – 50 °C nad křivku A_{C3} s výdrží na teplotě v řádu hodin a s následným volným ochlazením. Pro plechy se používají dvě metody – kontinuální nebo skupinové žíhání. [8]

Do úprav povrchů plechů řadíme záměrnou změnu struktury povrchu, kdy se různými metodami dosahuje zdrsnění povrchu za účelem lepší přilnavosti laku. Mezi úpravy povrchu patří i pokovování, nejčastěji zinkování, které zajišťuje zvýšenou protikorozní ochranu plechu. Zinkování se provádí dvěma způsoby – žárově nebo galvanicky. Tyto metody se liší jak způsobem provedení, tak i vlastnostmi samotné vrstvy - u žárového zinkování vzniká silnější vrstva, která je korozně odolnější.

Finální zpracování plechu je jeho jak příčné, tak i podélné narovnání a navinutí do svitku, případně dělení na jednotlivé tabule plechu. Takto zpracovaný plech je určen k další výrobě, jak pro automobilový průmysl, tak i pro jeho využití v jiných oblastech průmyslu.

3 Princip zvyšování pevnosti materiálu

V jednotlivých fázích procesu výroby plechů existuje několik způsobů, jak zvýšit pevnost a tím i mez kluzu. Rozděleny jsou podle způsobu, kterým k navýšení pevnosti dochází – na základě změny chemických vlastností, změny pomocí odlišného mechanického zpracování nebo využití tepelného zpracování ke změně struktury materiálu.

3.1 Chemické zvyšování pevnosti materiálu

K zvyšování pevnosti pomocí změny chemického složení materiálu je prostor na začátku výrobního procesu plechů – částečně už při výrobě surového železa, nejvíce ale při výrobě oceli. Pokud je cílem při výrobě dosáhnout oceli vysoké kvality o vyšší pevnosti, je potřeba při výrobě dosáhnout dostatečné čistoty od škodlivých prvků, dodat určité množství legur, při výrobě plechů nejčastěji pomocí mikrolegování, a zajistit rovnoměrné rozložení – homogenitu materiálu.

3.1.1 Čistota materiálu

Čistota materiálu je dána výskytem škodlivých prvků. Ty se nejčastěji do oceli dostávají při výrobním procesu z želené rudy a koksu. Jejich zvýšený obsah má za následek zhoršení mechanických vlastností oceli. Byť mnohé dokáží zvýšit pevnost, je to na úkor schopnosti tyto materiály tvářet, hlavně z důvodů poklesu tažnosti a náchylnosti na vznik trhlin. Zde uvádím nejběžnější škodlivé materiály se vztahem k dalšímu zpracování materiálu jako plechu určeného především pro automobilový průmysl.

Jeden z nejfrekventovanějších škodlivých prvků je síra. U běžných ocelí je maximální obsah síry 0,06 %, u kvalitních ocelí se pohybuje pod 0,035 %. V oceli se vyskytuje ve formě sulfidů železa. Má za následek větší křehkost a lámavost materiálu, který je tak náchylnější ke vzniku trhlin, případně mikrotrhlin. Při tváření za tepla způsobuje tzv. lámavost za červeného žáru. Její vliv lze omezit přidáním některých legujících prvků (mangan, titan), kdy vzniknou sulfidy těchto prvků, které vlastnosti oceli ovlivní méně než sulfid železa. [8]

Mezi další běžně se vyskytující škodlivé prvky patří fosfor. Jeho obsah má za následek zvýšenou lámavost zastudena, což nepříznivě ovlivňuje tažnost materiálu, a navíc ovlivňuje svařitelnost. Byť se primárně řadí mezi škodlivé prvky, existuje možnost přidání – legování oceli fosforem. Jedná se o refosforizaci, která se primárně používá u nízkouhlíkových ocelí uklidněných hliníkem (IF oceli) určených

hlavně pro výrobu karoserií. Určené jsou normou EN 10 292, vyrábějí se ve třídách HX220PD až HX300PD. Legování fosforem má za následek zvýšení meze pevnosti oceli až na hodnoty přes 400 MPa při tažnosti kolem 30 %. [8] [14]

Velice nepříznivým prvkem v oceli určené pro tvářeni je vodík, jeho obsah se pohybuje ve zlomcích promile, a přesto způsobuje vznik mikrotrhlin a tím snižuje tažnost a vrubovou houževnatost. Vodíku se lze zbavit pomocí žíhání, které ale má vliv na tvrdost a tím i pevnost materiálu. [8]

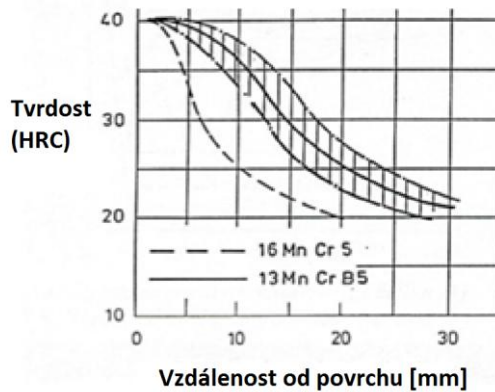
Nepříznivým prvkem je i kyslík, který sice zvyšuje tvrdost, ale zároveň křehkost materiálu. Malé množství může zjemnit strukturu, což pozitivně působí na vlastnosti materiálu. Velké množství vede k nehomogenitě materiálu – vzniku vměstků a následně k únavovým lomům. [8]

3.1.2 Legování materiálu

Legováním materiálu se rozumí přidávání prospěšných prvků do materiálu – tzv. legur, což má za následek zlepšení vlastností oceli – zvýšení meze kluzu a pevnosti i zlepšení korozní odolnosti materiálu. Legující prvky na sebe navazují kyslík (deoxidace oceli) a další škodlivé prvky a tím omezují jejich vliv na kvalitu oceli. Naopak k jejich nevýhodám patří cena, kdy přidávané prvky mohou mnohonásobně převyšovat cenu samotné oceli.

Prospěšný prvek zastoupený v největším množství v karosářských materiálech je mangan. Jeho obsah se u HSLA ocelí pohybuje na rozdíl od ostatních legur až do 2 %. V oceli na sebe dokáže navázat kyslík a síru, čímž se zmenšuje jejich vliv na kvalitu. Mangan zvyšuje tvrdost, pevnost, ale zároveň i houževnatost materiálu. [15]

V současné době se velmi rozvíjejí oceli legované borem. Nejčastěji se používá legování kolem 0,001 %, kdy i tak malé množství má vliv na mechanické vlastnosti materiálu, především na tvrdost a pevnost materiálu. Takto borem mikrolegované oceli se dokáží vyrovnat materiálům, které jsou zušlechťovány jinými prvky v řádu procent. Druhá možnost je legování borem v rozsahu 0,5 – 4 %, které se používá hlavně u vysokopevnostních ocelí v jaderných elektrárnách díky schopnosti pohlcovat neutrony. Při vyšších hodnotách legování se ale projeví nedostatek houževnatosti oceli a špatná svařitelnost, proto se nejčastěji používají oceli s obsahem boru kolem 1 %. Nárůst tvrdosti můžeme vidět na grafu v obrázku 6. [16]



Obrázek 6: Porovnání tvrdosti oceli 16 Mn Cr 5 a oceli legované borem 13MnCrB5. [16]

Další prvky běžně přidávané při zpracování železa jsou chrom, nikl, křemík, titan, molybden a vanad. Jejich poměr určuje jak mechanické vlastnosti materiálu, tak i možnost lepšího tepelného zpracování materiálu - schopnost vytvořit jiné struktury materiálu při chladnutí (bainitické nebo martenzitické). U slitinových ocelí se pohybuje jejich zastoupení v řádu jednotek procent, u mikrolegovaných materiálů mezi 0,01 % až 0,1 %. [8]

U materiálů používaných v automobilovém průmyslu se nejčastěji používá mikrolegování, u kterého se zastoupení většiny prvků pohybuje pouze v rozsahu několika desetin procenta. Hovoříme potom o vysoce pevných mikrolegovaných ocelích neboli HSLA (High Strength Low Alloy Steels). Nejedná se o slitiny již zmíněných prospěšných prvků, díky čemuž není velký nárůst ceny těchto materiálů oproti klasickým uhlíkovým ocelím. Zároveň i takto malý obsah stačí na zlepšení mechanických vlastností i na jejich stabilizaci. Tyto HSLA oceli dále dělíme podle struktury, která ovlivňuje jejich vlastnosti. [15]

3.1.3 Prášková metalurgie

Jedná se o specifický způsob zvýšení pevnosti, kdy jsme schopni pomocí lisování a spékání prášku vyrobit materiál s unikátním chemickým složením a tím i výbornými mechanickými vlastnostmi.

Na začátku stojí výroba prášků z jednotlivých materiálů. K výrobě se používají stejné prvky jako pro legování ocelí, jen je možné dosáhnout jiného poměru mezi nimi. Následuje lisování takto smíchané směsi tlakem mezi 200 MPa a 2000 MPa, kdy se prášek pěchuje již do tvaru podobajícího se výslednému výrobku. Následuje spékání polotovaru při teplotách kolem 0,8 násobku teploty tavení prvku, pokud je

složení majoritně z jednoho druhu prášku. U směsi je podmínkou, aby alespoň jedna složka zůstala v pevném skupenství. Tento proces se může opakovat i několikrát podle požadované míry zhutnění materiálu. [17]

Takto vytvořený polotovár se může dále lisovat za studena pro získání přesných rozměrů, může být dále chemicky zpracován (nejčastěji ještě sycen uhlíkem) či ošetřen povrch pro odstranění porézности výrobku. [17]

Výhody takto vyrobeného produktu jsou vyšší pevnost a houževnatost, případně i zlepšení dalších vlastností jako žáruvzdornost a žárupevnost. Je to dáno především složením materiálu, kde je možné vytvořit materiál jak s vysokým obsahem jednotlivých prvků (např. až 50 % uhlíku), tak z obtížně tavitelných prvků, jako jsou wolfram, molybden nebo niob. Důležitým parametrem při výrobě práškového materiálu je homogenita, které se dosahuje mísením prášku a kvalitním prolisováním směsi. [17]

3.1.4 Homogenita materiálu

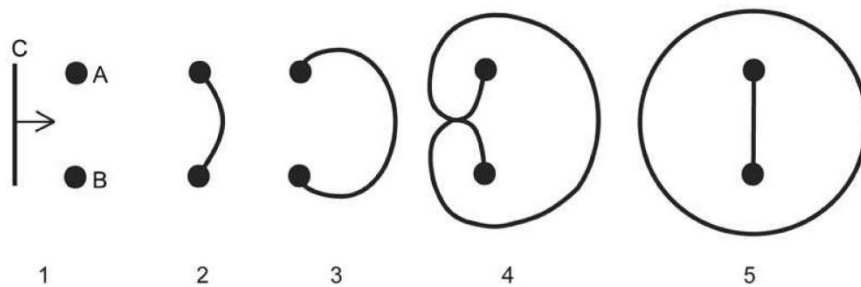
Homogenita oceli ovlivňuje vnitřní stavbu materiálu. Nestejnoměrné rozložení intersticií a dalších poruch v krystalové mřížce způsobuje nerovnoměrné chování materiálu při tváření, což vede ke vzniku mikrotrhlin. Ty se po čase mohou spojit a vytvořit únavový lom, který vede k fatálnímu selhání součásti. Obecně platí, že z takového materiálu není možné vytvořit kvalitní výrobky, ať už nehomogenita materiálu spočívá na úrovni mikročástic nebo na úrovni nehomogenity v rámci celého pásu plechu. [8]

Homogenita je ovlivněna mnoha vlivy při výrobě materiálu, nejvíce při zpracování taveniny v elektrické peci, případně konvertoru. Vliv na rovnoměrnou strukturu má i způsob lití, následné válcování, někdy různé vlastnosti materiálu způsobí až nerovnoměrné ochlazení pásu plechu. Naopak zestejnování materiálu a zjemnění struktury lze dosáhnout dodatečným převálcováním zastudena. [10]

3.2 Mechanické zvyšování pevnosti materiálu

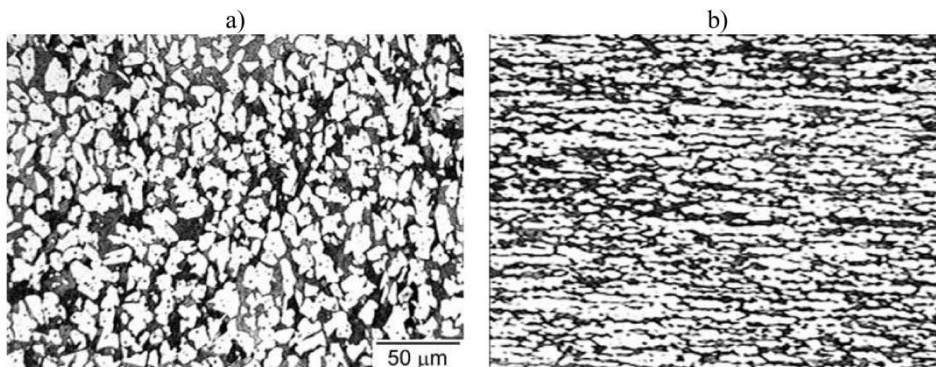
K mechanickému zvyšování meze kluzu i meze pevnosti materiálu dochází, pokud materiál deformujeme při teplotě menší, než je teplota rekrytalizace. Tento jev se nejvíce uplatňuje u válcování materiálu za studena. Ke zvýšení pevnosti dochází ale i při jakémkoli dalším tváření plechu za studena na finální výrobek.

Při tomto procesu nastává deformační zpevnění materiálu, kdy dochází nejen ke skluzu dislokací, ale také k jejich nové tvorbě. To může například nastat, pokud se v materiálu vyskytují překážky, které brání pohybu dislokací. Tento jev nazýváme Frankův-Readův zdroj dislokací. To vede ke zvýšení celkového počtu materiálu z původní hodnoty dislokací $10^{10} - 10^{12} \text{ m}^{-2}$ až na $10^{16} - 10^{18} \text{ m}^{-2}$. Při takovémto stupni přetvoření již dochází k blokaci pohybu jednotlivých dislokací, což brání dalšímu tváření. Nárůst pevnosti materiálu je různý u jednotlivých materiálů, mez pevnosti se může zvýšit až na 175 % původní hodnoty. Vše záleží na tom, k jak velké redukci tloušťky materiálu došlo. [18]



Obrázek 7: Frankův-Readův zdroj dislokací [18]

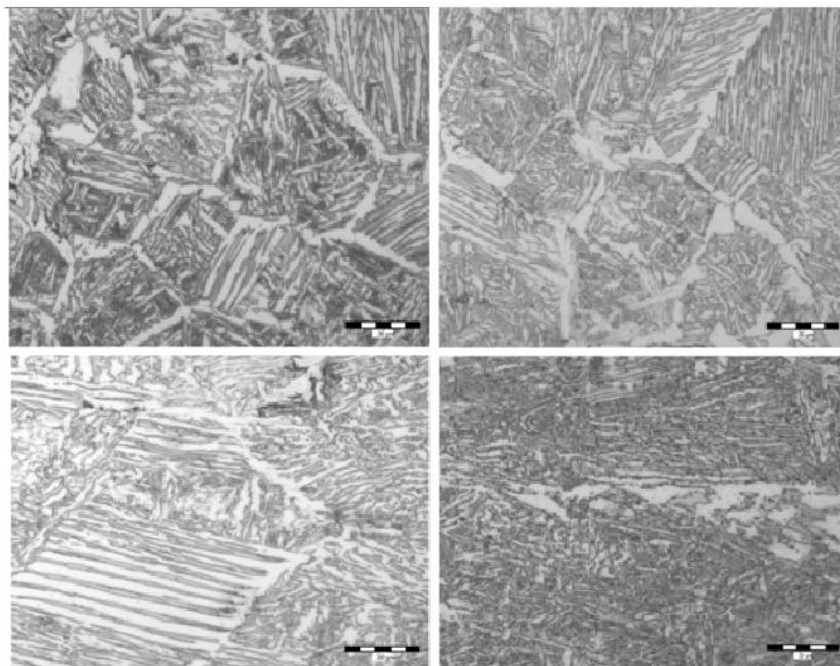
Jako vedlejší výsledek plastické deformace za studena je deformace zrn, které se protahují do směru, v jakém byl materiál tvářen. V takovémto případě můžeme mluvit o deformační textuře. [18]



Obrázek 8: Změna tvaru zrn při tváření za studena [18]

Pokud by se takto zpevněný materiál žíhal při vyšších teplotách, případně tvářel za tepla, došlo by k jeho zotavení a následné rekrytalizaci. Při zotavení by poklesl počet dislokací a bodových poruch materiálu. Při rekrytalizaci by došlo ke vzniku nových, již nedeformovaných zrn, která by měly minimum poruch. U obou těchto jevů by došlo tzv. odpevnění materiálu, kdy materiál ztratí své mechanické vlastnosti. [8]

U plechů určených pro automobilový průmysl se procesu zpevnění nejvíce využívá u TRIP (Transformation Induced Plasticity) ocelí. Tyto oceli jsou založeny na efektu, kdy plastická deformace za studena vyvolá změnu struktury z původní austenitické na strukturu martenzitickou. Tento jev se označuje jako TRIP efekt, který zlepšuje poměr pevnosti a tažnosti. Výsledné vlastnosti takovýchto plechů jsou určeny na stabilitou a obsahem zbylého austenitu. TRIP oceli takto dosahují lepších mechanických vlastností než klasické oceli tvářené za studena, protože u nich dochází pouze ke vzniku dislokací, kdežto u TRIP ocelí je pevnost zvýšena i fázovou transformací. [19]

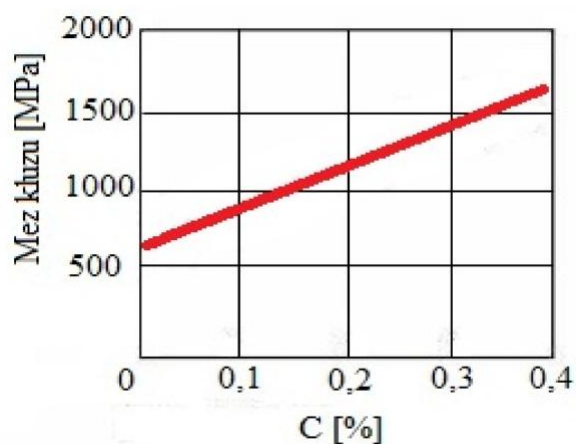


Obrázek 9: Struktura TRIP oceli bez tváření (vlevo nahoře), s tvářením za studena $\epsilon = 10\%$ (vpravo nahoře), s tvářením za studena $\epsilon = 20\%$ (vlevo dole) a s tvářením za studena $\epsilon = 40\%$ (vpravo dole). [19]

3.3 Zvyšování pevnosti materiálu pomocí tepelného zpracování

Při tepelném zpracování materiálu dochází ke změnám struktury v tuhém stavu a tím ke zlepšení především mechanických vlastností. U materiálů určených pro další tváření se využívá kalení nebo žíhání. Kalení se nejčastěji provádí jako součást procesu, kdy se plech válcuje zatepla. Žíhání pomáhá zvýšit především tažnost, ale způsobuje pokles tvrdosti, proto ho nelze použít jako zpracování za účelem zvýšení pevnosti. Často je zařazeno před samotné kalení ke zjemnění a zrovnomnění struktury materiálu. [8]

Materiál vhodný k tepelnému zpracování musí mít určité chemické složení, které zaručí, že dojde k fázové změně struktury. Schopnost dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti nazýváme kalitelnost. Primárním prvkem ovlivňujícím schopnost dosáhnout vyšší tvrdosti je uhlík, kterého by mělo být v oceli minimálně 0,4 %. Ten je nahrazován jinými legujícími prvky (Mn, Si, Cr, Ni, Mo), které dokáží zaručit kalitelnost i při obsahu uhlíku menším než 0,2 %. Běžné oceli se označují jako kalitelné, pokud dokáží vytvořit alespoň 50 % martenzitu ve své struktuře. U ocelí používajících se v automobilovém průmyslu se o kalitelnosti hovoří již od schopnosti vytvořit 30 % martenzitické fáze (MART oceli). Čím větší zastoupení martenzitu ve struktuře, tím vyšší tvrdost a tím vyšší i pevnost materiálu. V následujícím grafu je možné vidět závislost meze kluzu na obsahu uhlíku. [8] [14]



Obrázek 10: Závislost meze kluzu na obsahu uhlíku [20]

4 Rozdělení a příklady vysokopevnostních materiálů určených pro tváření

4.1 Rozdělení vysokopevnostních ocelí

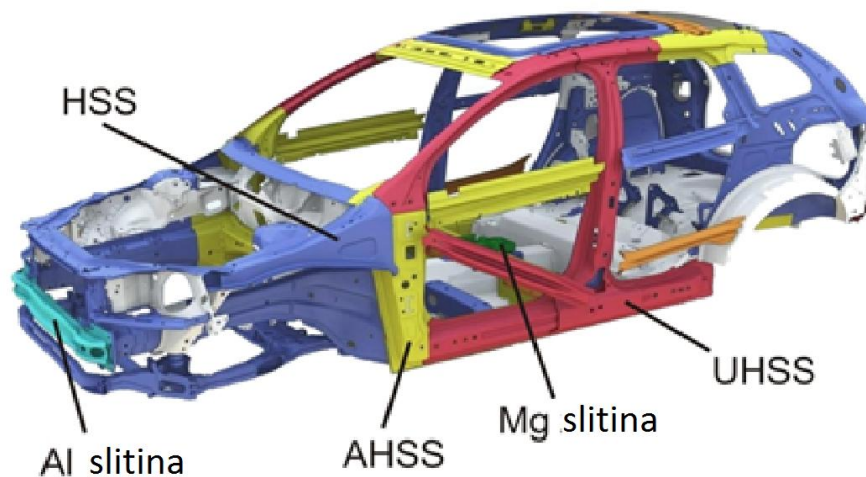
V posledních letech z důvodu potřeby karosářského průmyslu nastal obrovský rozvoj vysokopevnostních ocelí. Jelikož mnohé druhy materiálů jsou poměrně nové a neustále se vyvíjejí, nebyly pro ně stanoveny jasné podmínky rozdělení do jednotlivých kategorií, respektive existuje několik způsobů jejich zařazení.

Jedna z možností kategorizace ocelí je založena na označování materiálu podle současně platných norem. U norem ČSN mohou nastat nejasnosti u označování materiálů, protože u vyšších tříd ocelí je systém vytvořen na základě chemického složení. V tomto případě se může stát, že se pod stejným označením může nacházet více typů ocelí s různými mechanickými vlastnostmi. Dělení podle evropských norem (EN) může přinést přesnější rozdělení do jednotlivých kategorií, kdy více typů materiálu dle EN je zahrnuto v jedné kategorii ČSN. I přes toto přesnější dělení se oceli v karosářském průmyslu nejčastěji označují podle kategorií dle mechanických vlastností, metalurgických názvů (např. DP, TRIP, MART) či obchodních názvů.

Základní rozdělení ocelí je dle jejich mechanických vlastností – meze kluzu a meze pevnosti. Rozlišujeme čtyři základní kategorie ocelí – oceli s nízkou pevností, vysokopevnostní oceli (HSS), progresivní vysokopevnostní oceli (AHSS), ultra vysokopevnostní oceli (UHSS). Jejich mechanické vlastnosti uvádím v tabulce č. 3. Využití jednotlivých tříd v karoserii osobního automobilu je zřejmé z obrázku 11. [14]

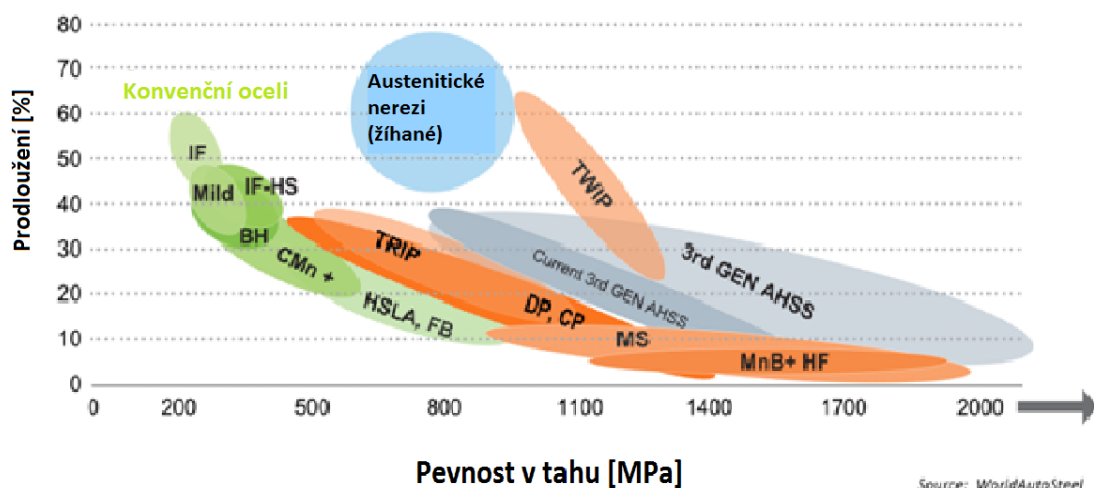
Tabulka 3: Rozdělení ocelí podle meze kluzu a meze pevnosti [14]

Pevnostní třída	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]
Oceli s nízkou pevností	< 210	< 340
Vysokopevnostní oceli (HSS)	210 – 550	270 - 700
Progresivní vysokopevnostní oceli (AHSS)	>550	590 – 980
Ultra vysokopevnostní oceli (UHSS)	> 550	> 980



Obrázek 11: Použití jednotlivých tříd materiálu u automobilu Volvo XC60 [14]

Další běžně používané rozdělení je podle metalurgických kategorií. Ty vznikají nejčastěji na základě výroby jednotlivých ocelí. Toto označení může být zavádějící, protože jedna metalurgická kategorie může mít vlivem různého chemického složení velice rozdílné mechanické vlastnosti. Například oceli TRIP, což je označení podle převálcování za studena, se podle chemického složení mohou dostat do kategorií vysokopevnostních ocelí (HSS), progresivních vysokopevnostních ocelí (AHSS) i ultra vysokopevnostních ocelí (UHSS). Výhodou naopak může být, že obchodní názvy ocelí v sobě často nesou jejich metalurgický název s kombinací mechanických vlastností, například TRIP 600/980. Na obrázku 12 je znázorněno rozložení jednotlivých kategorií v závislosti na pevnosti v tahu a prodloužení.



Obrázek 12: Diagram metalurgických typů ocelí v závislosti na prodloužení a pevnosti v tahu [20]

4.2 Příklady vysokopevnostních materiálů

4.2.1 HSLA oceli

HSLA oceli jsou vysokopevnostní mikrolegované oceli. Původní motivací jejich vzniku bylo vyvinutí pevného materiálu, dostatečně odolného vůči atmosférické korozi, který by sloužil pro výrobu plynovodů a ropovodů. Až později se začal používat v karosářském průmyslu, kde se využila jak jeho pevnost, tak i odolnost proti korozi v případě porušení ochranné vrstvy laku. [14]

Chemické složení HSLA ocelí uvádím v tabulce 4. Struktura zrn u těchto ocelí je poměrně různorodá, nejčastěji se vyskytují struktury perlitické, feriticko-perlitické nebo feriticko-martenzitické. Vyznačují se dobrou tvařitelností, svařitelností a vyšší tvrdostí hlavně díky precipitaci karbidů Ti, V, Nb. Oproti klasickým uhlíkovým ocelím vynikají i o 20 – 30 % menší hmotností při zachování stejné pevnosti. Mez kluzu je v rozsahu 240 – 620 MPa, mez pevnosti se pohybuje mezi 290 – 800 MPa. [14] [15]

Tabulka 4: Chemické složení HSLA ocelí [14]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	0,05 – 0,26
Mangan (Mn)	0,5 – 1,65
Fosfor (P)	0,025 – 0,15
Síra (S)	0,01 – 0,05
Křemík (Si)	0,15 – 0,9
Chrom (Cr)	0,25 – 0,9
Nikl (Ni)	0,25 – 1,25
Měď (Cu)	0,2 – 1
Vanad (V)	0,005 – 0,11
Ostatní (Mo, Zr, Ca, Nb, N, Al, Ti)	do 0,25

Z HSLA se ještě zvlášť vyčleňují DP, CP a CMn oceli. CMn oceli nedosahují meze kluzu nad 500 MPa, proto se s nimi v této práci nebudu zabývat. DP (Dual Phase) oceli jsou speciálně vyvinuté oceli pro karosářský průmysl. Jsou složeny ze dvou fází – martenzitických útvarů, kterých je kolem 10 - 40 % ve feritické matici. Některé druhy obsahují i další fáze, hlavně bainit a perlit, ty se ale vyskytují v malých množstvích. Chemickým složením se podobají klasickým HSLA, liší se obsahem uhlíku a fosforu. U DP ocelí může dosahovat obsah uhlíku až do výše 0,4 %, i tak se řadí k nízkouhlíkovým ocelím. [14] [15]

DP oceli se vyznačují vlastnostmi potřebnými při jejich zpracování na prvky karoserie. Mez kluzu dosahuje až k 780 MPa, mez pevnosti se pohybuje v rozsahu 400 – 1120 MPa. Je možný ještě další růst mezí pevnosti a kluzu pomocí BH efektu, případně pomocí deformačního stárnutí. Přestože jsou vysokopevnostní, zůstává zachována jejich dobrá tvařitelnost a svařitelnost. Mají plynulou mez kluzu a vysoký exponent deformačního zpevnění. Tažnost DP ocelí je mezi 5 a 60 %. Mezi jejich další výhody patří únavová odolnost, kdy jejich dvoufázová struktura brání šíření únavových trhlin. [14] [15]

CP (Complex Phase) oceli jsou tvořeny feriticko-bainitickou maticí a stejně jako ostatní HSLA oceli jsou i CP nízkouhlíkové. Vyznačují se velice jemným zrnem, což se dosahuje pomocí potlačení rekrystalizace. Mez kluzu se běžně pohybuje v rozpětí 600 – 920 MPa, mez pevnosti mezi 780 a 1130 MPa. Pomocí dalších zpevňujících efektů je možné je zvýšit i nad tyto hodnoty. [14] [15]



Obrázek 13: Feriticko-bainitká mikrostruktura CP oceli (ocel Complex Phase 1000) [21]

HSLA oceli se nejvíce používají na namáhané díly podvozku jako výztuže nosných částí karoserie, případně dveří a nárazníků. DP oceli se používají na výrobu sloupků, prahů, rámců karoserie, výztuh podlah a střech. CP oceli jsou schopné absorbovat velké množství mechanické energie při deformaci, proto je jejich majoritní využití u prvků, které se deformují při nárazu automobilu. Mezi tyto části patří výztuže dveří, nárazníků nebo například B-sloupek. [14]

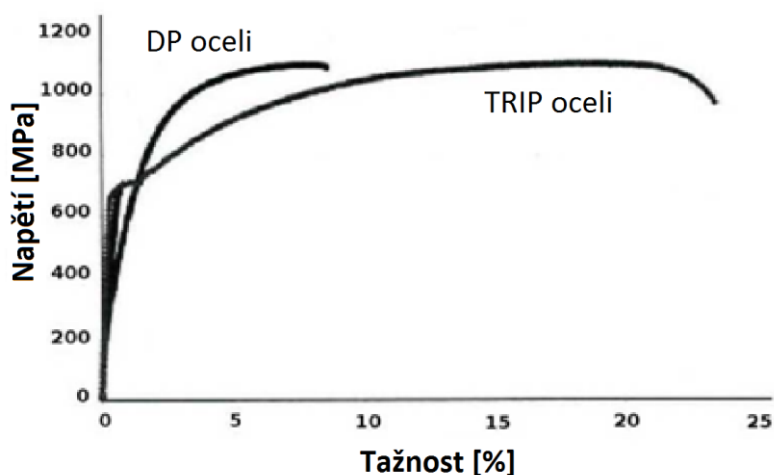
V tabulce 5 uvádím zástupce mikrolegovaných, DP a CP ocelí, označení je přebráno z katalogu firmy ArcelorMittal, ostatní ocelářské společnosti nabízejí často stejné produkty s podobnými názvy, které se většinou liší pouze rozpětím mechanických vlastností.

Tabulka 5: Příklady HSLA, DP a CP ocelí [21] [22][23]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Chemické složení [%]		
				C	Mn	Si
HSLA 550	550 – 650	650 – 730	> 15	0,09	1,65	0,35
Dual Phase 780 Y500	500 – 600	780 – 900	> 13	0,17	2,20	0,60
Dual Phase 980 LCE Y700	700 – 850	980 - 1100	> 8	0,18	2,40	0,60
Dual Phase 1180	900 - 1100	> 1180	> 5	0,18	2,40	0,60
Complex Phase 750	620 – 750	> 750	> 10	0,25	1,40	0,40
Complex Phase 1000	800 – 950	> 950	> 10	0,14	1,70	0,25
Complex Phase 1000 Y800	800 - 950	980 – 1130	> 6	0,20	2,70	0,80

4.2.2 TRIP oceli

TRIP oceli jsou vysokopevnostní materiály založené na kombinaci dvou fází – feritické matrice a martenzitu, který vznikl přeměnou ze zbytkového austenitu pomocí tzv. TRIP efektu. Vynikají vysokou tažností (20 – 80 %) při vysokých hodnotách meze kluzu (390 – 800 MPa) a meze pevnosti (500 – 1050 MPa). [14]



Obrázek 14: Porovnání tahového diagramu DP oceli a TRIP oceli. Z diagramu je patrné rozdílné prodloužení materiálu. [24]

Běžné chemické složení TRIP ocelí uvádím v tabulce 6. Obsahují poměrně málo legujících prvků. V poslední době se rozvíjejí CMnAl TRIP oceli, kde zvýšený obsah

hliníků má za následek zvětšení množství uhlíku ve zbytkovém austenitu. Hliník zpomaluje vznik cementitu, jelikož je v něm nerozpustný, naopak tím urychluje bainitickou přeměnu. Zároveň ale snižuje zpevňující efekt. Na množství hliníku je závislé množství fosforu, který stejně jako hliník brání vzniku cementitu, ale zároveň dokáže zpevnit tuhý roztok. Během bainitické přeměny jsou důležitými prvky křemík a hliník, které pomáhají zamezit precipitaci karbidů. [24]

Tabulka 6: Chemické složení TRIP ocelí [14]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	< 0,24
Mangan (Mn)	< 2
Fosfor (P)	< 0,04
Síra (S)	< 0,01
Křemík (Si)	< 0,3
Chrom (Cr) + Molybden (Mo)	< 0,6
Bór (B)	< 0,005
Niob (Nb) + Titan (Ti)	< 0,2

Díky své velké únavové odolnosti a schopnosti absorbovat velké množství mechanické energie při své deformaci se TRIP oceli používají na podélné i příčné nosníky karoserie, prahy dveří či jako prvky v B-sloupcích. V následující tabulce uvádím dva příklady TRIP ocelí. [14] [25]

Tabulka 7: Přehled TRIP ocelí [25]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Chemické složení [%]		
				C	Mn	Al + Si
TRIP 780 Y500	500 – 550	780 – 900	> 23	0,25	2	2
TRIP 980	> 700	> 980	> 14	< 0,2	2	1

4.2.3 TWIP oceli

TWIP (Twinning Induced Plasticity) oceli jsou velmi perspektivním druhem materiálu pro výrobu karoserií automobilů vyznačující se především obrovskou tažností. Byť svým rozpětím pevnosti se vyskytují ve všech třech kategoriích vysokopevnostních ocelí, nejčastěji bývají řazeny k UHSS ocelím.

Chemickým složením jsou podobné TRIP ocelím, na rozdíl od nich jsou TWIP oceli výrazně legovány především manganem. Díky tomuto legování zůstává původní austenitická struktura oceli, tedy při deformaci nedochází ke vzniku martenzitu jako u TRIP efektu. K zabránění fázové přeměny je potřeba, aby ocel obsahovala minimálně 15 % manganu, jinak dochází pouze k TRIP efektu. Nejvýraznější TWIP nastává, pokud je ho obsaženo přes 20 %. Výjimečná pevnost spočívá v mechanismu dvojčatění a změně orientace zrn, který nastává u austenitu při deformaci. Tímto dochází k enormnímu zpevnění materiálu obzvláště při velkých deformacích. [14] [26]

Tabulka 8: Chemické složení TWIP ocelí [14]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	0,02 – 0,6
Mangan (Mn)	17 – 33
Křemík (Si)	0,2 – 3,3
Hliník (Al)	< 8,4
Chrom (Cr)	< 18,3
Niob (Nb)	<0,033
Nikl (Ni)	0,02 – 8,6
Síra (S)	< 0,0033

Mez kluzu TWIP ocelí se pohybuje v rozsahu 280 – 1350 MPa, mez pevnosti mezi 580 – 1470 MPa. Jejich tažnost je v rozpětí 15 – 125 %. Tvařitelnost se tak vyrovnává hlubokotažným plechům, ale dosahují až pětikrát větší pevnosti. [14] [26]

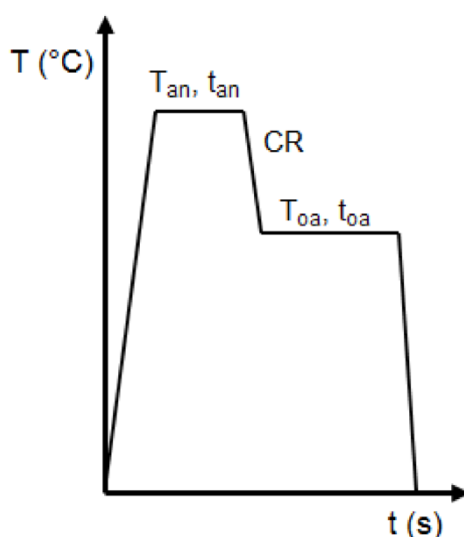
Použití je díky velké tažnosti možné prakticky kdekoliv, kvůli ceně se ale používají na prvky zajišťující prostor posádky automobilu, kde by mělo dojít k co nejmenším deformacím. Vhodné jsou jako materiál na B-sloupek či výztuže dveří a střechy. V tabulce č. 9 uvádím příklady TWIP ocelí. [14]

Tabulka 9: Přehled TWIP ocelí [15]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]
TWIP 500/900	500	900
TWIP 750/1000	750	1000
TWIP 950/1200	950	1200

4.2.4 TBF oceli

TBF (TRIP bainitic ferrite) oceli jsou nově vyvíjené oceli označované též jako 3. generace pokročilých vysokopevnostních ocelí (AHSS). Jejich cílem je dosáhnout podobné nebo větší pevnosti jako u DP a CP ocelí při zachování dobré tažnosti materiálu.



Obrázek 15: Křivka tepelného zpracování TBF ocelí [27]

Mikrostruktura TBF ocelí je založena na bainiticko-feritické matici, která obsahuje austenitické inkluze v bainitické oblasti. Toho je dosaženo prudkým ochlazením z plně austenitické struktury. Podle způsobu (viz obrázek 15) a rychlosti ochlazování se mění struktura a tím i vlastnosti materiálu. Obsažený austenit, kterého je kolem 10 %, umožňuje dobrou tvařitelnost ocelí i při tváření za studena, podobně jako u TRIP ocelí. Chemické složení uvádím v tabulce 10, hlavními legujícími prvky jsou uhlík, křemík a mangan. [27]

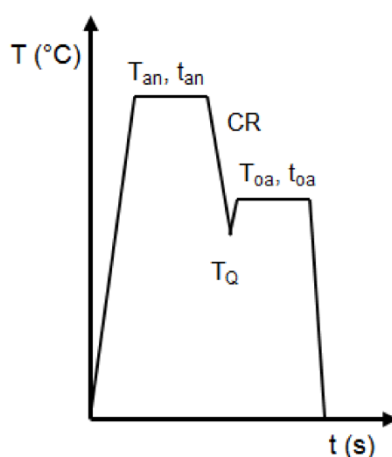
Tabulka 10: Chemické složení TBF ocelí [27]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	$\leq 0,2$
Mangan (Mn) + Chrom (Cr) + Molybden (Mo)	< 3
Křemík (Si) + Hliník (Al)	~ 1
Niob (Nb) + Titan (Ti)	$\leq 0,05$

TBF oceli dosahují meze pevnosti přes 980 MPa, mez kluzu se pohybuje nad 700 MPa, celková tažnosti je kolem 14 %. Tento typ oceli zatím neprodukuje žádná z velkých ocelářských společností. Vzorky většinou vznikají pouze za účelem dalšího výzkumu. V budoucnosti je pravděpodobné, že TBF oceli postupně nahradí TRIP oceli. Dokáží se jim vyrovnat v tažnosti, v mezi kluzu a pevnosti jsou schopny dosahovat lepších parametrů. [27]

4.2.5 Q&P oceli

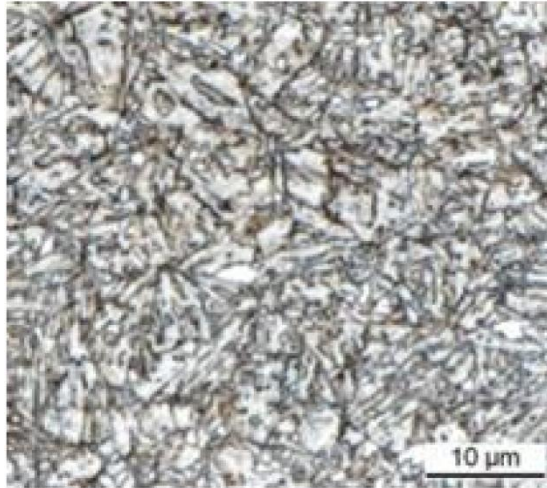
Q&P (Quench-and-Partitioning) oceli spadají podobně jako TBF oceli do třetí generace pokročilých vysokopevnostních ocelí. Svojí pevností se podobají klasickým CP ocelím nebo martenzitickým (MART) ocelím, ale i při této pevnosti si dokážou zachovat lepší tvařitelnost.



Obrázek 16: Křivka tepelného zpracování Q&P ocelí [27]

Q&P oceli jsou tvořeny maticí z martenzitu, temperovaného martenzitu nebo nižšího bainitu. Podobně jako u TBF ocelí jsou zde zachované austenitové inkluze, které vznikly krátkým ochlazením z plně austenitické struktury. Způsob tepelného zpracování těchto ocelí je znázorněn na obrázku 16. Materiál se nejprve ohřeje na

teplotu t_{an} , která se pohybuje kolem 850 °C, s výdrží 60 sekund. Potom se ochladí rychlostí 40 °C/s na teplotu t_q v rozmezí 350 – 380 °C, následuje zvýšení na teplotu $t_{0a} = 400 – 440$ °C. Chemickým složením mohou být shodné s TBF oceli, jiné vlastnosti jsou způsobeny rozdílným tepelným zpracováním, kdy při tomto procesu místo bainitu vznikne martenzit (viz mikrostruktura na obrázku 17). [27]

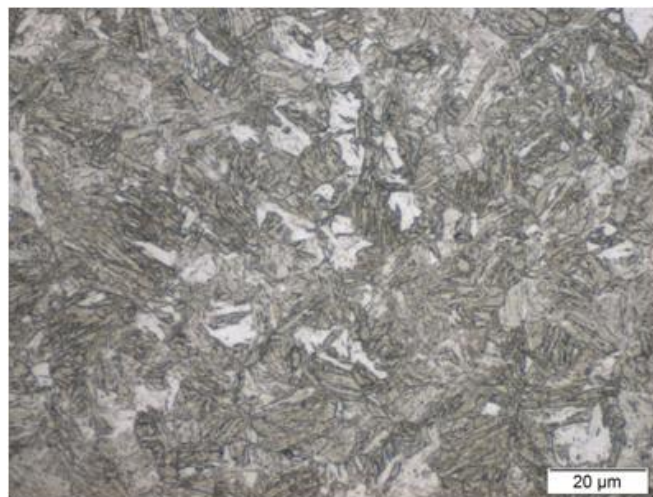


Obrázek 17: Mikrostruktura Q&P oceli po tepelném zpracování [27]

Q&P oceli dosahují meze pevnosti nad 980 MPa, mez kluzu začíná nad 800 MPa. Současně i při této pevnosti může mít tažnost nad 10 %. Tento typ oceli pravděpodobně nahradí CP oceli, případně méně pevné MART oceli, hlavně díky tomu, že umožní vytvořit složitější tvary při zachování stejné pevnosti. [27]

4.2.6 MART oceli

MART oceli (martenzitické), někdy označované jako MS (Martensitic Steel), jsou spolu s UHSS-B oceli nejpevnější železné materiály používané pro další tváření. Jejich pevnost spočívá ve fázové přeměně během tepelného zpracování, kde struktura musí obsahovat minimálně 30 % martenzitu. Mezi tyto oceli patří i PFHT (Post-Forming Heat-Treatable) oceli, u kterých dochází k tepelnému zpracování až po tváření, tím je možné vytvořit z těchto materiálů i tvarově složitější konstrukce. [14]



Obrázek 18: Mikrostruktura MART ocelí [28]

Chemické složení martenzitických ocelí uvádím v tabulce 11. Jejich chemické složení musí umožnit přeměnu austenitu na martenzit při kalení. Takto vzniklý martenzit má deskovitou morfologii (viz obrázek 18).

Tabulka 11: Chemické složení MART ocelí [28]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	0,1 – 0,5
Mangan (Mn)	1 – 2,5
Křemík (Si)	0,15 – 2

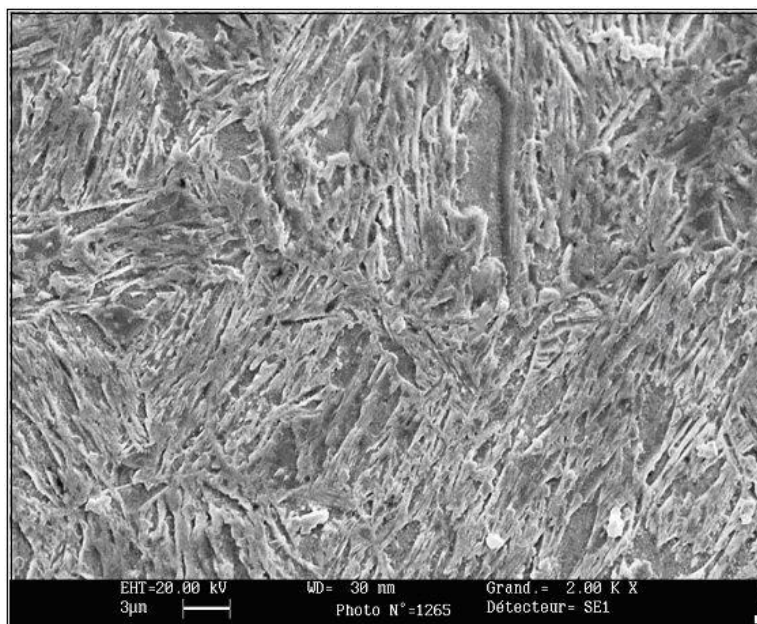
Díky této přeměně jsou vyrobené oceli velice pevné – mez kluzu se pohybuje v rozmezí 720 – 1200 MPa, mez pevnosti mezi 800 – 1200 MPa. Jejich nevýhodou je nízká tažnost, která se pohybuje mezi 5 – 15 %. Z tohoto důvodu se MART oceli používají výhradně na výztuže dveří, nárazníků a rámců karoserie. To vedlo k rozvoji nových metod zpracování i dalšímu vývoji ocelí, kdy se formují před tepelným zpracováním nebo v rámci tepelného zpracování. Jedním z příkladů jsou PFHT oceli, které mají před kalením tažnost kolem 35 %. [14]

Tabulka 12: Příklady MART ocelí [15] [28]

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Chemické složení [%]		
				C	Mn	Si
MART 1200	> 950	1200 - 1400	> 3	0,13	2,4	0,3
MART 1500	1200 – 1500	1500 – 1700	> 3	0,25	2	0,5
PFHT 1200	1200	1900				

4.2.7 UHSS-B oceli

UHSS-B (Ultra High Strength Steel – Boron) jsou nejpevnější oceli určené k tváření. Složením a vlastnostmi se podobají MART ocelím, jejich tvrdost je opět způsobena vhodnou strukturou materiálu, většinou martenzitickou. Mezi tyto oceli patří i PHS (Press Hardening Steels), které jsou určeny pro tepelné zpracování v rámci tvářecího procesu. [29]



Obrázek 19: Snímek struktury oceli Usibor 1500 po tepelném zpracování. [29]

Chemické složení uvádím v tabulce 13. Obsažený bor zabraňuje nukleaci feritu na okrajích zrn austenitu a podporuje vznik martenzitické fáze. Důležité je pomocí dalšího legování (hliník, titan) zabránit reakci boru s dalšími prvky, jako jsou například kyslík nebo dusík. U těchto druhů ocelí je velice široký rozptyl pevnosti, záleží na tepelném zpracování. Pro některé méně náročné aplikace dostačuje, pokud

vznikne v materiálu bainit. Mez kluzu dosahuje hodnot od 430 MPa do 1770 MPa, mez pevnosti dosahuje až hodnot kolem 2000 MPa. Tažnost je závislá na pevnosti, pohybuje se v rozsahu 3 – 41 %. [14]

Tabulka 13: Chemické složení UHSS-B ocelí [14]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	0,07 – 0,67
Mangan (Mn)	0,3 - 2,05
Fosfor (P)	0,025 – 0,04
Síra (S)	0,008 – 0,05
Křemík (Si)	0,15 – 2,2
Chrom (Cr)	0,13 – 1,45
Bor (B)	0,0005 – 0,005
Titan (Ti)	0,02 – 0,05
Nikl (Ni)	0,15 – 3,8
Vanad (V)	0,1 – 0,15
Hliník (Al)	0,015 – 0,065
Molybden (Mo)	0,08 – 0,35

Tento materiál se používá hlavně pro prvky v automobilu, které by se při nehodě neměli deformovat, především na prahy, A a B sloupky, výztuže dveří a palubní desky. Mezi jejich výhody patří možnost použít velmi tenký plech při vysoké pevnosti a bezpečnosti prvku. Naopak nevýhodou UHSS-B ocelí je nemožnost opravit deformované díly, je nutné je vyměnit za nové. Hojně se v současné době používá pro zpracování tzv. hot-formingem, kdy se kalení provede jako součást tvářecího procesu. Příklady materiálu uvádím v následující tabulce. [14] [29]

Tabulka 14: Příklady UHSS-B ocelí [29]

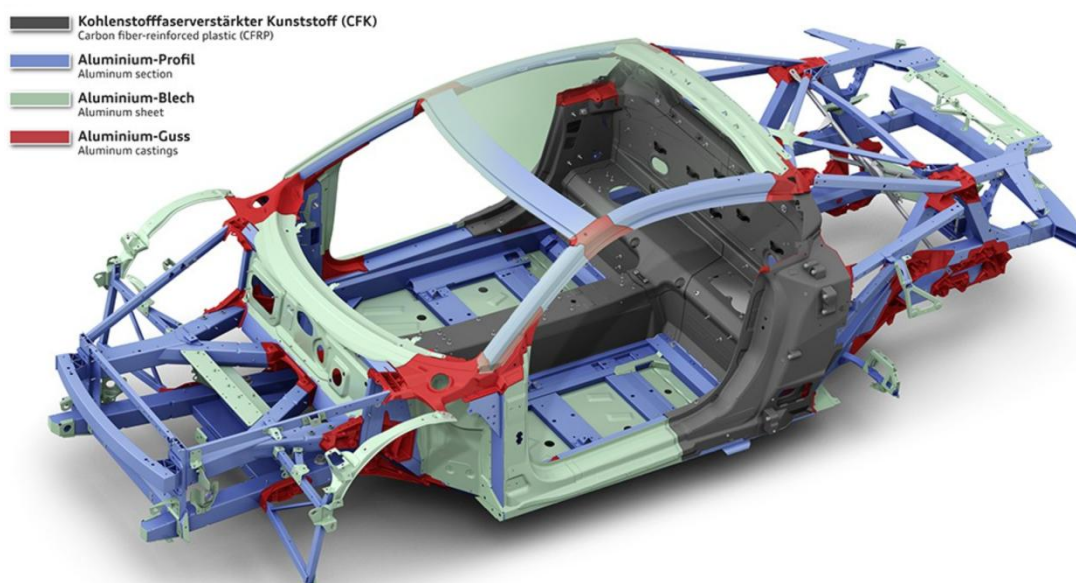
Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]	Chemické složení [%]			
				C	Mn	Si	B
Ductibor 1000	> 800	> 1000	> 6	0,12	2,0	0,75	0,005
Usibor 1500	1100	1500	> 3	0,25	1,4	0,4	0,005
Usibor 2000	> 1400	>1800		0,37	1,4	0,7	0,005

4.2.8 Neželezné a nekovové materiály

Nejhojněji zastoupené neželezné materiály jsou slitiny hliníku. V konstrukcích automobilů se začaly vyskytovat již v první polovině 20. století. Avšak zatím se nedočkaly masového využití v běžných osobních automobilech. Mezi jejich hlavní výhody patří nízká hmotnost, absolutně vzato, díly by mohly mít pouze třetinovou hmotnost. Rozdíl není však tak výrazný, pokud vezme v úvahu to, že kvůli menší pevnosti těchto slitin musí být jednotlivé prvky mohutnější.

Nejvíce se v současnosti používají slitiny hliníku a manganu (třída 5XXX). Tyto slitiny ale nedosahují meze kluzu nad 500 MPa. Pevnější jsou slitiny hliníku s křemíkem (třída 6XXX). Jejich mez kluzu může dosahovat až hodnot 600 MPa. [14]

Hliníkové slitiny se nejčastěji vyskytují v exkluzivních a sportovních automobilech. Podle podílu užití se daří redukovat hmotnost od 5 % až do 50 % u celohliníkových konstrukcí. Mezi takové patří například Audi R8 (2011) nebo Jaguar XJ. [14]



Obrázek 20: Prvky hliníkové konstrukce Audi R8 Coupé (2015)

Speciálním materiálem používaným v konstrukci automobilů jsou hořčíkové slitiny. Patří k nejlehčím konstrukčním materiálům, jejich hmotnost je ještě nižší než u hliníkových slitin. Oproti oceli je rozdíl hmotnosti až 75 %. Zatím nedosahují meze kluzu nad 500 MPa, ale jejich rychlý vývoj naznačuje, že v blízké době tuto hranici zdolají. Stále ale mají mnoho nevýhod při použití, například nízkou vrubovou

houževnatost, vysokou cenu nebo vysokou reaktivitu s kyslíkem. Jejich majoritní zpracování je odlévání, tváření těchto materiálů zatím není komerčně využitelné. [31]

5 Zpracování vysokopevnostních materiálů

Tváření materiálů je možné provádět mnoha způsoby, mezi které patří například kování, tažení nebo protlačování. V současné době je kladen velký tlak na výkonnost metod, kdy je potřeba na zařízení vyrobit desítky až stovky kusů za hodinu, proto jsou preferovány vysoce produktivní metody, a to především válcování a lisování. Staré způsoby tváření, které se používají již několik desetiletí, tak nyní musí procházet změnami a musí se modernizovat, aby jimi bylo možné zpracovat vysokopevnostní materiály. Současně se v běžné výrobě používají nové metody, které ještě do nedávna byly označovány jako nekonvenční.

Základní rozdělení tvářecích metod provádíme podle teploty – tváření za tepla a za studena. Některé vysokopevnostní materiály je možné zpracovávat oběma způsoby, jiné získávají své vlastnosti až při tepelném zpracování při tváření a jiné by při tváření za tepla naopak své vlastnosti ztratily. Ve většině případů, obzvláště při zpracování vysokopevnostních materiálů na prvky karoserie, je polotovarem plech, který se tvaruje různými nástroji do podoby finálního výrobku. [11]

5.1 Lisování za studena

Běžně užívaný způsob zpracování obyčejných ocelí se používá i pro vysokopevnostní oceli s menší pevností a vyšší tažností. Na rozdíl od hlubokotažných plechů se zpracovávají do jednodušších tvarů. U komplikovanějších výrobků dochází k velkému odpružení nebo porušení materiálu (vznik trhlin). Při použitích pro tváření vysokopevnostních ocelí nastává i rychlejší opotřebení lisovací formy. Při zpracování se také výrazně zvyšuje lisovací síla a tím i nároky na lisovací zařízení. Mezi výhody patří velká produktivita a absence problémů s dodržením správného tepelného zpracování.



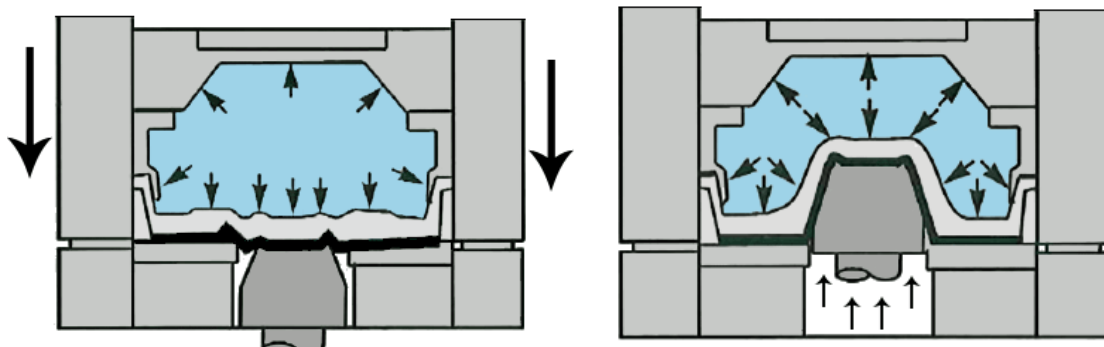
Obrázek 21: Porovnání odpružení vysokopevnostních ocelí (vlevo) vůči běžným ocelím (vpravo) [32]

5.2 Plošné válcování

Plošné válcování je velice produktivní způsob výroby, kdy se postupně tvarovými válci formuje pás plechu. Na konci výrobní linky je dělen na díly potřebné délky. Výhoda procesu je možnost kontinuální výroby profilu rychlostí až kolem 100 metrů za minutu. Při těchto rychlostech je obtížné kontinuální dělení materiálu i chlazení nástrojů – válců. Stejně jako u lisování je problémem značné odpružení materiálu, se kterým je potřeba počítat již při výrobě tvarových válců. [33]

5.3 Hydroforming

Dalším způsobem tváření za studena je hydroforming. Na začátku se položí plech na razník, přiklopí se formou s olejovou komorou. Poté se vysune razník, který tvaruje plech, z druhé strany je tvarován tlakem olejové komory. Vhodný je zejména pro menší, tvarově složitější výrobky. Mezi výhody patří levné vytvarování složitých tvarů a rovnoměrné rozložení tlaku při tváření. Mimo to existuje ještě tzv. tube hydroforming, u kterého je výchozím polotovarem trubka, která se založí do formy. Následně se vytvaruje tlakem kapaliny podle okolní formy. [34]



Obrázek 22: Proces hydroformingu [34]

5.4 Lisování za tepla

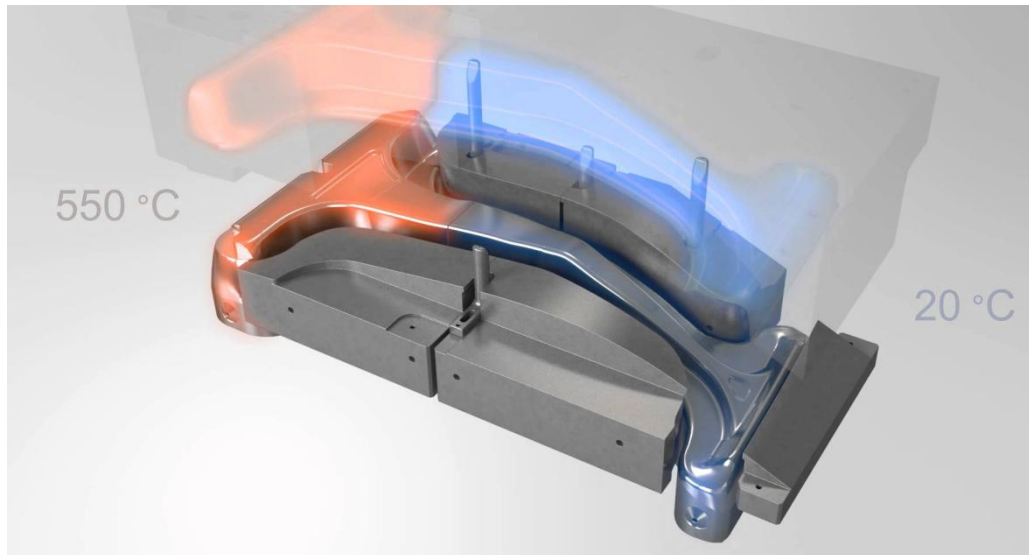
Metoda lisování za tepla je velice podobná lisování za studena. Výchozím polotovarem je plech ohřátý nad teplotu rekrystalizace materiálu. Následně se založí do spodní části lisovací formy, kde je tlakem od hodní strany vytvarován do výsledného produktu. Poté je z formy vyjmut a ochlazen, způsob ochlazení záleží na požadované mikrostruktuře. Výhodou je lepší tvárnost materiálu při vyšších teplotách a s tím související pokles tvářecích sil. U materiálu nedochází k deformačnímu zpevnění jako u tváření za studena. Mezi nevýhody patří náročnost výroby formy, která musí být jak mechanicky, tak teplotně odolná, nebo ztížená manipulace s ohřátým plechem. Zároveň při ochlazování vylisku může dojít k jeho tvarové změně.

5.5 Hot-forming

Hot-forming je poměrně nová a v současné době asi nejrychleji se rozvíjející metoda tváření vysokopevnostních plechů. Její princip je podobný jako u lisování za tepla s tím rozdílem, že ochlazení probíhá už ve formě.

Nejčastěji se pro tyto účely používají velké výrobní linky, na začátku kterých je svitek plechu. Ten linka stříhá a tím si připravuje jednotlivé polotovary pro další zpracování. Tyto polotovary jsou dopraveny do pece, kde jsou ohřáty na teplotu kolem 950 °C. Z pece jsou přesunuty do formy, která se stlačí pod lisem. Dříve než se forma rozevře, nastává proces tepelného zpracování materiálu – kalení. Při tomto procesu je vylisek prudce ochlazen, aby došlo ke změně na martenzitickou strukturu. Takováto forma na to musí být přizpůsobena – musí mít v sobě kanálky pro chladicí médium. Po zchlazení na teplotu kolem 200 °C, kdy už nedochází ke změnám ve struktuře, se vylisek vyjme z formy. [35]

Velkou výhodou může být možnost vytvořit velice unikátní součásti. Stačí, pokud je forma ochlazována nerovnoměrně na různých místech (viz obrázek 23). Lze tak vytvořit vylisek z jednoho kusu materiálu s jinými vlastnostmi v rámci dílu. Naopak mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena takovýchto výrobních linek a složitost jak formy, tak i procesu samotného. [36]



Obrázek 23: Výrobní proces hot-formingu [36]

6 Ověření vlastností materiálové jakosti MBW1500 + AS150

Cílem experimentální části je ověření mechanických vlastností vysokopevnostních ocelí, konkrétně MBW1500 s povrchovou úpravou AS 150. Tato ocel patří mezi pokročilé borem legované oceli, spadá do skupiny PHS ocelí. Vzorek plechu byl poskytnut firmou ŠKODA AUTO, a.s. Tento materiál je používán pro výrobu B-sloupků pomocí technologie hot-formingu.

Provedl jsem tahovou zkoušku vzorků z dodané tabule plechu. Tyto vzorky byly pořízeny ve všech třech směrech vůči směru válcování.

6.1 Testovaný materiál

Testované vzorky byly vytvořeny z plechu o tloušťce 1,34 mm z materiálu MBW1500 s povrchovou úpravou AS 150. Plech vyrábí společnost ThyssenKrupp. Jeho chemické složení uvádím v tabulce 15. Velký vliv na jeho pevnost má obsah manganu a boru. Tato ocel se svým složením i mechanickými vlastnostmi podobá oceli Usibor 1500, kterou vyrábí společnost ArcelorMittal.

Tabulka 15: Chemické složení ocele MBW1500 [37]

Prvek	Obsah [%]
Uhlík (C)	0,25
Křemík (Si)	0,40
Mangan (Mn)	1,40
Fosfor (P)	0,025
Síra (S)	0,010
Hliník (Al)	0,015
Titan (Ti)	0,05
Chrom (Cr) + Molybden (Mo)	0,50
Bor (B)	0,005

Mechanické vlastnosti této oceli uvádím v tabulce 16. Jelikož se jedná o ocel, která své vlastnosti mění během zpracování hot-formingem, uvádím tyto hodnoty jak před tepelným zpracováním, tak po něm. Měření jsem provedl u materiálu bez

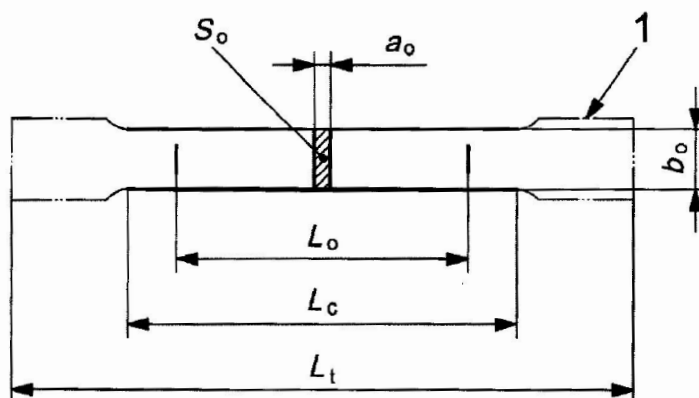
tepelného zpracování, proto své výsledky budu porovnávat s hodnotami meze kluzu $R_{p0,2} = 350 - 550$ MPa, meze pevnosti $R_m = 500 - 700$ MPa a tažností $A_{80min} = 12$ %.

Tabulka 16: Přehled vlastností oceli MBW1500 udávaných výrobcem [37]

	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80min} [%]
Před tepelným zpracováním	350 - 550	500 - 700	12
Po tepelném zpracování (zakalení v nástroji z teploty 920 °C)	1000	1500	5

6.2 Zkušební metoda

Jako zkušební metodu jsem zvolil zkoušku tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro zkoušku jsem použil elektromechanické testovací zařízení LabTest 6.100. Tuto zkoušku jsem provedl na 9 kusech vzorků o normalizovaném tvaru (viz obr. 24, tab. 17), tři vzorky byly pořízeny ve směru válcování, tři pod úhlem 45° na směr válcování a poslední tři jsem vytvořil kolmo ke směru válcování.



Obrázek 24: Tvar zkušební vzorku [38]

Tabulka 17: Rozměry zkušební vzorku

Celková délka zkušební vzorku	L_t	220 mm
Zkoušená délka	L_c	120 mm
Počáteční měřená délka	L_0	80 mm
Počáteční šířka	b_0	20,53 mm
Počáteční tloušťka	a_0	1,34 mm

6.3 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty uvádím v tabulce 18, z těchto hodnot jsem určil vlastnosti testovaného materiálu, které uvádím tabulce 19. Všechny výsledky z tahových zkoušek včetně grafů přikládám jako přílohu na CD.

Tabulka 18: Naměřené hodnoty

Označení vzorku	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
0-1	425	589	16,46
0-2	424	590	16,32
0-3	425	592	16,53
45-1	431	589	18,91
45-2	430	587	17,48
45-3	429	588	17,20
90-1	426	596	17,22
90-2	430	596	17,79
90-3	434	590	17,51

Tabulka 19: Mechanické vlastnosti MBW 1500 určené pomocí experimentu

	Úhel vůči směru válcování [°]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
Směr 1	0	424,7	590,3	16,44
Směr 2	45	430	588	17,86
Směr 3	90	430	594	17,51



Obrázek 25: Snímek dvou vzorků, 90-3 před zkouškou, 45-3 po zkoušce

Ze zjištěných hodnot meze pevnosti a meze kluzu jsem dokázal, že tento materiál přesně odpovídá hodnotám deklarovaným výrobcem. Naměřené hodnoty leží blízko prostředku intervalu předpokládaných vlastností. Žádný z vzorků se nedostal mimo tento interval. U tažnosti výrobce deklaruje její minimální hodnotu, která byla všemi vzorky překročena v průměru o více než 5 % tažnosti.

7 Závěr

V úvodu bakalářské práce jsou popsány důvody, proč dochází k výzkumu a využívání vysokopevnostních ocelí určených pro tváření, a zároveň je shrnuta základní problematika tváření.

Dále jsem popsal výrobu vysokopevnostních ocelí. Plechy tvoří majoritní polotovary pro další zpracování těchto materiálů. Také jsem se zabýval možnostmi zpevňování materiálu. Největší vliv na mechanické vlastnosti ocelí má jejich chemické složení a tepelné zpracování. V automobilovém průmyslu se hojně používá tzv. mikrolegování, kdy se přidává pouze malé množství legujících prvků, což způsobuje úsporu nákladů na výrobu. Mezi moderní trendy v zušlechťování patří legování borem, které vede ke vzniku těch nejpevnějších ocelí vhodných pro tváření. Speciálním způsobem výroby je prášková metalurgie, která umožňuje unikátní složení oceli a tím i její speciální vlastnosti.

Jedním z cílů bakalářské práce bylo vytvořit přehled moderních vysokopevnostních materiálů. Tento přehled můžete najít v kapitole 4, kde jsou materiály rozříděny podle metalurgických názvů skupin. Jednotlivé příklady materiálů jsou uvedeny pod obchodními názvy, které se používají v praxi nejvíce. V teoretické části práce jsem se držel označení používané firmou ArcelorMittal, která má jedno z největších zastoupení na trhu s těmito ocelmi a současně se podílí na jejich dalším vývoji.

Následně jsem se věnoval možnostem zpracování vysokopevnostních materiálů. Tato problematika úzce souvisí s jejich vlastnostmi. U moderních způsobů zpracování, jako je například hot-forming či termomechanické zpracování, získávají oceli své jedinečné vlastnosti až v procesu výroby jednotlivých výlisků.

Pro praktickou část bakalářské práce se podařilo zajistit určité množství plechu materiálové jakosti MBW1500 + AS150. Běžně se tento materiál při výrobním procesu termomechanicky zpracovává. S touto materiálovou jakostí nejsou na pracovišti Ústavu strojírenské technologie zkušenosti, proto byla s ohledem na časové možnosti provedena ověřovací zkouška tahem. Zjištěné hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti odpovídají vlastnostem udávaným výrobcem. V následující činnosti předpokládám pokračování v ověřování tvařitelnosti dalšími zkouškami.

Seznam použité literatury

- [1] *Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007: Úřední věstník EU*. In: 2007, L171. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32007R0715>
- [2] SAJDL, J. *Emisní norma EURO* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net>
- [3] *Fuel economy* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: www.epa.gov
- [4] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [5] Výroba železa a oceli. In: *Vysoká škola báňská Ostrava* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/06_Zaklady_teorie_a_technologie_vyroby_zeleza_a_oceli_I_Zelezarstvi/Kret_Teorie_procesu_pri_vyrobe_zeleza_a_oceli.pdf
- [6] ZEITHAMMER, K. *Vývoj techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008, 316 s. 3. vydání. ISBN 978-80-01-02836-0.
- [7] *Směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích: Výroba oceli a železa*. In: 2010. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=CS>
- [8] MACEK, K. a P. ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- [9] BAŽAN, J. *Základy teorie a technologie výroby železa a oceli* [online]. 2013 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.fmmi.vsb.cz
- [10] SCHAEFFLER, D. J. *Understanding steelmaking for better forming* [online]. In: *The Fabricator*, 30. 6. 2010 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.thefabricator.com
- [11] LENFELD, P. *Technologie objemového tváření. Katedra strojírenské technologie TUL: Technologie II.* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.ksp.tul.cz
- [12] Rolling Mills. In: *Williamson* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.williamsonir.com
- [13] *Plechý válcované za studena* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.itbohemia.cz

- [14] GIRMAN, V. a V. HRABČÁKOVÁ. Kovové materiály v automobilových konštrukcii II. - Karoséria a karosárske plechy. *Materials Engineer* [online]. 8. 2. 2012 [cit. 2018-05-15]. ISSN 1337-8953. Dostupné z: http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
- [15] KEELER, S. a M. KIMCHI. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines V5* [online]. 5. vydání. WorldAutoSteel, 2015, 250 s. [cit. 2018-05-15].
- [16] Boron in Steels. In: *Total Materia* [online]. 2007 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/>
- [17] HAMERNÍK, J. *Prášková metalurgie* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Metalurgie.htm>
- [18] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [19] *Válcování za studena TRIP oceli po termomechanickém zpracování* [online]. In: METAL 2007, 22. 5. 2007 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: metal2013.tanger.cz
- [20] In: *WorldAutoSteel* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.worldautosteel.org
- [21] Complex Phase steels. In: *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>
- [22] High strength low alloy (HSLA) steels for cold forming. In: *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>
- [23] Dual Phase steels. In: *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>
- [24] CHATTERJEE, S. *Transformations in TRIP-assisted Steels: Microstructure and Properties*. 2006. Disertační práce. Darwin College, University of Cambridge.
- [25] TRIP (TRAnsformation Induced Plasticity) steels. In: *ArcelorMittal* [online]. 3. 5. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>
- [26] BOGDAN, D., B. DULEBA a E. SPIŠÁK. TWIP ocele - konštrukčný materiál pre automobilový priemysel budúcnosti. *Transfer inovácií* [online]. 2011, (21) [cit. 2018-05-15]. ISSN 1337-7094.
- [27] BACHMAIER, A., K. HAUSMANN, D. KRIZAN a A. PICHLER. *Development of TBF Steels with 980 MPa Tensile Strength for Automotive Applications: Microstructure and Mechanical Properties*. Linz, 2013.
- [28] MartINsite® steels. In: *ArcelorMittal* [online]. 3. 5. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>

- [29] Steels for hot stamping -Usibor® and Ductibor®. In: *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com>
- [30] *New Audi Space Frame* [online]. In: [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.audi-technology-portal.de>
- [31] YOU, S., Y. HUANG, K. U. KAINER a N. HORT. Recent research and developments on wrought magnesium alloys. In: *ScienceDirect* [online]. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [32] High Strength Steels. In: *DAYTON Lamina* [online]. 2016 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.daytonlamina.com>
- [33] *Dreistern* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.dreistern.com
- [34] About the Hydroforming Process: The Benefits of the Hydroforming Process. *JMP company* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.jmpforming.com
- [35] Hot Forming. *AutoForm* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.autoform.com
- [36] In: *ThyssenKrupp* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: www.thyssenkrupp-steel.com
- [37] *MBW* [online]. 2016, s. 17 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: www.thyssenkrupp-steel.com
- [38] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 8 – 31. s. ICS 77.040.10

Seznam obrázků

Obrázek 1: Proces výroby železa ve vysoké peci	13
Obrázek 2: Schéma kyslíkového konvertoru [9]	14
Obrázek 3: Schéma procesu kontinuálního lití [10]	15
Obrázek 4: Schéma různých válcovacích pořadí [11]	16
Obrázek 5: Schéma výroby plechu pomocí rozválcování ingotu [12].....	16
Obrázek 6: Porovnání tvrdosti oceli 16 Mn Cr 5 a oceli legované borem 13MnCrB5. [16].....	20
Obrázek 7: Frankův-Readův zdroj dislokací [18].....	22
Obrázek 8: Změna tvaru zrn při tváření za studena [18]	22
Obrázek 9: Struktura TRIP oceli bez tváření (vlevo nahoře), s tvářením za studena $\epsilon = 10\%$ (vpravo nahoře), s tvářením za studena $\epsilon = 20\%$ (vlevo dole) a s tvářením za studena $\epsilon = 40\%$ (vpravo dole). [19].....	23
Obrázek 10: Závislost meze kluzu na obsahu uhlíku [20].....	24
Obrázek 12: Diagram metalurgických typů ocelí v závislosti na prodloužení a pevnosti v tahu [20]	26
Obrázek 11: Použití jednotlivých tříd materiálu u automobilu Volvo XC60 [14]	26
Obrázek 13: Feriticko-bainitká mikrostruktura CP oceli (ocel Complex Phase 1000) [21].....	28
Obrázek 14: Porovnání tahového diagramu DP oceli a TRIP oceli. Z diagramu je patrné rozdílné prodloužení materiálu. [24]	29
Obrázek 15: Křivka tepelného zpracování TBF ocelí [27].....	32
Obrázek 16: Křivka tepelného zpracování Q&P ocelí [27]	33
Obrázek 17: Mikrostruktura Q&P oceli po tepelném zpracování [27].....	34
Obrázek 18: Mikrostruktura MART ocelí [28].....	35
Obrázek 19: Snímek struktury oceli Usibor 1500 po tepelném zpracování. [29].....	36
Obrázek 20: Prvky hliníkové konstrukce Audi R8 Coupé (2015)	38
Obrázek 21: Porovnání odpružení vysokopevnostních ocelí (vlevo) vůči běžným ocelím (vpravo) [32]	41
Obrázek 22: Proces hydroformingu [34]	42
Obrázek 23: Výrobní proces hot-formingu [36]	43
Obrázek 24: Tvar zkušební vzorku [38]	45
Obrázek 25: Snímek dvou vzorků, 90-3 před zkouškou, 45-3 po zkoušce	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Emisní norma pro benzínové motory [2]	9
Tabulka 2: Emisní norma pro naftové motory [2]	9
Tabulka 3: Rozdělení ocelí podle meze kluzu a meze pevnosti [14]	25
Tabulka 4: Chemické složení HLSA ocelí [14]	27
Tabulka 5: Příklady HSLA, DP a CP ocelí [21] [22][23]	29
Tabulka 6: Chemické složení TRIP ocelí [14]	30
Tabulka 7: Přehled TRIP ocelí [25]	30
Tabulka 8: Chemické složení TWIP ocelí [14]	31
Tabulka 9: Přehled TWIP ocelí [15]	32
Tabulka 10: Chemické složení TBF ocelí [27]	33
Tabulka 11: Chemické složení MART ocelí [28]	35
Tabulka 12: Příklady MART ocelí [15] [28]	36
Tabulka 13: Chemické složení UHSS-B ocelí [14]	37
Tabulka 14: Příklady UHSS-B ocelí [29]	37
Tabulka 15: Chemické složení ocele MBW 1500 [37]	44
Tabulka 16: Přehled vlastností oceli MBW 1500 udávaných výrobcem [37]	45
Tabulka 17: Rozměry zkušebního vzorku	45
Tabulka 18: Naměřené hodnoty	46
Tabulka 19: Mechanické vlastnosti MBW 1500 určené pomocí experimentu	46