



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

OCELI PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

STEELS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Boček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2022

Tato strana je záměrně ponechána prázdná.

Zadání bakalářské práce

Ústav	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student	Jan Boček
Studijní program	Strojírenství
Studijní obor	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce	prof. Ing. Josef Štětina, Ph. D.
Akademický rok	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Oceli pro automobilový průmysl

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis co je to ocel, výhody využití jako konstrukčního materiálu v automobilovém průmyslu. Moderní výrobní technologie pro oceli.

Vlastnosti ocelí a jejich využití pro jednotlivé komponenty automobilů.

Oceli DP, HSLA, Mild Steel, TRIP

Recyklace, ekologické aspekty

Provedení simulací/výpočtů vlastností ocelí a jejich využití při konstrukčních návrzích automobilů.

Cíle bakalářské práce:

Trendy vývoje použití moderních vysokopevnostních ocelí v automobilovém průmyslu. Modelování vlastností těchto ocelí pomocí moderních simulačních nástrojů. Využití těchto dat jako výstupy pro matematické modelování namáhání komponent automobilů.

Seznam doporučené literatury:

Autosteel [online]. Washington: Steel Market Development Institute, 2014 [cit. 2016-06-10]. Dostupné z: <http://www.autosteel.org/>

RANA, Radhakanta, SINGH Shiv Brat. Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications. 1. Cambridge: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-100638-2.

ROKACH, Abraham J. Theory and problems of structural design. 1. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-053563-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph. D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph. D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá rešerší použití moderních ocelí v automobilovém průmyslu. Na konstrukci automobilu jsou kladeny přísné požadavky, proto se při konstrukci používají různé třídy ocelí. Ocel poskytuje vhodné vlastnosti jako dobrou svařitelnost, tvářitelnost a vysokou pevnost. Má ale i své nevýhody, a proto se částečně prosazují i jiné materiály. Obsah této bakalářské práce zahrnuje obecné pojednání o oceli, teorii použití oceli v automobilovém průmyslu a přehled často používaných ocelí a jejich vlastnosti. Jmenovitě jsou to HSLA oceli, nízkouhlíkové oceli, dvoufázové oceli a TRIP oceli. Oceli jsou v současné v automobilovém průmyslu používány z velké většiny a pravděpodobně tomu tak zůstane i v budoucnu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ocel, automobilový průmysl, automobil, TRIP, HSLA, nízkouhlíková ocel, dvoufázové oceli

ABSTRACT

The subject of this thesis is research of usage of modern steel in the automotive industry. Because car bodies are subjected to strict requirements, multiple steel grades are used in their construction. Steel provides suitable properties such as good weldability, formability, and high strength. It has its disadvantages as well, and because of that, other materials has started to be used. This thesis contains a general overview about steel, the theory of usage of steel in the automotive industry and information about specific steels used and their properties. Particularly they are HSLA steels, low carbon steels, dual phase steels and TRIP steels. Nowadays in the automotive industry, steels are the main material used and it isn't unreasonable to think that it will stay that way in the future.

KEYWORDS

Steel, automotive industry, car, TRIP, HSLA, low carbon steel, dual phase steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOČEK, J. *Oceli pro automobilový průmysl*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Josef Štětina. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140638>

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Josefa štětiny a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Jan Boček

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce, panu profesorovi Josefu Štětinovi za věcné připomínky a poskytnuté literární zdroje. Mé díky patří také mojí rodině i kamarádům, kteří mi byli oporou během celého studia. Bez vás by tato práce vůbec nevznikla

OBSAH

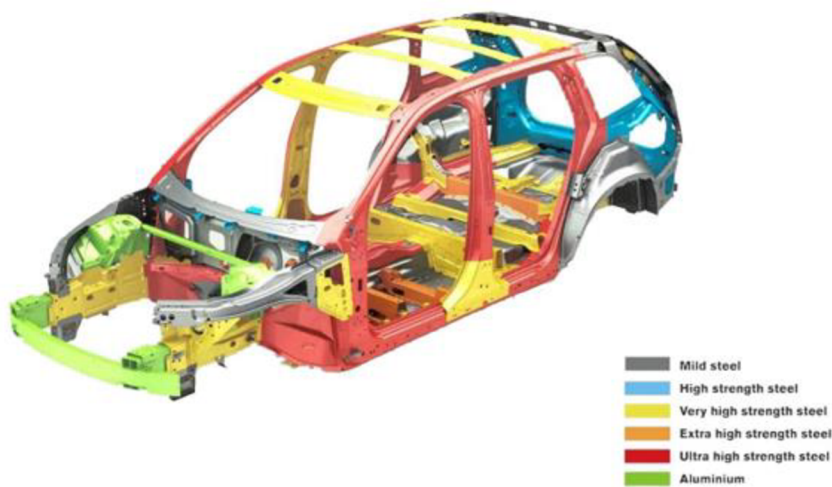
Úvod	10
1 Ocel	11
1.1 Výroba oceli	11
1.2 Zpracování oceli	12
1.3 Polymorfie železa	13
1.4 Fáze ocelí	14
1.4.1 Austenit	14
1.4.2 Ferit a cementit	15
1.4.3 Martenzit	16
1.4.4 Perlit	17
1.4.5 Bainit	17
1.5 Legovací prvky	18
2 Ocel v automobilovém průmyslu.....	21
2.1 Historie využití oceli v automobilovém průmyslu	21
2.2 Hmotnost automobilů a použité materiály při výrobě	22
2.3 Vlastnosti oceli	24
2.4 Výroba komponent automobilů	24
2.4.1 Svařování	24
2.4.2 Tváření	25
3 Oceli používané v automobilovém průmyslu	27
3.1 Mild steel	27
3.1.1 Interstitial Free oceli	27
3.2 HSLA oceli	28
3.2.1 Popis	29
3.2.2 Využití v konstrukci automobilu	30
3.3 Dvoufázové oceli	31
3.3.1 Popis	32
3.3.2 Využití v konstrukci automobilu	32
3.4 TRIP oceli	33
3.4.1 Popis	33
3.4.2 Výrobní procesy	34
3.4.3 Alternativní mikrostruktury	35
3.4.4 Využití v konstrukci automobilu	36
4 Simulace vlastností v softwaru JMat Pro	38
4.1 Vybrané příklady ocelí	38
4.2 Grafy simulovaných vlastností	39
Závěr	42
Použité informační zdroje.....	43
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	45
Seznam příloh	46

ÚVOD

Oceli tvoří nedílnou součást současného automobilového průmyslu a jejich použití prodělalo během existence automobilů značný vývoj. První předchůdci automobilů se objevil již v 18. století. Tehdy se jednalo o stroje poháněné párou a s dnešními automobily neměli moc společného. Jelikož vycházeli z tehdejších kočárů a bezpečnost ani optimalizace hmotnosti nehráli roli, bylo na velkou část konstrukce použito dřevo, železo a obyčejná ocel. To se začalo měnit na přelomu 19. a 20. století, kdy se začal automobilový průmysl rozvíjet a automobily se začínali podobat stále více těm moderním. Od dřeva se začalo upouštět a stále víc se používaly oceli, neboť se díky svým vlastnostem dokonale hodí na nejrůznější součástky automobilů. Protože však konstrukce automobilů podléhá přísným ekologickým normám a nárokům na bezpečnost, používá se v automobilovém průmyslu velké množství různých tříd oceli. Cílem práce je proto rešerše moderních trendů použití ocelí v automobilovém průmyslu, protože je důležité znát vlastnosti jednotlivých ocelích používaných při konstrukci a kde v automobilu jsou použity. Osobní motivací pro výběr tohoto tématu byl můj záměr dozvědět se více jak o konstrukci dnešních automobilů, tak o složení moderních ocelí a jejich výrobních procesech.



Obrázek 1 Benz Auto z roku 1886 [14]



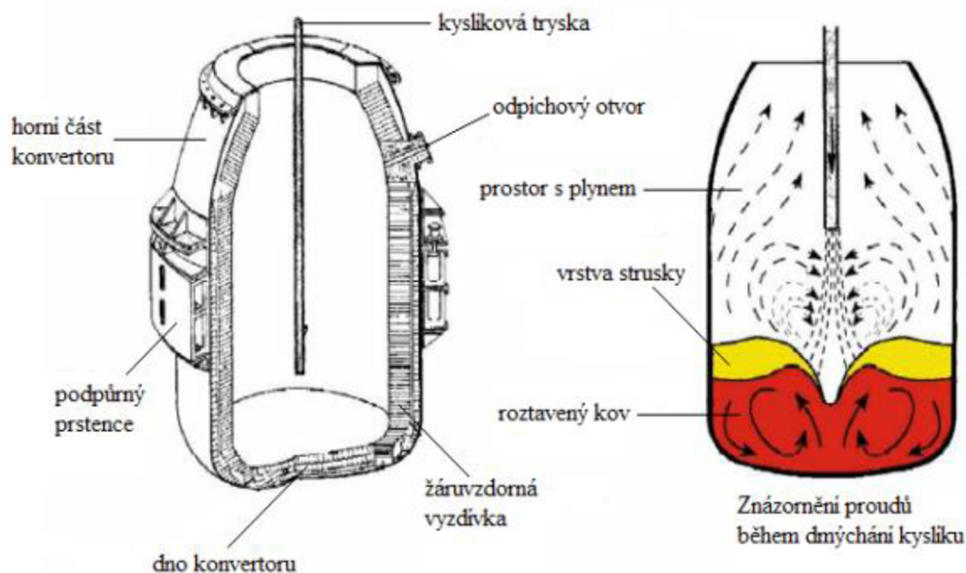
Obrázek 2 Příklad moderní karoserie, Volvo XC90, druhá generace[4]

1 OCEL

Jako oceli jsou označovány slitiny železa a jiných prvků, přičemž druhý nejvíce zastoupený z nich je uhlík, který tvoří až 2,14 % obsahu [1]. Při vyšších koncentracích jsou už tyto slitiny označovány jako litiny. Kromě uhlíku jsou zde zastoupeny mnohé další prvky. Některé z důvodu pozitivní modifikace vlastností oceli, ty se nazývají legury, jiné jsou pozůstatky z výrobního procesu. Mezi legury patří hořčík, chrom, nebo vanad. Tyto přísady mají různé efekty: zvyšují odolnosti vůči korozi, zlepšují prokalitelnost, nebo zvyšují pevnost. K prvkům ovlivňující vlastnosti negativně se řadí např. fosfor, který zapříčiňuje křehkost oceli. Je tedy důležité redukovat jeho obsah ve slitině [1].

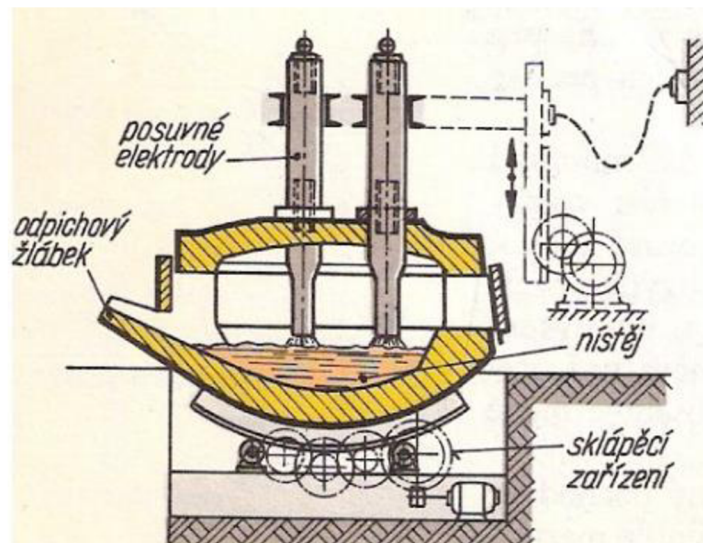
1.1 VÝROBA OCELI

V současnosti existují dva způsoby výroby oceli. Prvním z nich je zkujňování surového tekutého železa v kyslíkových konvertorech. Schéma je na obrázku 3. Do taveniny se dmýchá kyslík, který má za úkol následující: snížit obsah uhlíku na přibližně 1 %, upravit obsah potřebných cizích prvků a odstranit nečistoty v maximální možné míře [7]. Po oxidaci kyslíkem následuje proces nazývaný sekundární metalurgie a jde o úpravu složení a zvýšení jakosti oceli. Mezi úkony sekundární metalurgie patří: míchání a homogenizace taveniny, úprava chemického složení, včasná úprava teploty pro proces odlévání, odkysličení, odstranění nežádoucích plynů, zlepšení čistoty oxidace oddělením nekovových příměsí [7].



Obrázek 3 Kyslíkový konvertor [8]

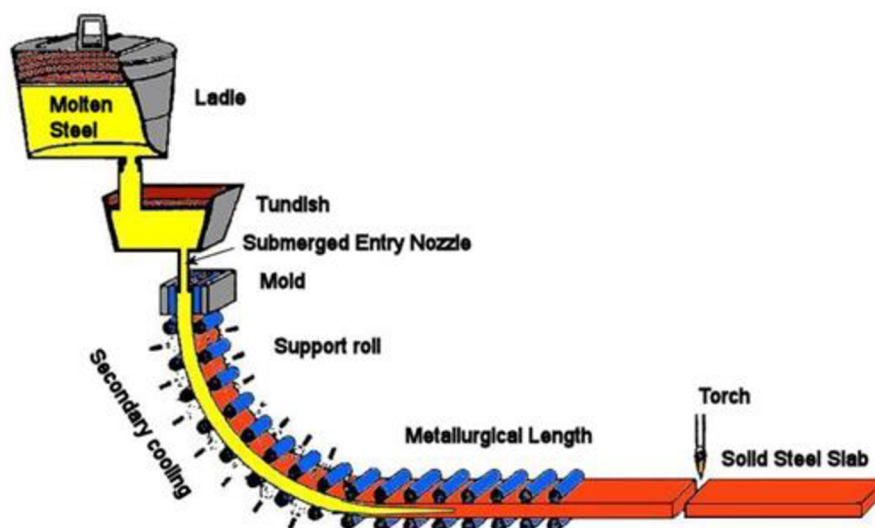
Druhým způsobem výroby oceli je pomocí elektrických obloukových pecí. Schéma je na obrázku 4. Potřebné teplo k roztavení vsázky se získává hořením elektrického oblouku mezi elektrodami, nebo mezi elektrodou a taveninou [8]. V obloukových pecích se vyrábí velmi kvalitní ocel, neboť díky vysokým teplotám lze skoro kompletně odstranit fosfor a síru. Také tavba ocelového šrotu probíhá v obloukových pecích.



Obrázek 4 Oblouková pec [8]

1.2 ZPRACOVÁNÍ OCELI

V současné době ve světě převládá metoda zpracování oceli nazývaná kontinuální lití. Více než 97 % celosvětové produkce oceli je zpracována právě pomocí tohoto procesu [4]. Oproti předcházejícímu procesu zpracování, odlévání oceli do kokil, je dosaženo nižších ztrát, vyšší kvality oceli, vyšší produktivity, nižších nákladů a v neposlední řadě je tento proces taky bezpečnější.



Obrázek 5 Schéma radiálního kontinuálního lití [4]

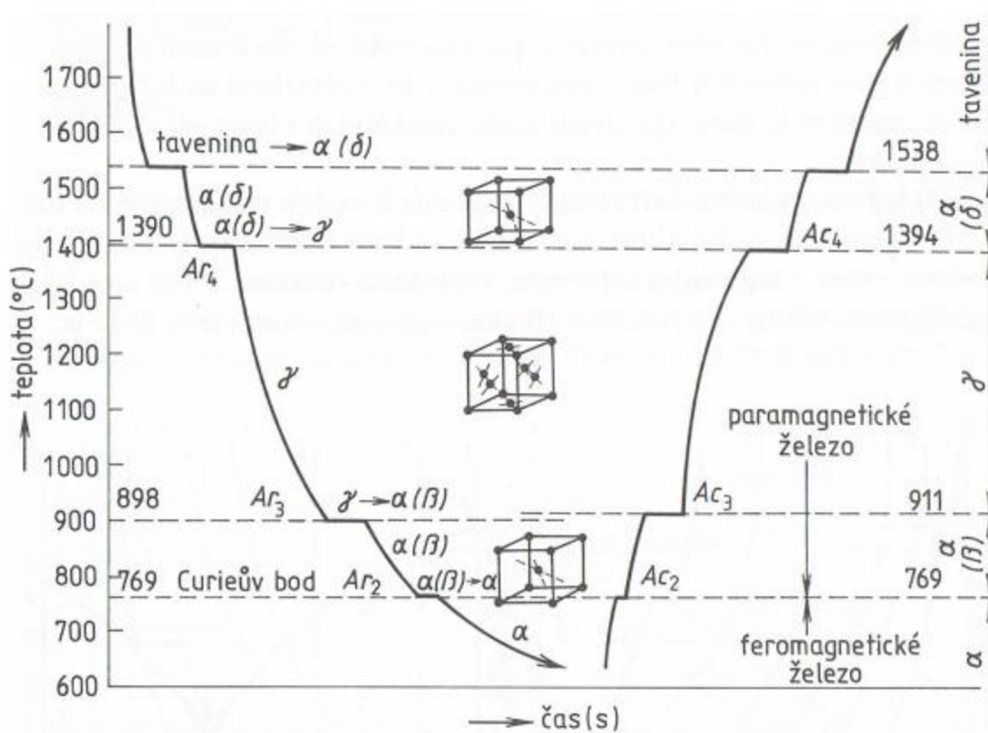
Obrázek 5 ukazuje poddruh kontinuálního lití, tzv. radiální kontinuální lití. Toto uspořádání je momentálně převládající formou kontinuálního lití díky své flexibilitě a produktivitě [4].

Tekutá ocel vytéká z nádoby do mezipánve a odtud přes ponořenou trysku do formy (krystalizátoru). Z formy vystupuje už na povrch ztuhlá mezi válcovací stolice a je postupně ochlazována, až vznikne polotovar – deska. Ta je poté nařezána na kusy a dále podle potřeby zpracována [4].

I když je tato technologie již vyspělá, je stále vyvíjeno úsilí zefektivnit produkci. Firmy se soustřeďují zejména na zvýšení rychlosti lití, snížení provozní energie a zredukování výdajů na údržbu prodlužováním životnosti vybavení [4].

1.3 POLYMORFIE ŽELEZA

Železo má několik modifikací závisících na teplotě. Do teploty 911 °C je stabilní modifikace α , která má krychlovou prostorově středěnou krystalickou mřížku, obsahující 9 atomů železa. Při teplotě 769 °C ztrácí železo α své magnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou [3]. Tuto modifikaci můžeme nazvat železo β . Při teplotě 911 °C se mění modifikace α na modifikaci γ . Ta má rovněž krychlovou krystalickou mřížku, ale plošně středěnou, obsahující 14 atomů železa. Za teploty 1394 °C vzniká opět krystalová mřížka prostorově středěná. Železo je tedy polymorfní kov, který má dvě stabilní modifikace [3]. Modifikaci α při teplotách do 911 °C a modifikaci δ stabilní v rozmezí teplot 1394 °C až 1598 °C. tyto modifikace jsou od sebe odděleny oblastí železa γ .

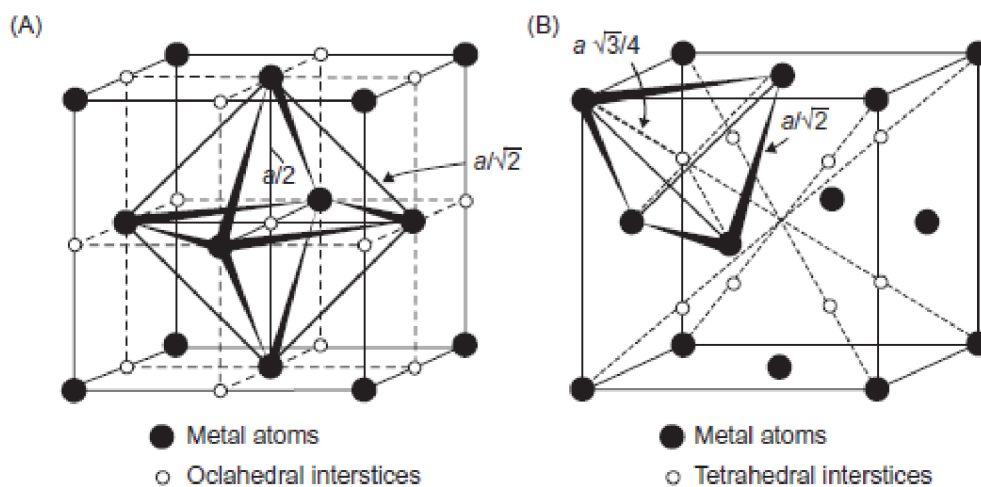


Obrázek 6 Křivky chladnutí a ohřevu čistého železa [3]

1.4 FÁZE OCELÍ

Univerzálnost ocelí závisí na faktu, že dvě velice odlišné fáze neboli krystalové struktury, železa existují při dvou velice odlišných teplotách. Austenit při vysokých teplotách, ferit při teplotách nízkých a pokojových [1]. Austenit se musí při chladnutí přeměnit v jinou mikrostrukturu a v závislosti na rychlosti ochlazování, jakákoliv ocel může být přetvořena do variace struktur, některé výhodné při zpracovávacím procesu, některé výhodné v konečném produktu. Právě díky schopnostem oceli tvořit různé mikrostruktury, je možné produkovat rozmanité typy ocelí s různou kombinací vlastností [1].

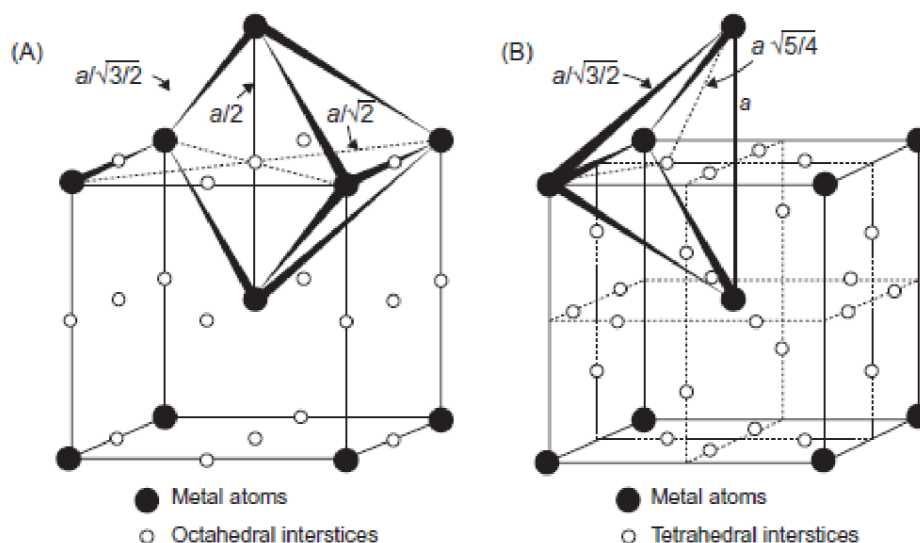
1.4.1 AUSTENIT



Obrázek 7 Krystalická mřížka austenitu
 černé tečky – atomy železa
 bílé tečky – osmistěnná a čtyřstěnná intersticiální místa [1]

Austenit je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ . Jeho krystaly jsou světle šedé barvy, plastické, houževnaté a dobře tvárné [3]. Obrázek 7 zobrazuje krystalovou plošně středěnou mřížku austenitu. Atomy železa jsou vyznačeny černou barvou a jsou umístěny v rozích a ve středech stran buňky [1]. Levý pohled vyobrazuje osmistěnné intersticiální místo mezi atomy, na pravém pohledu je vidět čtyřstěnné intersticiální místo mezi atomy železa. Vysoká rozpustnost uhlíku v austenitu, až 2,11 %, je způsobena právě osmistěnným intersticiálním místem a je to velice důležitá vlastnost, která umožňuje karbidům stabilním při nízkých teplotách být rozpuštěn do austenitu při zahřívání [1]. Tento uhlík je poté přeměněn do jiných mikrostruktur při ochlazování austenitu. Běžně se vyskytuje jen při vyšších teplotách v železe γ . U některých vysokolegovaných ocelí obsahujících větší množství niklu a manganu však austenit zůstává i při pokojových teplotách. Tyto oceli se pak nazývají austenitické [1].

1.4.2 FERIT A CEMENTIT

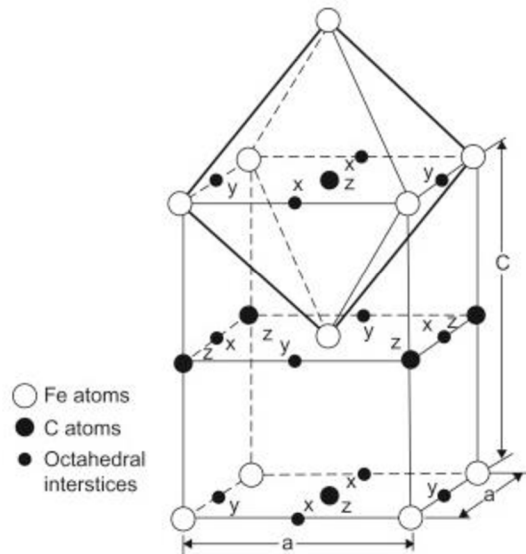


Obrázek 8 Krystalická mřížka feritu [1]
 černé tečky – atomy železa
 bílé tečky – osmistěnná a čtyřstěnná intersticiální místa

Ferit je tuhý roztok uhlíku v železe α . Rozpustnost uhlíku v této fázi je velmi nízká, maximální obsah uhlíku činí 0,018 % a tato hodnota klesá společně s teplotou až na 0,008 % [3]. Z tohoto důvodu se často společně s feritem vytvoří při chladnutí austenitu i cementit. Formuje světlé krystalky, které jsou za studena měkké a tvárné [3]. Je hlavní fází nelegovaných ocelí, u který je hlavním požadavkem houževnatost. Na obrázku 8 je zobrazena krystalová, prostorově středěná mřížka feritu s atomy železa v rozích a středu buňky vyznačenými černě [1].

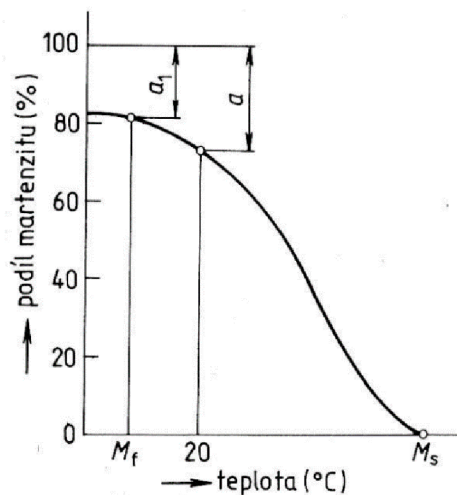
Cementit, nazývaný taky karbid železa, je sloučenina železa a uhlíku, kterého obsahuje až 6,68 % [1][3]. Tvoří komplikovanější ortorombickou krystalovou mřížku, jeho krystalky jsou šedé a jehlicovitého tvaru. Je velmi tvrdý, křehký a není tvárný [3].

1.4.3 MARTENZIT



Obrázek 9 Krystalová mřížka martenzitu [1]

Ochladíme-li austenit prudce pod teplotu M_s (obrázek 10), začne jeho rozpad [3]. Při této teplotě jsou potlačeny všechny difúzní jevy, pouze se přemění mřížka z γ na α a uhlík zůstane uzavřen v mřížce α . Protože železo α v sobě uhlík téměř nerozpouští, vyvolá takto zachycený atom uhlíku velké pnutí, popřípadě deformaci mřížky, což se projevuje velkou tvrdostí a křehkostí [3]. Takto vzniklá struktura se nazývá martenzit a je to metastabilní přesycený roztok tuhý roztok uhlíku v železe α . Jeho krystalovou mřížku můžete vidět na obrázku 9.

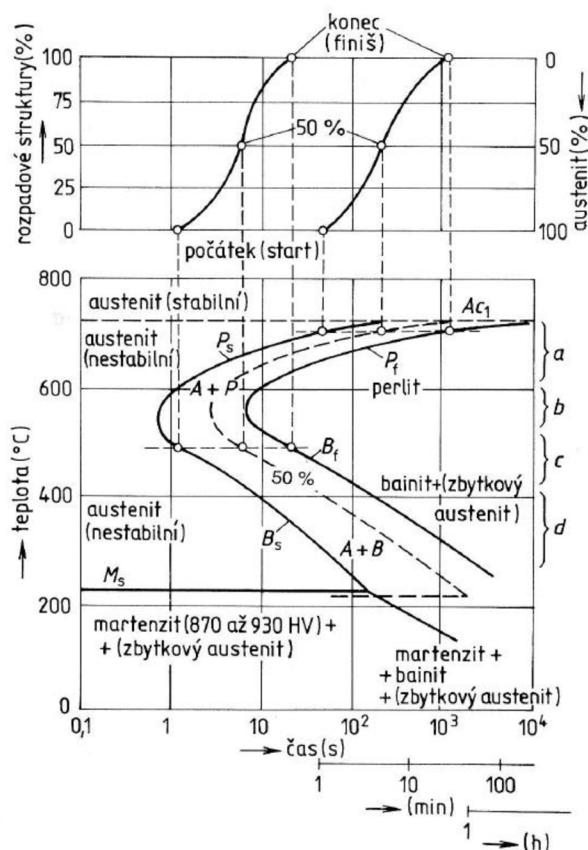


Obrázek 10 Křivka rozpadu austenitu v závislosti na teplotě pod M_s [3]

Martenzitická přeměna není závislá na čase ale pouze na teplotě. Na obrázku 10 je vidět průběh přeměny austenitu na martenzit v závislosti na teplotě [3]. Rozpad začíná při teplotě M_s a pokračuje až do teploty M_f kdy se rozpad zastavuje a křivka se mění na vodorovnou přímku. Po ukončení rozpadu se ve struktuře vyskytuje zbytkový austenit, který se dále nerozpadne i přes další snižování teploty.

1.4.4 PERLIT

Obrázek 11 zobrazuje diagram IRA. Pokud rozpad austenitu probíhá při teplotách nad nosem křivky rozpadu, vzniká perlit [3]. Čím víc se bude teplota rozpadu blížit nosu křivky, tím jemnější bude vzniklý perlit a naopak. Perlit není samostatná fáze, ale dvoufázová struktura složená z feritu a cementitu.



Obrázek 11 Diagram IRA – izotermický rozpad austenitu [3]

1.4.5 BAINIT

Pod nosem křivky rozpadu (obrázek 11) se kvůli snížené difúzi austenit již nerozpadá na perlit. Čím bude teplota izotermického rozpadu austenitu menší, tím více feritu přesyceného uhlíkem vzniká z austenitu, neboť přeměna mřížky z γ na α se nedá potlačit a teprve potom vzniká difúzí z přesyceného feritu cementit. V důsledku toho, že ferit vzniklý v tomto teplotním intervalu obsahuje navíc uhlík, tvoří jehlicovité útvary, tím výrazněji, čím víc se teplota blíží teplotě M_s . Takto vzniklá struktura se nazývá bainit.

Na obrázku 12 je bainitická struktura. Můžeme zde vidět světlé jehlice feritu obklopené difúzně vzniklým cementitem. Díky této jehlicové struktuře se vyznačuje značou pevností a houževnatostí [3].

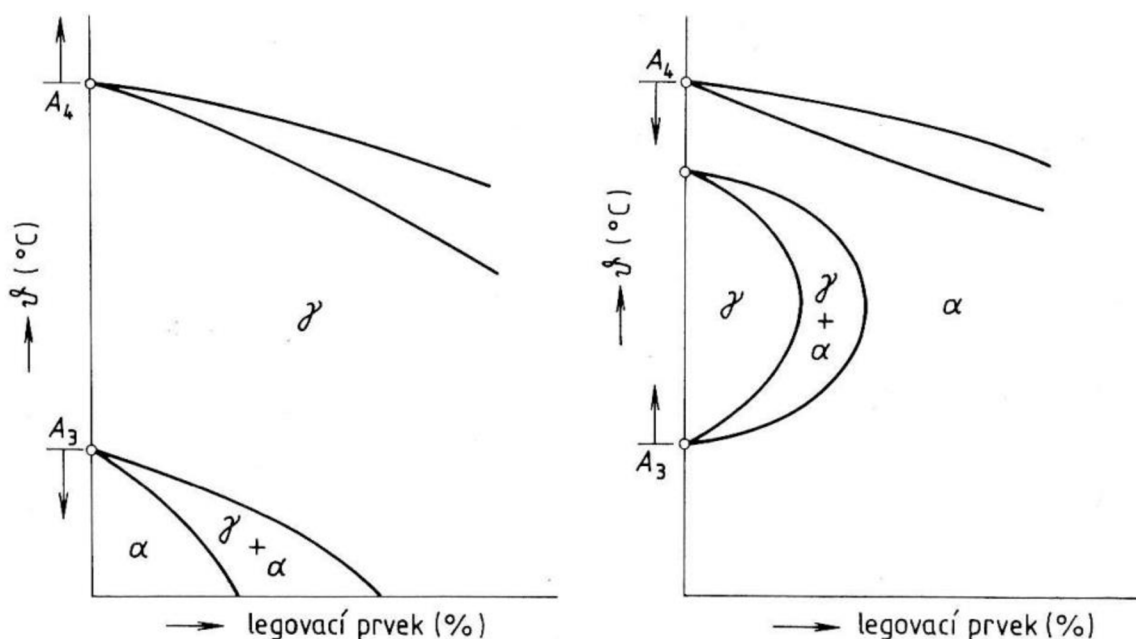


Obrázek 12 Bainitická struktura
[3]

1.5 LEGOVACÍ PRVKY

Jak již bylo zmíněno výše, ocel může kromě uhlíku a železa obsahovat také různé další prvky. Tyto prvky se nazývají legovací a bývají obsaženy v množství od několika setin procenta (např. bór), až po desítky procent (např. nikl, chrom) [3]. Mají pozitivní vliv na vlastnosti oceli jako např. zvýšení tvrdosti a pevnosti, zlepšení prokalitelnosti, odolnosti proti korozi. Nejčastěji jsou používány chrom, nikl, mangan, křemík, molybden, wolfram a vanad, méně často pak kobalt, titan, hliník, měď, niob, zirkonium a bor [3].

Legovací prvky můžeme rozdělit na Austenitotvorné (nikl, mangan, měď) a feritotvorné (např. chrom, křemík, molybden) [3]. Austenitotvorné prvky rozšiřují oblast železa γ snižováním teploty A_3 a zvyšováním teploty A_4 . Feritotvorné prvky zužují, popřípadě zcela uzavírají oblast železa γ zvyšováním teploty A_3 a snižováním teploty A_4 . Některé legovací prvky se slučují s uhlíkem a tvoří karbidy, nazýváme je proto karbidotvornými (např. chrom, molybden, wolfram) [3].



Obrázek 13 Diagramy austenitotvorného prvku (vlevo) a feritotvorného prvku (vpravo) [3]

NIKL

Neomezená rozpustnost v železe γ , částečná v železe α , otevírá oblast γ , zvětšuje houževnatost, prokalitelnost, u nezušlechtěných ocelí zvyšuje pevnost, je legurou u korozivzdorných a žárupevných ocelí [3].

MANGAN

Neomezená rozpustnost v železe γ , v malé míře v železe α , otevírá oblast γ , zvyšuje prokalitelnost, tvrdost a pevnost, je legurou ocelí korozivzdorných a žárupevných a odolných proti opotřebení [3].

CHROM

Neomezená rozpustnost v železe α , částečná v železe γ , uzavírá oblast γ , je karbidotvorný, zvětšuje odolnost proti korozi, žáruvzdornost, prokalitelnost, pevnost, odolnost proti opotřebení [3].

KŘEMÍK

Částečná rozpustnost v železe α i γ , uzavírá oblast γ , působí grafítizačně, zvyšuje odolnost proti oxidaci i za zvýšených teplot, pevnost a prokalitelnost [3].

MOLYBDEN

Částečná rozpustnost v železe α , menší v železe γ , uzavírá oblast γ , silně karbidotvorný, zvyšuje prokalitelnost, mez tečení, odolnost proti korozi a opotřebení [3].

WOLFRAM

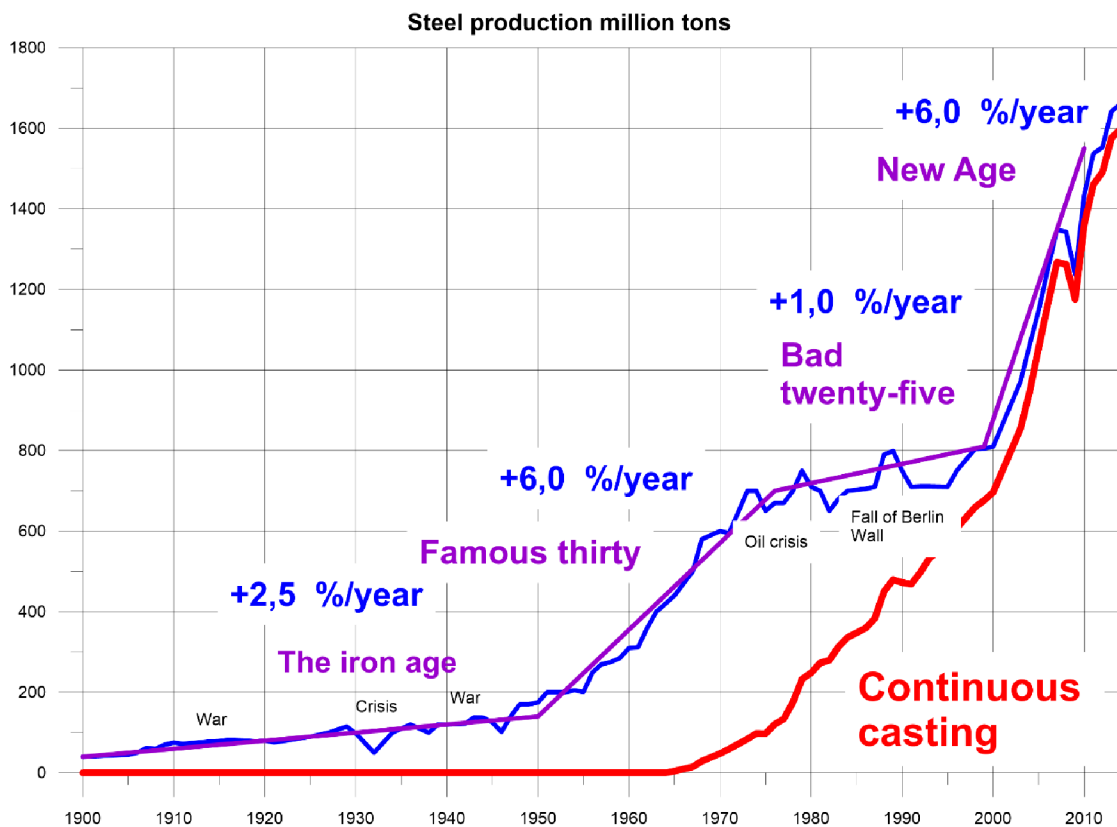
Částečná rozpustnost v železe α i γ , uzavírá oblast γ , silně karbidotvorný, zlepšuje prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, odolnost proti opotřebení, zvyšuje žárupevnost [3].

VANAD

Neomezená rozpustnost v železe α , částečná v γ , uzavírá oblast γ , silně karbidotvorný, zvyšuje prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, tvrdost, žárupevnost [3].

2 OCEL V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

2.1 HISTORIE VYUŽITÍ OCELI V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU



Obrázek 14 Produkce oceli od začátku 20. století po současnost [4]

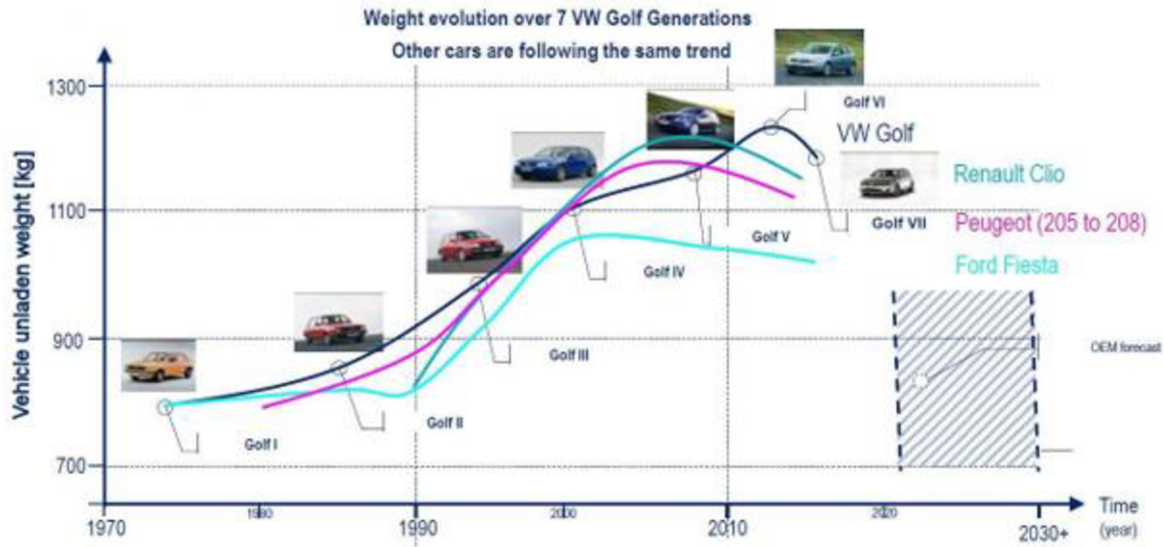
Svislá osa – roky

Vodorovná osa – množství v milionech tun

Ocel byla důležitým materiálem pro konstrukci motorových vozidel již od počátku 20. století. V té době ještě ocel soutěžila s hliníkem a dřevem o nejpoužívanější materiál ve stavbě automobilů, ale v průběhu dvacátých let již byla jasným vítězem [1]. Toto vítězství můžeme přisuzovat její nízké ceně, schopnosti být formována do složitých tvarů a snadnému spojování jednotlivých dílů pomocí svařování. Díky tomuto vývoji závisel automobilový průmysl na stabilní dodávce ocelových plechů, na což ocelářský průmysl zareagoval vyvinutím schopnosti vyrábět tenké a široké plechy [1].

V šedesátých letech nicméně čelil automobilový průmysl novým výzvám, které významně změnila požadavky na strukturu vozidla. Mezi tyto výzvy patřila poptávka po vozidlech, které byly bezpečnější, šetrnější k životnímu prostředí a spotřebovávaly méně paliva, stejně jako vzrůstající konkurence schopnost nových materiálů na trhu a poptávka zákazníků po výkonnějších, komfortnějších a spolehlivějších automobilech. Odpovědí byl vývoj nových typů ocelí s vysokou pevností a lepší zpracovatelností. [1]

2.2 HMOTNOST AUTOMOBILŮ A POUŽITÉ MATERIÁLY PŘI VÝROBĚ



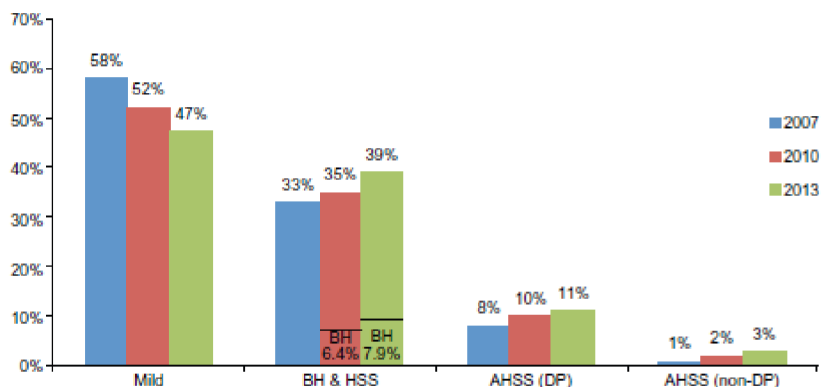
Obrázek 15 Vývoj hmotnosti VW Golf a ostatních automobilů od roku 1970 [4]

Svislá osa – hmotnost vozidla

Vodorovná osa - roky

Obrázek 15 ukazuje vývoj hmotnosti středně velkého auta reprezentovaného VW Golf. Je možné pozorovat postupný nárůst hmotnosti z méně než 800 kg první generace na 1250 kg šesté generace [4]. Tento trend se však v poslední, tedy sedmé, generaci změnil a je zřejmý pokles hmotnosti o více jak 100 kg, při zachování rozměrů, bezpečnosti a komfortu automobilu. Tato redukce byla dosažena použitím vysokopevnostní oceli na ocelové plechy a podpůrné prvky těla, což umožnilo redukci tloušťky těchto komponent při zachování pevnosti i ostatních vlastností [4].

V nedávné zprávě bylo nastíněno použití ocelí v konstrukci automobilu. V roce 2013 byla průměrná hmotnost automobilu 1733 kg, z toho 57 % činilo různé třídy oceli a železa [1]. Byl také prokázán trend nahrazovat obyčejnou uhlíkovou ocel různými druhy vysokopevnostních ocelí. V roce 2013 činil podíl oceli v konstrukci automobilu 748 kg [1]. V porovnání s minulými roky klesl podíl uhlíkových ocelí, zatímco podíl vysokopevnostních ocelí vzrostl. Toto reprezentuje graf na obrázku 16. Nahrazování uhlíkové oceli vysokopevnostními oceli je trend, který začal v 80. letech, nabral na síle v 90. letech a pokračuje až do současnosti.



Obrázek 16 Vývoj zastoupení jednotlivých tříd ocelí od roku 2007 do roku 2013 [1]

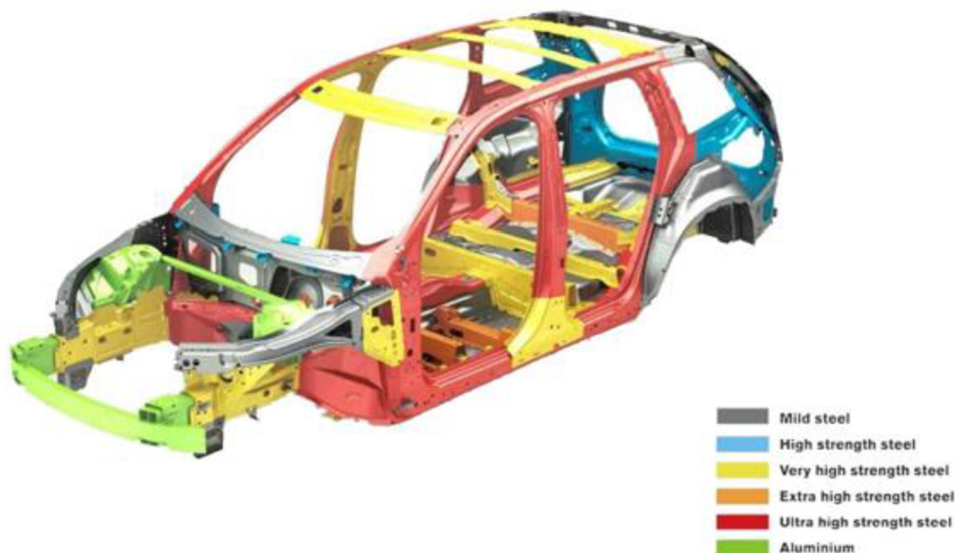
Mild – nízkouhlíková ocel

BH and HSS – Bake hardenable a vysokopevnostní oceli

AHSS (DP) – pokročilé vysokopevnostní dvoufázové oceli

AHSS – pokročilé vysokopevnostní oceli

Automobily střední třídy a menší stále kvůli výrobní ceně využívají převážně celo-ocelovou konstrukci, ovšem s vyšším podílem pokročilých vysokopevnostních ocelí. Trendem při výrobě větších automobilů a SUV je použití oceli v kombinaci s hliníkovými a jinými lehkými slitinami a uhlíkovými vlákny vyztuženými plasty [4]. Jako příklad lze uvést druhou generaci automobilu Volvo XC90, konstrukci můžete vidět na obrázku 17. Automobil je oproti první generaci rozměrnější, a přesto jeho celková hmotnost klesla o 10 kg a pevnost karoserie dokonce vzrostla [4].



Obrázek 17 Karoserie automobilu Volvo XC90 druhé generace [4]

2.3 VLASTNOSTI OCELI

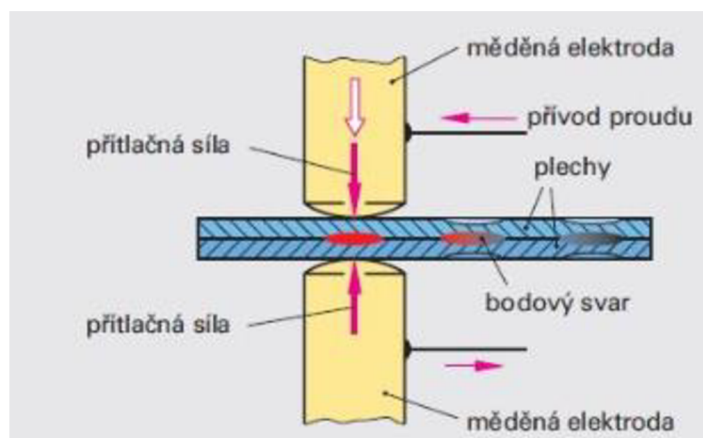
Oceli jsou v konstrukci automobilů tak hojně využívány, protože mají vlastnosti, kterých lze s výhodou využít. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit: svařitelnost, tvárnost, tažnost, relativně vysokou pevnost vzhledem k hmotnosti, korozivzdornost, deformační zpevnění a dají se také dobře lakovat barvami. Je však nutné říct, že ne všechny mají zmíněné vlastnosti. Například běžné nízkouhlíkové oceli mají výbornou tažnost a tvárnost a dobře se svařují, ale mají nízkou pevnost a tvrdost. Naproti tomu oceli s vyšším obsahem uhlíku mohou nabídnout vyšší pevnost a dobrou kalitelnost, nebo lepší poměr hmotnosti a pevnosti, ale jejich svařitelnost je špatná. Proto byly vyvinuty moderní oceli, které využívají vhodných legovacích prvků a kombinací mikrostruktury, pro dosažení potřebné kombinace vlastností.

2.4 VÝROBA KOMPONENT AUTOMOBILŮ

Moderní automobily jsou vyrobeny z komponent poměrně komplikovaných tvarů. K tomu se využívá proces tváření, pomocí kterého je možné vyrobit díly, které jsou tenké, lehké a mohou mít komplikovaný tvar. Následně jsou jednotlivé díly spojovány do celků nejčastěji svařováním, ale využívá se i šroubových, nebo nýtových spojů. Tam kde není potřeba velká pevnost spoje, je možné použít i lepené spoje.

2.4.1 SVAŘOVÁNÍ

Svařování je proces lokálního natavení spojovaných součástí a případného přídavného materiálu elektrody. Vznikne tak nerozebíratelný spoj se stejnou, nebo vyšší pevností jako spojované materiály. Schopnost materiálu vytvářet spolehlivý spoj svařováním se nazývá svařitelnost. Čím vyšší je obsah uhlíku a legovacích prvků v oceli, tím hůře je ocel svařitelná. Parametr, podle kterého se stanovuje svařitelnost oceli, se nazývá uhlíkový ekvivalent [1]. Tento parametr je funkcí množství legovacích prvků a reprezentuje ekvivalent množství obsahu uhlíku, který by vyústil ve stejnou svařitelnost.



Obrázek 18 Schéma odporového bodového svařování [11]

Nejvyužívanější metodou svařování v automobilovém průmyslu je bodové odporové svařování [1]. Spojované ocelové plechy se k sobě přiloží a přitlačí dvěma měděnými, vodou chlazenými elektrodami. Následně je jimi puštěn elektrický proud, který lokálně nataví spojované součásti a vznikne tak svar. Výhodami této metody je jen malé lokální tepelné ovlivnění spojovaných součástí a snadná automatizace a také rychlost procesu. Schéma je možné vidět na obrázku 18.

2.4.2 TVÁŘENÍ

Tváření je proces, při kterém se za působení vnějších sil deformují plechové polotovary a vzniká tak výrobek požadovaného tvaru, velikosti a s požadovanými vlastnostmi. Vhodnost materiálu pro tváření udává jeho tvářitelnost. Je to schopnost materiálu plasticky se deformovat bez vzniku a šíření trhlin. Tato vlastnost je lepší u ocelí s nižší mezí pevnosti.

Lisování je nejpoužívanější metodou tváření v automobilovém průmyslu, protože jde o produktivní metodu, výrobky nejsou nákladné a lze je dobře automatizovat [12]. Při lisování je plechový polotovar vtlačován do zápusťky a tím získává potřebný tvar. Jelikož jsou výlisky často komplexních tvarů, nezískává se finální tvar na jedno lisování, ale proběhne několik lisovacích cyklů, při kterých se tvar zápusťky stále více blíží finálnímu tvaru. Lisování můžeme rozdělit na lisování za studena a lisování za tepla.

LISOVÁNÍ ZA STUDENA

Jelikož probíhá lisování za pokojových teplot, nazýváme ho lisováním za studena. Hodí se spíše pro oceli s nižší pevností, neboť ty mají lepší tvářitelnost. U ocelí s vyšší mezí pevnosti může dojít jen k částečné plastické deformaci a výlisky tedy mají tendenci se částečně vracet do původní podoby [12]. Také riskujeme vznik trhlin. Lisování můžeme dále rozdělit na další podprocesy.

Dělení ocelových plechů je první krok v tvářecím procesu [1]. Jednak je potřebný kus oddělen od zbytku a jednak je upraven na tvar hrubě připomínající výsledný výlisek s potřebným přídatkem, který činí 10 až 15 %.

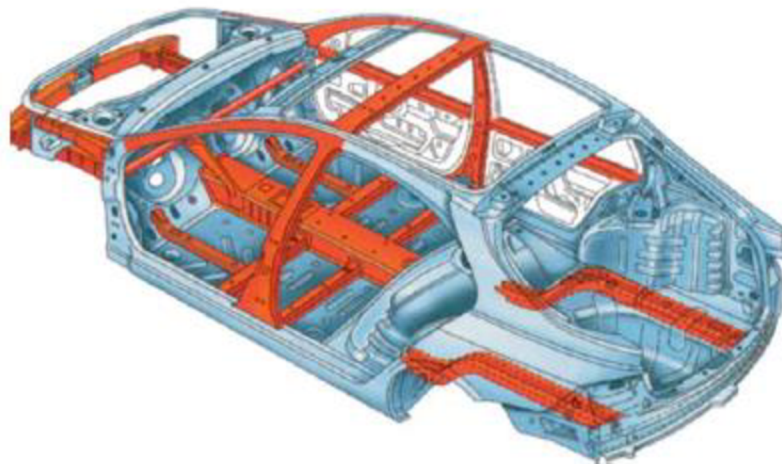
Tažení je proces, při kterém je materiál uchycen k zápusťce a do ní vtlačen [1]. Jelikož materiál nemůže volně téct do zápusťky, všechna deformace probíhá na úkor tloušťky materiálu vtlačeného do zápusťky, materiál po úchytem si svoji tloušťku uchová.

Hlubokotažení je proces podobný tažení s tím rozdílem, že lem, který u tažení pevně uchycen k zápusťce může nyní volně vtéct do zápusťky a je tak možné dosáhnout hlubších výlisků [1]. I hlubokotažení má ale svůj limit, neboť při příliš hlubokém tažení se může materiál začít vrásnit.

Ohýbání je přímočarý základní proces zpracování polotovarů. Při výrobě automobilových dílů však často nutné ohýbat součásti, které mají lem, a to může způsobit potíže během procesu [1]. Ohýbání je charakterizováno gradientem napětí po tloušťce polotovaru. Když tedy ohneme plech o 180°, vnější strana plechu je maximálně namáhána.

LISOVÁNÍ ZA TEPLA

I když prošli vysokopevnostní oceli značným vývojem, jejich tvářitelnost není v některých případech dostatečná pro lisování za studena [12]. Pro tyto oceli se lépe hodí zpracování lisováním za tepla. Lisování za tepla se využívá při výrobě dílů z pevností až 1500 MPa, mezi které patří, nárazníky, A, B i C sloupky, kostra střechy, panely dveří atd. Mezi lety 2008 a 2012 zaznamenalo lisování za tepla růst podílu využití při výrobě komponent karoserie a 4 až 15 % na 10-30 %. Jedním z důvodů je vzrůst podílu SUV a luxusních automobilů, jejichž konstrukce obsahuje velký podíl za tepla lisovaných součástí [12].



Obrázek 19 Podíl za tepla lisovaných dílů v konstrukci automobilu [12]

Obecně lze lisování za tepla popsat následovně. Polotovár je v peci zahřát na požadovanou teplotu, aby proběhla austenitizace a poté přepraven do vodou chlazených zápustek, kde proběhne lisování a přeměna mikrostruktury [12]. Podle průběhu procesu můžeme lisování za tepla rozdělit na přímé a nepřímé lisování za tepla.

Při přímém lisování za tepla, je ocelový plech zahřát v peci a poté vylisován. Zároveň proběhne i přeměna mikrostruktury [12]. Poté je výlisek ořezán laserem a dále podle potřeby zpracován. Výhody této metody jsou následující: lisování proběhne v jedné zápustce, takže je to operace rychlá a ekonomická a výchozí polotovár je plochý, takže jde jednoduše zahřívát různými způsoby. Nevýhodou je, že touto metodou lze vyrábět jen díly s jednodušším tvarem, jako např. B sloupky [12].

Při nepřímém lisování za tepla, je ocelový plech nejprve předlisován za studena a až následně zahřát v peci na austenitizační teplotu [12]. Poté je výrobek opět lisován jako v předchozím případě, ořezán laserem a podle potřeb zpracováván. Výhodou této metody je, že lze produkovat díly s komplexním tvarem [12]. Nevýhodou, že je to zdlouhavý a tím i nákladnější proces.

3 OCELI POUŽÍVANÉ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Tato kapitola rozebírá několik typů ocelí, které se používají v automobilovém průmyslu nejčastěji. Konkrétně se jedná o obyčejnou uhlíkovou ocel, HSLA steel – nízkou legovanou vysokopevnostní ocel, dual phase steel – dvoufázovou ocel a TRIP steel – ocel s deformačně indukovanou plasticitou.

Dříve se na konstrukci automobilů používali převážně jednoduché uhlíkové oceli s nižší mezí kluzu a pevnosti. Jak pokračoval vývoj automobilů a stále přibývalo různých nároku na vlastnosti konstrukce, byli výrobci nuceni začít využívat pokročilejší materiály. Moderní karoserie sestávají z ocelových komponent vyrobených z vysokopevnostních ocelí, takže celý automobil může být odlehčen při zachování všech vlastností.

3.1 MILD STEEL

Mild steel, český nízkouhlíková ocel je nejzákladnější formou oceli. Obsahují maximálně 0,25 % uhlíku a jsou tím pádem dobře tvářitelné a svařitelné, ale nedosahují vysokých pevností [2]. Mají feritickou mikrostrukturu a jsou legovány nejčastěji titanem a manganem [6]. V automobilovém průmyslu se konkrétně používají oceli nazývané Interstitial Free (IF).

3.1.1 INTERSTITIAL FREE OCELI

Tyto oceli odvozují svůj název od faktu, že se v mikrostruktuře nenachází skoro žádné intersticiální atomy. Česky by se tedy dali nazvat jako oceli bez intersticiálních atomů. Obsahují totiž velmi malé množství uhlíku, do 0,005 %, který je navíc skoro výhradně přítomen pouze ve formě karbidů, takže se jen velmi malé procento uhlíkových atomů nachází v intersticiálních místech, což má za následek velmi vysokou tažnost [1]. Tyto oceli mají poměrně nízkou mez kluzu, respektive pevnosti. Hodnoty se pohybují v rozmezí 140 až 150 MPa, respektive 280 až 290 MPa [1]. Tyto oceli jsou také odolné vůči stárnutí, což znamená, že jejich mechanické vlastnosti nedegradují v závislosti na čase [6].



Obrázek 20 Struktura IF oceli [6]

VÝROBNÍ PROCES

Výrobní proces začíná kontinuálním litím, následuje válcování za tepla, pak válcování za studena a končí žiháním. Dalším krokem ve výrobě je proces tzv. „vakuového odplynění.“ Tento krok zaručí, že obsah prvků, jejichž atomy by mohli vnikat do intersticiálních míst, je co nejmenší [1]. Konkrétně se jedná o uhlík a dusík. Následně jsou přidány legovací prvky, odlité desky jsou znovu zahřáty, za tepla válcovány a smotány. Poté je vychladnutý pás za studena znovu válcován a podroben žihání.

Tabulka 1 Obsah uhlíku a mechanické vlastnosti IF oceli [6]

C [%]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
0,001-0,01	165	120-290	47

VYUŽITÍ V KONSTRUKCI AUTOMOBILU

Tyto oceli se používají při výrobě vysoce exponovaných dílů, jako jsou nárazníky, blatníky, dveře, kapota, víko kufru a střecha [6].

3.2 HSLA OCELI



Obrázek 21 Mikrostruktura oceli HSLA 340 [6]

První zmínka o vysokopevnostních nízko legovaných ocelí pochází z roku 1934, kdy byl publikován článek rozebírající vlastnosti za tepla válcované oceli s obsahem vanadu. [1] Druhá zmínka pochází z roku 1958, kdy byla vyrobena první komerční řada HSLA ocelí, nesoucí označení GLX-W, legovaná niobem. Tyto dvě události společně tvoří objev a následné komerční uvedení třídy ocelí, kterým se postupně začalo říkat HSLA oceli. Použití HSLA ocelí v automobilovém průmyslu přišel společně s ropnou krizí v roce 1973. Kvůli nedostatku paliva byli výrobci nuceni hledat možnosti, jak redukovat hmotnost automobilů a použití HSLA ocelí bylo jednou z možností.

Dnešní typy HSLA ocelí, používané v automobilovém průmyslu, se od tehdy používaných značně liší [1]. Ačkoliv redukce hmotnosti zůstává stále důležitým aspektem, nabyly na důležitosti i ostatní požadavky: redukce CO₂ emisí, zvýšení odolnosti při havárii, zlepšení tvářitelnosti a svařitelnosti.

Tabulka 2 Příklady použití HSLA ocelí [1]

Třída	Zpracování	Tváření	Hlavní využití
HSLA 260-420	Válcované za tepla	Za studena	Šasi, ráfky a disky, části odpružení
HSLA 550			
HSLA 750			
HSLA 320	Válcované za studena a galvanicky pozinkovány		Části vozidel vyžadující tažení a hluboko tažení
HSLA 420			
HSLA 590			

3.2.1 POPIS

HSLA oceli jsou speciální kategorií obyčejných uhlíkových ocelí [1]. Patří do skupiny nazývané se „vysokopevnostní oceli“ (z anglického „High Strength Steel – HSS“). Mají feritickou mikrostrukturu, kterou lze vidět na obrázku 21. Jde o rozsáhlou skupinu ocelí s obsahem uhlíku od 0,02 % do 0,2 % [5]. Co se legovacích prvků týče, obsahují tyto oceli nikl, chrom, měď a molybden. Všechny tyto prvky dohromady tvoří více jak 1,5 % obsahu. Dále pak také obsahují mangan, respektive křemík a jejich obsah tvoří 1 až 2 % respektive 0,5 % [5]. V tomto složení nejsou tyto oceli nijak speciální a nedosahují mezi pevnosti v kluzu vyšších než 350 MPa.

Pokud jsou však tyto oceli legovány malým množstvím většinou niobu, titanu a vanadu a někdy též zirkonia a tantalu, je možné dosáhnout velkého množství mechanických vlastností. Tyto přísady dokážou i velmi malém množství výrazně zvýšit pevnost. Například přidáním 0,002 % niobu lze zvýšit mez pevnosti v kluzu až o 200 MPa. Naproti tomu, přidáním například 1 % niklu dosáhneme zvýšení meze pevnosti v kluzu asi jen o 38 MPa [5]. Z tohoto příkladu je patrné, odkud pochází název této skupiny ocelí. Všechny legovací prvky jsou přidávány ve velmi malém množství.

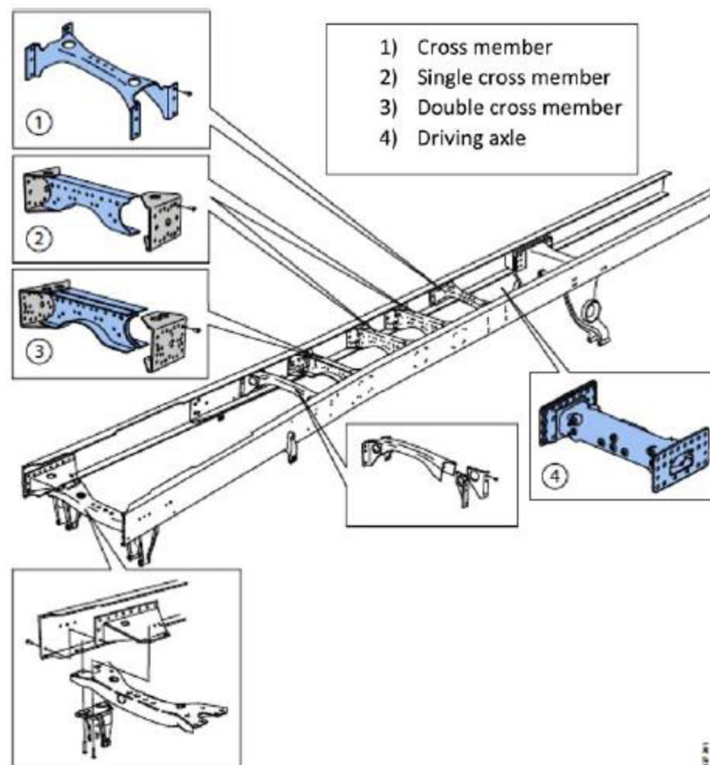
Mez pevnost v kluzu u některých těchto ocelí dosahuje až 690 MPa, což je více než dvojnásobek pevnosti v kluzu běžných uhlíkových ocelí. Všeobecně panuje přesvědčení, že tato vysoká pevnost vychází z jejich faktorů mikrostruktury, jako zjemnění zrna, precipitační vytvrzení a kontrola tvaru nečistot [1].

Tabulka 3 Příklad chemického složení a mechanických vlastností oceli HSLA 340 [6]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
Max. 0,08	Max. 0,7	Max. 0,04	340-400	420-490	≥ 23

3.2.2 VYUŽITÍ V KONSTRUKCI AUTOMOBILU

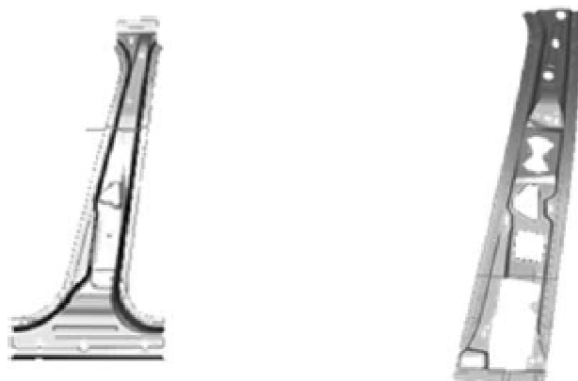
Dobré mechanické vlastnosti za tepla válcovaných HSLA ocelí a jejich výborná tváritelnost za studena, odolnost vůči křehkému lomu při nízkých teplotách a svařitelnost poskytuje možnosti vyrábět komponenty s nízkou hmotností a malou tloušťkou a velikostí [1]. Typickými oblastmi využití za tepla válcovaných HSLA ocelí jsou výztužné díly dveří a nárazníků, rámy podvozků, kola a příčné nosníky [1][6].



Obrázek 22 Příklad konstrukce rámu podvozků a umístění příčných nosníků, modré komponenty vyrobeny z HSLA oceli [1]

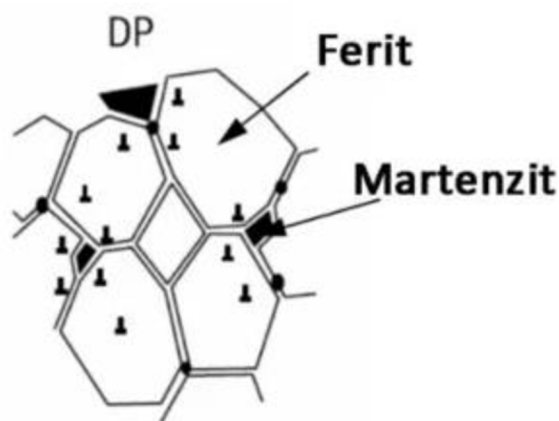
- 1) Příčný nosník
- 2) Jednoduchý příčný nosník
- 3) dvojitý příčný nosník
- 4) Hnací náprava

Typické komponenty vyrobené s využitím za studena válcovaných HSLA ocelí jsou výztuhy B sloupků a vnitřní výztuž sloupků. Specifická ocel použitá v těchto případech je HSLA Gr350 s obsahem titanu a niobu [1].



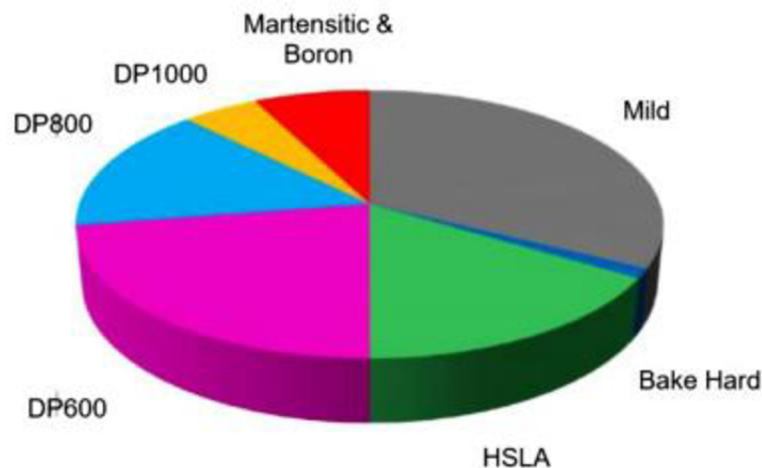
Obrázek 23 B sloupek (vlevo) a vnitřní výztuž sloupků (vpravo) [1]

3.3 DVOUFÁZOVÉ OCELI



Obrázek 24 Mikrostruktura (vlevo) a schéma mikrostruktury (vpravo) [6]

Dvoufázové oceli byly první třídou vysokopevnostních ocelí, jejichž výroba zahrnovala specifickou fázovou přeměnu [1]. Na rozdíl od HSLA ocelí, které mají čistě feritickou mikrostrukturu, jsou dvoufázové oceli, jak název napovídá, složeny z dvou fází. Tuto strukturu znázorňuje obrázek 24. Řadí se mezi tzv. „pokročilé vysokopevnostní oceli,“ společně s TRIP oceli. Byly poprvé vyvinuty v 70. letech minulého století [2]. Následoval jejich intenzivní vývoj, během kterého tyto oceli dosahovali pevnosti v tahu asi 600 až 700 MPa [1]. Dnes jsou na dvoufázové oceli kladeny přísnější nároky, díky čemuž pevnost v tahu vzrostla až na 1200 MPa [1]. Tyto oceli jsou v současné době nejvíce využívanými oceli při konstrukci automobilu a není bezpředmětné se domnívat, že tomu tak i nadále zůstane, díky jejich výborným vlastnostem [1]. Na obrázku 23 můžeme vidět graf znázorňující podíl jednotlivých ocelí v konstrukci Fordu Edge. Více než třetinu tvoří dvoufázové oceli.



Obrázek 25 Podíl zastoupení ocelí v konstrukci automobilu Ford Edge z roku 2015 [1]

3.3.1 POPIS

Dvoufázové oceli poskytují výhodnou kombinaci pevnosti a tažnosti. Vděčí za to své mikrostruktuře, která je složena z měkké feritické matrice s ostrůvky martenzitu vzniklého transformací austenitu [6]. Dvoufázové oceli se také vyznačují vysokou mírou deformačního zpevnění, což vede ke zvýšení meze kluzu po tváření. S tím pomáhají legovací prvky, v tomto případě konkrétně mangan, chrom, molybden, vanad a nikl [6]. Další zvětšení meze kluzu může nastat při tepelném vytvrzování laku, efektem tzv. „kontrolovaného žíhání.“ Je to proces, který probíhá při teplotách okolo 170 °C, po dobu asi 20 minut a za statického zatěžování. Tento proces stabilizuje dislokace v mikrostruktuře pomocí intersticiálních (rozpuštěných) atomů uhlíku [6]. Dalšími charakteristickými vlastnostmi jsou nízký koeficient odpevnění, vysoký koeficient zpevnění, odolnost proti iniciaci a šíření únavového lomu [6].

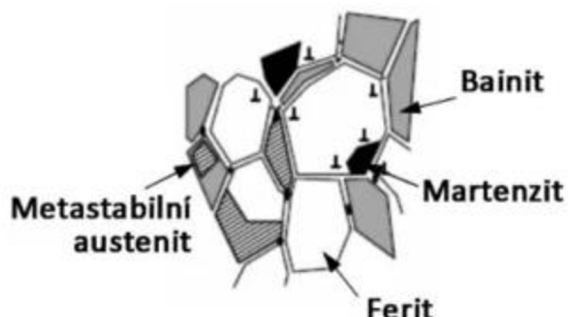
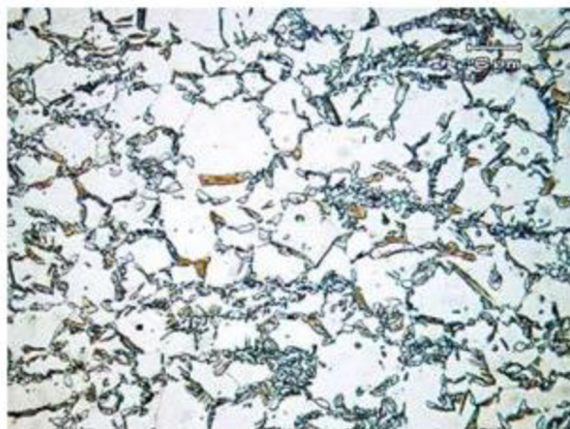
Tabulka 4 Příklad chemického složení a mechanických vlastností oceli Dual Phase 600 [6]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]
Max. 0,14	Max. 2,1	Max. 0,4	330-410	600-700	≥ 21

3.3.2 VYUŽITÍ V KONSTRUKCI AUTOMOBILU

Jak již bylo zmíněno, dvoufázové oceli jsou v současné době nejvyužívanější třídou oceli při konstrukci automobilů, v karoserii jsou zastoupeny až ze 74 % [1][6]. Vysoká pevnost a deformační zpevnění v kombinaci se získkem pevnosti v kluzu při kontrolovaném žíhání z nich dělá vhodný materiál pro snižování hmotnosti strukturálních komponent a krycích plechů [1]. Konkrétně se může jednat o příčné nosníky, A, B, C i D sloupky, prahy dveří, výztuhy střeš a podlah, přední nárazníkové konstrukce [6].

3.4 TRIP OCELI



Obrázek 26 Typická mikrostruktura TRIP oceli (vlevo) a její schématické vyobrazení (vpravo) [6]

Zvyšující se nároky na bezpečnost automobilů a ochranu životního prostředí a růst konkurence alternativních a lehčích materiálů vedl k vývoji nové třídy ocelí nazývané „pokročilé vysokopevnostní oceli“ (z anglického „Advanced High Strength Steels“ - AHSS) [1]. Skládají se z dvou a více fází a kombinují tak vysokou pevnost s dobrou tvářitelností.

Mezi různými oceli patřícími do této kategorie vynikají TRIP efektem podporované oceli, díky svým mechanickým vlastnostem, zejména kombinací pevnosti a prodloužení, ale také vysokým exponentem deformačního zpevnění [1]. Tyto vlastnosti společně poskytují výbornou tvářitelnost a dělají z TRIP ocelí slibného kandidáta na materiál pro strukturální komponenty automobilů.

Prvními oceli vykazujícími TRIP efekt byly metastabilní, vysokolegované, austenitické oceli [1]. Ty ovšem nebyly komerčně populární, kvůli vysoké výrobní ceně. Dalšími oceli vykazujícími TRIP efekt byly slitiny vyvinuté v 90. letech minulého století v Japonsku. Byl použit nový proces výroby, jehož výsledkem byla nízkolegovaná, křemík obsahující ocel se středním obsahem uhlíku. Byla tvořena feritem jako matricí a bainitem a metastabilním zbytkovým austenitem jako dalšími fázemi v mikrostrukturu [1].

3.4.1 POPIS

Zkratka TRIP pochází z anglického „Transformation induced plasticity,“ tedy transformačně indukovaná plasticita. TRIP efekt spočívá v přeměně austenitu na martenzit vyvolané plastickou deformací [6]. To má za následek zvýšení míry deformačního zpevnění a tím zpoždění tvorby krčku při namáhání.

Mikrostruktura TRIP ocelí se skládá většinou z měkké feritické matrice a ostrůvků zbytkového austenitu a bainitu. U některých typů se může v jednotkách procent vyskytovat i martenzit [6]. Typická mikrostruktura je vyobrazena na obrázku 26, existují však i TRIP oceli s jinak složenou mikrostrukturou. Z legovacích prvků jsou zde důležitými křemík, hliník a mangan. Urychlují transformaci feritu na bainit a zabraňují vzniku karbidů v bainitu [6].

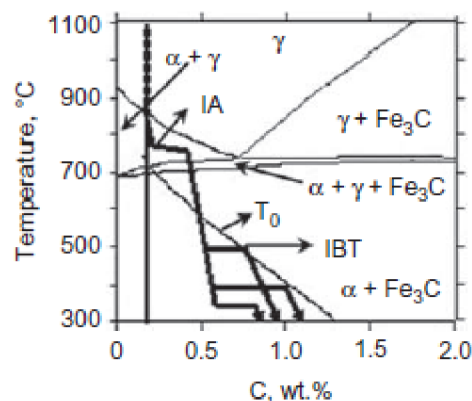
TRIP oceli obsahují poměrně velké množství uhlíku. Cílem při výrobě TRIP ocelí je dosáhnout při pokojové teplotě alespoň minimálního potřebného množství uchovaného austenitu v mikrostruktuře [1]. To je možné pouze tehdy, pokud je maximální teplota, při které se austenit mění na martenzit, viz teplota M_s , obrázek 10, snížena pod pokojovou teplotu. K tomu je využít právě uhlík, neboť výrazně snižuje teplotu M_s a také pomáhá stabilizovat austenit [1]. Výrobní procesy jsou proto navrženy tak, aby se zajistilo nasycení uhlíkem a byl tak uchován austenit při pokojové teplotě.

Tabulka 5 Příklad chemického složení a mechanických vlastností oceli TRIP 690 [6]

C [%]	Mn [%]	Al+Si [%]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
Max. 0,2	Max. 2,0	Max. 2,0	410-510	690-800	≥ 10

3.4.2 VÝROBNÍ PROCESY

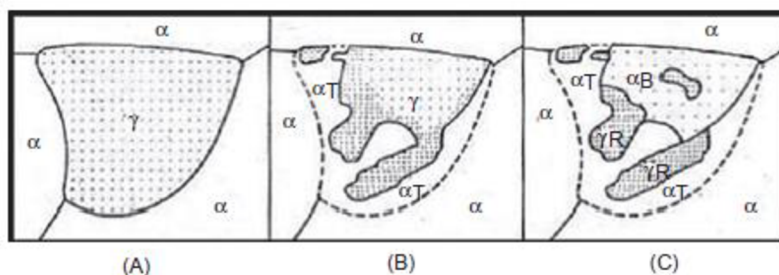
Obecně se při výrobě TRIP ocelí používá dvoufázové tepelné zpracování, vyobrazeno na obrázku 27. První fáze probíhá v oblasti feritu α + austenitu γ a nazývá se interkritické žihání [1]. Během této fáze probíhá rekrystalizace za studena válcované struktury, rozpad perlitu a karbidů a tvorba austenitu. Cílem je získat strukturu zhruba půl na půl tvořenou perlitem a austenitem. Tvorba austenitu je provázena obohacováním uhlíkem, avšak maximální hodnoty dosažené při této fázi zpracování nejsou dostačující na retenci austenitu, proto následuje fáze druhá. Proběhne rychlé zchlazení na teplotu, při které proběhne finální přeměna v oblasti bainitu. Tato fáze se nazývá izotermická bainitická přeměna [1]. Jako první se při této fázi vytvoří přesycený bainit. Ten zanikne přechodem uhlíku do austenitu, nebo vytvořením karbidů. V praxi je možné tohoto procesu dosáhnout jak válcováním za studena, tak za tepla, přičemž válcování za studena převažuje.



Obrázek 27 Graf dvoufázového tepelného zpracování TRIP ocelí
svislá osa – teplota [°C]
vodorovná osa – obsah uhlíku [%] [1]

VÁLCOVÁNÍ ZA STUDENA

Desky oceli jsou prvně zahřáty na teploty okolo 1200 °C a poté válcovány za tepla [1]. Po skončení válcování jsou pásy zchlazeny vzduchem a stočeny. Mikrostruktura se v tomto bodě skládá z feritu a perlitu. Pásy jsou dále válcovány za studena a znovu zahřáty v kontinuální žíhací lince na teplotu mezi 780 a 860 °C. Poté jsou pásy rychle zchlazeny na teplotu asi 450 °C a na této teplotě jsou drženy pro realizaci izotermické bainitické přeměny [1]. Výsledná struktura se skládá z feritické matrice, bainitu a austenitu.



Obrázek 28 Změny mikrostruktury během dvoufázového tepelného zpracování: A) interkritické žíhání, B) ochlazení z teploty interkritického žíhání na teplotu izotermické bainitické přeměny, C) izotermická bainitická přeměna [1]

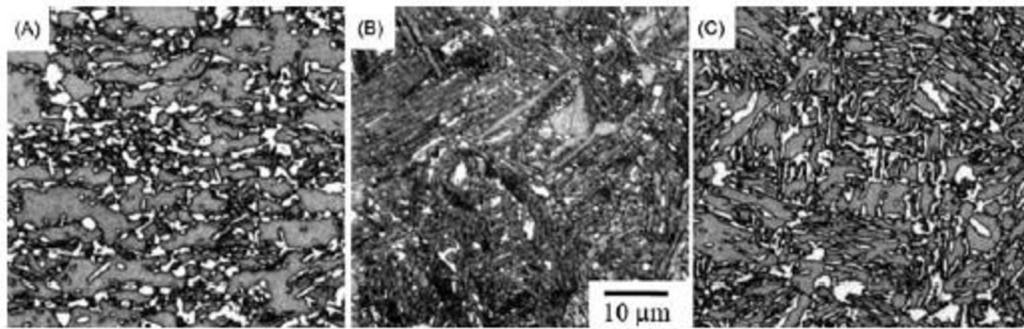
VÁLCOVÁNÍ ZA TEPLA

Po dokončení válcování na teplotě mezi 780 a 860 °C je provedeno stočení za kontrolované teploty [1]. Tento krok je ekvivalentem izotermické bainitické přeměny při válcování za studena. Následuje chlazení vzduchem což má za následek požadovanou mikrostrukturu.

3.4.3 ALTERNATIVNÍ MIKROSTRUKTURY

I když má většina TRIP ocelí mikrostrukturu složenou z feritu, bainitu a austenitu, bylo vynaloženo velké úsilí vytvořit alternativní mikrostruktury v reakci na požadavky ze strany automobilového průmyslu [1]. Mezi významné příklady patří dvě TRIP oceli, jedna s bainitickoferitickou maticí, druhá s žíhanou martenzitickou maticí.

Oceli s bainitickoferitickou maticí jsou vyprodukovány nahrazením interkritického žíhání kompletní austenitizací v prvním kroku a následnou izotermickou bainitickou přeměnou [1]. Oceli s martenzitickou maticí jsou vyprodukovány přídatnou austenitizací a následným zakalením v oleji [1]. Tento krok předchází interkritickému žíhání a izotermické bainitické přeměně. Na obrázku 29 jsou ukázány mikrostruktury takto vzniklých ocelí.



Obrázek 29 Příklady alternativních mikrostruktur: A) s polygonálním feritem, B) bainitickoferitická matrice, C) martenzitická matrice [1]

3.4.4 VYUŽITÍ V KONSTRUKCI AUTOMOBILU

Díky své únavové pevnosti a vysoké absorpční energii jsou TRIP oceli vhodné pro konstrukční a bezpečnostní díly jako jsou příčné a podélné nosníky, výztuhy B sloupků a nárazníky [6].



Obrázek 30 TRIP oceli v konstrukci automobilu [9]

Bumper cross member – příčník nárazníku

B-pillar reinforcement – výztuhy B sloupků

Mild steel – nízkouhlíková ocel

High strength steel – vysokopevnostní ocel

Extra high strength steel – extra vysokopevnostní ocel

Ultra high strength steel – ultra vysokopevnostní ocel

4 SIMULACE VLASTNOSTÍ V SOFTWARE JMAT PRO

Tato poslední kapitole se věnuje simulaci ocelí z jednotlivých tříd popsaných v předchozí kapitole. Software Jmat Pro simuluje reálné chování ocelí pomocí chemického složení oceli zadaného uživatelem.

4.1 VYBRANÉ PŘÍKLADY OCELÍ

Z každé třídy byla vybrána jedna ocel a její chemické složení dohledáno na internetových stránkách www.steelnumber.com.

IF OCEL

Tabulka 6 Chemické složení a meze pevnosti v kluzu a v tahu IF oceli [6][13]

Obsah prvků [%]								
C	Si	Mn	P	S	N	Al	Nb	Ti
0,002	0,01	0,15	0,01	0,01	0,0025	0,04	0,016	0,025
R _{p0,2} [MPa]		165		R _m [MPa]		120-290		

DVOUFÁZOVÁ OCEL

Tabulka 7 Chemické složení a meze pevnosti v kluzu a v tahu oceli HCT600X [10]

Obsah prvků [%]								
C	Si	Mn	P	S	V	Al	B	Další prvky
Max. 0,17	Max. 0,8	Max. 2,2	Max. 0,08	Max. 0,015	Max. 0,2	Max. 2	Max. 0,005	Cr+Mo <1, Nb+Ti <0,15
R _{p0,2} [MPa]		340-420			R _m [MPa]		600	

HSLA OCEL

Tabulka 8 Chemické složení a meze pevnosti v kluzu a tahu oceli HC340LA [10]

Obsah prvků [%]							
C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al
Max. 0,1	Max. 0,5	Max. 1,1	Max. 0,025	Max. 0,025	Max. 0,09	Max. 0,15	Min 0,015
R _{p0,2} [MPa]		340-420		R _m [MPa]		410-510	

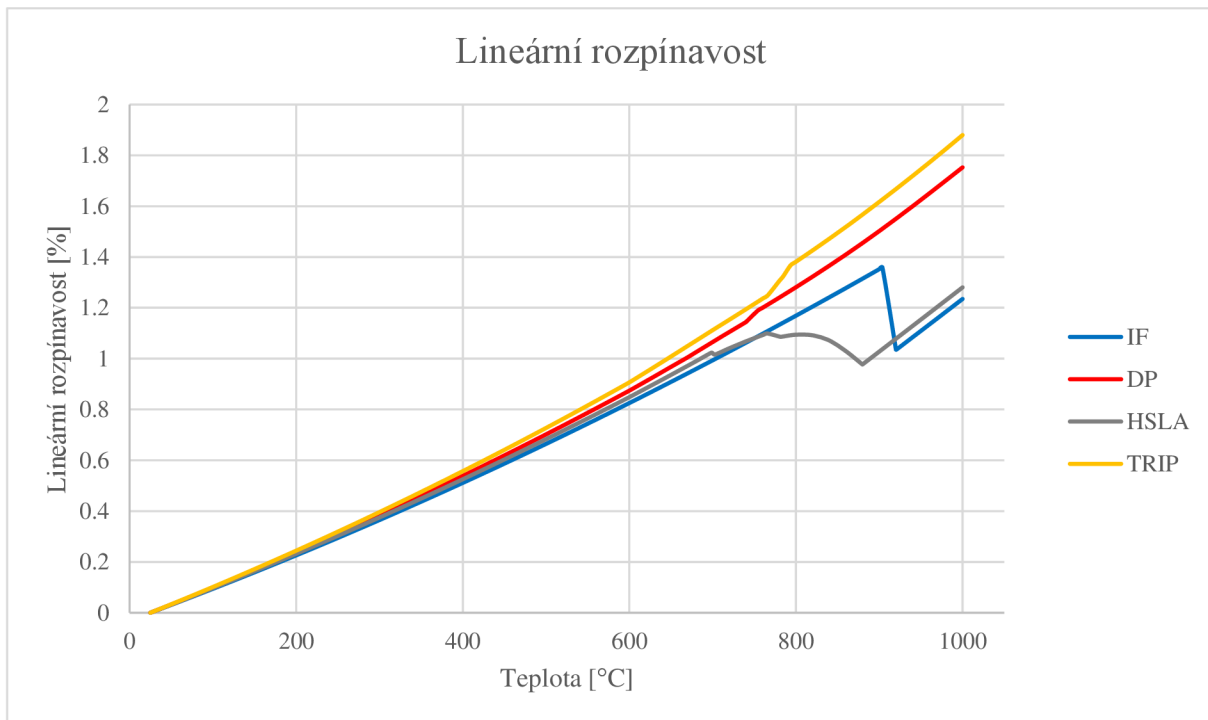
TRIP OCEL

Tabulka 9 Chemické složení a meze pevnosti v kluzu a tahu oceli HCT690T [10]

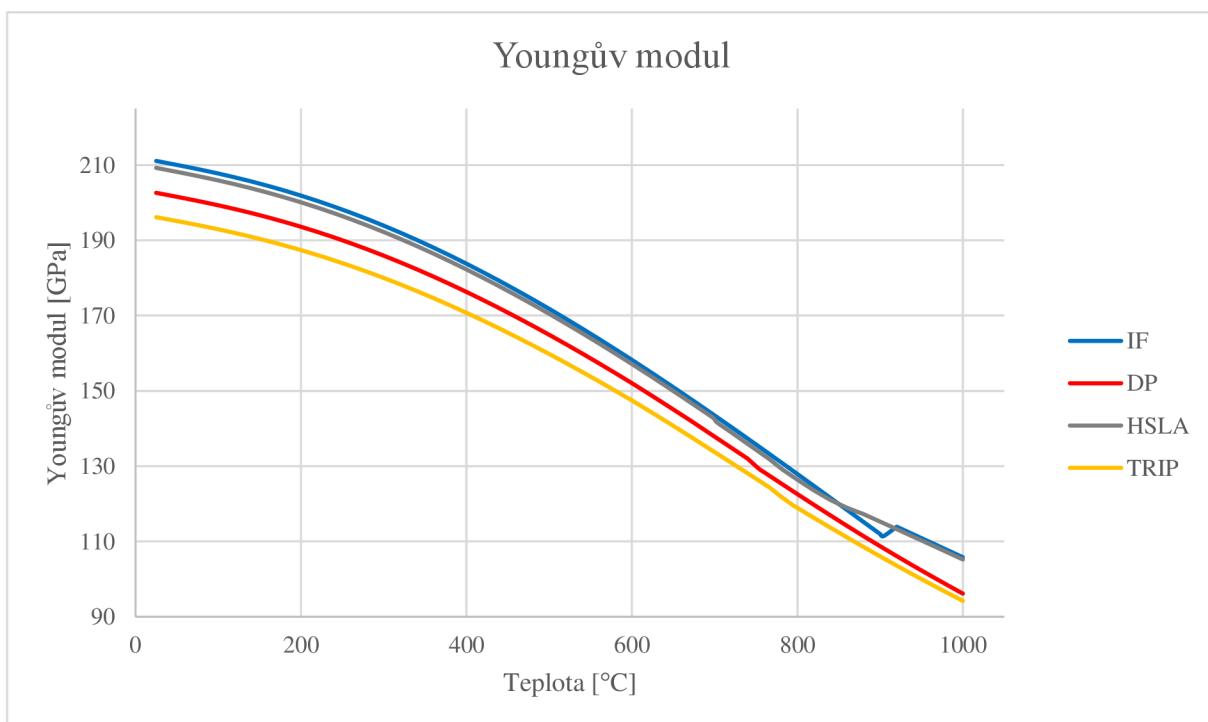
Obsah prvků [%]								
C	Si	Mn	P	S	V	Al	B	Další prvky
Max. 0,32	Max. 2,2	Max. 2,5	Max. 0,12	Max. 0,015	Max. 0,2	Max. 2	Max. 0,005	Cr+Mo <0,6, Nb+Ti <0,2
R _{p0,2} [MPa]		430-550			R _m [MPa]		690	

4.2 GRAFY SIMULOVANÝCH VLASNOSTÍ

Pro každou z uvedených ocelí byly nasimulovány čtyři vlastnosti a z nich vytvořeny grafy. Konkrétně se jedná o lineární rozpínavost při zahřívání, pokles Youngova modulu při zahřívání, pokles pevnosti v závislosti na zahřívání a únavovou pevnost.

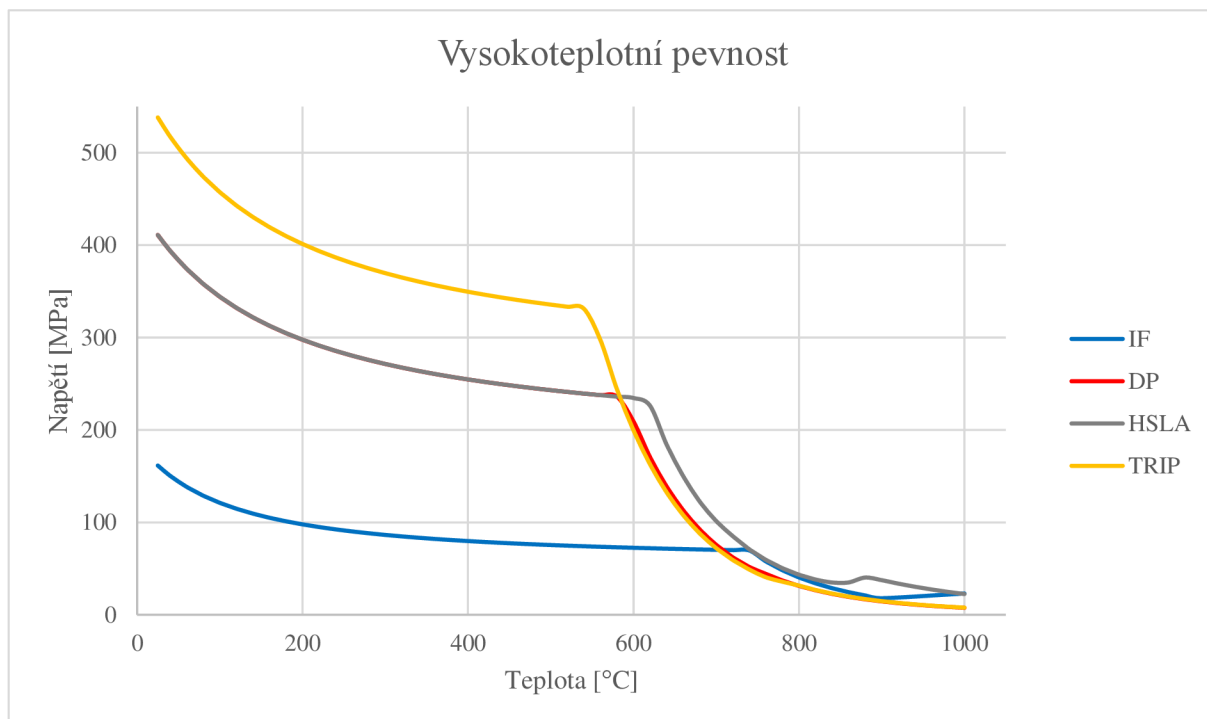
LINEÁRNÍ ROZPÍNAVOST


Obrázek 31 Graf závislosti lineární rozpínavosti na teplotě

YOUNGŮV MODUL


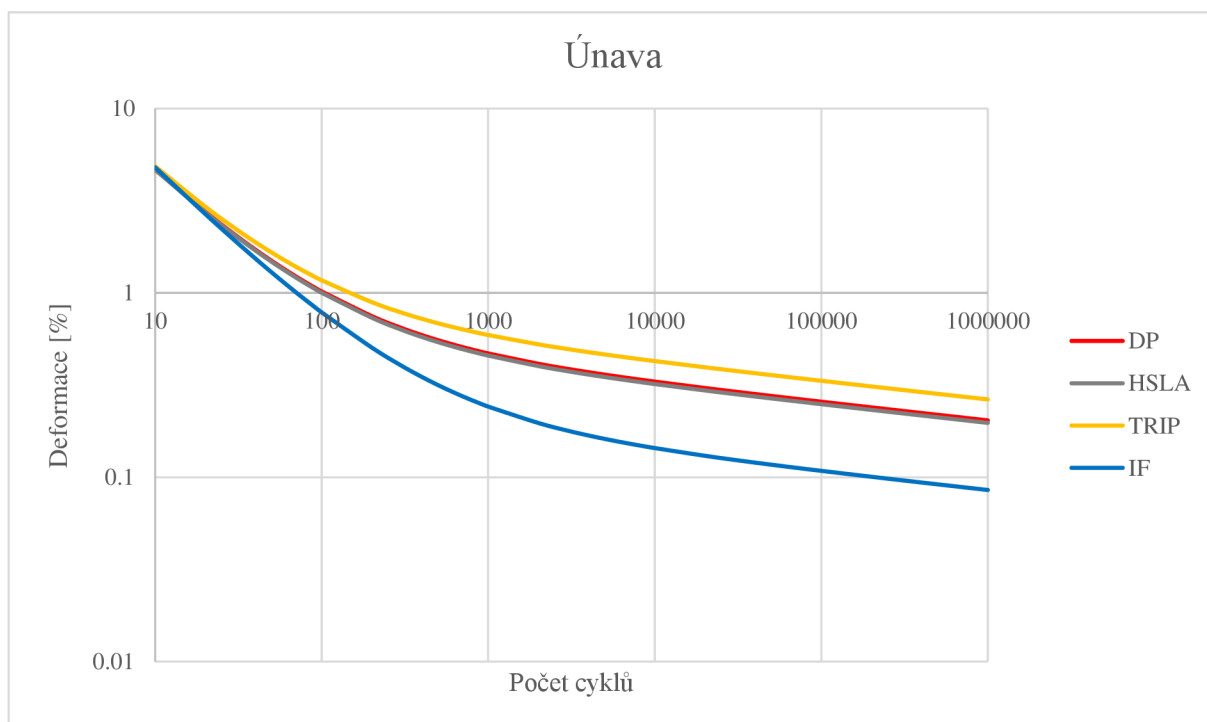
Obrázek 32 Graf závislosti Youngova modulu na teplotě

VYSOKOTEPLTNÍ PEVNOST



Obrázek 33 Graf závislosti potřebného napětí pro vytvoření konstantní deformace na teplotě

ÚNAVA



Obrázek 34 Graf únavových křivek

ZÁVĚR

Oceli jsou s automobilovým průmyslem neodmyslitelně spjaty, jelikož společně prošli dlouhým a intenzivním vývojem. V začátcích se na výrobu automobilů používali materiály jako čisté železo a jednoduché uhlíkové oceli s nijak speciálními vlastnostmi. Velké části karoserie i rámu byly ze dřeva, které bylo nahrazováno ocelí. Postupně ale přibývalo nároků na konstrukci automobilů, mezi které patří mimo jiné: snížení emisí CO₂ a s tím spojené snižování hmotnosti, zvyšování bezpečnosti při nárazu a zlepšení jízdního komfortu, což mělo za následek naopak zvyšování hmotnosti automobilu vlivem implementací různých systému starajících se právě o komfort. Řešením těchto na první pohled neslučitelných požadavků byl výzkum vysokopevnostních ocelí a jejich použití v konstrukci automobilů. Dlouhodobým trendem v automobilovém průmyslu je tedy nahrazování nízkopevnostních ocelí těmi vysokopevnostními v co největší míře a na vhodných místech.

Oceli jsou využívány v takovém množství, jelikož mají obecně právě takové vlastnosti, které umožňují konstruovat takovou karoserii, která splňuje požadavky zmíněné výše. Díky dobré tvářitelnosti je lze jednoduše lisovat do dílů s požadovaným tvarem a ty pak jednoduše spojovat díky dobré svařitelnosti ocelí. Neméně důležitou vlastností je i jednoduchá aplikace barev na povrch ocelí. Dalším aspektem jsou pak mechanické vlastnosti dosažitelné vhodným tepelným zpracováním a přidáním legovacích prvků. Komponenty vyrobené z oceli s vysokou pevností je možné navrhovat odlehčené a tím snižovat celkovou hmotnost automobilu. Ty aplikujeme do míst, kde očekáváme velké provozní zatížení, nebo kde mají přispívat k ochraně posádky. Naopak nízkopevnostní oceli nacházejí využití tam, kde vysoká pevnost není žádoucí, jmenovitě třeba deformační zóny, které svou deformací pomáhají pohltit energii při nárazu. Další využití nachází tyto oceli při výrobě nestrukturálních a ozdobných dílů, např. krycí plechy karoserie. Další z velkých výhod je fakt, že oceli jsou jednoduše recyklovatelné a děje se tak z velkou většinou oceli v automobilovém průmyslu používanou. Jelikož jsou oceli paramagnetické, lze je lehce vytřídit z vraků automobilů. Je také možné libovolně při recyklaci upravit chemické složení oceli, takže ocelový šrot lze přetvořit na jakoukoliv třídu oceli. Existuje řada oceláren, které mají svoji produkci založenou pouze na výrobě oceli ze šrotu v elektrických pecích. Ocelový šrot se celosvětově stává strategickou surovinou.

Kromě všech těchto výhodných vlastností, mají oceli i své nevýhody. Je nutné zabránit šíření korozi ošetřením povrchu, vysokopevnostní oceli mají horší tvářitelnost, takže při tváření mají tendenci vracet se částečně do původní polohy a je proto nutné je lisovat za tepla. Je potřeba zmínit i vyšší hustotu a tím i vyšší hmotnost v porovnání s lehkými slitinami, např. na bázi hliníku, které se v konstrukci automobilu částečně také prosadily. Ty ale také mají své nevýhody, včetně horší recyklovatelnosti a obtížnějšího spojování jednotlivých dílů.

I přes zmíněné použití jiných materiálů je ocel i nadále většinovým materiálem při konstrukci všech částí automobilu a patrně tomu tak bude i v dohledné budoucnosti. Všechny oblasti týkající se zpracování oceli a výroby samotných komponent jsou dobře zvládnuty a implementovány ve výrobních procesech všech světových dodavatelů automobilů. Stále i v současné době probíhá vývoj nových a pokročilých ocelí se stále se zlepšujícími se vlastnostmi, takže zatím není potřeba hledat nové slitiny. Nicméně stejně tak probíhá vývoj i jiných materiálů, takže není vyloučené, že podíl těchto materiálů v konstrukci automobilů bude i nadále pozvolna růst.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RANA, Radhakanta, SINGH Shiv Brat. *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. 1. Cambridge: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-100638-2.
- [2] KRAUSS, George. *Steels: processing, structure, and performance*. Second edition. Materials Park: ASM International, 2016. ISBN 978-1-62708-083-5.
- [3] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie I*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-265-0.
- [4] ŠTĚTINA, J., T. MAUDER a L. KLIMEŠ. STEEL IN AUTOMOTIVE INDUSTRY. In: *KOKA 2016*. 1. Brno: VUT Brno, 2016. s. 195-202. ISBN: 978-80-214-5379-1.
- [5] PERELOMA, Elena a David EDMONDS, ed. *Phase Transformations in Steels*. Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-1-84569-971-0.
- [6] Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl. *Workswell.cz* [online]. © 2020 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>
- [7] KONVIČKA, Vladislav. Výroba oceli v kyslíkových konvertorech a odlévání. KONVIČKA, Vladislav. *HORNICTVÍ.info* [online]. VLADISLAV, Konvička [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylyomy.cz/prirucka/zprac/ocel/ocel.htm>
- [8] RUSNIOK, J. Postup výroby oceli v kyslíko konvertorové ocelárně se zaměřením na výrobu konstrukčních ocelí typu S355: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 64 s. Vedoucí práce: Mohyla, P.
- [9] CHRISTODOULOU, Peter. TRIP steels in automotive industry. In: *ResearchGate.net* [online]. ResearchGate, Září 2017, [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/TRIP-steels-in-automotive-industry_fig6_322362528
- [10] National Technical University KhPI. *Steelnumber.com* [online]. National Technical University KhPI, © 2011-2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.steelnumber.com/>
- [11] Odporové svařování. In: *Batima.cz* [online]. Batima, © 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.batima.cz/odporove-svarovani>
- [12] HU, Ping, Liang YING a Bin HE. *Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body*. Singapore: Springer Singapore Pte. Limited, 2016. ISBN 9789811024009. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-2401-6
- [13] SARNA, Satyendra Kumar. Interstitial Free Steels. SARNA, Satyendra Kumar. Ispatguru.com [online]. 13. června 2014, © 2019 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/interstitial-free-steels/>

- [14] MINDERHOUD, M. Benz Auto, 1886. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2004 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Automobil#/media/Soubor:Benz_auto.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AHSS – pokročilé vysokopevnostní oceli

Al – hliník

B – bór

BH – oceli vytvrditelné při kontrolovaném žhání

C – uhlík

Cr – chrom

DP – dvoufázové oceli

HSLA – vysokopevnostní nízkolegované oceli

HSS – vysokopevnostní oceli

IF – oceli s minimálním množstvím intersticiálních atomů v mikrostruktuře

Mn – mangan

Mo – molybden

Nb – niobium

P – fosfor

S – síra

Si – křemík

TRIP – efekt transformací indukované plasticity

Ti – titan

V – vanad

α – modifikace železa s krychlovou prostorově středěnou mřížkou

β – paramagnetický poddruh železa α

γ – modifikace železa s krychlovou plošně středěnou mřížkou

SEZNAM PŘÍLOH