



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Katedra Zemědělské a manipulační techniky

Bakalářská práce

Moderní výroba kovových dílů používaných v dopravní technice

Autor práce: Matěj Kouba

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Zoubek

České Budějovice
2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval(a) pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Ve všech odvětvích lidské činnosti je přirozený určitý postup dopředu a vývoj moderních materiálů i nových technologických postupů ve výrobě. Tato práce shrnuje tento postup zejména v oblasti dopravní techniky.

Neodmyslitelnou součástí moderní výroby je však konvenční výroba, i proto je práce rozdělena do dvou částí. První část se zabývá konvenční výrobou kovových dílů, zejména materiály jako je ocel a hliník a konvenčními způsoby tváření dílů karoserie. Druhá část přináší informace o první, druhé a třetí generaci AHSS ocelí a moderních technologiích výroby, které mají potenciál pro použití v dopravní technice.

Za konvenční metody považujeme zejména tažení a lisování. Moderními metodami ve výrobě kovových dílů může být hydroforming, vysokorychlostní tváření, či, zejména v posledních letech velmi oblíbený 3D tisk, tedy aditivní výroba.

Klíčová slova: vysokopevnostní oceli; moderní tváření; kovové pěny; 3D tisk kovových dílů

Abstract

In all branches of human activity there is a certain advance and the development of modern materials and new technological processes in production. This work summarizes this procedure, especially in the field of transport technology.

However, conventional production is an important part of modern production, that is why the work is divided into two parts. The first part deals with the conventional production of metal parts, especially materials such as steel and aluminum and conventional methods of forming body parts. The second part provides information on the first, second and third generation of AHSS steels and modern production technologies that have the potential for use in transportation technology.

Conventional methods are mainly drawing and pressing. Modern methods in the production of metal parts can be hydroforming, high-speed forming. In recent years, additive production has become very popular, especially 3D printing

Keywords: high-strength steels; modern forming; metal foams; 3D printing of metal parts

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Mgr. Tomáši Zoubkovi za odborné vedení práce, ochotu a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Obsah

Úvod.....	8
1 Konvenční výroba kovových dílů	9
1.1 Ocel	10
1.1.1 Tepelné zpracování oceli.....	12
1.1.2 Termomechanické zpracování	15
1.1.3 Chemicko-tepelné zpracování	16
1.1.4 Konvenční druhy oceli používané v dopravní technice	16
1.1.5 Povlaky a povrchové úpravy ocelí	19
1.2 Hliník	19
1.2.1 Hliník v dopravní technice	20
1.3 Konvenční způsoby tváření.....	22
1.3.1 Lisování.....	22
1.3.2 Tažení.....	23
1.3.3 Ohýbání	25
1.3.4 Válcování	25
1.3.5 Kování.....	25
1.3.6 Protlačování	26
2 Moderní výroba kovových dílů.....	27
2.1 Moderní oceli	27
2.1.1 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – první generace.....	28
2.1.2 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – druhá generace	31
2.1.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – třetí generace.....	32
2.2 Kovové pěny	34
2.3 Hydroforming.....	36
2.3.1 Hydromechanické tažení	36

2.3.2	Tváření trubek kapalinou	37
2.4	Vysokorychlostní tváření	38
2.4.1	Tváření explozí	38
2.4.2	Elektrohydraulické a elektromagnetické tažení	39
2.5	Kalení lisováním	40
2.6	Tailor welded blanks	40
2.7	3D tisk kovových dílů	41
2.7.1	Kovové materiály pro aditivní výrobu	43
2.7.2	Aditivní výroba v leteckém a kosmickém průmyslu.....	45
2.7.3	Aditivní výroba v automobilovém průmyslu	46
	Závěr	49
	Seznam použité literatury.....	50
	Seznam obrázků	59
	Seznam tabulek	60

Úvod

V každodenním životě jsme obklopováni kovovými materiály. Jinak tomu není ani v dopravní technice. Osobní automobil Škoda Octavia je tvořen kovovými slitinami ze 75 %, kdy největší zastoupení mají slitiny železa (oceli), menší podíl činí lehké kovy (hliník, hořčík) a zhruba 2 % tvoří slitiny mědi, olova či zinku.

Přirozeným jevem je zavádění nových materiálů a technologií do všech odvětví průmyslu, dopravní techniku nevyjímaje. Důvodem jsou mimo jiné přísné bezpečnostní a emisní normy. Výrobci dopravní techniky jsou tlačeni k výrobě co nejlehčích karoserií, které přispívají ke snížení spotřeby paliva a tím ke snížení emisí. Bez vývoje moderních materiálů a technologií výroby by tento postup nebyl možný.

Za moderní materiály můžeme považovat zejména AHSS oceli a kovové pěny. Nové i konvenční materiály je pak možné zpracovávat a aplikovat pomocí hydroformingu, vysokorychlostního tváření, kalení lisováním, tailor welded blanks technologií či 3D tiskem.

Cílem této práce je shrnutí dostupných poznatků o moderní výrobě kovových dílů v dopravní technice.

1 Konvenční výroba kovových dílů

Kovové materiály jsou pevné látky, jejichž hlavní složkou je kovový prvek, zejména železo, měď, hliník apod. Nikdy však nejsou tvořeny absolutně čistým kovem, vždy jde o slitiny s dalšími kovy, případně s nekovovými prvky. Slitiny vznikají společným roztavením a ztuhnutím více složek. Příměsi ve slitinách mohou být nežádoucími nečistotami, ale také vítanými složkami pro zlepšení mechanických vlastností. Mechanické vlastnosti kovových materiálů definují tvárnost, elektrickou a tepelnou vodivost a lesk. Rozdělení kovových materiálů s ohledem na jejich vlastnosti je na obrázku 1.1 (Vojtěch, 2006).



Obrázek 1.1: Rozdělení kovových materiálů (upraveno podle Vojtěch, 2006).

Vysoká pozornost je věnována výběru kovových materiálů na jednotlivé díly karoserií dopravních prostředků, zejména z důvodu zajištění co nejvyšší bezpečnosti pasažérů. Konstrukce jako celek musí snést vysoké zatížení, bez viditelných projevů. Kromě vhodných deformačních schopností jsou dalšími požadavky na vlastnosti použitých materiálů nízká hmotnost, odolnost vůči korozi, životnost, pevnost, tažnost, dobrá svařitelnost a tvárnost (Barnard, 2002; Girman a Hrabčáková, 2012).

Konstrukce dopravních prostředků nejsou vyráběny jako celek, ale jako množství komponentů spojených k sobě. Použitý materiál by měl svou plastickou deformací a fázovou transformací pohltit co největší množství energie nárazu a zmírnit přetížení, vyvinuté na posádku, na co nejnížší hodnotu. Tenkostěnnou konstrukcí karoserie jsou karosářské plechy, ty by se měly také podílet na bezpečnosti cestujících. Mimo to jsou

významným designovým prvkem vozidla. Nejpoužívanějším kovovým materiálem konstrukce i karoserie vozidel jsou různé druhy oceli. Některé ocelové součástky jsou postupně nahrazovány součástkami ze slitin hliníku a v malé míře hořčíku (Barnard, 2002; Girman a Hrabčáková, 2012).

1.1 Ocel

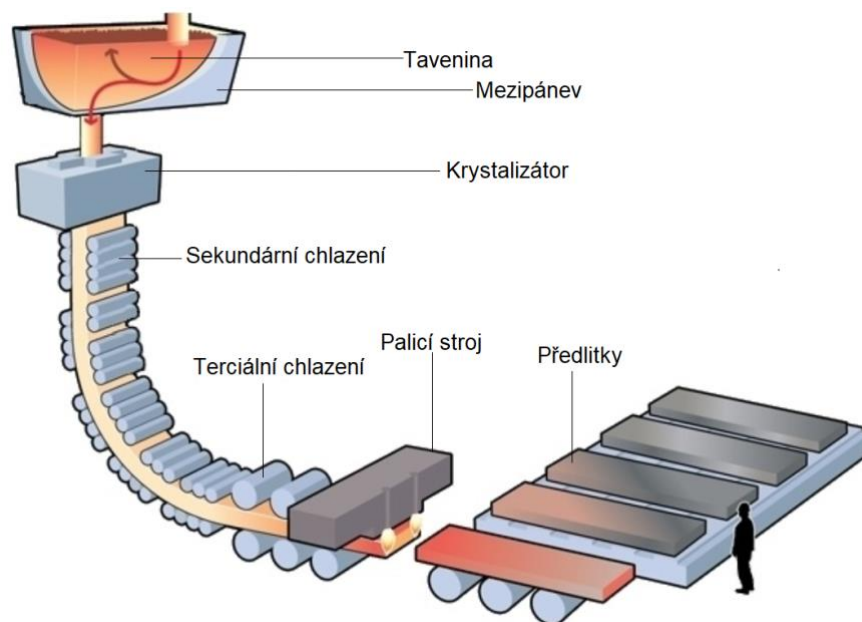
Ocel je technickou slitinou železa s obsahem uhlíku (C) pod 2,14 % hmotnosti. Během výroby oceli probíhají zkujňovací a rafinační procesy a je snižován obsah uhlíku a nežádoucích prvků tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností oceli. Výroba probíhá v elektrických obloukových pecích, následně je ocel odlita do tzv pánve. Po případné mimopecní rafinaci je odlévána do litinových nebo ocelových forem (kokil), v nichž tuhne na ingoty.



Obrázek 1.2: Obří kokila vyrobená v Ostravské slévárně huti LIBERTY (foto: Liberty Steel Group, 2021).

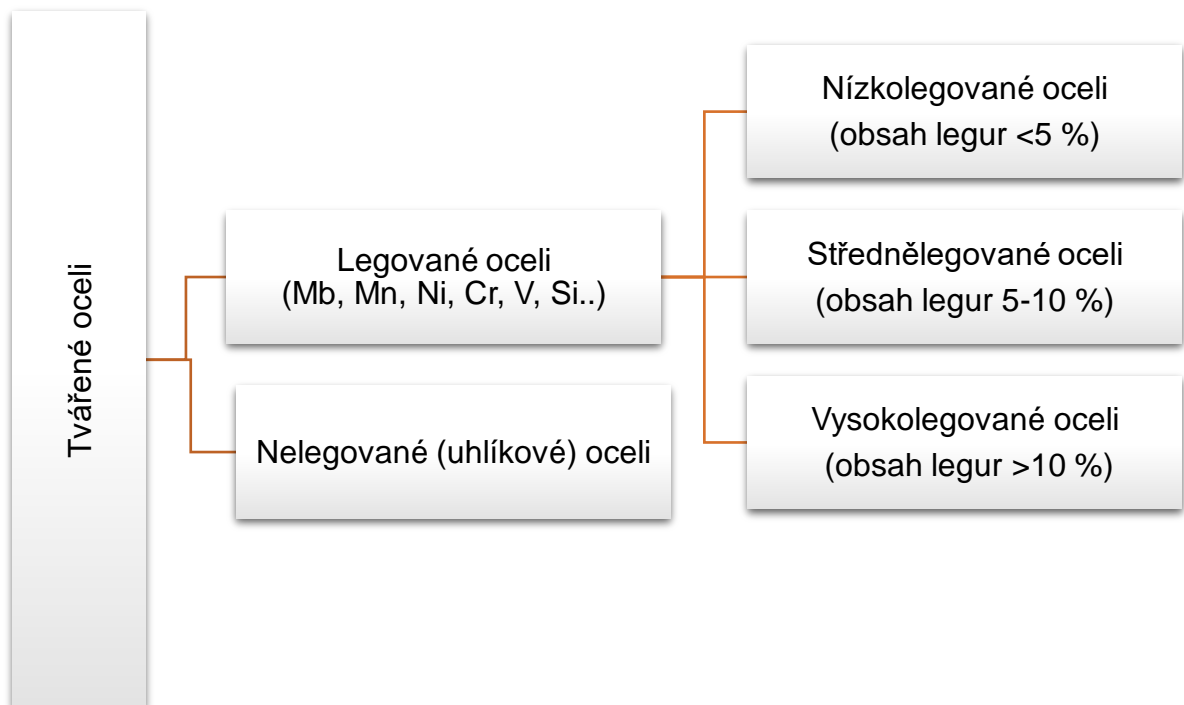
Odlévání se postupně nahrazuje plynulým neboli kontinuálním litím, kdy je tekutá ocel zpracovávána na tuhé polotovary. Z konvektoru či pece je ocel deportována do mezipánve, sloužící jako zásobník. Dále teče ocel do krystalizátoru, ten odvádí část tepla z tekuté oceli. Odtud je předlitek, který je již na povrchu tuhý, v jádře však tekutý, tažen pomocí válců a tažných stolic do sekundární zóny chlazení. To probíhá pomocí vodních či vodovzdušných chladících trysek. Terciální chlazení probíhá radiací a konvekcí tepla do okolí. Předlitky jsou na konci procesu řezány palicím strojem na požadované velikosti. Proces kontinuálního lití je znázorněn na obrázku 1.3. V důsledku rychlého ochlazení dochází k potlačování segregáčních procesů

a vznikající vady, jako jsou staženiny anebo kyslíkové bubliny (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Klimeš, 2012).



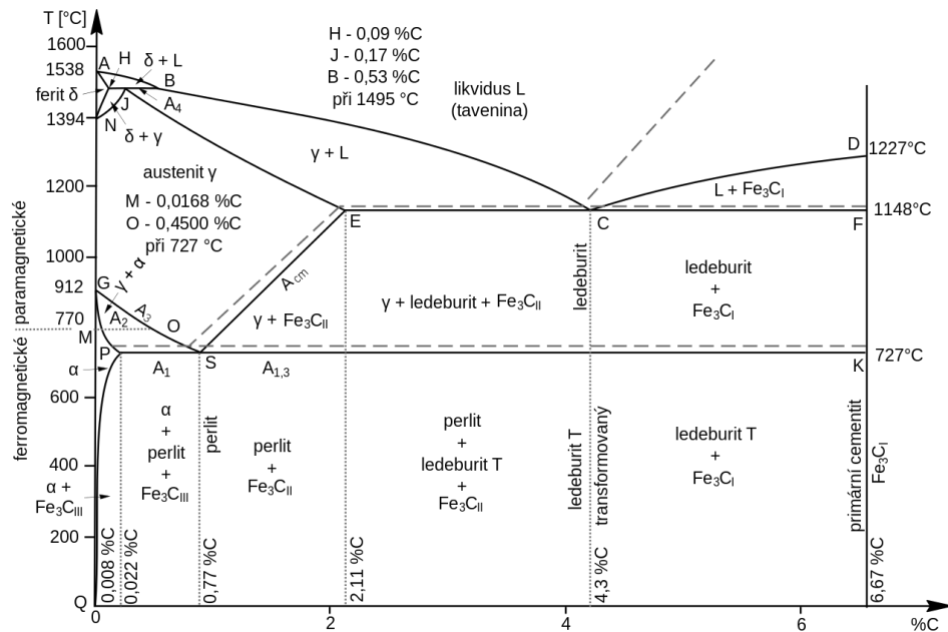
Obrázek 1.3: Proces kontinuálního lití (upraveno podle Klimeš, 2012).

Podle fyzikálních a chemických vlastností se oceli dělí na tvářené oceli a oceli na odlitky. Dále je možné oceli dělit podle obsahu uhlíku, legovacích prvků apod. Dělení ocelí je znázorněno na obrázku 1.4 (Macek a Zuna, 2003).



Obrázek 1.4: Rozdělení tvářené oceli (dle Macek a Zuna, 2003).

Fázové a strukturní změny v ocelích je možné popsat pomocí metastabilního rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C (obrázek 1.5). Změny v ocelích probíhají v závislosti na teplotě a obsahu uhlíku. Diagram je základem pro stanovení teploty ohřevu při tepelném, termomechanickém i chemicko-tepelném zpracování u ocelí s obsahem do 2,11 % uhlíku. Obsah uhlíku je v diagramu uveden na vodorovné ose, na svislé ose je pak teplota (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Šebestová a Schovánek, 2018).



Obrázek 1.5: Rovnovážný diagram Fe-Fe₃C (wikipedia.org, 2021).

1.1.1 Tepelné zpracování oceli

Principem tepelného zpracování je ohřev materiálu na určitou teplotu, udržení teploty pro danou dobu a následné ochlazování. To musí probíhat vhodnou rychlostí. Teplota, rychlost ohřevu i následná rychlost ochlazování závisí na konkrétním způsobu zpracování. U jednoduchých součástek, kdy rozdíly mezi teplotou na povrchu a uvnitř nejsou markantní, se volí plynulý ohřev. Naopak u složitějších součástek je vhodnější ohřívat na požadovanou teplotu postupně, aby nedošlo ke vzniku pnutí uvnitř materiálu. Podle požadované konečné struktury materiálu se volí způsob ochlazování. Pro zachování rovnovážného stavu soustavy se volí pomalé ochlazování v peci s regulovaným poklesem teploty. Při rychlém ochlazení materiálu vznikají nové strukturální složky a materiál získává specifické vlastnosti. Rychlé ochlazování se provádí ve vodních anebo olejových lázních, případně na vzduchu. Tepelné zpracování lze rozdělit na zpracování s překrystalizací a bez překrystalizace. Zvolený

způsob závisí na požadované konečné struktuře. Základními způsoby při tepelném zpracování oceli jsou žíhání, kalení a popouštění (Jech, 1983; Ptáček, 2002; Pilous, 2007; Pilous, 2008).

Žíhání

Během žíhání se polotovary ohřívají na určitou teplotu, v závislosti na použitém druhu žíhání, po které následuje pomalé zchlazování. Cílem je dosažení rovnovážného stavu a stabilní struktury. Žíháním je možné odstranit vlivy předchozích zpracování na strukturu materiálu, snižovat tvrdost a vnitřní pnutí. Žíháním je možné také dosáhnout chemické homogenity materiálu. Dle teploty žíhání rozlišujeme žíhání s překrystalizací a žíhání bez překrystalizace (Macek et al., 2008; Kraus, 2013).

Žíhání s překrystalizací

Pro zajištění rovnoměrné struktury a chemické homogenity materiálu se provádí žíhání s překrystalizací. Provádí se při teplotách nad A_1 , při kterých dochází k přeměnám ve výchozí feriticko-perlitické struktury na austenit. Teplota A_1 je znázorněna v obrázku 1.5 na předchozí straně. Jde zejména o homogenizační, normalizační a izotermické žíhání (Jech, 1983; Macek et al., 2008; Kraus, 2013).

K odstranění segregací v odlitcích se provádí homogenizační žíhání. Provádí se při teplotách nad $1100\text{ }^\circ\text{C}$, při kterých dochází k urychlení difuzích procesů, vyrovnávajících koncentrační gradienty v oceli a vzniká jednolitý materiál. Samotné žíhání se skládá z několika fází. Materiál se nejprve ohřeje, při teplotě $1100\text{-}1300\text{ }^\circ\text{C}$ je udržován po dobu několika desítek hodin a následně se nechává pomalu zchladnout v peci. Při homogenizačním žíhání se odlučuje povrch materiálu a oxiduje, tím dochází ke zhrubnutí struktury. Zjemnění může být dosaženo procesem normalizačního žíhání či tvářením za tepla s rekrystalizací (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Totten, 2007; Kraus, 2013).

Účelem normalizačního žíhání je zrovnornění a zjemnění struktury oceli a odstranění nerovnoměrnosti ve velikosti zrn. Normalizační žíhání je používáno, mimo jiné, jako příprava pro následné tepelné zpracování či tvářením. Pro méně namáhané součásti to může být konečná operace. Materiál je zahřát na teplotu o $30\text{-}50\text{ }^\circ\text{C}$ nad teplotou A_3 , která je krátkou dobu udržována. Stejně jako teplota A_1 i teplota A_3 je znázorněna v obrázku 1.5. Ochlazování se provádí na vzduchu (Vojtěch, 2006; Callister, 2007; Kraus, 2013).

Izotermické žihání je vhodné pro malé výrobky, jejichž velikost umožňuje rychlé změny teploty. Je prováděno pro získání rovnoměrné struktury a zlepšení mechanických vlastností, zejména tvrdost, tvárnosti a obrobitelnosti. Ocel je, stejně jako u normalizačního žihání, zahřáta na teplotu o 30-50 °C nad A_3 . Následuje rychlé zchlazení pod teplotu A_1 (600-700 °C), teplota je po určitou dobu udržována. Ochlazování u tohoto typu žihání může probíhat libovolnou rychlostí (Jech, 1983; Ptáček, 2002; Kraus, 2013).

Žihání bez překrystalizace

Při těchto typech žihání obvykle není přesažena teplota A_{c1} . Dochází k rozpadu nerovnovážných fází uhlíku a dusíku. Změny v oceli mají pouze strukturní charakter (Jech, 1983; Kraus, 2013).

Prakticky u všech typů ocelí se provádí *žihání k odstranění vnitřního pnutí*. Žihání se provádí obvykle při teplotách 450-650 °C, teplota se udržuje dostatečně dlouhou dobu pro vyrovnání teplot v průřezu, poté je materiál ochlazován na teplotu 250-300 °C. Ohřev i ochlazování musí být pomalé, aby nedošlo k porušení součásti ohřevem ani ke vzniku nových pnutí. Při žihání nesmí dojít ke změně ve struktuře ani v mechanických vlastnostech. Ke snížení vnitřního pnutí dochází pomocí mikroplastických deformací, kdy je elastická deformace přeměněna na plastickou (Ptáček, 2002; Vojtěch, 2006; Kraus, 2013)

Při tváření za studena vzniká deformační zpevnění, k jeho odstranění a obnově tvárných vlastností je využíváno *rekrytalizační žihání*. Rekrytalizace spočívá v ohřevu materiálu na teplotu 550-570 °C, která je udržována asi 1 hodinu a následuje ochlazení. Teplota nesmí překročit teplotu A_1 , aby nedošlo k překrystalizaci. Nižší teplotou je dosaženo jemnější struktury zrna, vyšší žihací teplotou je dosaženo zhrubnutí zrna (Ptáček, 2002; Vojtěch, 2006).

Pro snížení tvrdosti a zlepšení obrobitelnosti se využívá *žihání na měkko*. Tímto žiháním se dosahuje vhodné výchozí struktury pro kalení. Oceli s obsahem uhlíku do 0,8 % se žihají těsně pod bodem A_1 , po delší dobu se teplota udržuje a následně se pomalu ochlazuje. Oceli s vyšším obsahem uhlíku se žihají při teplotách nad A_1 a teplota se udržuje 2-3 hodiny (Jech, 1983; Ptáček, 2002; Vojtěch, 2006)

Kalení

Při kalení je materiál zahřát 30-50 °C nad teplotu A_3 , určitou dobu držen při této teplotě a následně rychle ochlazen ponořením do oleje, vody anebo solné lázně. Dochází ke zvyšování tvrdosti oceli, odolné proti opotřebení. Kalení může být martenzitické anebo bainitické. Při martenzitickém kalení je při ochlazování používána studená vodní anebo olejová lázeň. Bainitická struktura vzniká při izotermickém kalení a ochlazování v kovové anebo solné lázni o teplotě 300-400 °C (Vojtěch, 2006; Pilous, 2008; Kraus, 2013).

Popouštění

Popouštěním se snižuje pnutí a tvrdost, vzniklé po kalení. Ocel je zahřívána na teplotu nižší než A_1 , teplota je určitou dobu udržována a následně dochází vhodnou rychlostí k ochlazování. V závislosti na teplotě a délce popouštění dochází ke změnám ve struktuře a mechanických vlastnostech. Nejčastěji se využívají dva typy popouštění, vysokoteplotní a nízkoteplotní. Vysokoteplotní popouštění je vhodné pro namáhané ocelové součástky, nízkoteplotní např. pro obráběcí nástroje. Vysokoteplotní probíhá při teplotách 400-650 °C, nízkoteplotní do 300 °C (Vojtěch, 2006; Pilous, 2008; Kraus, 2013).

1.1.2 Termomechanické zpracování

Termomechanickým zpracováním (TMZ) se zvyšují pevnostní vlastnosti oceli a houževnatost. Jde o kombinaci plastické deformace austenitu a tepelného zpracování. Cílem termomechanického zpracování je řízení mikrostrukturních změn během deformace za tepla a při ochlazování (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Benešová, 2015).

TMZ je podle teploty tváření možno rozdělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní tváření probíhá při teplotách pod A_1 , následně se ocel zakalí a vznikne vysoce jemný martenzit s vysokou hodnotou meze pevnosti. Při vysokoteplotním tváření je ocel tvářena při teplotě nad kritickou hodnotou A_3 , vzniklá struktura se prudce ochladí a vzniká materiál vysokých pevnostních charakteristik (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Kocich, 2013)

1.1.3 Chemicko-tepelné zpracování

Cílem chemicko-tepelného zpracování je dosažení rozdílných mechanických fyzikálních nebo chemických vlastností povrchu a jádra difúzním sycením povrchu oceli kovy i nekovy. Difúzní povrchová vrstva oceli je obohacována uhlíkem, dusíkem, borem, vodíkem, ale i substitučními roztoky hliníku, chromu, křemíku či jejich kombinací. Nemusí docházet pouze k obohacování, ale může docházet i ke snížení obsahu prvků. Tímto způsobem je získávána součást s velmi tvrdým povrchem, ale houževnatým jádrem. Nejvýznamnějšími procesy jsou *cementace* a *nitridace* (Vojtěch, 2006; Pilous, 2007; Michna, 2012).

Při *cementaci* dochází k sycení povrchu oceli uhlíkem a následné tepelné zpracování. Vzniká vysoce tvrdý a opotřebením odolný předmět s houževnatým jádrem. Jde o jednu z nejpoužívanějších metod. Cementované součásti jsou nejčastěji ozubená a řetězová kola, hřídele, čepy, pouzdra a vačky. Hloubka cementované vrstvy dosahuje nejčastěji 0,5-1,5 mm s přídavkem na broušení. Cementace může probíhat v pevném prostředí, nanášením prášku, v kapalném prostředí, v lázni anebo v plynném prostředí (Ptáček, 2002; Michna et al. 2012)

Nitridace anebo nitridování je sycení povrchové vrstvy dusíkem bez nutnosti následného tepelného zpracování, vzniklý předmět je vysoce odolný proti opotřebením a korozi. Nitridací vzniká vrstva 0,2-0,6 mm, ale oproti cementaci vznikají tvrdší vrstvy (Hrubý a Holemář, 1991; Vojtěch, 2006; Pilous, 2008).

1.1.4 Konvenční druhy oceli používané v dopravní technice

Za více než sto let vývoje a používání v automobilovém průmyslu se ocel osvědčila jako všestranný a efektivní materiál pro karoserie vozidel. Stoupající požadavky na bezpečnost, trvanlivost a cenu materiálu vedly ke spolupráci výrobců oceli s konstruktéry vozidel při vývoji nových tříd ocelí, zaměřených na jedinečné požadavky na různé části karoserií. V automobilovém průmyslu je používáno velké množství druhů oceli. Použití konkrétního materiálu na jednotlivé prvky karoserie se odvozuje od jeho pevnosti, pružnosti, tvárnosti apod., tak aby materiál odpovídal požadavkům na funkčnost dílu (Gosh a Ray, 2017; Hall a Fekete, 2017).

Nízkopevnostní oceli – LSS

Pro výrobu nejexponovanějších částí karoserie – střecha, nárazníky, kapota, blatníky, dveře a víko kufru jsou používány *hlubokotažné nízkopevnostní oceli* s řízenou mezí

kluzu (LSS – Low Strength), které jsou odolné proti stárnutí. Tyto nízkouhlíkové oceli jsou válcované a tvářené za studena. Pro karosářské plechy byly v minulosti často používány také nízkouhlíkové Mild Steels oceli, pro jejich vysokou hmotnost je jejich používání minimalizováno (Forejtová a kol., 2017; Workswell, 2020).

Interstitial Free oceli – IF

IF (Interstitial Free) oceli jsou oceli, v jejichž struktuře nejsou přítomny zpevňující intersticiální prvky uhlík a dusík. Množství intersticiálních prvků se snižuje technologií vakuového odplynění. Tyto oceli jsou extrémně tažné a tím pádem také vhodné pro tvarově složité díly karoserií. Dle požadavků na konečné vlastnosti jsou IF oceli mikrolegovány titanem (Ti) anebo niobem (Nb), obsah uhlíku (C) a dusíku (N) jsou pod hodnotou 0,005 %, tím je dosaženo dobrých plastických vlastností. Obecně platí, že snížení obsahu uhlíku samo o sobě vždy zlepšuje tvorbu struktury a hlubokou tažnost. S Ti a Nb uhlík vytváří v materiálu sraženiny, které přispívají k požadovaným vlastnostem. IF oceli se vyrábějí metodou kontinuálního lití s následným válcováním za tepla a za studena a s žiháním. Kontinuálně odlévané desky se znovu zahřívají na požadovanou teplotu, válcují se za tepla a stáčekjí. Pásky válcované za tepla jsou dále válcovány za studena a podrobeny žihání. Každý krok výrobního procesu má významný vliv na konečnou mikrostrukturu a vlastnosti (Forejtová a kol., 2017; Gosh a Ray, 2017 Workswell, 2020).

Vysokopevnostní oceli - HSS

Nejpoužívanějšími konvenčními ocelmi jsou vysokopevnostní oceli HSS (High Strength Steel).

Interstitial Free-High Strength oceli – IF-HS

Pro součásti, které jsou složité a zároveň vyžadují vysokou pevnost jsou vhodné IF-HS oceli s vynikající hlubokotažností. Stejně jako IF oceli obsahují pouze malé množství uhlíku, zpevňování probíhá pomocí příměsí Mn, Si a zejména P. Díky obsahu P mají oproti IF ocelím IF-HS oceli vyšší tažnost. U IF i IF-HS ocelí značně ovlivňují kvalitu veškeré procesy během zpracování, od odlévání a válcování desek až po žihání. Musí být také dodrženy přísné požadavky na složení, zejména obsah uhlíku a dusíku. Vysokopevnostní IF-HS oceli je možné využít při výrobě velkých a tvarově složitých částí karoserie (Forejtová a kol., 2017; Gosh a Ray, 2017).

Bake Hardening oceli – BH

Výhradně na vnější plechy automobilů, u kterých je kladen požadavek na odolnost vůči promáčknutí, se používají Bake Hardening (BH) oceli. Jde o speciální nízkouhlíkové oceli, zpevněné speciálním výrobním procesem. Je u nich využíváno efektu stárnutí zbytkového množství volného uhlíku, jehož množství je zároveň tak nízké, aby nedocházelo k ovlivnění vlastností materiálu. Plechy jsou válcovány za studena, jsou vytvarovány do požadovaných tvarů, poté následuje nástřik laku. Tvarování plechů probíhá technologií hlubokého tažení, při kterém v materiálu vznikají dislokace. K vyplňování těchto dislokací dochází difúzně, atomy volného uhlíku, poté následuje proces umělého stárnutí, tepelným vypalováním po dobu 20 minut při teplotě 170 °C, při kterém dochází ke zlepšení mechanických vlastností. S procesem urychleného stárnutí plechu je spojen i proces vypalování laku. Při skladování je nutné množství volného uhlíku kontrolovat, aby se předešlo stárnutí dílů. K předčasnému stárnutí dochází zejména u vícefázových ocelí, z důvodu interakcí fází během přepínacích a vypalovacích procesů. Tento způsob výroby dílů karoserie umožňuje výrobcům snížit tloušťku použitého plechu, čímž se sníží hmotnost celého automobilu (Gosh a Ray, 2017; Perloma a Timokhina, 2017).

High Strength Low Alloy oceli – HSLA

HSLA oceli byly původně používány při výrobě plynovodů a ropovodů. V automobilovém průmyslu se prosadily až v 70. letech, v období ropné krize, kdy stoupaly požadavky na snížení hmotnosti automobilů. V moderním automobilovém průmyslu se využívají k výrobě konstrukčních, výstužných dílů dveří, nárazníků a nosných částí karoserie, je možné je také využít na některé namáhané díly podvozku (Gosh a Ray, 2017; Forejtová a kol., 2017).

HSLA oceli jsou mikrolegované prvky vanad, niob anebo titan. Legující prvky jsou přítomny v malém množství, v různých kombinacích, materiál tak vykazuje pevnost a houževnatost. Vzhledem k přítomnosti pouze malého množství legujících prvků, nenutnosti dalšího technologického zpracování, v porovnání s vynikajícími mechanickými vlastnosti a finanční nenáročností jde o výhodné materiály pro různá konstrukční řešení. Využití HSLA ocelí je možné jako levnější alternativa dvoufázových nebo martenzitických ocelí. Oceli jsou dobře svařitelné a vhodné k aplikaci nátěrů (Mouritz, 2012; Hall a Fekete, 2017).

1.1.5 Povlaky a povrchové úpravy ocelí

Povrchové úpravy ocelí jsou aplikovány zejména pro zamezení koroze a tím zvýšení životnosti materiálu. Vylepšená morfologie povrchu také usnadňuje ulpění maziva, používaného pro tvářecí operace. Při tváření ocelí bez povrchové úpravy za tepla dochází ke vzniku okují. Povlaky musí plnit požadavky na mnoho funkcí – udržování maziva na povrchu při tváření, odolnost vůči tlaku při lisování dílů i mikrogeometrické parametry pro kvalitu konečného laku.

Plechové tvářené za studena z hlubokotažných ocelí se často používají pro výrobu karoserií, jako jejich protikorozní ochrana se nejčastěji používají zinkové povlaky. Zinek je relativně levnou korozní ochranou s výbornými vlastnostmi. V korozním prostředí se rozpouští zinkový povlak dříve než ocelová součást, ta je tak chráněna před okamžitým působením oxidačního prostředí. Nejčastěji jsou zinkové povlaky používány v oblastech vozidla vystavených nečistotám a solí, výrazně oddalují působení koroze v místech, která nejsou chráněna lakem. Povlaky zinku jsou lehce problematické při tváření, proto bývají pozinkované ocelové součástky opatřovány ještě fosfátovým povrchem (AČSZ, 2011; Pilvousek a Šanovec, 2016; Hall a Fekete, 2017).

Nejčastěji je pozinkování dílů pro karoserie prováděno žárově, kdy materiál prochází na pásu nejprve zinkovou lázní a následně je z něj přebytečný roztavený zinek ofukován tak, aby na povrchu zůstal pouze povrch o přesně specifikované tloušťce. Díly, u kterých je kladen vyšší požadavek také na vzhled jsou pozinkovány elektrolyticky (AČSZ, 2011; Pilvousek a Šanovec, 2016; Hall a Fekete, 2017).

Moderní oceli zpracovávané za tepla s rychlým ochlazením jsou povlakovány vrstvou na bázi Al-Si. Funkcí těchto povlaků je zejména zabránění oxidace na povrchu, ale také snižování tření v tvářecím nástroji. Povlak Al-Si má obvykle tloušťku 30 až 50 mikrometrů a vytváří lesklý povrch, poskytuje vynikající ochranu i v korozním prostředí s uhlovodíky. Díky tomu, že si povlak zachovává vynikající mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách, je vhodný pro použití na motory, rozdělovače, katalyzátory a na díly podvozku (ArcelorMittal, 2021).

1.2 Hliník

Po železe je hliník nejpoužívanějším kovem na světě, v roce 2002 činila výroba surového hliníku 21 milionů tun. Do roku 2020 se výroba hliníku více než

ztrojnásobila na zhruba 65 milionů tun. Hliník a jeho slitiny mají významné postavení v mnoha odvětvích, dopravní techniku nevyjímaje. Jeho využitelnost spočívá zejména ve výhodné kombinaci fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností a ceny (Michna a kol., 2005; Vojtěch 2006; World Aluminium, 2021).

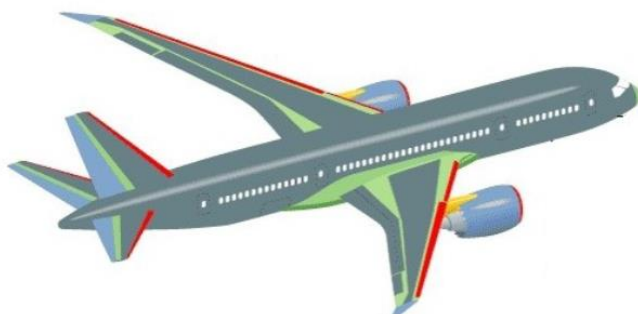
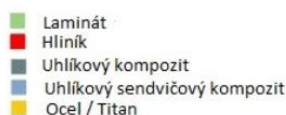
V přírodě se hliník nachází asi v 250 minerálech, nejvýznamnější rudou je však bauxid, kterého se ročně vytěží asi 370 milionů tun. Nejčastěji se v průmyslu využívá hliník ve formě slitin. Ty mají oproti slitinám z jiných kovů řadu výhod, například nízkou teplotu tavení, chemickou stabilitu anebo dobré povrchové vlastnosti odlitku. Slitiny hliníku obsahují legující prvky, měď, křemík, hořčík, zinek, cín, nikl, železo, v malých množstvích pak např. titan, chrom, molybden, vanad, olovo a antimon. Stejně jako ocel, i hliník a jeho slitiny procházejí tepelným zpracováním (žiháním, precipitačním vytvrzováním) (Lukáč, 2005; Vojtěch, 2006; USGS, 2020).

Jednou z prvních precipitačně vytvrzitelných slitin hliníku byl v roce 1906 dural (AlCu_4Mg), tedy slitina hliníku, hořčíku a mědi. Tento objev byl významným zlomem ve výrobě vzducholodí a letadel (Ptáček, 2002).

1.2.1 Hliník v dopravní technice

Celosvětově zaujímá prvenství ve spotřebě hliníku oblast dopravy. Nejvíce hliníkových materiálů je pak použito při výrobě letadel (obrázek 1.6). Prvenství v leteckém průmyslu zaujímá hliník z důvodu nízké hmotnosti a zachování dobrých mechanických vlastností i při nízkých teplotách pod bodem mrazu. I přes snahu nahradit část hliníkových dílů jinými materiály, pro výrobu komponentů namáhaných při vyšším napětí, jako jsou trup a křídla jsou slitiny hliníku nenahraditelné (Michna, 2005).

Při výrobě leteckých konstrukcí se používají slitiny hliníku, které jsou mnohem pevnější než samostatný hliník. Výhoda použití hliníku oproti oceli je jeho hustota, kdy při stejné hmotnosti mohou být hliníkové díly mnohem silnější a stabilnější. Nejpoužívanějšími slitinami jsou dural (tyče, profily, trubky, plechy, pásy), superdural (zatěžované části, pásnice nosníků křídla), pantal (plechy, nádrže a nýty), amcam (nádrže), silumin (letecké konstrukce) (Beňo et al., 2004).



Obrázek 1.6: Materiály používané pro výrobu letadel (Patterson, 2012).

V automobilovém průmyslu se hliník uplatňuje zejména z důvodu možného snížení hmotnosti, u některých dílů může úspora hmotnosti činit až 50 % oproti konkurenčním materiálům. Možnosti ušetření hmotnosti jednotlivých dílů jsou v tabulce 1.1 (EAA, 2020).

Tabulka 1.1 Úspora hmotnosti při použití hliníkových dílů (EAA, 2020).

Konstrukční díl	Relativní úspora hmotnosti [%]	Absolutní úspora hmotnosti [kg]
Části motoru a převodovky	30–60	70
Podvozek a odpružení	5-55	70
Závěsné díly (kapota, blatníky, dveře, dveře zavazadlového prostoru)	30-55	40
Ráfky kol	8-48	10
Nárazníky	30-50	10

Množství hliníku, použité na výrobu jednoho automobilu vyrobeného v Evropě se mezi lety 1990 a 2018 téměř zčtyřnásobilo a vzrostlo z 50 na 180 kg a další růst se stále předpokládá. Společnost Ducker Worldwide předpokládá, že v roce 2025 vzroste množství hliníku na výrobu jednoho automobilu na 200 kg. Dá se říct, že všechny automobily obsahují poměrně velké množství dílů vyrobených právě z hliníku (EAA, 2020; Ducker Worldwide, 2019).

Hustota hliníku (2700 kg.m³) je oproti hustotě oceli zhruba třetinová, ale třetinového snížení hmotnosti se dosáhne jen zřídka. U velkého počtu dílů je nutné zvýšit průměrnou tloušťku hliníku ve srovnání s ocelí, aby bylo dosaženo stejných vlastností. Nejčastější poměr tloušťky strukturálních aplikací je cca 1,5. Ocelový díl o tloušťce 0,8 mm lze nahradit hliníkovým dílem o tloušťce 1,2 mm, snížení hmotnosti je ale stále zhruba 50%. Vztah mezi vlastnostmi materiálu, např. pevností, tuhostí a hmotností je velmi složitý. Může být ovlivněn geometrií součásti, neexistuje tedy absolutní pravidlo pro nahrazování ocelových dílů o dané tloušťce hliníkovými díly o určité tloušťce. Snížením hmotnosti vozidel dochází zejména k úspoře paliva, což vede ke snižování emisí CO₂, což je celoevropským požadavkem. Dalšími pozitivy ve snižování vozidel je zlepšení akcelerace, udržování konstantní brzdné síly a zkracování brzdné dráhy, zlepšení stability vozu, zvýšení jízdního komfortu a snížení opotřebení silnic (EAA, 2020).

Slitiny hliníku jsou v automobilovém průmyslu používány zejména na výrobu litých kol, pístů, turbodmychadel, hliníkových rámců, chladičů, bloků motoru, klikové skříně, hlavy válce ale i interiérových součástí jako jsou palubní desky, volantová kola, ramena pedálů, schránky pro air bag apod. (Louda, 2005).

Hliník je hojně využíván i při výrobě dalších dopravních prostředků – autobusů, vlaků, malých lodí anebo jízdních kol. I v těchto případech jsou hliníkové materiály používány zejména z důvodu nízké hmotnosti. Stejně jako v letectví je hliník, jako velmi odolný materiál prosazován pro použití v kosmonautice (Michna, 2005).

1.3 Konvenční způsoby tváření

Technologie tváření kovů lidstvo zná a využívá již několik tisíc let. Tváření zahrnuje množství metod, které mění tvar polotovaru. Pomocí tváření však výrobku nedodáváme pouze podobu, ale můžeme ovlivňovat také jeho mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. Technologie tváření je možné rozdělit na plošné a objemové. Mezi plošné patří lisování, tažení a ohýbání, mezi objemové pak válcování, kování a protlačování (Fabík, 2012)

1.3.1 Lisování

Mezi nejkomplicovanější technologie tváření patří lisování. Výsledné výlisky mohou být velmi složité a členité, proto je, při jejich výrobě, nutné využít několika operací, které na sebe navazují. Jde zejména o stříhání, ohýbání a tažení. Vstupní materiál,

plech, je nutné nejdříve nastříhat, následně se tvářený materiál deformuje a tvoří se hlavní tvar. Finální výrobek (příklad na obrázku 1.7) může procházet ještě lemováním, děrováním či ostříhováním (Dvořák et. al., 2007).



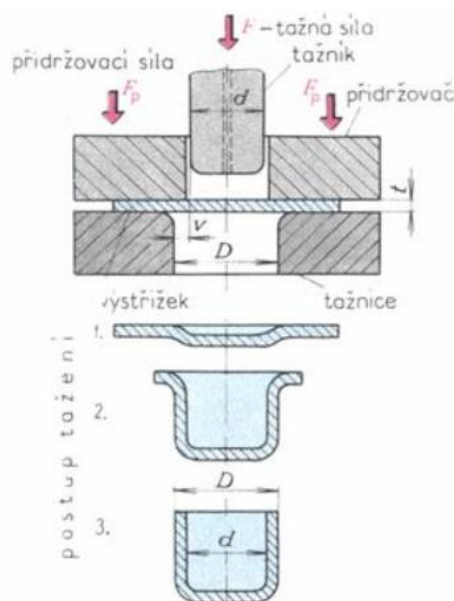
Obrázek 1.7: Výlisky (OKZ, 2018)

1.3.2 Tažení

Nezákladnějšími metodami výroby dílů karoserií je ohýbání a tažení. Tažením vzniká z rovného plechu polouzavřené duté těleso, zvané výtažek. Dle tvaru výlisku můžeme rozlišovat tažení mělké, hluboké, se ztenčením stěny, rotační tažení a tažení nepravidelných tvarů, kterými mohou být právě karosářské výlisky. Základní polotovar (nejčastěji kovový plech anebo pás) se velikostně uzpůsobí požadovanému dílu. Vzniklý přístřih se vloží do nástroje na tažnici a následně je tažníkem vtáhnut do otvoru tažnice, kde je působením tlaku zhotoven požadovaný tvar výtažku. Jednodušší tvary je možné vytvořit v jedné operaci, tvarově složité a hluboké výtažky je nutné vytvářet postupně během dvou i více operací (Tišnovský a Mádle, 1990; Forejt a Píška, 2006; Dvořák et. al, 2007)

Technologií tažení je možné vytvářet díly rotačních i nerotačních tvarů. Při výrobě rotačních dílů je velmi kritickým místem zaoblení mezi dnem a pláštěm výtažku, kde se materiál značně prodlužuje a ztenčuje. Určení počtu tažných operací u rotačních tvarů se provádí podle tloušťky a druhu použitého materiálu a především podle tvaru a velikosti výtažku. U dílů nerotačních tvarů je určení počtu tažných operací závislé na velkém počtu veličin, jako je velikost zaoblení v rozích, poměr mezi velikostí

zaoblení v rozích a délkou podélné části stěny výtažku, velikostí zaoblení u dna výtažku, tvar přístříhu, tloušťka a druh taženého materiálu, velikost výtažku, aj. Mezi nástrojem a taženým materiálem dochází ke tření. K ochraně materiálu i nástroje je nutná aplikace maziv, jejichž použití je závislé na konkrétním technologickém postupu. Používají se kapalná maziva (oleje), konzistenční maziva (tuky, pasty, emulze) a tuhá maziva (grafit a mastek). Princip tažení je zobrazen na obrázku 1.8 (Tišnovský a Mádle, 1990; Hrivňák et al., 1992; Dvořák et al., 2007)



Obrázek 1.8: Princip tažení (Lenfeld, 2010^a)

V závislosti na charakteru výtažku je možné využívat různé metody tažení. Při tažení se zeslabením stěny výrobku se zmenšuje tloušťka pláště výtažku, tloušťka dna však zůstává stejná, jako tloušťka výchozího materiálu. Zužováním vznikají výtažky, kdy je průměr dna zachován a směrem vzhůru se průměr výtažku zmenšuje. Opačného tvaru se u výtažků dosahuje metodou rozšiřování, má využití zejména při zvětšování části výtažku. Tvárné kovy lze rozšířit až o 30 %, aplikací více tažných operací je možné dosáhnout většího rozšíření, mezi operace je nutné zařadit žíhání. Rozšiřování je možné provést například pomocí minerálního oleje a tažníku, kdy tažník působí na kapalinu nalitou do výtažku jako píst. Pro dosažení lepších tažných podmínek je možné materiál lokálně zahřát. Tažení s použitím místního ohřevu spočívá v použití nahřívaných ploch tažnice a přidržovače, naopak tažník je ochlazován kapalinou. Dalšími metodami je přetahování, protahování, zpětné tažení. Nekonenční metody tažení jsou popsány v kapitole 2.3. (Tišnovský a Mádle, 1990; Hrivňák et al., 1992; Dvořák et al., 2007).

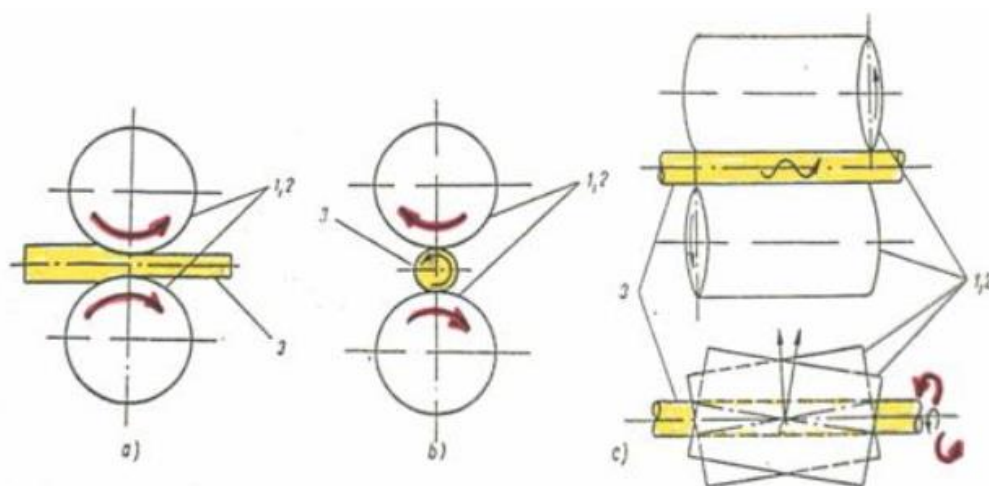
1.3.3 Ohýbání

Při ohýbání dochází k deformaci materiálu působením vnějšího momentu. Technologie se využívá zejména při lemování, profilování, ohraňování, zakružování, stáčení, navíjení či válcování. Ohýbáním dochází k namáhání vláken na vnější straně tahem, na vnitřní straně naopak tlakem. Ohýbání je možné provádět na lisech pomocí ohýbadel (ohýbacích nástrojů). Pohyblivá část ohýbadel, ohybník vykonává přímočaré pohyby (Dvořák et al., 2007).

1.3.4 Válcování

Válcováním dochází ke ztenčování kontinuálně litého kovu pomocí dvou otáčejících se válců. Pomocí válcování je možné vyrábět plechy, hranoly, tyčový profilový materiál či kolejnice. Válcování je možné provádět za tepla či za studena. Dochází k deformaci materiálu mezi válci, snižuje se jeho výška a prodlužuje se délka. (Vojtěch, 2006; Pilous, 2008).

Válcování může probíhat podélně, příčně či kose. Podélným válcováním se vyrábějí dlouhé polotovary, jako jsou například kolejnice a tyče. Příčné válcování se používá tam, kde je potřeba redukovat radiální průřez, například u osazených hřídelí. Kosým válcováním se vyrábějí trubky (Lenfeld, 2010^o).



Obrázek 1.9: Princip podélného (vlevo), příčného (uprostřed) a kosého (vpravo) válcování (1, 2 – válce, 3 – materiál) (Lenfeld, 2010^o)

1.3.5 Kování

Kování je objemové tváření za tepla, které je zřejmě jedním z nejstarších způsobů zpracování kovových materiálů. Tímto způsobem je možné zpracovávat velké množství druhů kovů (Hašek et al., 1965; Řasa a Gabriel, 2005).

Tváření kováním spočívá v beztrískovém zpracování kovů údery a rázy. Tímto způsobem dochází ke zlepšování makrostruktur i mikrostruktur materiálů a zvyšuje se tak jejich houževnatost (Řasa a Gabriel, 2005; Fabík, 2012).

Materiál je nutné nejprve zahřát v peci či kovářské výhni. Kovací teplota oceli je 800-1000 °C, dochází ke změnám v její struktuře a stává se tak tvářitelnou. Kování může probíhat ručně či strojně, pomocí bucharu či lisu (Haček et al., 1965; Fabík, 2012).

Pro sériovou výrobu se využívá zápustkové kování, kdy je kov zatlačován do dvoudílné zápustky. Tvar dutiny zápustky je identický s tvarem výkovku. Tímto způsobem se dosahuje tvarově velmi přesných výrobků. Ohřátý polotovar se vkládá do dutiny zápustky, následně se na něj působí údery tvářecího stroje, bucharu či klidným tlakem lisu (Lenfeld, 2010^b).

1.3.6 Protlačování

Dopředu pohybující se průtlačník protlačuje výchozí polotovar průtlačnicí. Tímto způsobem je získáván protlaček. Touto technologií je možné vyrábět profily s velmi složitým průřezem. Obrobek bývá nehybný a obráběcí nástroj koná přímočarý pohyb (Řasa a Gabriel, 2005; Fabík, 2012).

Tato metoda je vhodná pro velkosériovou výrobu, zejména z toho důvodu, že protahovací nástroje mají poměrně vysokou cenu. Protlačování je možné provádět za tepla či za studena. Za tepla je možné protlačovat například i kovy, které jsou špatně tvárné a náchylné k trhlinám, může jít o oceli s vysokým obsahem uhlíku, či o legované oceli, případně o neželezné kovy a jejich slitiny. Za studena je možné protlačovat měď, hliník či olovo (Řasa a Gabriel, 2005).

Materiály jako hliník, měď, mosaz či ocel je možné protlačovat hydrostaticky. V materiálu, který je obklopen kapalinou o vysokém tlaku se vytváří všestranné napětí, zvyšuje se tak tvárnost materiálu, který je působením kapaliny protlačován průtlačnicí (Řasa a Gabriel, 2005; Fabík, 2012).

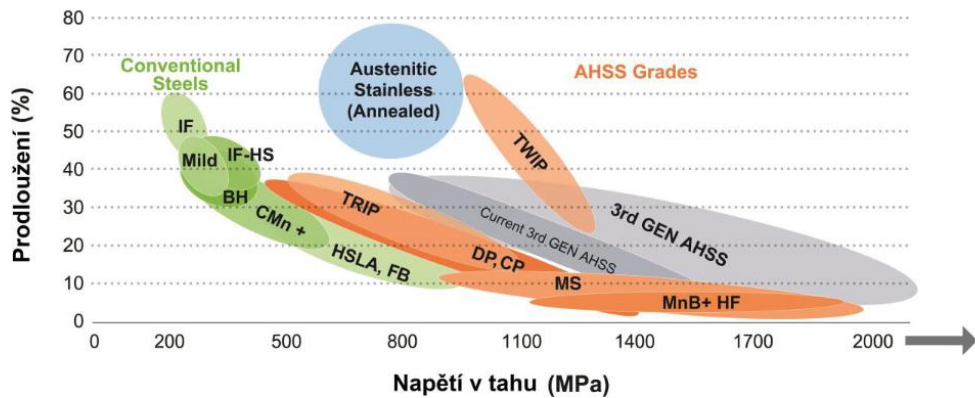
2 Moderní výroba kovových dílů

Zavádění nových druhů materiálů je přirozeným vývojem téměř ve všech odvětvích. V automobilovém průmyslu je modernizace umocněna zejména rostoucími požadavky na snížení spotřeby pohonných hmot. Dalšími důvody mohou být zvýšení bezpečnosti a komfortu. Snižování hmotnosti dílů je umožněno nejen používáním nových materiálů ale také zaváděním moderních technologií. Zásadním rozhodnutím po volbu materiálu je také jeho cena a technologické možnosti použití (Šanovec a Pilvousek, 2016).

2.1 Moderní oceli

Výběr druhu oceli pro kritické bezpečnostní aplikace se řídí dvěma obecnými zásadami. Při náhlém zpomalení v důsledku nárazu musí být energie rozptýlena kontrolovaným způsobem, aby zpomalení cestujících nepřekročilo určité prahové hodnoty, čímž se maximalizuje přežití a minimalizují se šance na zranění. Ve struktuře materiálu musí být vytvořeny zóny, jejichž rolí při nehodě je absorbovat kinetickou energii vozidla a zajistit rychlé, ale řízené zpomalení. Materiál musí být využit co nejeфекtivněji, tak aby absorboval maximální množství energie, to vyžaduje pečlivé konstrukční řešení. Články konstrukce musí odolávat deformacím případně zajistit malé a kontrolovatelné množství deformace. Motivací pro hledání alternativních materiálů s nižší hustotou pro využití v dopravní technice je mimo jiné také možnosti snížení hmotnosti vozidla (DuBois et. al., 2004; Hall a Fekete, 2017).

Tam, kde je vyžadována maximální absorpce energie nárazu se jako vhodný materiál objevily dvoufázové oceli (Dual Phase). Pro zajištění vhodných deformačních vlastností použité ocele je důležité, aby měl materiál co nejvyšší mez kluzu, dobrou tažnost, svařitelnost a zároveň musí být tvářitelná a vhodná pro aplikaci povrchových úprav. Vlastnosti moderních AHSS ocelí v porovnání s konvenčními druhy ocelí jsou zobrazeny v grafu na obrázku 2.1 (Hall a Fekete, 2017).



Obrázek 2.1: Porovnání fyzikálních vlastností moderních a konvenčních ocelí (WorlAutoSteel, 2016).

Conventional Steels = konvenční oceli; *IF* = Interstitial Free oceli; *Mild* = Mild Steels; *IF-HS* = Interstitial Free-High Strength oceli; *BH* = Bake Hardening oceli; *CMn+* = konvenční CMn oceli; *HSLA* = High Strength Low Alloy oceli; *Austenitic Stainless* = austenitické oceli; *TRIP* = TRIP oceli; *DP* = Dual Phase oceli; *CP* = Complex Phase oceli; *MS* = martenzitické oceli; *MnB+ HF* = manganbórové oceli; 3rd GEN AHSS = AHSS oceli 3. generace

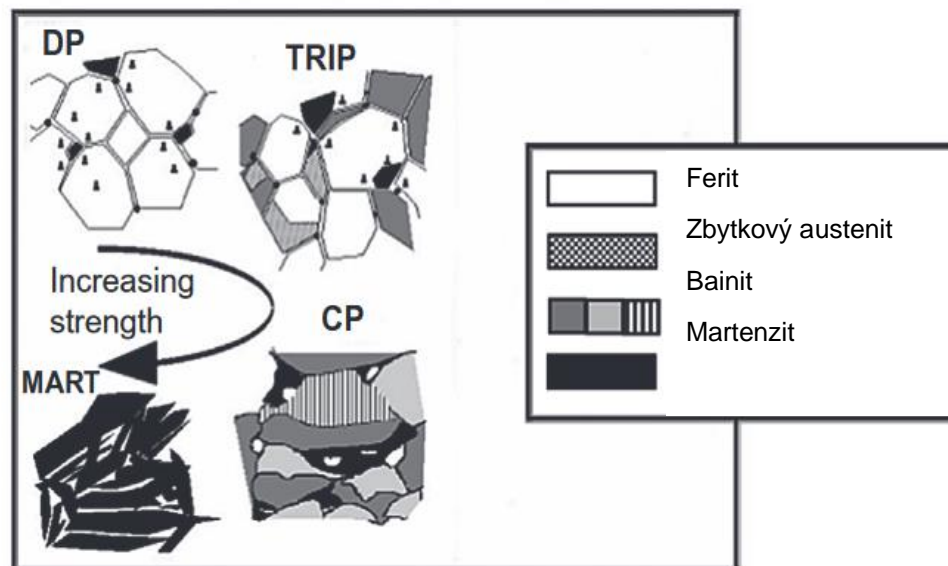
Moderní třídy ocelí znamenají pro automobilový průmysl materiály s rostoucí úrovní pevnosti. Tyto materiály je však obtížnější tvářet při běžných teplotách. Jednoduché díly je možné tvořit válcováním, pro výrobu geometricky složitějších je však nutné vyvíjet náročnější metody, jako je například lisování za tepla. Lisování za tepla přináší možnost vytvářet geometricky náročné díly, je však energeticky náročnější a pomalejší, což zvyšuje cenu výlisků. Vysoká cena staví využití této metody do sporu s využitím levnějších alternativních materiálů (Hall a Fekete, 2017).

Využíváním vysokopevnostních ocelí je možné snížit množství použitého materiálu na konstrukčním dílu se zachováním dostatečné pevnosti. Snížení množství použité oceli umožňuje snižovat celkovou váhu karoserie, to přispívá ke snížení spotřeby paliva. Kromě snižování množství použitého materiálu je možné snižovat hmotnost dílů inovativními výrobními procesy, jako jsou laserem svařované polotovary (Hall a Fekete, 2017).

2.1.1 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – první generace

Zavedení přísných předpisů v oblasti bezpečnosti vozidel a ochrany životního prostředí v posledních několika desetiletích, jakož i rostoucí konkurence jiných nových a lehčích materiálů, vedly k vývoji nové třídy ocelí s názvem Advanced High Strength Steels. Jde o vícefázové oceli s alespoň dvěma mikrostrukturálními složkami,

které kombinují atraktivní vlastnosti pevnost a tvarovatelnost. Na obrázku 2.2 jsou znázorněny typické mikrostruktury AHSS (Sugimoto a Mukherjee, 2017).



Obrázek 2.2: Typické mikrostruktury pokročilých vysokopevnostních ocelí první generace (podle Sugimoto a Mukherjee, 2017).

DP – Dual Phase oceli; TRIP - Transformation Induced Plasticity oceli; MART – martenzitická ocel; CP - Complex Phase oceli

Na bezpečnosti a nosné prvky automobilové konstrukce se používají zejména speciální pokročilé vysokopevnostní oceli, které jsou odolnější a pevnější než předcházející materiály. Tyto oceli jsou vyvinuty za účelem plnění náročných požadavků z hlediska bezpečnosti automobilů. Ideálními kandidáty pro použití při konstrukci bezpečnostních prvků konstrukce automobilu jsou oceli s martenzitickou mikrostrukturou. Ve srovnání s ostatními vysokopevnostními třídami oceli mají však tyto materiály omezenou tažnost. (Bouaziz a kol., 2013; Hall a Fekete, 2017).

Alternativní tvarování složitých dílů umožňuje technologie lisování za tepla, která se rychle rozšiřuje. Do procesu vstupuje žíhaný materiál s vysokou tažností, je zahříván na austenitizační teplotu v peci, poté se lisuje a zároveň chladí speciální technologií. Tímto způsobem je možné vytvořit složité tvary, které mají, díky rychlému ochlazení, martenzitickou mikrostrukturu (Hall a Fekete, 2017).

Dual Phase oceli – DP

Pro bezpečnostní díly automobilů (sloupky, prahy dveří, výztuhy, rámy karoserie, nosníky a nárazníky) je vhodné používat DP oceli. Ty jsou schopny absorbovat energii a mají vysoké hodnoty únavové pevnosti. Ačkoli mez kluzu u dvoufázových ocelí jsou obvykle nižší než u martenzitických ocelí, je stále podobná anebo vyšší než u konvenčních vysokopevnostních ocelí. Vysoká úroveň tvárnosti ve srovnání s martenzitickými oceli z nich činí atraktivní alternativu pro použití při levnějším konvenčním lisování složitých součástí, které stále vyžadují vysokou pevnost (Forejtová a kol., 2017; Hall a Fekete, 2017).

DP oceli jsou charakteristické strukturou, které je dosaženo specifickým způsobem tepelného zpracování, který se skládá z několika samostatných procesů. Mají tak martenzitickou a feritickou fázi. Oproti konvenčním ocelím obsahují více uhlíku a zároveň více legujících prvků – manganu a křemíku. Mezikritické žhání, používané jako základ dual phase ocelí se používá také pro výrobu ocelí s transformačním podnětém (TRIP), ocelí se středním obsahem manganu (Bouaziz a kol., 2013; Fonstein, 2017).

Complex Phace oceli – CP

Kromě martenzitické a feritické fáze mají CP oceli ještě bainitickou fázi, mají tak vyšší tvařitelnost a jemnou mikrostrukturu. Jde o přechod mezi dvoufázovými a vysokopevnostními oceli. Tyto oceli mají nižší tažnost, ale poměrně dobrou tvárnost a vysokou absorpci nárazové energie. Pro svou dobrou absorpční kapacitu se CP oceli používají pro bezpečnostní prvky karoserie jako jsou nárazníky a výztuhy sloupků (Gosh a Ray, 2017; Sugimoto a Mukherjee, 2017).

Transformation Induced Plasticity oceli – TRIP

Celkovou bezpečnost vozu pomáhají zlepšit nosné komponenty z TRIP oceli, které mají, z hlediska poměru pevnosti a tažnosti, jedny z nejlepších vlastností ze všech AHSS ocelí první generace. TRIP oceli jsou vysoce tvárné, což z nich dělá slibné náhrady různých konstrukčních automobilových komponentů. Lepší bezpečnost cestujících je navíc zajištěna výbornými vlastnostmi těchto ocelí při nárazu. Možné využití TRIP oceli je na obrázku 2.3. Přirozené vlastnosti TRIP ocelí lze ještě zlepšit využitím Bake Hardening efektu (Sugimoto et al., 1992; Krizan et al., 2004; Sugimoto a Mukherjee, 2017).



Obrázek 2.3: Možné využití TRIP oceli (Bellás, 2015).

Martensitic Steel oceli – MS

Ze všech AHSS ocelí mají MS oceli nejvyšší pevnost v tahu, ale mají zároveň nejhorší tažnost. Pro zvýšení tvárnosti bývají vystavovány temperování. Jejich prokalitelnost se zvyšuje přidáváním uhlíku, manganu, křemíku, bóru, chromu, molybdenu, vanadu či niklu. Je možné používat vytvářet z nich výztuhy (boční prahové, dveří) rámy karoserie a příčníky. (Forejtová a kol., 2017).

2.1.2 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – druhá generace

Druhá generace AHSS ocelí řeší problematickou aplikaci AHSS ocelí první generace, které mají velmi nízkou tažnost. Pokročilé vysokopevnostní oceli druhé generace byly vyvinuty tak, aby nabízely vysokou pevnost v kombinaci s vysokou tvarovatelností. Oceli této třídy vyžadují pro stabilizaci austenitu vysoké množství legujících prvků, jako je chrom, nikl a mangan. Problémem AHSS ocelí druhé generace je jejich vysoká cena, z tohoto důvodu je použití těchto materiálů v automobilovém průmyslu prozatím vcelku malé. Využití v automobilovém průmyslu komplikují také problémy s praskáním při tradičním bodovém svařování (Hall a Fekete, 2017; Workswell, 2020).

Twinning Induced Plasticity oceli – TWIP

V deformačních zónách karoserie a výztuhách mohou být využívány TWIP oceli, které v sobě kombinují vysokou pevnost a tažnost. TWIP efekt spotřebuje při deformaci mnoho energie. To je dáno plastickou deformací, která u těchto ocelí probíhá pomocí mechanismu dvojčatění. Případné deformační procesy se mohou realizovat několikanásobně. TWIP oceli mají vysoký obsah manganu, který napomáhá k indukci twinningové plasticity (De Moor a Speer, 2017; Workswell, 2020).

Austenitické korozivzdorné oceli

Austenitické korozivzdorné oceli obsahují poměrně vysoké množství legujících prvků, díky tomu dosahují poměrně dobré pevnosti při zachování vysoké tažnosti. Vysoký podíl legujících prvků (chrom, nikl) zvyšuje jejich cenu, ale také korozní odolnost. K transformaci u těchto ocelí nedochází při tepelném zpracování, pouze tvářením za studena. Ocel je nejprve podrobena překrytizačnímu žhání a následně rychlému ochlazení, dle tloušťky výrobku se volí chlazení vzduchem anebo vodou. Při optimálním chemickém složení s přísadami Ni, Mn a N jsou tyto oceli nemagnetické. Austenitické korozivzdorné oceli se vyznačují dobrou tvářitelností a svařitelností. Ke zvýšení pevnostních hodnot dochází zejména díky vysokému obsahu manganu, ten však snižuje korozivzdornost. Pevnostní hodnoty je možné také zvýšit deformačním zpevněním za studena, to však vede ke snížení obrobitelnosti. Trendem je u austenitických korozivzdorných ocelí snižovat obsah uhlíku a přidávat dusík. Stále také vznikají oceli s novým složením o různém zastoupení prvků, jako je například molybden (MM Spektrum, 2003; McGuire, 2008).

2.1.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli – AHSS – třetí generace

Snaha o vyvinutí materiálů, které v sobě spojují vysokou pevnost a tažnost a zároveň jsou finančně dostupné, vedla k vytvoření AHSS ocelí třetí generace. Mimo požadovaných vlastností je třetí generace AHSS ocelí vhodnou volbou pro životní prostředí. Schopnost redukce hmoty umožňuje snížení spotřeby pohonných hmot a tím také snížení emisí skleníkových plynů. Díky svým magnetickým vlastnostem je možné ocel snadno roztřídit a oddělit od ostatních materiálů z vozidel a je možné ji tak znovu přetavit na nové výrobky (Hall a Fekete, 2017).

Oceli využívající efektu kalení a rozpadu uhlíku (Q&P)

Q&P oceli vykazují výbornou tažnost a pevnost, tyto vlastnosti jsou uplatitelné při výrobě strukturních a bezpečnostních komponentů. Komerční rozšíření těchto ocelí zatím není příliš široké, ale vzhledem k jejich vlastnostem se dá odhadovat, že v budoucnu jejich uplatnění a podíl na trhu bude stoupat (Wang a Speer, 2013).

K výrobě Q&P ocelí se využívají oceli s příměsí legujících prvků (mangan, křemík, nikl, molybden), jejichž jednotlivé zastoupení nepřesáhne 4 % obsahu. Q&P oceli mají zvláštní strukturu, jejíž vznik spočívá ve speciálním technologickém procesu. Struktury je docíleno pouze pokud je postup přesně dodržen. Nejprve je

materiál zahřát do oblasti austenitu, během následujícího procesu – kalení je materiál ochlazen na teplotu, kdy dojde k vyrovnání obsahu uhlíku v různých fázích oceli. Po vyrovnání obsahu uhlíku je materiál opět zahřát, tentokrát na teplotu, kdy dochází k difuzi uhlíku z jedné fáze do druhé. Po ukončení procesu se materiál nechá zchladnout na pokojovou teplotu (Fonstein, 2015; De Cooman, 2017; De Moor a Speer, 2017).

TRIP oceli s bainiticko feritickou fází (TBF)

Slibnou náhradou pro výrobu konstrukčních automobilových komponentů jsou TRIP oceli, ty mají pravděpodobně nejlepší mechanické vlastnosti z hlediska kombinace tvárnosti, pevnosti a tažnosti. Výhodou těchto ocelí oproti ostatním AHSS ocelím je také vyšší odolnost při nárazu (Mintz, 2001; Krizan a kol., 2004).

Jedinečná kombinace vysoké pevnosti a zvýšené tažnosti je dána zvláštní strukturou, která má pouze dvě fáze – bainiticko feritickou a druhou ve formě zbytkového austenitu. Jde tak o řadu nízkolegovaných vysokopevnostních tvárných ocelí (Sugimoto a Mukherjee, 2017).

NanoSteel

Nejmodernějším a stále nejméně prozkoumaným zástupcem AHSS ocelí třetí generace jsou oceli s nanokrystalickou strukturou. Ocel NanoSteel je stále ve vývoji a dosud není komerčně dostupná. Experimenty s výrobou tohoto typu oceli započala společnost NanoSteel v roce 2012. Ocel má nanokrystalickou strukturu, tvořenou speciální chemikálií a tepelným zpracováním. Po odlití je ocel austenitická s obsahem boridů, následuje tepelné zpracování a plastická deformace (Billur a Altan, 2014).

Německá společnost Engineering + Design AG (EDAG) zveřejnila konstrukční studii, ve které byla konvenční ocel v modelu Honda Accord 2011 nahrazena NanoSteel. Nahrazením konvenčního materiálu došlo ke snížení hmotnosti automobilu o 30 %. Snížením hmotnosti automobilu je možné dosáhnout značné úspory paliva a snížení dopadu na životní prostředí, nano materiály jsou i z tohoto důvodu materiály budoucnosti (Green Car Congress, 2013).

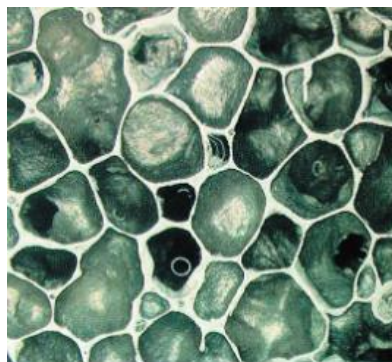
Oceli se středím obsahem manganu (Medium Mn)

Budoucnost 3. generace AHSS ocelí spočívá také v možnosti nahrazení některých konvenčních materiálů. Příkladem mohou být oceli se středním obsahem manganu, ty mohou nahradit martenzitické PH oceli. Medium Mn oceli mají oproti konvenčním ocelím vyšší tažnost a jsou vhodnější pro operace hlubokého tažení (Zheng a kol., 2018).

Medium Mn oceli jsou středně legované, obsahují 4–10 % manganu, mají vysoký podíl zbytkového austenitu s malým zbytkovým množstvím uhlíku. Obsah manganu ovlivňuje pevnost a tažnost, čím více Mn, tím lepší uvedené vlastnosti ocel má. Vlastnosti jsou přímo ovlivněny optimálním provedením tepelného zpracování. I přes výborné vlastnosti Medium Mn oceli nejsou zatím komerčně využívány (Fonstein, 2015).

2.2 Kovové pěny

Snaha nahrazovat těžké pevné konstrukce vedla k vývoji kovových pěn s buněčnou strukturou. Pórovitá struktura těchto materiálů je záměrně vytvořena tzv. zpěněním. Pórovité kovové materiály byly používány již na počátku 20. století pro strojírenské účely, ale jejich rozsáhlý výzkum a vývoj začal až v 90. letech a stále pokračuje. Inspirací pro vytvoření lehkého porézního materiálu byly zejména přírodní materiály jako dřevo, které je, přes lehkou porézní strukturu, vysoce pevné a tuhé. Struktura kovové pěny (obr. 2.4) je velmi podobná buněčným strukturám známých z přírody. Kovové pěny vykazují vysokou tuhost při nízké hustotě, vysokou tepelnou vodivost a schopnost absorpce energie. Výsledné vlastnosti kovové pěny významně závisí na velikosti, tvaru, rozložení a propojení pórů. Póry tvoří více než 60 % objemu pěny. Vysoce důležitým aspektem pro vlastnosti pěny je charakteristika základního materiálu a hustota (Jerz, 2005; Srivastava a Sahoo, 2007; Drenchev et al., 2006).

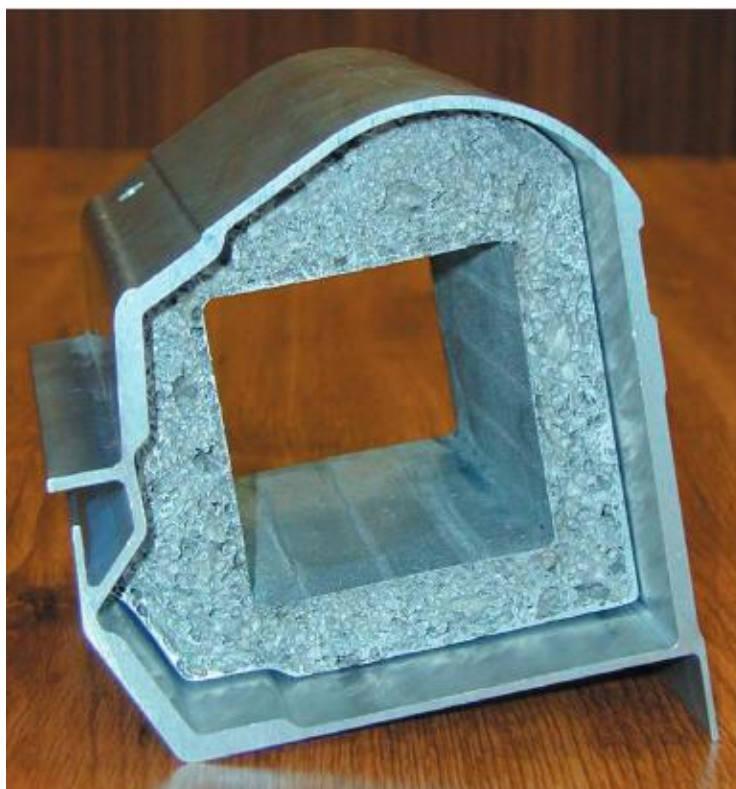


Obrázek 2.4: Struktura pěnového hliníku (Jerz, 2005).

Ačkoliv se kovové pěny dají lehce vyrábět z různých druhů kovů (Zn, Pb, Fe, Ni, Cu, Ti), nejvíce možností uplatnění ze všech kovových pěn nabízí pěnový hliník. Důvodem je zejména nízká hustota a teplota tavení, houževnatost a korozní odolnost. Mimo to je nehořlavý, recyklovatelný a zdravotně nezávadný. Výroba pěnového hliníku probíhá vytvářením plynových bublin v hliníkové tavenině a následným tuhnutím do formy pěny. Výroba hliníkové pěny může probíhat třemi následujícími způsoby:

- vháněním plynu z externího zdroje do hliníkové taveniny,
- tepelným rozkladem zpěňovačů přimíchaného do taveniny,
- roztavením tuhého zpěnitelného polotovaru s částicemi zpěňovačů v hliníkové tavenině (Jerz, 2005).

Aplikace kovových pěn v automobilovém průmyslu spočívá zejména v tvorbě lehkých konstrukcí, prvků absorbujících energii a k tlumení zvuku a vibrací. Vzhledem k pórovitosti jsou kovové pěny schopné absorbovat mechanickou energii, díky tomu jsou využitelné pro deformační zóny automobilů či vozidel hromadné dopravy. Na obrázku 2.5 je příklad využití hliníkové pěny ve výztuze rámu automobilu Ferrari (Jerz, 2005; Banhart, 2007)



Obrázek 2.5:Sériově vyráběná výztuha rámu automobilu Ferrari z pěnového hliníku (Jerz, 2005).

2.3 Hydroforming

Hydroforming (hydraulické tváření) je jednou ze speciálních technologií tváření hliníku používanou v automobilovém průmyslu. Svůj význam má zejména u velkých tenkostěnných hliníkových, hořčíkových ale i ocelových dutých profilů. Touto technologií vzniká jedna součástka, která může nahradit řadu dílů. Pro návrh komponentu se často využívá CAD software a metoda konečných prvků, což umožňuje využití dostupného prostoru na maximum (Marciniak et al., 2002; Louda, 2015; Hartl 2020).

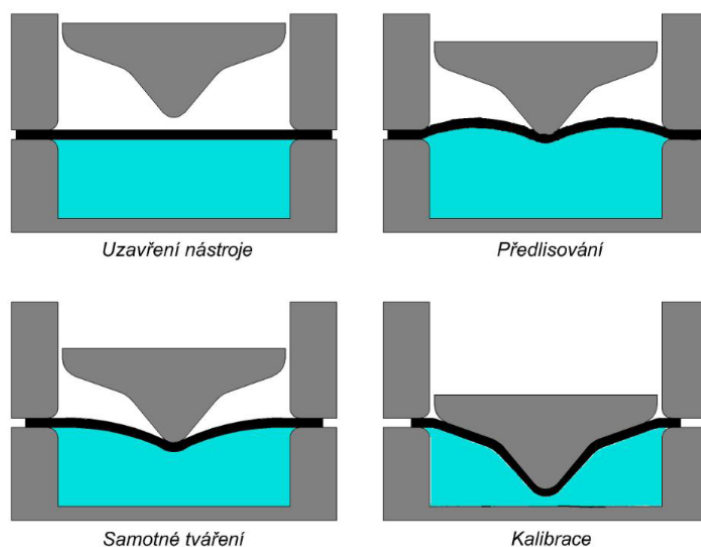
Hydroforming je používán ve strojírenství již řadu let, v automobilovém průmyslu však jde o moderní prvek. Hydraulické tváření nahrazuje lisování a následné svařování dílů, to umožňuje vytvářet nová konstrukční řešení, zejména u podvozku, dílů zavěšení, nosníků motorů a celého rámu. Komponenty vytvářené touto technologií jsou lehčí, přispívají k odlehčení celé konstrukce automobilu a tím ke snížení emisí CO₂ (Marciniak et al., 2002; Yuan a Liu, 2014; Louda, 2015).

2.3.1 Hydromechanické tažení

Při použití této technologie je tažnice zastoupena tažnou komorou s kapalinou. Uplatnění má při výrobě hlubokých dutých výtažku rotačních i nerotačních tvarů, stejně tak složitých a velkoplošných dílů, jako jsou části karoserie. Je možné využívat tenké plechy z široké škály materiálů, například nerezavějících ocelí, mědi, titanu, pozinkovaných, hliníkových a molybdenových plechů. Při výrobě je nutné použít speciální nástroje a lisy, vznikají však velmi přesné výtažky s kvalitním povrchem a minimálním ztenčením tloušťky výtažků v ohybu u dna. Výhodou hydromechanického tažení je snížení počtu tažných operací a mezioperačního žihání. Rovný plech je upnutý mezi přídržovačem a tažnou komorou, která je naplněna kapalinou. Pro hydromechanické tažení je možné, po úpravách, používat konvenčně vyráběné lisy. Kapalina působí hydrostaticky na plech, ten se přizpůsobuje tvaru tažníku. Při hydromechanickém tažení není nutné používat mazadla, jde o poměrně ekologicky šetrný způsob výroby (MM Spektrum, 2001; Forejt a Píška, 2006; Dvořák et al., 2007; Lenfeld, 2010^a).

Z 85 % směřuje produkce z hydromechanického tažení do automobilového průmyslu, nejčastěji jde o části katalyzátoru, nádoby, olejové filtry, koncovky

výfukového potrubí, reflektory světlometů, výfuková potrubí a další díly (MM Spektrum, 2001).



Obrázek 2.6: Schéma procesu hydromechanického tažení (Lenfeld, 2010^a)

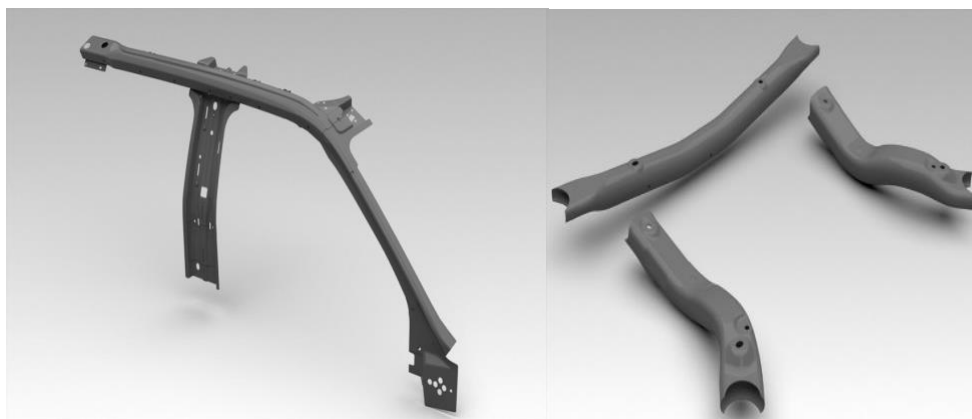
2.3.2 Tváření trubek kapalinou

V dnešní době se velmi rychle rozvíjí tváření trubek pomocí kapaliny. Nejčastěji jde o duté díly pro automobilový průmysl, často je ale využíván například pro tváření rámu jízdních kol. Metoda umožňuje vytvářet složité tvary i z vysokopevných materiálů, tenkostěnných trubek, barevných kovů i jiných polotovarů. (Manninen et al., 2002; Yuan a Liu, 2014; Louda, 2015)

Samotná výroba spočívá ve zpracování trubek či jiných dutých polotovarů do finálního výrobku. Polotovar se nejprve ohýbáním upraví do požadovaného tvaru. Ve formě je dutý polotovár formován do finálního tvaru. Do dutiny je pod vysokým tlakem (až 600 MPa) napuštěna kapalina, čímž se trubka přizpůsobí tvaru formy. Hydroforming umožňuje vytvářet velmi složité tvary s velmi těsnými rozměrovými tolerancemi. Komponenty je možné následně spojovat různými způsoby, díky těsné toleranci je možné využít i např. laserového svařování. Na přesnosti a jakosti výsledných částí má vysoký podíl kvalita ohýbání před samotným hydroformingem, ale např. zvrásnění, které se v ohybech po procesu ohýbání objeví po aplikaci hydroformingu nezmizí. Do výroby je možné začlenit další procesy, jako je děrování, ořezávání či ostříhování (Marciniak et al., 2002; Louda, 2015; Hartl, 2020).

Nejjednodušší metodou tváření trubek kapalinou je nízkotlaký hydroforming. Touto metodou lze tvářet jednoduché tvary s pozvolnými přechody. Složitější díly o menších průměrech je možné formovat pomocí vysokotlakého hydroformingu, který však také klade vysoké požadavky na použitý materiál. Materiál musí mít velkou tažnost a být dostatečně pevný, z tohoto důvodu jsou pro hydroforming vyvíjeny speciální hlubokotažné oceli, které jsou však dražší než konvenční materiály (Yuan a Liu, 2015; Hartl, 2020)

Jednou z nejnovějších metod hydroformingu je postupový hydroforming patentovaný firmou Vari-Form. Jde o dvě operace, kdy nejprve je do trubky pod relativně nízkým tlakem napuštěna kapalina, následně se forma zavře a postupně se zvyšuje vnitřní tlak, čímž se trubka vytvaruje. Oproti klasickému vysokotlakému hydroformingu je možné využít nižších tlaků a zkrátit výrobní čas. Společnost Vari-Form uvádí, že touto metodou je možné vyrábět střešní nosníky, části podvozku a zadního nárazníku, rámy karoserie a sloupky. Díly karoserie vyrobené touto metodou jsou na obrázku 2.7 (Hartl, 2020; Vari-Form, 2021).



Obrázek 2.7: Díly karoserie vyrobené metodou postupového hydroformingu (Var-Form, 2021).

2.4 Vysokorychlostní tváření

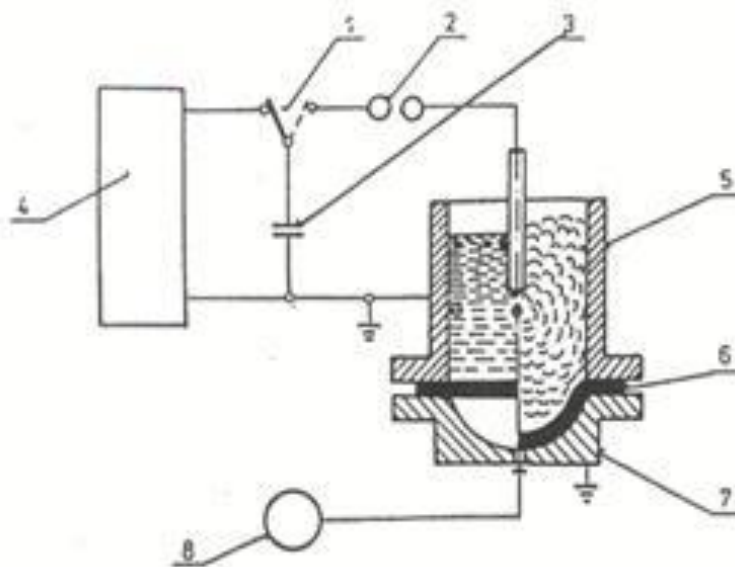
2.4.1 Tváření explozí

Explozivní tažení je založeno na výbuchu, kdy je tažník a lis nahrazen účinkem rázové vlny. K výbuchu dochází explozí nálože trhaviny, ten způsobí vysoký detonační tlak a detonační rychlost. Pro usměrnění těchto dvou vlivů je nutné použít vhodné médium, tím může být voda, písek anebo hliníkový prach. Rychlost tváření může být více než

250 m.s⁻¹, přičemž pracovní operace trvá zhruba 2 tisíce sekundy. Vzniklá tlaková vlna působí buď přímo, kdy je výbušnina položena na materiálu anebo nepřímo přes prostředí. Metodou je možné tvářet běžné druhy oceli, titan, hořčík i hliník a jeho slitiny. Tažení explozí je možné využít k výrobě velkoplošných dílů anebo rozšiřování výtažků a trubek. Vznikající výtažky mají vysoce kvalitní povrch. Touto technologií je možné, s nízkými výrobními náklady, vytvářet i velkoplošné díly z vysokopevnostních materiálů. Technologie je vzhledem ke své časové náročnosti vhodná spíše pro kusovou a malosériovou výrobu (Tišnovský a Mádle, 1990; Lenfeld, 2010^a).

2.4.2 Elektrohydraulické a elektromagnetické tažení

Elektrohydraulické tváření je obdobné jako předchozí metoda, energie pro rázovou vlnu je získána elektrickým výbojem pod vodou v jiskřišti. V porovnání s explozivním tažením je tato metoda bezpečnější, energie výboje je regulovatelná a opakovatelná. Metoda však vyžaduje složitější zařízení. Schéma metody je znázorněno na obrázku 2.8. Podobného schématu používá i elektromagnetické tažení, místo jiskřiště je však indukční cívka. (Tišnovský a Mádle, 1990, Lenfeld, 2010).



Obrázek 2.8: Schéma elektro-hydraulického tváření (Lenfeld, 2010^a).

1- přepínač, 2- jiskřiště, 3- kondenzátory, 4- napájení, 5- předdržovač, 6- plech 7- lisovnice, 8- vakuové čerpadlo

2.5 Kalení lisováním

Jde o poměrně novou technologii, díky které je možné vyrábět veliké komplexní díly karoserií s dobrým poměrem pevnosti a váhy. Metoda v sobě spojuje tvarování za tepla a kalení, tedy dvě osvědčené metody zpracování kovových materiálů. Při výrobě se nejprve zahřívá plechový přístřih nad teplotu A_3 , austenitizovaný polotovár je následně vložen do hlubokotažného lisu, jeho zavřením dochází k vytvarování dílu. Zušlechťování probíhá v uzavřeném nástroji rychlým ochlazením (Bauer, 2007).

Kritickými proměnnými technologie je teplota a čas. Ohřátí polotovaru na teplotu A_3 trvá 4–7 minut, následně musí být polotovár velmi rychle přesunut do nástroje v lisu, optimální prostředkem tento přesun trvá 2,5 – 3,5 vteřiny. I za takto krátkou dobu působí na materiál okolní vzduch a dochází k ochlazení, u dílu z 1,5 mm materiálu se může snížit teplota až o 140 °C. V praxi se teplotní ztráta kompenzuje nastavením pece na vyšší teplotu, než je teplota A_3 . Po uzavření tvářecího nástroje je naopak žádoucí co nejrychlejší ochlazení, aby došlo k zakalení materiálu (Bauer, 2007).

2.6 Tailor welded blanks

Metoda tailor welded blanks je velmi specifickou technologií, která má velký potenciál v automobilovém průmyslu. Jde o výrobu polotovarů na míru z jednotlivých ocelových nebo hliníkových plechů různé tloušťky, pevnosti a povlaku, které jsou spojeny laserovým svařováním. Vzhledem k tomu, že výsledný dílec je tvořen jedním kusem materiálu, není nutné používat další výztuže a spoje, to přispívá ke snížení hmotnosti karoserie. Principem výrobního procesu je použití správného materiálu na správném místě. Využití v malosériové výrobě je limitováno zejména vysokou pořizovací cenou speciálních nástrojů, technologická náročnost, vysoké náklady na provoz svařovacích laserů a nároky na používané nástroje. Technologie s sebou nese i výhody jako je snižování nákladů na materiál, snížení hmotnosti dílů a možnost kombinace více druhů ocelí na jednom dílci (Vlk, 2000; MM Spektrum, 2002; Baosteel, 2021).

Příkladem využití této technologie v automotive je vnější postranní panel automobilu, ten je tvořen pěti díly plechu o tloušťce 0,7 až 2,1 mm. Pět dílů se svaří jeden díl, zvaný svařenec, z něj se vylisuje kompletní boční díl karoserie včetně zadního blatníku. Tailor welded blanks technologii je možné využít i při výrobě

kritických bezpečnostních dílů karoserie jako jsou B sloupky či vnitřní díly dveří (obr. 2.9) (Vlk, 2000; Baosteel, 2021).

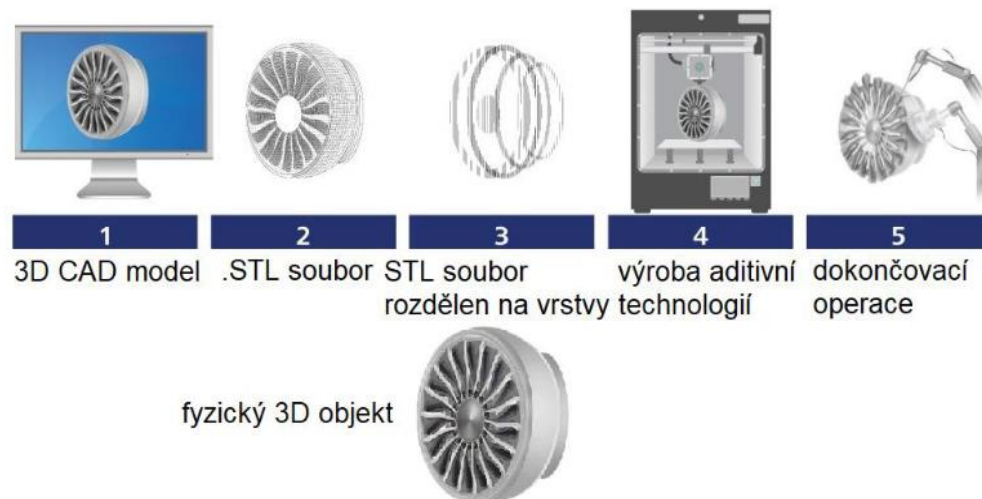


Obrázek 2.9: Vnitřní díl dveří automobilu, vyrobený technologií tailored welded blanks (Baosteel, 2021).

2.7 3D tisk kovových dílů

Technologie 3D tisku se v průmyslu označuje také pojmem aditivní výroba. Jde o automatizovaný proces tvorby, kdy je 3D objekt vytvářen spojováním materiálu, nanášeným ve vrstvách. Počátky aditivní výroby můžeme najít již v 60. a 70. letech 20. století, komercializovaná 3D výrobní technika, stereolitografie, přišla však až na konci 80. let. Aditivní výroba je dnes považována za jednu z nejnovějších technologií, která je stále ve fázi zkoumání a rozvoje. K nejintenzivnějšímu rozvoji dochází v průběhu posledních deseti let. (Duda a Raghavan, 2016; Buchanan a Gardner, 2019; Průša a Bach, 2019).

Grafické modely, které tato technologie využívá jsou modelovány nejčastěji v CAD softwarech, to konstruktérům umožňuje snadné vyhledávání nových, konstrukčně výhodnějších řešení. Postup aditivní výroby je na obrázku 2.10 (Duda a Raghavan, 2016; Průša a Bach, 2019).



Obrázek 2.10: Výrobní proces aditivní výroby (Coykendall, 2014).

Všeobecný pojem aditivní výroby byl přijat normou ISO/ASTM 52900 v roce 2015. Norma označuje tímto pojmem veškeré procesy, ve kterých dochází k výrobě objektů postupným přidáváním materiálu. Norma stanovuje 7 klíčových skupin technologií, jejichž základ je však založen na stejném pracovním postupu. V CAD softwaru je naprojektován 3D model, ten je následně rozdělen do jednotlivých stavebních vrstev. Ze softwaru jsou informace předány do pracovního stoje (ten je často označován jako 3D tiskárna), který pomocí tiskové hlavy tvoří vybranou součást po jednotlivých vrstvách, tak jak byla naprojektována (ISO, 2015; Buchanan a Gardner, 2019).

Pro proces aditivní výroby jsou materiály formovány do prášků, drátů, kapalin anebo tenkých desek. Surovina během procesu přichází do kontaktu se zdrojem energie, ten materiál, v závislosti na technologii taví anebo zpevňuje (Bourell a kol., 2017; Redwood, 2020).

Původně byla aditivní výroba orientována zejména na polymery, plast anebo vosky. Díky intenzivnímu výzkumu v této oblasti se okruh používaných materiálů postupně rozšiřuje například o keramiku, chemikálie, papír, beton, silikony, dřevo, kompozitní materiály, ale také potraviny, jako je čokoláda. Postupným vývojem je možné aditivní výrobou vytvářet komponenty z kovů, zejména pak hliníku, mědi, zlata, stříbra, chromu, kobaltu a slitin železa (Bourell a kol., 2017; Buchanan a Gardner, 2019; Formlabs, 2021).

2.7.1 Kovové materiály pro aditivní výrobu

Vysoká pozornost je věnována 3D tisku kovů, tato technologie přináší nové možnosti ve výrobě kovových objektů. Lze dosáhnout odlehčení dílů, vytvářet rozličné geometrické tvary. Nejčastěji se aditivní výroba kovů používá v leteckém, automobilovém, kosmickém a energetickém průmyslu, dále také ve zdravotnictví a strojírenství (Buchanan a Gardner, 2019, Šprlík, 2019).

Aditivní výroba kovů zahrnuje selektivní laserové tavení (SLM), selektivní tavení elektronovým paprskem (SEBM) a laserové nanášení kovů (LMD). Pro všechny tři metody je společné lokální tavení práškové vrstvy, která následně rychle tuhne (Gorsse a kol., 2017; SLM, 2021).

Během SLM laserový paprsek skenuje a selektivně taví vrstvu prášku, tento postup se opakuje vrstvu po vrstvě až do dokončení dílu. Tloušťky vrstev se pohybují mezi 20 a 100 μm . Maximální rychlost vytváření je asi $70 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, velikost vytvářeného výrobku je maximálně $500 \times 280 \times 850 \text{ mm}$ (Gibson a kol., 2009, SLM, 2021).

Proces SEBM je podobný SLM, rozdílem je, že místo laserového paprsku se k tavení vrstev prášku ve vakuové komoře používá elektronový paprsek. SEBM má vyšší stavební rychlost (až $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) (Lewandowski a Seifi, 2016; Wang a Tang, 2016).

LMD je aditivní výrobní proces, při kterém je součást opláštěna vrstvou po vrstvě. Místo selektivního tavení materiálu, který byl předtím uložen na práškovém loži, jsou prášky přenášeny inertním plynem do laserového paprsku, kde se taví a jsou přiváděny na obrobek, kde se taví s dříve nanesenou tenkou povrchovou vrstvou. Výhody této metody spočívají v tom, že nemá žádné omezení velikosti výrobku. Rychlost vytváření je až $300 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Technologie umožňuje výrobu a tříděných a hybridních dílů současným dávkováním dvou různých plnicích materiálů (Gasser et al., 2010; Lewandowski a Seifi, 2016).

Kovy pro aditivní výrobu musí splňovat dvě hlavní kritéria. Dobrou svařitelnost (aby se zabránilo praskání během tuhnutí) a dostupnost v podobě sférických prášků, ve velikosti několika desítek mikronů (aby bylo dosaženo požadované hustoty a homogenity při nanášení prášku). V podobě atomizovaného prášku je dostupných asi 50 kovových slitin o různém slitinovém složení. (Gorsse a kol., 2017, Šprlík, 2019; SLM, 2020).

Klasifikace kovů, které lze zpracovat prostřednictvím aditivní výroby je následující:

- nástrojové a vysokopevnostní oceli – H13 a Maraging 300,
- nerezové oceli – 316L, 15-5PH a 17-4PH,
- komerčně čistý titan a jeho slitiny – komerčně čistý (stupeň 1 a 2), slitiny Ti6Al4V a Ti6Al-4V ELI,
- slitiny hliníku – AlSi12 a AlSi10Mg,
- slitiny na bázi niklu – Inconel 625, Inconel 713, Inconel 718, Inconel 738, Hastelloy X,
- slitiny kobaltu a chromu – Co28Cr6Mo
- slitiny na bázi mědi – CuSn10

Proces výběru správného materiálu je kompromisem, ve kterém se zvažuje řada faktorů, zejména aplikace, funkce, stabilita, estetika, trvanlivost, ekonomika, ale i priority designéra (Šprlík, 2019; SLM, 2020; Farinia Group, 2021).

Kvůli rychlému ochlazení a směrovému tuhnutí mají kovy vyráběné aditivní výrobou struktury, mikrostruktury a trojrozměrné víceúrovňové architektury, které se liší od odlitků a tvářených výrobků. Mezi charakteristické objemové mikrostrukturální vlastnosti zpracovaných kovů patří pórovitost a zachycování plynu. Povrchy kovových součástí také vykazují charakteristické rysy, jako svarové stopy, vyčnívající neroztavené částice prášku anebo kapičky roztavené hmoty. Kvůli různým objemovým a povrchovým strukturám v kovech zpracovaných aditivní výrobou se může mechanické chování podstatně lišit od konvenčně zpracovaných materiálů (Šprlík, 2019; Farinia Group, 2021).

Při aditivní výrobě kovových dílů metodou SLM a SEBM dodává do procesu veškerou energii laserový anebo elektronový paprsek, z tohoto důvodu vzniká teplotní gradient mezi okolím a výrobkem. Proto je nutné výrobek po dobu výroby pevně ukotvit v základně (Wang a Tang, 2010; Seifi a kol., 2016; VVM, 2016; Delgado a kol., 2011).

Pro využití v leteckém a automobilovém průmyslu je vhodným materiálem například ocel Maraging 300, která se vyznačuje vysokou pevností, houževnatostí a rozměrovou stabilitou, je vytvrzena metalurgickou reakcí, při které není použit uhlík, ale srážení intermetalických sloučenin bohatých na nikl, kobalt a molybden. Dále je použitelná také slitina titanu (Ti6Al4V) a slitina hliníku (AlSi12).

Pro letecký a kosmický průmysl je vhodná ocel 316L a 15-5PH, slitiny na bázi niklu – Inconel 625, Inconel 713, Inconel 718, Inconel 738 a Hastelloy X (Šprlík, 2019; Farinia Group, 2021).

2.7.2 Aditivní výroba v leteckém a kosmickém průmyslu

Při výrobě letadel se využívá aditivní výroba zejména z důvodu možnosti eliminace plýtvání materiálem. Výrobu lehčích dílů umožňuje topologická optimalizace. Díly vytvořené touto technologií se využívají ve vojenské technice, ale i u komerčních a kosmických letounů. Aditivní výrobou jsou vytvářeny tepelně odolné díly, které nejsou ale kritické z hlediska bezpečnosti. U letadla Airbus A380 jde například o držáky uvnitř kabiny pro cestující, palivové trysky a komponenty klimatizací a vzduchotechniky (Huang et al., 2016; Buchanan a Gardner, 2019; Goehrke, 2020).

Technologie aditivní výroby je využívána i při výrobě dílů pro kosmické rakety. NASA představila části raketového motoru, vytištěné z mědi. Součástky jsou navrženy pro provoz při extrémních teplotách a tlacích. Demonstrují tak jednu z pokročilých technologií, které společnost testovala pro použití při výrobě dílů pro misi na planetu Mars. Dalším dílem, testovaným ve výzkumném středisku NASA Glenn Research Center je například sestava raketového vstřikovače na kapalný kyslík/plynný dusík. Ve spolupráci s NASA testuje výrobu dílů 3D tiskem i společnost Aerojet Rocketdyne, ta vytvořila tlakovou komoru raketového motoru ze slitiny mědi, kterou následně společně s NASA úspěšně podrobila teplotní zkoušce. Silnou motivací pro vyhodnocování technologie aditivní výroby pro aplikaci v kosmickém průmyslu je zkrácení dodacích lhůt a snížení nákladů na výrobu. Vesmírné a kosmické agentury vyžadují přísné postupy a nákladné certifikační procesy jednotlivých komponentů. Významné úspory lze dosáhnout snížením počtu certifikovaných dílů a spojů, což umožňuje právě technologie aditivní výroby (Globe Newswire, 2014; McMahan, 2017; Milewski, 2017; Goehrke, 2020).

Atraktivní je také možnost snížení hmotnosti, která vede k významným úsporám při startu nebo k úspoře paliva během letu komerčních letadel. Dalším důležitým faktorem nahrávajícím aditivní výrobě je snížení plýtvání materiálem během výroby součástek z drahých speciálních materiálů, jako jsou slitiny na bázi niklu nebo titanu. Aditivní výroba umožňuje, na rozdíl od konvenčních metod, vytváření komponentů složitých tvarů a funkcí z jednoho kusu materiálu, bez nutnosti používat spoje. Efektivním využíváním aditivní výroby v leteckém a kosmickém průmyslu lze také

realizovat další výhody jako jsou například snížení dopadu na životní prostředí – zejména snížení hluku a nežádoucích emisí (Huang et al., 2016; Milewski, 2017).

2.7.3 Aditivní výroba v automobilovém průmyslu

Aplikace aditivní výroby probíhá i v automobilovém průmyslu. Aditivní technologie umožňují zefektivnění výroby a využití materiálu, růst produktivity. Nejčastěji nacházíme díly produkované technologií aditivní výroby v prototypch automobilů, v podobě složitých dílů komplexních tvarů. Použití aditivní výroby u prototypů je výhodné mimo jiné v tom, že není nutné vyvíjet speciální tvářecí nástroj na konkrétní díl, což je finančně i časově velmi náročné. Oproti tomu prototyp je možné vytvořit během několika dnů, okamžitě jej zabudovat a ověřit jeho funkčnost (VVA, 2016).

Aditivní výroba představuje v automobilovém, stejně jako v leteckém a kosmickém průmyslu, potenciál pro snížení hmotnosti finálního produktu. Technologie přináší také určitou svobodu v geometrickém tvaru dílů. Tyto dva aspekty spolu úzce souvisí, výrobou tvarově složitých dílů vzniká možnost snížení počtu jednotlivých dílů, které není nutné dále spojovat, čímž dochází ke snížení hmotnosti celku. Dalšími způsoby snižování hmotnosti je zavádění pórovitých vnitřních struktur a topologická optimalizace součástek. Lehké komponenty, které prošly topologickou optimalizací přispívají nejen úspoře paliva, ale mohou také snížit náklady na zásoby a manipulaci v dodavatelském řetězci. Aditivní výroba také umožňuje integraci funkcí, zvyšujících výkon, jako jsou interní chladič kanály (Adams, 2018; METAL AM, 2018).

Společnost Volkswagen uvádí, že aditivní výroba je ideální pro výrobu speciálních a exkluzivních sériových vozidel. Touto technologií je možné také vytvářet reprodukce originálních náhradních dílů, které se již nevyrábějí, příkladem může být výroba řadicí páky pro Porsche 959 a vodního konektoru pro motor Audi W12 (obrázek 2.11). Reprodukce náhradních dílů pomocí aditivní výroby je možným řešením pro zjednodušení logistických a skladových operací v budoucnu. V sériové výrobě je použití aditivní výroby kovů běžné zatím pouze u prémiových značek, jako je Bentley, Rolls-Royce, Porsche anebo Bugatti, Audi a BMW (VVA, 2016; Adams, 2018; METAL AM, 2018).



Obrázek 2.11: Vodní konektor pro motor Audi W12 vyrobený metodou 3D tisku (METAL AM, 2018).

Dle Jörga Spindlera z Audi Competence Center kovová aditivní výroba plně nenahradí konvenční sériovou výrobu dílů, v určitých podoblastech však přináší významný pokrok. Aby se aditivní výroba stala životaschopnou technologií pro masovou výrobu je nutné optimalizovat rychlost a nákladnost výroby. Bude také nutné zlepšit rozměrovou přesnost a kvalitu povrchové úpravy kovových komponentů (METAL AM, 2018).

Pro vytvoření odlehčených dílů technologií aditivní výroby v oblasti automobilového, leteckého a kosmického průmyslu je využívána tzv topologická optimalizace. Touto optimalizací dochází k odebrání postradatelného materiálu, správná funkce ale zůstává zachována. Technologií aditivní výroby je možné vytvořit díly tzv bionického tvaru, které připomínají biologické struktury. Ty jsou prakticky nevyrobitelné konvenčními metodami kvůli geometrické náročnosti. Během topologické optimalizace musí konstruktér reflektovat a kombinovat úsporu hmotnosti součástí, efektivitu, ale i ekonomickou výhodnost výroby. Součástky je možné odlehčit také použitím vnitřních struktur – strukturních mřížek, umožňujících výrobu lehčených oblastí s množstvím pórů. Výhody a nevýhody aditivní výroby oproti ostatním způsobům výroby jsou uvedeny v tabulce 2.1 (Duda a Raghavan, 2016; Mirzendehtel a Suresh, 2016; Pagáč, 2017; Buchanan a Gardner, 2019).

**Tabulka 2.1: Výhody a nevýhody aditivní výroby kovů
(Duda a Raghavan, 2016; Buchanan a Gardner, 2019).**

Výhody	Nevýhody
Lepší využitelnost a nižší spotřeba materiálů	Pomalá produkce
Široká škála konstrukčních možností	Ekonomická náročnost
Efektivní proces návrhu	Procesní náročnost
Vysoká přesnost a bezpečnost	Limity v maximální velikosti výrobků
Nižší počet výrobních kroků	Nutné další zpracování výrobků
Snížení spotřeby energie	Smršťování součástek
Kratší doba nutná pro uvedení výrobku na trh	Vznik vnitřního pnutí
Možnost využití široké škály materiálů	Nutno využívat materiály vysoké kvality
Možnost vytvářet malé a tvarově složité díly	Přísná kontrola a údržba zařízení pro výrobu

Závěr

Práce shrnuje poznatky z oblasti konvenční i moderní výroby kovových dílů a používaných materiálů v dopravní technice. Přes velké množství kovových materiálů jsou stále nejpoužívanějšími slitiny oceli. Ocel je možné u některých dílů nahradit slitinami hliníku, případně hořčíku. Nezastupitelnou úlohu při výrobě kovových dílů má technologie tažení.

Vzhledem k tlaku na snižování spotřeby paliva a snížení emisí jsou výrobci nuceni hledat způsoby, jak vyrábět co nejlépe díly se zachováním vlastností, zejména pevnosti a tažnosti. Moderní materiál musí zároveň při náhlém nárazu efektivně rozptylovat energii kontrolovaným způsobem, aby byla zachována maximální bezpečnost cestujících.

Snížit hmotnost karoserie je možné také zavedením moderních technologií do výroby. Může jít o aplikaci kovových pěn, hydroforming, vysokorychlostní tváření, kalení lisováním, tailor welded blanks či, v poslední době velmi oblíbený 3D tisk (aditivní výrobu).

Vnášení nových technologií do výroby je však často finančně i organizačně náročné, proto se nejčastěji moderní metody kombinují s konvenčními tak, aby bylo dosaženo optimalizace požadované kvality, bezpečnosti, designu i ekonomické náročnosti

Seznam použité literatury

AČSZ (Asociace českých a slovenských zinkoven), 2011. *Příručka žárového zinkování*. [online] [cit. 30. 1. 2021]. Dostupné z: <http://zarova-zinkovna.me.cz/upload/ck/files/prirucka-zaroveho-zinkovani.pdf>

Adams, K. (2018). *Automotive Applications Embracing Metal Additive Manufacturing*. [online] Lightweighting World [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://lightweightingworld.com/automotive-applications-embracing-metal-additive-manufacturing/>

ArcelorMittal, 2021. *Steels coated with Alusi, an aluminium-silicon alloy*. [online] [cit. 30. 1. 2021]. Dostupné z: <https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/coatings/alusi>

Banharti, J. (2007). *Metalic Foams – from Fundamental Research to Applications*. [online] Helmholtz Berlin [cit. 15. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/B-Conferences/b097_banhart2007.pdf

Baosteel (2021). *Tailored Blanks*. [online] [cit. 15. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.tailored-blanks.com/en/tailored-blanks>

Barnard, R.H. (2002). Automotive Engineering Development. In: Happian-Smith, J. (Ed.). *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Butterworth-Heinemann, pp. 1-26. ISBN 978-0-75-065044-1

Bauer, D. (2007). *Inovativní technologie v automobilovém průmyslu*. [online] MM Spektrum [cit. 15. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/inovativni-technologie-v-automobilovem-prumyslu>

Bellas, I. (2015). *Study of strain-induced transformation in low-alloy TRIP steels*. Diplomová práce, University of Thessaly – Department of Mechanical Engineering.

Benešová, S. (2015). *Termomechanické zpracování*. [online] MM Spektrum [cit. 15. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/termomechanicke-zpracovani.html>

Billur, E. a Sltan, T. (2014). Three generations of advanced high Strength steels for automotive applications. *Stamping journal*, pp. 16-17.

Bouaziz et al. (2013). Driving Force and Logic of Development of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications. *Steel research international*, 84(10), 937-947.

Bourell, D. et al. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66(22): 359-681.

Buchanan, C. a Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180: 332-348.

Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: an Introduction*. 7. vyd. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-471-73696-1

Coykendall, J. (2014). *3D opportunity for aerospace and defense*. [online] Deloitte [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace.html>

De Moor, E. a Speer, J.G. (2017). Bainitic and quenching and partitioning steels. In.: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 289-316. ISBN 978-0-08-100638-2

DeCooman, B. C. (2017). High Mn TWIP steel and medium Mn steel. In.: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 317-385. ISBN 978-0-08-100638-2

Delgado, J. et al. (2011). Comparison of forming manufacturing processes and selective laser melting technology based on the mechanical properties of products. *Virtual and Physical Prototyping*, 6: 167-178.

Drenchev, L., et al. (2006). Gasars: a class of metallic materials with ordered porosity. *Materials Science and Technology*, 22(10).

DuBois, P., et. al. (2004). *Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection*. American Iron and Steel Institute, Michigan.

Duda, T. a Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29): 103-110.

Dvořák, M. et al. (2007). *Technologie tváření. Plošné a objemové tváření*. Vyd. 4. Akademické nakladatelství CERM, Brno. ISBN 978-80-214-3425-7

EAA (European Aluminium Association) (2020). *Aluminium in cars unlocking the lightweighting potential*. [online] [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.european-aluminium.eu/media/1326/aluminium-in-cars-unlocking-the-lightweighting-potential.pdf>

Fabík, R. (2012). *Tváření kovů, učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2572-4

Farinia.com (2021). *Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications*. [online] [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing>

Fonstein, N. (2015). *Advanced High Strength Sheet Steels: Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties*. Springer International Publishing Switzerland. ISBN 978-3-319-19164-5

Fonstein, N. (2017). Dual-phase steels. In.: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 169-216. ISBN 978-0-08-100638-2

Forejt, M. a Píška, M. (2006). *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Akademické nakladatelství CERM, Brno. ISBN80-214-2374-9

Forejtová, L. et al. (2017). *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie*. [online] MM Spektrum [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>

Formlabs (2021). *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/#origins>

Gasser, A. et al. (2010). Laser Additive Manufacturing. *Laser Technik Journal*, 7(2):58-63.

Gibson, I. et al. (2016). *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. Springer. New York. ISBN 978-1-4419-1119-3

Globe Newswire (2014). *Aerojet Rocketdyne Successfully Tests Thrust Chamber Assembly Using Copper Alloy Additive Manufacturing Technology*. [online] NASA Gameon [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://gameon.nasa.gov/2014/10/17/aerojet-rocketdyne-successfully-tests-thrust-chamber-assembly-using-copper-alloy-additive-manufacturing-technology/>

Goehrke, S. (2020). *Additive Manufacturing Is Driving The Future Of Automotive Industry*. [online] Forbes [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/sarahgoehrke/2018/12/05/additive-manufacturing-is-driving-the-future-of-the-automotive-industry/#472b8c1375cc>

Gorsse, S. et al. (2017). Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18: 584-610.

Gosh, P., Ray, R. K. (2017). Deep drawable steels. In.: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 317-385. ISBN 978-0-08-100638-2

Green car congress (2013). *EDAG study finds NanoSteel sheet steels can achieve up to 30 % weight Reduction in automotive structures*. [online] [cit. 26. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2013/08/edag-20130805.html>

-
- Hall, J. N., Fekete, J. R. (2017). Steels for auto bodies: A general overview. In: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 19-45. ISBN 978-0-08-100638-2
- Hartl, C. (2020). Mechanics of hydroforming. In: Silberschmidt, V.V. (Ed.) *Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques*. První vydání. Elsevier Ltd. Pp 71-109. ISBN 978-0-12-818232-1
- Hašek, V., et al. (1965). *Kování*. 1. vydání. Praha: SNTL. 732 s. ISBN 4-233-65
- Hrivňák, A., et al. (1992). *Teória tvarovania a nástroje*. Vyd. 1. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, Bratislava. ISBN 80-05-01032-X
- Hrubý, V. a Holemář, A. (1991). *Katalog technologických listů iontové nitridace*. STROJOTECH, Brno.
- Huang, R. et al. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135:1559-1570.
- ISO (2015). *ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing – General principles – Terminology*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/69669.html>
- Jech, J. (1983). *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. 4. vyd. SNTL, Praha.
- Jerz, J. (2005). Výroba a průmyslové využití pěnového hliníku. In: Michna, Š. (Ed.). *Encyklopedie hliníku*. 1. vydání, Adin, Prešov. ISBN 80-89041-88-4
- Klimeš, L. (2012). *Plynulé odlévání oceli*. [online] Fakulta strojního inženýrství Vysoké učení v Brně [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/14_Strojirenska-technologie_35-37/35_IUT/071_Plynuleodlevani-oceli---P1.pdf
- Kocich, R. (2013). *Termomechanické procesy tváření (studijní opory)*. [online] Vysoká škola báňská – Technická univerzita v Ostravě [cit. 15. 2. 2021]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/termomechanicke-procesy-tvareni/Kocich_Termomechanicke-procesy-tvareni.pdf
- Kraus, V. (2013). *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň. ISBN 978-80-261-0260-1
- Krizan, D. et al. (2004). *Retained Austenite Stability in Cold Rolled CMnAlSiP Microalloyed TRIP Steels*. International Conference on Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications, AIST, Winter Park, Colorado, pp. 205-216.
-

-
- Lenfeld, P. (2010)^a. *Technologie plošného tváření – tažení*. [online] ksp.tul.cz [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm
- Lenfeld, P. (2010)^b. *Technologie objemového tváření – kování*. [online] ksp.tul.cz [cit. 10. 4. 2021]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/03.htm
- Lenfeld, P. (2010)^c. *Technologie objemového tváření – válcování*. [online] ksp.tul.cz [cit. 10. 4. 2021]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm
- Lewandowski, J. J. a Seifi, M. (2016). Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 46: 151-186.
- Liberty Steel Group (2021). *Slévárna huti LIBERTY v Ostravě vyrobila obří kokilu, která míří na italský trh*. [online] [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://libersteeelgroup.com/cz/news/slevarna-huti-liberty-v-ostrave-vyrobila-obri-kokilu-ktera-miri-na-italsky-trh/>
- Louda, P. (2005). *Nové trendy ve využití hliníku a jeho slitin v automobilovém průmyslu*. In: Michna, Š. (Eds.). *Encyklopedie hliníku*. 1. vydání, Adin, Prešov. ISBN 80-89041-88-4
- Lukáč, I. (2005). *Přehled slévárenských hliníkových slitin*. In: Michna, Š. (Ed.). *Encyklopedie hliníku*. 1. vydání, Adin, Prešov. ISBN 80-89041-88-4
- Macek, K. a Zuna, P. (2003) *Strojírenské materiály*. Vydavatelství ČVUT, Praha. ISBN 80-01-02798-8
- Macek, K. et al. (2008). *Tepelné zpracování kovových materiálů*. Vyd. 1. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha. ISBN 978-80-01-04186-4
- Manninen, T. et al. (2002). *Modelling and Optimization of Metal Forming Processes*. In: Lenar, J.G. (Ed.). *Metal Forming Science and Practice*. Elsevier Ltd. Pp. 193-212. ISBN 978-0-08-044024-8
- Marciniak, Z. et al. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. První vydání. Elsevier Ltd. ISBN 978-0-7506-5300-8
- McGuire, M. F. (2008). *Stainless steels for design engineers*. ASM, International. ISBN 9781615030590
- Metal-am.com (2018). *Volkswagen identifies key areas for metal Additive Manufacturing in automotive applications*. [online] [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/volkswagen-identifies-key-areas-metal-additive-manufacturing-automotive-applications/>
- Michna, Š. et al. (2005). *Encyklopedie hliníku*. Adin, Prešov. ISBN 80-89041-88-4
-

Michna, Š. et al. (2012). *Strojírenská technologie*. 1. vyd. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Ústí nad Labem. ISBN 978-80-7414-501-8

Milewski, J. O. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-58204-7

Mintz, B. (2001) Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels. *Int. Mater. Rev.*, 46: 169-197.

Mirzendehtel, A. M. a Suresh, K. (2016). Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *Computer Aided Design*, 81: 1-13.

MM Spektrum (2001). *Hydromechanické tváření vnějším vodním přetlakem*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hydromechanicke-tvareni-vnejsim-vodnim-pretlakem.html>

MM Spektrum (2002). *Technologie tailored blanks*. [online] [cit. 15. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks>

MM Spektrum (2003). *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2.html>

Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead. 978-1-85573-946-8

OKZ (OK Záchlumí) (2018). *Tváření plechů*. [online] [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.okz.cz/cs/vyrobni-program/tvareni-plechu/#prettyPhoto>

Pagáč, M. (2017). *Začínáme s 3D tiskem kovů #3: Předvýrobní etapa (topologická optimalizace)*. [online] Konstrukter.cz [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>

Patterson, J. (2012). *New Large Aircraft Composite Fire Fighting*. [online] airporttech.tc.faa.gov [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Safety-OLD/Operation-of-New-Large-Aircraft/New-Large-Aircraft-Composite-Fire-Fighting>

Pereloma, E. a Timokhina, I. (2017). Bake hardening of automotive steels. In: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 259-288. ISBN 978-0-08-100638-2

Pilous, V. (2007). *Kovové materiály, 1. vydání*. Tiskové středisko ZČU, Plzeň. ISBN 978-80-7043-531-1

Pilous, V. (2008). *Technologie kovových materiálů, 2. vydání*. Tiskové středisko ZČU, Plzeň. ISBN 978-80-7043-699-8

Pilvousek, T. a Šanovec, J. (2017). *Lehké konstrukce automobilů – Specifické povlaky hlubokotažných ocelí*. [online] MM Spektrum [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-automobilu-specificke-povlaky-hlubokotaznych-oceli.html>

Průša, J. a Bach, M. (2019). *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. [online] Prusa Research s.r.o., Praha [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>

Ptáček, L. (2002). *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. CERM, Brno. ISBN 80-7204-248-32

Redwood, B. (2020). *Additive Manufacturing Technologies: An Overview*. [online] 3D Hubs [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>

Řasa, J., Gabriel, V. (2005). *Strojírenská technologie 3*. 2. vydání. Praha: Scientia. 256 s. ISBN 80-718-3337-1

Seifi, M. et al. (2016). Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. *Springer*, 68: 747-764.

SLM (2020). *SLM Metal Powder. Discover the variety*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <http://www.kolarkk.cz/images/stories/produkty/slm/slm-metal-powder.pdf>

SLM (2021). *Industrial Metal Additive Manufacturing Machines*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines/>

Srivastava, V.C. a Sahoo, K.L. (2007). Processing, stabilization and applications of metallic foams. *Art of science. Material Science-Poland* 25(3): 733-753.

Sugimoto, K. a Mukherjee, M. (2017). TRIP aided and complex phase steels. In.: Rana, R., a Singh, S. B., (Eds.). *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. První vydání, Elsevier Ltd., pp. 217-257. ISBN 978-0-08-100638-2

Sugimoto, K. et al. (1992). *Ductility and strain-induced transformation in a high-strength transformation-induced plasticity-aided dual-phase steel*. *Metall. Trans. A* 23A: 3085-3091.

Šanovec, J. a Pilvousek, T. (2016). *Lehké konstrukce karoserií osobních automobilů*. [online] MM Spektrum [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-karoserii-osobnich-automobilu>

-
- Šebestová, H., Schovánek, P. (2018). *Krystalizace ocelí a litin (studijní opory)*. [online] Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky. [cit. 15. 2. 2021]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm1-p-2.pdf>
- Šprlík, V. (2019). *Dostupnější 3D tisk kovů*. [online] MM Spektrum [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dostupnejsi-3d-tisk-kovu-14210.html>
- Tišnovský, M., Mádle, L. (1990). *Hluboké tažení plechu na lisech*. Vyd. 1. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Brno. ISBN 80-03-00221-4
- Totten, G. E. (2007). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. 2. vyd. Taylor & Francis. ISBN 978-0-8493-8455-4
- USGS (2020). *Mineral commodity summaries 2020*. [online] [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- Vari-Form (2021). *Hydroforming*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://vari-form.com/hydroforming/>
- Vlk, F. (2000). *Karosérie motorových vozidel*. 1. vydání, Vydavatelství a nakladatelství Vlk, Brno. ISBN 80-238-5277-9
- Vojtěch, D. (2006). *Kovové materiály*. Vydavatelství VŠCHT, Praha. ISBN 978-80-7080-600-5
- Vvautomotive.cz (2016). *Když se tisknou brzdy*. [online] [cit. 17. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.vvautomotive.cz/kdyz-se-tisknou-brzdy/>
- Wang, J. a Tang, H. (2016). Review on metals additively manufactured by SEBM. *Materials Technology*, 32(2):86-89.
- Wang, L., Speer, J. G. (2013). Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 2, 268-281.
- Wikipedia.org (2021). *Binární diagram železo-uhlík*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BEelezo-uhl%C3%ADk
- World Aluminium (2021). *Primary aluminium production*. [online] [cit. 29. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.world-aluminium.org/statistics/>
- WorldAutoSteel (2016). *Advanced High-Strength Steel (AHSS) Definitions*. [online] [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>
-

Worswell.cz (2020). *Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl*. [online] [cit. 17. 1. 2021].
Dostupné z: <https://worswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/#povlaky-oceli-pro-automobilovy-prumysl>

Yan, S.J, Liu, G. (2014). Tube Hydroforming (Internal-Pressure Forming). In: Hashmi, S. et al. (Eds.). *Comprehensive Material Processing*. Vol. 3. Elsevier Ltd. Pp. 55-80 ISBN 978-0-08-096533-8

Zheng, G. et al. (2018). A Comparative Study on Formability of the Third-Generation Automotive Medium-Mn Steel and 22MnB5. *Steel.Journal of Materials Engineering and Performance* 27(8). 530-540.

Seznam obrázků

Obrázek 1.1:Rozdělení kovových materiálů.....	9
Obrázek 1.2:Obří kokila vyrobená v Ostravské slévárně huti LIBERTY	10
Obrázek 1.3:Proces kontinuálního lití.....	11
Obrázek 1.4:Rozdělení tvářené oceli.	11
Obrázek 1.5:Rovnovážný diagram Fe-Fe ₃ C	12
Obrázek 1.6:Materiály používané pro výrobu letadel.....	21
Obrázek 1.7:Výlisky	23
Obrázek 1.8:Princip tažení	24
Obrázek 1.9:Princip podélného, příčného a kosého válcování	25
Obrázek 2.1:Porovnání fyzikálních vlastností moderních a konvenčních ocelí	28
Obrázek 2.2:Typické mikrostruktury AHSS první generace	29
Obrázek 2.3:Možné využití TRIP oceli	31
Obrázek 2.4:Struktura pěnového hliníku	34
Obrázek 2.5:Sériově vyráběná výztuha rámu z pěnového hliníku	35
Obrázek 2.6:Schéma procesu hydromechanického tažení	37
Obrázek 2.7:Díly karoserie vyrobené metodou postupového hydroformingu.....	38
Obrázek 2.8:Schéma elektro-hydraulického tváření	39
Obrázek 2.9 Vnitřní díl dveří automobilu, vyrobený technologií TWB	41
Obrázek 2.10 Výrobní proces aditivní výroby	42
Obrázek 2.11 Vodní konektor pro motor vyrobený metodou 3D tisku	47

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 Úspora hmotnosti při použití hliníkových dílů	21
Tabulka 2.1 Výhody a nevýhody aditivní výroby kovů	48