

Interreg



Rakousko-Česká republika

Evropský fond pro regionální rozvoj



STROJÍRENSTVÍ

Strojní inženýrství 3



EVROPSKÁ UNIE

OBSAH

1. Rapid prototyping	3
1.1. Rapid prototyping	3
1.2. Metody, vlastnosti a typy Rapid Prototyping	4
1.3. Stereolitografie	5
1.4. Selective Laser Sintering SLS	7
1.5. Laminated object manufacturing LOM	8
1.6. 3D tisk	9
2. Výroba oceli.....	11
2.1. Suroviny	11
2.2. Vysoká pec.....	12
2.3. Reakce, které probíhají ve vysoké peci	12
2.4. Surové železo a struska	13
2.5. Výroba oceli.....	14
3. Značení oceli	16
3.1. Oceli k tváření	16
3.2. Šedá litina	19
3.3. Tvárná litina.....	19
4. Neželezné kovy a jejich slitiny	21
4.1. Rozdělení a značení neželezných kovů	21
4.2. Těžké neželezné kovy a jejich slitiny.....	22
4.3. Měď a slitiny mědi	22
4.4. Bronzy	23
4.5. Mosazi	23
4.6. Olovo a jeho slitiny.....	23
4.7. Nikl a jeho slitiny	24
4.8. Zinek a jeho slitiny.....	24
4.9. Cín a jeho slitiny.....	24
4.10. Kobalt	25
4.11. Wolfram	25
4.12. Molybden.....	25
4.13. Chrom	26

4.14.	Lehké neželezné kovy a jejich slitiny	26
4.15.	Hliník a jeho slitiny	26
4.16.	Hořčík a jeho slitiny	28
4.17.	Titan – Ti.....	29
4.18.	Speciální slitiny neželezných kovů	30
5.	Prášková metalurgie	31
5.1.	Historie.....	31
5.2.	Proč prášková metalurgie?	31
5.3.	Prášky.....	31
5.4.	Užití technologie práškové metalurgie	32
5.5.	Speciální způsoby konsolidace.....	34
6.	Tepelné zpracování.....	36
6.1.	Účel a základní rozdělení způsobů tepelného zpracování.....	36
6.2.	Žíhání.....	38
6.3.	Kalení.....	40
6.4.	Popouštění	41

1.RAPID PROTOTYPING

1.1. Rapid prototyping

Historie: 80. léta – vyvinuta první metoda RP – **STEREOLITOGRAFIE**

Použití metody:

- **Výroba modelu** – Rapid modeling
- **Výroba nástrojů a přípravku** – rapid tooling
- **Marketingová a kusová výroba** – rapid manufacturing

Výhody technologie

- Snížení výrobních nákladů
- Zlepšení kvality
- Vývoj výrobku a technologie
- Výroba tvarově složitých výrobků

RP umožňuje

- Ověřit funkci, design, ergonomii už v etapě vývoje výrobku

Používané materiály

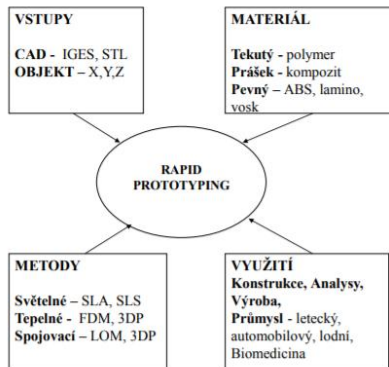
- Tekuté, práškové, polymerní, papírové,

Vývoj technologie

- Materiály s lepšími technologickými vlastnostmi
- Využití kompozitních materiálů na výrobu (plasty plněné sklenými, uhlíkovými nebo kevlarovými vlákny)
- Zvyšování přesnosti a kvality výrobků
- Snižování výrobní ceny výrobku
- Snížení ceny zařízení
- Automatizace výroby
- Úspora materiálu a energie

Definice Rapid Prototyping

- Jsou to všechny technologie, které automatizují proces pro výrobu trojrozměrných, celistvých objektů z původních materiálů.
- Skupina technologií, které umožňují výrobu modelů a prototypů komplikovaných dílů přímo z 3D dat CADů. Objekty mohou být vyrobeny z rozdílných materiálů závislých na vybavení.
-



1.2. Metody, vlastnosti a typy Rapid Prototyping

Podle výrobního postupu RP dělíme:

- Vrstvy přidávané použitím laseru
 - S vytvrzování bod po bodu
 - S vytvrzování po vrstvách
- Vrstvy přidávané bez použití laseru
 - S vytvrzování bod po bodu
 - S vytvrzování po vrstvách

Příklady

- **SLA** - StereoLithography Aparatus, tekutý akrylát bod po bodu, laser
- **SGC** - Solid Ground Curing, tekutý akrylát plošně, UV lampa
- **SLS** - Selective Laser Sintering, kompozit 2 prášků spékány
- **FDM** - Fuse Deposition Modelling, plast ABS nanášený vytlačněním
- **LOM** - Laminated Object Modelling, laminace papíru a laser
- **3DP** - Three Dimensional Print - Tisk po vrstvách, slepováním prášku

Funkce a význam prototypování

- Koncept – sdílení všech nápadů
- Vhodnost – testování rozměrů na návrhu
- Tvar – zhodnocení estetičnosti a ergonomie dílů
- Funkčnost – testování v pracovním prostředí
- Nabídka – ocenění produktu z hlediska nabídky
- Marketing – komunikace o designu se zákazníkem

Typy prototypů

- **Konstrukční prototypy:** Kontrola geometrie a montáže
- **Prototypy designu:** Zlepšení komunikace mezi partnery – kontrola návrhu
- **Funkční prototypy:** Testování a analýzy typu obtékání – modely do větrných tunelů
- **Technické prototypy:** Funkčnost, rysy

1.3. Stereolitografie

- technologie RP
- Nejpřesnější výroba složitých výrobků a modelů
- Aditivní způsob výroby (slučování, přidávání mat.)

Princip metody:

- 3D PC model se převede do požadovaného formátu
- Načítání dat do softwaru RP
- Vytvoření virtuálního modelu a jeho rozřezání a nastavení tloušťky vrstev
- Návrh podpor

Použití metody:

- Výrobky s vnitřními dutinami a složitými detaily
- Modely pro slévárství – výroba forem a nástrojů
- Náhrada voskového modelu
- Modely pro lékařsky a letecký průmysl
- Kontrola designu navrhovaného objektu
- Nevýhody
- Pomalé vytvrzování polymeru

- Malá tepelná odolnost
- Použité materiály
- Fotopolymery – reagují na světlo vytvrzením
- Akrylátové nebo epoxidové pryskyřice
- Části stereolitografického zařízení
- Pracovní komora
- Laserové zařízení
- Řídicí systém

Proces výroby

- Vytvoření 3D PC modelu
 - Tvorba modelu v CAD/CAM systému
 - Skenování z tomografu CAT
 - 3D měřicí přístroje - rozměry
 - Vytvoření pracovního STL programu
 - Přesun souboru do softwaru daného programu
 - Program připraví model k procesu výroby – tvorba pracovního programu s koncovkou STL
 - Model je rozřezán na stejné vrstvy
 - Vlastní stereolitografický proces
 - Laser generuje paprsek
 - Vykresluje plochy vrstev- vytvrzování materiálu
 - Pohyb laseru je řízen programem
 - Po vytvrzení jedné vrstvy se nanáší další
- Vytvrzování výrobku v UV peci
 - Dojde k osušení a zpevnění výrobku
- Dokončovací operace
 - Povrchová úprava
 - Je možné aplikovat plnivo, barvivo
 - Leštění povrchu
 - Drsnost povrchu 1 až 2 μm
 - Přesnost – setiny mm
- Podpory
 - Model musí zaujmout na platformě nejvhodnější polohu pomocí podpor
 - Podpory musí být umístěny tak, aby se po skončení procesu dali lehce odstranit

- Po vytvrzení se model vyjme z podpor a následuje vytvrzování v UV komoře
- Zarovnávací nůž
 - Po každém vytvrzení jednotlivé vrstvy nůž zarovná hladinu pryskyřice, aby byla dosažena stejná tloušťka další vrstvy

1.4. Selective Laser Sintering SLS

Schéma sinteringu:

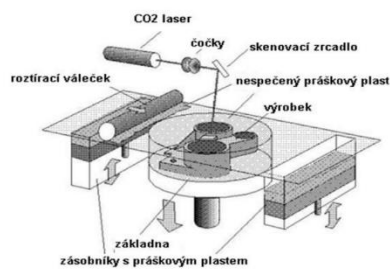
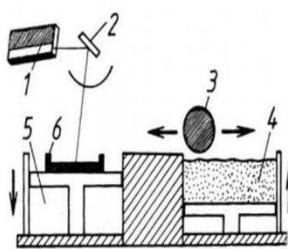


Schéma zařízení sinteringu



- 1 – laser
- 2 – zrcadlo
- 3 - válec pro dopravu prášku materiálu obrobku
- 4 - zásobník prášku
- 5 - pracovní komora
- 6 - vyráběná součást

- Modely jsou velmi pevné
- Využívá spékání prášku pomocí CO2 laseru
- Prášek je nanášen po vrstvách na nosnou desku v interní atmosféře (dusík nebo argon)

Princip

- Laserem se materiál speče nebo roztaví a ztuhne
- Okolní – materiál tvoří podporu
- Vyrábí se po vrstvách
- Po vytvoření jedné vrstvy se nosná deska sníží

Použité materiály

- Prášek, který se působením tepla taví
- Termoplasty
- Speciální nízkotavitelné sliny
- Ocelové prášky

Výrobní zařízení

- Zásobník prášku
 - Pomocí zvedacího pístu a válce je prášek dopraven k místu vytvrzení
- Optické soustavy
 - Laser vytvrdí určitou plochu, poté se o tloušťku vrstvy posune základna dolů a proces pokračuje
- Základna
 - Platforma: je na ní umístěn výrobek

Model = výrobek

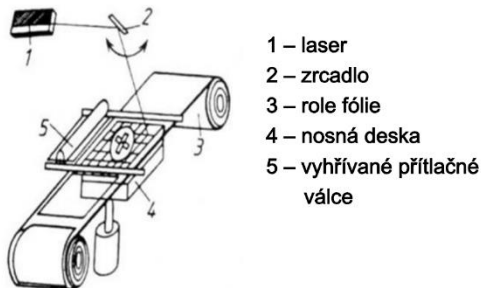
- Model je umístěn v nevytvrzeném prášku
- Po vytvrzení musí prášek vychladnout
- Z důvodu ochrany jakosti povrchu je komora naplněna inertním plynem

1.5. Laminated object manufacturing LOM

- Princip je laminování jednotlivých vrstev na sebe
- Materiál může být papír, plast, dřevo, plech
- Metoda založena na vrstvení lepivého materiálu
- Součást je vytvářena ze speciálních plastových fólií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěných zpevňující hmotou
- Jednotlivé vrstvy jsou oříznuty do správného tvaru CO2 laserem
- Vlastnosti výrobku
 - Podobnost dřevu
 - Ruční opracování pro hladký povrch

- Vhodné pro velké součásti
- Nevýhoda - velký odpad

Schéma LOM:



- LOM vrstvení lepidivého materiálu
 - Vrstvení fólie a lepicí hmoty
 - Materiál je odvíjen na nosnou desku
 - Laser vytvoří požadovaný tvar
 - Tlakem vyhřívaného válce se vrstvy spojí
 - Zbytek fólie se navine zpátky na válec
 - Nosná deska klesá a proces se opakuje

1.6. 3D tisk

Definice 3D tisku:

- Souvisí s technologiemi, které se vztahují k procesům nanášení inkoustových tiskáren termoplastové /termosetové polymery a vosky k vytvoření 3D pevných objektů

Používají se dvě hlavní technologie

- Výroba pomocí jedné trysky
- Výroba pomocí několika trysek

Typy materiálů

- Vosk
- Teplem tvrditelná UV pryskyřice
- Termoplastické polymery obsahující parafín, hydrokarbonové vosky a barviva
- Termoplastické polymery obsahující hydrokabrony, amidy a estery pro zvýšenou trvanlivost
- nemohou být recyklované – jedná se o vysoce přefiltrovaný produkt)

“3D printing zahrnuje ty technologie, které používají přístup tvorby dílů vrstva po vrstvě k nanesení vrstev prášku a poté následné selektivní vazbě do tvaru pevného tělesa“

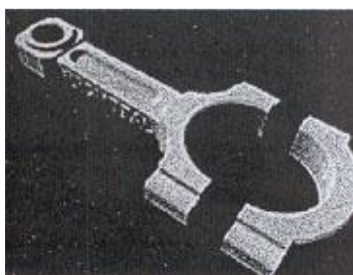
Je to proces podobný Laser sintering s výjimkou že tryskání pojiva váže prášek
3D Printing používá inkjet hlavy k nanášení

Proces tvorby dílů

- Importování STL souboru do softwarového rozhraní
- Naplnění vany práškem
- Rozprostření vrstvy prášku z vany
- Tisk pojiva na sypký prášek s tvarování prvního řezu
- Zbývající prášek podpírá vrstvy, které budou převislé
- Snížení nosné desky a rozprostření nové vrstvy po povrchu
- Proces se opakuje

3D Printing – Kovy

- Nanášení a vazba kovových prášků
- Vlastní proces je stejný, liší se post processing, kde se díly spékají v peci k odstranění pojiva a propojení kovových molekul



2. VÝROBA OCELI

Výroba oceli je metalurgický postup získání oceli ze surového železa odstraňováním přebytečného uhlíku a dalších nežádoucích prvků jako je fosfor a síra a dodáním žádoucích prvků, např. manganu, hliníku, křemíku a dalších.

Ocel se vyrábí ve specializovaném hutním provozu, který se nazývá ocelárna.

2.1. Suroviny

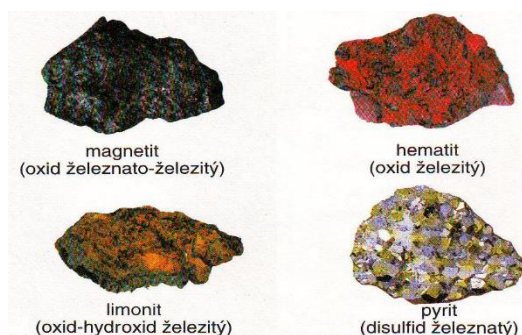
Železná ruda (je tvořena převážně kyslíkatými sloučeninami železa):

- Fe_2O_3 – krevet (hematit)
- Fe_3O_4 – magnetovec (magnetit)
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – hnědel (limonit)
- FeS_2 – pyrit

Koks (z černého uhlí) - je to téměř čistý uhlík a slouží k redukci oxidů železa

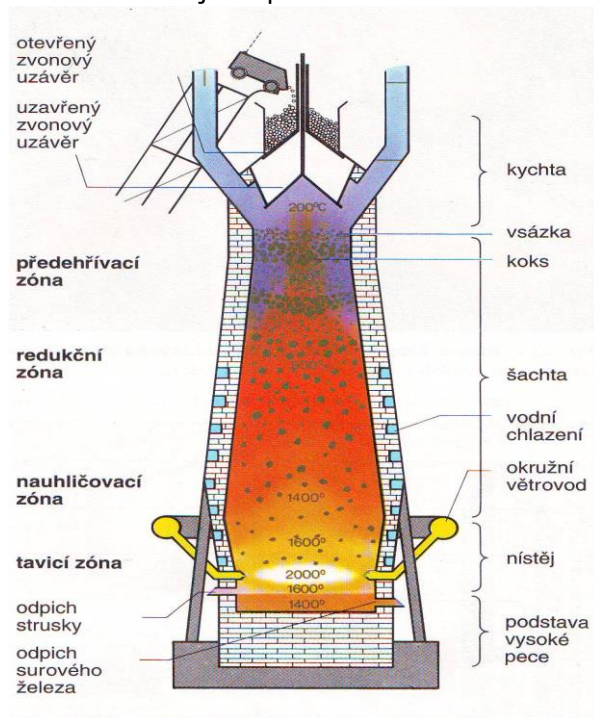
Vápenec CaCO_3 – napomáhá utvoření tzv. strusky z hornin, které doprovázejí železnou rudu.

Doprovodné horniny železné rudy se nazývají **hlušina** a z větší části se před navážkou do vysoké pece odstraňují.



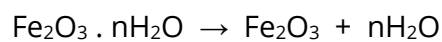
2.2. Vysoká pec

Až 40 m vysoká, 15 m široká šachtová pec z oceli, uvnitř je vyzděna ohnivzdornými cihlami. Pracuje nepřetržitě až 10 let.

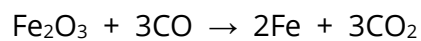
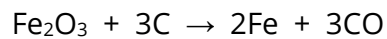


2.3. Reakce, které probíhají ve vysoké peci

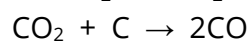
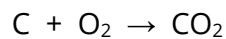
Vysoušení surovin:



Redukce železa:



Spalování koksu:



2.4. Surové železo a struska

Struska chrání povrch roztaveného železa před oxidací.

Vypouštění (tzv. odpich) surového železa a strusky ze spodní části vysoké pece se provádí vždy asi po dvou hodinách.

Surové železo obsahuje příměsi: asi 4% C, dále hlavně Mn, Si, P, S. Je velmi tvrdé, ale křehké. Odlévá se do forem (**litina**) a vyrábějí se z něj topná tělesa, části strojů, potrubí apod., ale většina se dále upravuje na **ocel**.

- Surové železo je **primární produkt** tavení železné rudy s koksem, vápencem a dalšími přísadami ve vysoké peci.
- **Má vysoký obsah uhlíku** – více jak 2,14 %, typicky i více jak 3,5 %.
- Vlivem vysokého obsahu uhlíku je tvrdé a křehké, při ohřátí na **teploty 1150°C až 1250°C** se taví bez přechodu přes tvárný stav.
- Proto ho není možné tvářit za tepla ani za studena.
- Nazývá se také **nekujné železo** a jeho přímé použití je velmi omezené.
- Jde však o výchozí materiál pro výrobu ostatních druhů technického železa.

Dělení surového železa

Šedé surové železo – čím více uhlíku se vyloučí ve formě grafitu, tím má tmavší barvu, je měkčí a lépe se obrábí. Dobře se odlévá, více se proto používá pro slévárenské účely:

- ocelářské
- slévárenské:
 - šedá litina
 - tvrzená litina
 - očkovaná litina
 - tvárná litina
 - legovaná litina
 - nelegovaná litina

bílé surové železo – vyloučený cementit způsobuje jeho tvrdost, většinou se proto dále zpracovává v ocelárnách na ocel.

- ocelářské
- slévárenské:
 - bílá litina
 - nelegovaná temperovaná litina

speciální surové železo – feroslitina – kromě uhlíku obsahuje další prvky nejčastěji mangan, křemík, chróm, vanad, molybden. Používají se jako přísady při výrobě slitinových – legovaných ocelí a litin.

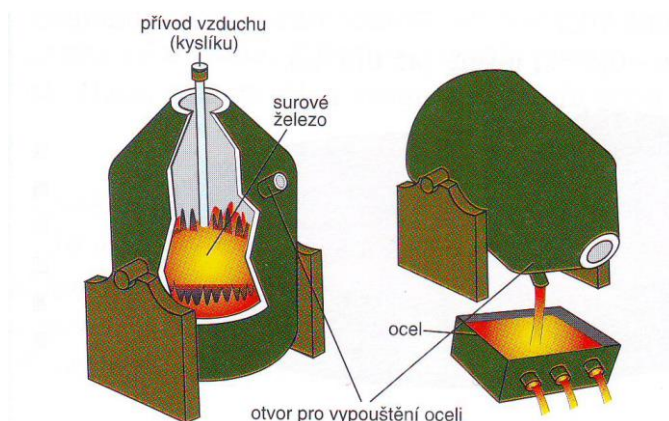
2.5. Výroba oceli

Pro zlepšení vlastností surového železa se provádí v ocelárnách tzv. **zkujňování** (to je odstraňování většiny příměsí uhlíku a dalších prvků).

Konvertorový způsob: odstraňování nežádoucích příměsí spočívá v jejich oxidaci vzdušným kyslíkem v konvertoru (speciální výklopná pec).

V nístějových pecích: k oxidaci nežádoucích příměsí dochází kyslíkem z železného šrotu nebo upravené železné rudy.

Konvertor pro výrobu oceli



Ocel

- Pomalu ochlazovaná (popouštěná) je méně tvrdá a dobře ohybatelná.
- Prudce ochlazená (zakalená) je tvrdá, ale lámavá.
- Podíl uhlíku je maximálně 1,7%.
- Čím více uhlíku ocel obsahuje, tím je tvrdší.
- Vlastnosti oceli se vylepšují také přidáním malých množství některých dalších kovů (chromu, niklu, vanadu, wolframu aj.).

Druhy ocelí

Podíl uhlíku	Uhlíkové oceli		Ušlechtilé oceli	
	Vlastnosti	Použití	Přísady	Použití
asi 0,25 %	lehce tvarovatelná	plechy pro konzervy a karoserie automobilů, dráty, hřebíky	chrom 25 % nikl 20 % křemík 0,5 %	velmi pevná: pancéřové desky
0,25 - 0,7 %	pevná a tuhá	kolejnice, osy, stavební ocel	chrom 18 % nikl 8 %	nerezavějící: nerez
0,7 - 1,7 %	velmi tvrdá	ocelová péra, čepelky, nástroje	chrom 6 % wolfram, vanad, kobalt	žáruvzdorná: ocelové obráběcí nástroje

Oceli třídy 11 – oceli konstrukční, uhlíkové obvyklých jakostí

1 značí ocel vhodnou k obrábění – tzv. automatová

střední obsah C v desetínách % zaokrouhlený na nejbližší celé číslo

11 1 x x
třída oceli _____ pořadové číslo

střední pevnost v tahu

11 x x x
třída oceli _____ pořadové číslo

Význam jednotlivých číslic číselné značky u ocelí třídy 12 – 16 se posuzuje stejně.

součet obsahu přísad. prvků (kromě uhlíku) v %,

střední obsah C v desetínách %. Pokud je obsah C větší jak 0,9% , je čtvrtá číslice 0

1x x x x
třída oceli _____ pořadové číslo

Oceli třídy 17 podle stupně legování označujeme jako středně a vysoko legované.

Tyto oceli jsou legovány několikanásobně větším množstvím legujících prvků, jako je tomu u ocelí třídy 13 – 16.

Ocelí třídy 17 je velké množství druhů a jsou to oceli, které můžeme označit jako **korozivzdorné, žáruvzdorné, žáropevné a speciální**. Jsou legovány hlavně chrómem, manganem, křemíkem, niklem, wolframem, titanem, vanadem a dalšími ušlechtilými prvky.

Číselná značka	Význam třetí číslice ve značce
17 0 x x	Oceli legované chromem - chromové
17 1 x x	Oceli chromové + další prvky Mo, Al
17 2 x x	Oceli chromniklové
17 3 x x	Oceli chromniklové+další prvky Ti, Nb, Mo ,V, W
17 4 x x	Oceli manganochromové nebo manganochromniklové
17 5 x x	Oceli niklové
17 6 x x	Oceli manganové
17 7 x x	Oceli manganoniklové
17 8-9 x x	Zvláštní kombinace prvků
Čtvrtá číslice značky vyjadřuje množství přísadových prvků. Pátá číslice vyjadřuje vzrůstající obsah C	

Oceli třídy 19 - nástrojové

Číselná značka	Význam třetí číslice ve značce	
19 0 x x	Nástrojové oceli uhlíkové	
19 1 x x		
19 2 x x		
19 3 x x	Oceli manganové	Nástrojové oceli slitinové
19 4 x x	Oceli chromové	
19 5 x x	Oceli chrommolybdenové	
19 6 x x	Oceli niklové	
19 7 x x	Oceli wolframové	
19 8 x x	Oceli rychlořezné	
Čtvrtá číslice značky vyjadřuje kombinaci přísadových prvků. Pátá číslice - pořadová – vyjadřuje způsob výroby oceli		

Oceli na odlitky

Číselná značka	Význam třetí a čtvrté číslice ve značce
42 26 xx	Oceli na odlitky uhlíkové
42 27 xx	Oceli na odlitky nízko a středně legované lité do pískových forem
42 28 xx	Oceli na odlitky nízko a středně legované lité jinak než do pískových forem a oceli pro permanentní magnety
42 29 xx	Oceli na odlitky vysokolegované
První dvojčíslí - 42 značí normu hutnictví Druhé dvojčíslí zařazuje oceli do skupin Třetí dvojčíslí značí u <u>uhlíkových</u> ocelí: 00 – 29 – oceli jsou odlévány jinak než do pískových forem. 30 – 99 přibližná hodnota meze pevnosti v tahu v MPa Třetí dvojčíslí značí u <u>slitinových</u> ocelí skupiny legujících prvků	

Číselná značka	Význam první doplňkové číslice
1x x x x. <u>0</u> x	tepelně nezpracovaný
1x x x x. <u>1</u> x	normalizačně žíhaný
1x x x x. <u>2</u> x	žíhaný s uvedením způsobu žíhání
1x x x x. <u>3</u> x	žíhaný na měkko
1x x x x. <u>4</u> x	kalený nebo kalený a popuštěný
1x x x x. <u>5</u> x	normalizačně žíhaný a popuštěný
1x x x x. <u>6</u> x	zušlechťený na dolní pevnost obvyklou u příslušné oceli
1x x x x. <u>7</u> x	zušlechťený na střední pevnost obvyklou u příslušné oceli
1x x x x. <u>8</u> x	zušlechťený na horní pevnost obvyklou u příslušné oceli
1x x x x. <u>9</u> x	tepelné zpracování, které nelze zapsat číslicemi 0 - 8
Druhá doplňková číslice vyjadřuje stupeň přetváření materiálů	

3.2. Šedá litina

Šedá litina je směs ocelové základní hmoty, v níž jsou rozptýleny různými směry částičky grafitu.

Tvar struktury závisí nejvíce na chemickém složení a na rychlosti chladnutí litiny.

Vlastnosti litiny ovlivňuje velikost a rozložení lupínků.

Grafit může mít tvar lupínkovitý, pavoučkovitý, dokonale nebo nedokonale zrnitý.

Rozložení grafit může být rovnoměrné, růžicovité, usměrněné, neusměrněné, smíšené.

3.3. Tvárná litina

Tvárná litina se vyrábí z šedé litiny tzv. **očkováním**. Jedná se o přidávání hořčíku přímo do lící pánve s roztavenou litinou.

Grafit lupínkový se působením hořčíku mění na **kuličkový** – dochází k takzvané krystalizaci grafitu.

Tuto strukturu nazýváme **perlitickou** a se vznikem této struktury se výrazně mění i vlastnosti nově vzniklé tvárné litiny.

Struktura tvárné litiny: feritická, perlitická, feriticko – perlitická, perliticko – feritická
Temperovaná litina

Vyrábí se **temperováním – dlouhodobým žháním** bílé litiny, při němž dochází k rozkladu struktury zvané **cementit** na železo a grafit.

Vyloučí se **temperovaný grafit**, který má tvar nepravidelných zrn. Jeho přítomnost ovlivňuje vlastnosti temperované litiny podobně, jako kuličkový grafit u tvárné litiny.

Litina má v některých případech větší smrštění a zhoršenou zabíhavost, takže se nehodí pro výrobu velkých odlitků (do 100kg).

4. NEŽELEZNÉ KOVY A JEJÍCH SLITINY

4.1. Rozdělení a značení neželezných kovů

Kromě kovů, které obsahují železo jsou v technické praxi zatím nenahraditelné nebo jen špatně nahraditelné **kovy neželezné** – někdy je nazýváme **barevné kovy**.

Většina těchto kovů v čistém stavu nemá takové vlastnosti, které jsou požadovány při konstrukci součástí strojů.

Mají v čistém stavu většinou dobrou tepelnou i elektrickou vodivost, odolnost proti oxidaci – korozi, jsou však převážně měkké a mají nízkou pevnost v tahu.

Rozdělení neželezných kovů:

- **těžké neželezné kovy** a jejich slitiny (hustota nad 5kg/dm³),
- **lehké neželezné kovy** a jejich slitiny (hustota do 5kg/dm³).

Číselné značení neželezných kovů a slitin

- 42 x x x x – číslice 42 značí třídu hutnictví
- 42 3 x x x – číslice 3 značí těžké kovy a jejich slitiny
- 42 4 x x x – číslice 4 značí lehké kovy a jejich slitiny
- 42 x x x x – čtvrtá 0, 2, 4, 6, 8 –tvářené výrobky
- 42 x x x x – čtvrtá 1, 3, 5, 7, 9 –slévárenské výrobky
- 42 x x x x –skupinu těžkých nebo lehkých kovů
- 42 x x x x – šestá číslice je pořadová
- 42 x x x x. x x – první doplňková - tepelné zpracování
- 42 x x x x. x x –u odlitků způsob odlévání

4.2. Těžké neželezné kovy a jejich slitiny

Mezi těžké kovy patří:

- olovo,
- nikl,
- antimon,
- cín,
- zinek,
- kadmium,

Hlavním představitelem těžkých neželezných kovů a poměrně nejvíce užívaným neželezným kovem této skupiny je měď a její slitiny

4.3. Měď a slitiny mědi

- Teplota tavení 1083 °C.
- Hustota 8,96kg/dm³.
- + Má šestinásobně větší tepelnou a elektrickou vodivost než ocel.
- + Houževnatá.
- + Dobře se svařuje a pájí (na tvrdo i na měkko).
- + Dobrá odolnost proti korozi.
- Měkká.
- Obrobitelnost je špatná, protože se měď maže.

Rozdělení mědi:

- **měď tvářená** – přímé zpracování
- **měď slévárenská** – využívá se hlavně pro výrobu slitin.

Slitiny mědi:

- tvářené slitiny,
- slévárenské slitiny.

4.4. Bronzy

Bronzy jsou slitiny mědi s různými neželeznými kovy **kromě zinku**.

Bronzy můžeme zase rozdělit na **bronzy tvářené** a **bronzy slévárenské**.

Který hlavní legující prvek vytvoří s mědí slitinu, podle toho se bronzy nazývají.

- Bronzy cínové – do 20% Sn
- Bronzy červené – do 10% Sn + Pb
- Bronzy olověné-do 33% Pb + Sn
- Bronzy niklové
- Bronzy hliníkové

4.5. Mosazi

Mosazi jsou slitiny mědi se zinkem a dalšími kovy. Pokud by mosazi obsahovaly méně jak mosazi s obsahem přes 80% Cu se nazývají **tombaky**.

Nejlépe slévatelné při 60% Cu.

Nejlépe tažné jsou při 70% Cu.

Označení značkami Ms 70 – kde číslo vyjadřuje Cu v %. např. Ms 85, Ms 90 jsou **tombaky**.

Mosazi automatové např. Ms 63 Pb jsou mosazi s přísadou olova

Mosazi slévárenské se označují **Ms L 60** – kde číslo značí % Cu.

4.6. Olovo a jeho slitiny

- Hustota 11,34 kg/dm³,
- Teplota tavení 327 C.

- + Dobře slévatelné
- + Dobře obrobitelné kromě pilování
- + Odolné proti korozi a chemikáliím
- Měkké

4.7. Nikl a jeho slitiny

- Hustota 8,9 kg/dm³
- teplota tavení 1453 °C,
- elektrickou vodivost má 4x nižší jako měď ale lepší než ocel.
- Dobrá slévateľnost, pájitelnost i svařitelnost
- Velmi dobrá odolnost proti korozi.
- Feromagnetický do teploty 356 °C.
- Žáropevný 800 °C (+ Cr až 1300 °C)
- Užívá se nejčastěji jako legující prvek při výrobě různých druhů ocelí, zvláště třídy 17.
- Při výrobě alkalických akumulátorů, jako kladná deska,
- v potravinářském, chemickém, průmyslu k výrobě chirurgických nástrojů
- k ochraně kovů před korozi – niklováním

4.8. Zinek a jeho slitiny

- hustota 7,13 kg/dm³,
- teplota tavení 419 °C,
- elektrická vodivost je o málo větší jako u niklu, má dobrá slévateľnost i pájitelnost.
- Mechanické vlastnosti se mění s teplotou
 - při normální teplotě je Zn křehký,
 - při teplotě 100 - 150 C je kovatelný – tvárný,
 - při zvýšení teploty na 200 C ztrácí tvárnost a je opět křehký.
- Jeho odolnost proti korozi je různá.
- **Výroba** zinku dříve podobnou technologií jako měď. V současnosti elektrolyticky 99,99%.

4.9. Cín a jeho slitiny

- Hustota 7,3 kg/dm³,
- teplota tavení je 232 °C,
- elektrická vodivost je poměrně nízká
- Odolnost proti korozi je velmi dobrá.
- Cín má 2 modifikace.
- **modifikaci β** v níž se vyskytuje převážně. Je to modifikace zvaná **bílý cín**.

- **modifikace α** zvaná šedý cín, což je šedý prášek. Při dlouhém podchlazení pod teplotu 13 °C a nižší začne **modifikaci**
- Přejít z modifikaci β na modifikaci α **cínový mor**.

4.IO. Kobalt

- Hustota 8,9 kg/dm³,
- teplota tavení je 1495 °C.
- Užívá se jako přísadový kov do ocelí,
- Zvyšuje žáruvzdornost a žáropevnost ocelí až na teploty 800 - 850 °C.
- výroba leteckých tryskových a raketových motorů, legující prvek u rychlořezných ocelí, výrobě **slinutých karbidů**

4.II. Wolfram

- Hustota 19,3 kg/dm³,
- teplota tavení velmi vysoká - 3380 °C.
- Elektrická vodivost je poměrně dobrá (cca dvojnásobná jako u oceli).
- Pevnost v tahu 1100MPa.
- Velká tvrdost 200HB.

Součástí, které pracují při vysokých teplotách legující prvek do žáruvzdorných a žáropevných ocelí, přidává se do nástrojových ocelí – tvrdé karbidy výrobě slinutých karbidů a výrobků práškové metalurgie.

4.I2. Molybden

- Hustota 10,2 kg/dm³,
- teplota tavení 2630 °C.
- Elektrická vodivost menší jako u wolframu.
- Pevnost 700MPa
- Tvrdost 150HB

Vytváří žáropevné a žáruvzdorné slitiny.

Legující prvkem při výrobě ocelí pracujících při vysokých teplotách, ocelí nástrojových - pro výrobu velmi kvalitních řezných nástrojů,

V práškové metalurgii značně tepelně a mechanicky namáhaných výrobků.

4.13. Chrom

- Hustota 7,14 kg/dm³,
- Teplota tavení je 1910 C,
- Velmi odolný proti korozi i silným chemikáliím.
- Je i žárovevný a žáruvzdorný
- Křehký

legující prvek při výrobě konstrukčních, korozivzdorných i nástrojových ocelí.
Ochrana ocelí proti korozi.

Dekorační povrchy automobilního průmyslu.

4.14. Lehké neželezné kovy a jejich slitiny

- hliník – **Al** a slitiny
- titan – **Ti** a slitiny
- hořčík - **Mg** a slitiny.

Jsou užívány při výrobě ocelí i neželezných slitin.
Výrazně ovlivňují mechanické a další vlastnosti.

4.15. Hliník a jeho slitiny

- Hustota 2,7kg/dm³,
- Dobrá vodivost elektrická i tepelná (60% vodivosti mědi)
- Dobrá tvárnost a svařitelnost (+Si).
- Odolný proti chemikáliím a proti korozi.
- Tváření při teplotách 450 - 500 C.

Změna mechanických vlastností =Al+Cu; Mg; Si; Mn; Zn...

Výroba Al

- Přítomnost hliníku v rudách přes 8%.
- Vyrábí se téměř výhradně z tzv. **bauxitu**.
- Chemickou cestou se získá oxid hlinitý Al₂O₃.
- Elektrolýza - získáme Al čistoty 99,3% až 99,8%,
- **Pásmová rafinace** Al až 99,999%.
- Odlévání do tzv. housek, ingotů, bloků nebo desek.

Rozdělení Al

- **Podle počtu tavení:**
 - Hliník prvního tavení -přímo ze surovin.
 - Hliník druhého tavení -přetavením hliníkových odpadů.
- **Podle využití:**
 - Hliník a slitiny tvářené
 - Hliník a slitiny slévárenské nebo hutnické

Slitiny hliníku tvářené

Nejnámější slitina Al – Cu4 – Mg -dural.

- Ve vytvrzeném stavu pevnost 400 MPa.
- Malá odolnost proti korozi, povlakuje se hliníkem.

Al – Cu4 – Mg1- **superdural**

- Pevnost nad 500MPa.

Obě tyto slitiny slouží k výrobě tyčových profilů a plechů a využívají se v leteckém průmyslu.

Al + Cu + Ni

- Stále mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách.
- Pevnost 400MPa
- výroba součástí spalovacích motorů, jako jsou písty nebo ojnice.

Al + Mg s obsahem Mg od 2 do 8% **Hydrionalium**

- odolné proti korozi,
- Přes 400MPa
- využívají se v leteckém průmyslu

Al + Mn

- dobrá korozní odolnost
- výroba nádrží v potravinářském nebo chemickém průmyslu.

Slitiny Al + Sn

- výroba kluzných ložisek. Al – Sn₂₀,
- plátuje se do ocelových kluzných ložisek ve formě tenkých pásků, jako **výstelka**.

Slitiny hliníku slévárenské

- Teplota roztaveného kovu 700 - 750 C.
- Lijí se do písku, forem kovových – **kokil** i pod tlakem.
- legujícím prvkem u těchto slitin je Si – křemík

Silumin Al Si₁₃ s malým množstvím hořčíku,

- teplota tavení 577 C,
- před litím se **očkuje** Na.
- výrobu leteckých nebo vznětových motorů.

4.16. Hořčík a jeho slitiny

- Jeho hustota 1,74kg/ dm³.
- Málo odolný vůči povětrnostním vlivům.
- Zvláště málo proti mořské vodě.
- Mg má velkou afinitu ke kyslíku proto je využíván jako dezoxidovadlo, -svařování v ochranné atmosféře CO₂.
- Ochrana proti korozi **chromatováním** - moření v roztoku dvochromanu draselného nebo sodného a kyseliny dusičné. -povlak sloučenin chromu.
- Svařování slitin Mg je obtížné.
- Pájení není možné vůbec.
- Spojování se provádí nejčastěji nýtováním.
- Hořčík je možno vyrábět z mořské vody 0,14%.
- Další suroviny **magnezit a dolomit**.
- Vyrábí se **elektrolýzou** při teplotách 700 - 750 °C
- **Rafinace** nebo **silikotermickou redukcí** dolomitu křemíkem při teplotě 1200 °C.

Slitiny hořčíku

Do slitin hořčíku se přidává vždy mangan, který zlepšuje odolnost proti korozi a vznítivosti slitiny.

Elektron Mg+3-10%Al+Zn+Mn.

- Hustota 1,8kg/dm³.

Při obrábění slitin hořčíku je nutná dobrá protipožární ochrana – hrozí nebezpečí vznícení, zvláště tam, kde vzniká prach při jeho broušení.

Slitiny Mg jsou velmi dobře obrobitelné, volíme ty největší rychlosti obrábění

4.17. Titan – Ti

- Hustota 4,5kg/dm³
- mechanické vlastnosti podobné jako ocel.
- nemagnetický.
- Vysoká odolnost proti korozi.
- Je odolný i proti kyselinám a louchům.
- Je dobře svařitelný el. obloukem i el. odporem.
- Obrobitelnost však není příliš dobrá.
- Zpracovává se kováním, válcováním na výkovky, vývalky a plechy.
- Jeho dobré mechanické vlastnosti určují použití titanu a jeho slitin.
- Velké využití nachází v leteckém průmyslu a ve zdravotnictví, kde se vyrábí z titanu a jeho slitin
- kostní náhrady.
- Jednou z mála nevýhod titanu je jeho vysoká cena. Je velmi důležitým legujícím prvkem při výrobě oceli. Pevnost slitin titanu je větší jako u čistého Ti.

Slitiny titanu

Slitiny α obsahují vždy hliník, kterého bývá až 8%. Dalším legujícím prvkem bývá Sn. Jsou velmi dobře svařitelné. Kováním se z těchto slitin dělají např. lopatky parních turbin.

Slitiny β obsahují Al a další prvky jako **Cr, V, W, Mo**, a další. Tyto slitiny dosahují po vytvrzení pevnost až 1150MPa. Používají se pro součásti motorů, v leteckém a farmaceutickém průmyslu.

4.18. Speciální slitiny neželezných kovů

Tyto slitiny slouží k výrobě kluzných ložisek jejich kluzné části – pro výrobu výstelek, vylévání pánví kluzných ložisek a k výrobě pájek.

Pro výrobu kluzných ložisek rozeznáváme dvě skupiny slitin. Jsou to **slitiny těžkotavitelné a slitiny lehkotavitelné**.

Mezi slitiny **těžkotavitelné** patří bronzы cínové, červené, olověné a další – užívají se pro výrobu kluzných ložisek, ale mají ještě další.

Slitiny užívané pouze pro výrobu kluzných ložisek nazýváme kompozice. Kompozice jsou slitiny neželezných kovů, kde základním kovem je buď cín, nebo olovo. Kompozice jsou slitiny s velmi dobrým součinitelem smykového tření.

Kompozice cínové – základním kovem cín (85%) a další kovy, jako antimon Sb, do 10% a Cu.

Kompozice olověné – olovo (75%) a dále antimon do 15% a cín do 10%.

Pájky jsou slitiny neželezných kovů využívané jako přídavný materiál při pájení materiálu.

Podle teploty tavení dělíme pájení i pájky.

- Pájky s teplotou tavení **do 500 °C** jsou **pájky měkké**.
- Pájky s teplotou tavení **nad 500 °C** zhruba do **950 °C** jsou **pájky tvrdé**.

Měkké pájky jsou slitiny cínu s olovem, cínu se zinkem případně mědí, olova s mědí a stříbrem atd.

- Sn40Pb s teplotou tavení 185-225 °C
- Sn70Zn s teplotou tavení 200-320 °C.

Pájky tvrdé

- **mosazné** k pájení ocelí, mědi **stříbrné** k pájení mědi, mosazi, bronzů a k pájení spojů v elektrotechnice.
- Ag45CuZn s teplotou tavení 680-740 °C
- Ag28CuZnMnNi s teplotou tavení 680-860 °C.

5. PRÁŠKOVÁ METALURGIE

5.1. Historie

- Zhotovování nástrojů a zbraní např. u některých afrických kmenů.
- Zpracování spočívalo v rozmělnění rudy a zbavení hlušiny.
- Po smíšení s dřevěným uhlím se směs ve zvláštní peci přeměnila na železnou houbu.
- Po opětovném rozmělnění a vyčistění se prášek spékal v uzavřené hliněné nádobě.
- 19. stol. – v Rusku ražení peněz z platiny (použita platinová houba)

5.2. Proč prášková metalurgie?

- Prášková metalurgie umožňuje získat výrobky se speciálními vlastnostmi (např. žárupevností, oteruvzdorností apod.).
- Výrobky s vysokou pórovitostí a výrobky tvořící přechod ke kompozitům, které jinými technologiemi nemůžeme vyrobit.
- Prášková metalurgie zahrnuje jednak výrobu prášků, jednak jejich zhutňování (obvykle lisováním a slinováním) do konstrukčních materiálů nebo součástí.

5.3. Prášky

- **Prášky** jsou charakterizovány fyzikálními (distribuce a velikost částic, tvar a morfologie povrchu, tvrdost, atd.) a technologickými vlastnostmi (lisovatelnost, tekutost, sytný objem, atd.).
- Podle způsobu výroby mohou mít prášky různý tvar (kulový, lístkový, nepravidelný, zrna zaoblená, atd.).
- Prášky je možno vyrábět fyzikálními, fyzikálně-chemickými, chemickými nebo elektrochemickými způsoby.
- Z ekonomického hlediska má největší vliv cena prášku.
- Vhodně upravené prášky se zpravidla lisují do požadovaného tvaru a získaný tvar se následně zpracovává spékáním, aby se dosáhlo potřebných fyzikálních a mechanických vlastností.

- Největší výhodou práškové technologie je vysoké využití kovu při nižší spotřebě energie, snížené pracnosti a nákladech, čistota prostředí. Další výhodou je isotropie mechanických vlastností.

Výrobní postup technologie práškové metalurgie

Výrobní postup se skládá z několika etap:

- výroba prášků
- úprava prášků
- lisování prášků
- spékání čili slinování výlisků z prášků
- konečná úprava výrobků.

5.4. Užítí technologie práškové metalurgie

Tato technologie se používá v případech, kdy

- není možno dané materiály zpracovat jinou technologií, jako například v případech spojování komponent, které se spolu neslévají
- je tato technologie hospodárnější než jiné, jako například při zpracování materiálů s vysokým bodem tavení nebo při sériové výrobě drobných součástí
- tato technologie dává lepší výsledky než technologie ostatní, jako například při požadavku vysoké čistoty materiálů, požadavku dosažení přesného chemického složení nebo potřeby dosažení zvláštní struktury (poréznost).

Nevýhodami práškové metalurgie jsou

- menší hutnost a tím i pevnost a houževnatost vyrobených materiálů
- vysoké náklady na nástroje.

Zhutňování kovových prášků

- Velikost stykové plochy částic práškového kovu bude záviset na stupni a kvalitě vazby mezi jednotlivými částicemi – stupni konsolidace.
- U plně konsolidovaného tělesa se dotýkají všechny práškové částice navzájem po celém povrchu (stejně jako u tuhých těles), ale v sypkém stavu je velikost kontaktů jen velmi malou částí celkového povrchu všech částic.
- Hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností budou vzrůstat v závislosti na zvětšování kontaktních ploch částic.

- Stupeň konsolidace **práškového tělesa** zpravidla zvyšuje působením tlakových sil nebo spékáním, ve většině případů oběma způsoby.

Lisování

- Těleso z práškových kovů má objem jednak pevných částic a jednak mezer (pórů).
- Objem mezer je závislý na způsobu lisování a velikosti lisovacího tlaku. Při stlačování prášku v dutině nástroje působí vnější (mezi práškovým materiálem a stěnou dutiny lisovací formy) i vnitřní tření (tření mezi částicemi).
- Tření, které je možné snížit použitím mazadel, má za následek nerovnoměrné rozdělení hustoty ve výlisku.
- Podle směru působícího tlaku rozdělujeme lisování na jednosměrné, obousměrné a izostatické.
- Při jednostranném lisování je nejvyšší hustota v oblasti pod lisovníkem, při oboustranném lisování je nejnižší hustota ve středu výlisku.
- Při izostatickém lisování je prakticky odstraněno vnější tření a výrobek vykazuje rovnoměrnou hustotu.
- Následuje spékání.
- Ke snížení pórovitosti se může lisování i spékání vícekrát opakovat.
- Lisovací tlaky se pohybují od 50 do 1800 MPa a pórovitost je 50 až 8 %.
- K lisování se používají mechanické nebo hydraulické lisy.

Válcování

Válcováním se vyrábějí polotovary ve formě pásků, tyčí, plechů, apod. Prášek je plynule dodáván ze zásobníku do mezery mezi válci, kde je třecími silami unášen a tlakem válců stlačován. Princip je znázorněn na obrázku. Poměrně pevný a ohebný pás je veden do spékací pece. Podle požadované hustoty se může válcování i spékání vícekrát opakovat. Vhodnou konstrukcí násypky je možno vyrábět i vícevrstvé polotovary.

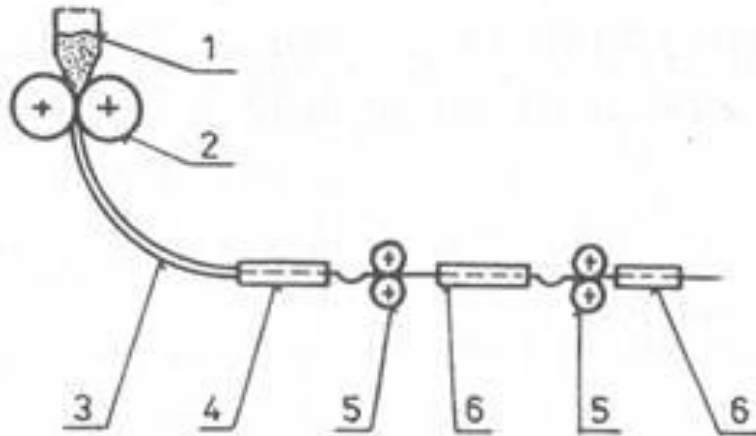


Schéma výroby polotovaru válcováním práškových kovů

1 – násypka, 2 – dvouválec, 3 – skluz, 4 – spékací pec, 5 – dvouválec, 6 – žíhací pec

Kování

- Kování se dosahuje lepších mechanických vlastností a odstraňuje se zbytková pórovitost.
- Výchozím polotovarem může být buď vylisek, který se spéká v průběhu ohřevu na tvářecí teplotu nebo spěkaný polotovar, který je možné kovat přímo po vyjmutí ze spékací pece.
- Volné kování se používá hlavně pro velké polotovary, zápustkové kování pro výrobky s vysokými nároky na přesnost. Volí se poměrně malé deformace.

5.5. Speciální způsoby konsolidace

- Lisováním za tepla, které spojuje operaci lisování se spékáním, lze dosáhnout i plné hustoty vylisků.
- Prášek je lisován poměrně nízkým tlakem při teplotách až 2500 °C v ochranné atmosféře, vakuu nebo vzduchu.
- Izostatické lisování za studena je vhodné pro tvarově složité výrobky. Vibračně zhutnělý prášek je uzavřen v tenkém elastickém obalu a vystaven postupnému hydrostatickému tlaku kapaliny až 600 MPa.
- Výhodou je vysoká hustota a izotropní vlastnosti. Izostatické lisování za tepla je vhodné pro dosažení bezporézního stavu.

- Prášek v kovovém obalu je vystaven působení tlaku a teploty. Jako tlakové médium se používá argon.
- Protlačování za tepla se používá hlavně pro AL, Mg, Ag, apod.
- Ve speciálních případech je možné použít hydroimpulzivní lisování, lisování v magnetickém poli, explozivní lisování, vstřikování, přetlačování, lití, lití se zmrazením, technologie velmi vysokých tlaků, apod.

Spékání

- Spékání je způsob tepelného zpracování zhutněných částic nebo práškového výlisku, při kterém se z pórovitého výlisku stává souvislé těleso za působení teploty a případně tlaku.
- Zvětšuje se celková plocha styku částic, snižuje se pórovitost, zvyšují se fyzikální a mechanické vlastnosti, dochází k objemovému smrštění.
- Teplota spékání se volí v rozmezí 0,6 až 0,9 teploty tavení.
- Spékání může probíhat za normálního tlaku nebo pod tlakem vnějších sil. Spékání se provádí v elektrických pecích s ochrannou atmosférou redukčních či inertních plynů nebo vakuu. Nejdůležitějšími parametry spékání jsou teplota, doba spékání a ochranné prostředí.

6. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

6.1. Účel a základní rozdělení způsobů tepelného zpracování

Správným využitím vlastností kovů a slitin lze např. snížit hmotnost stroje nebo strojního zařízení, anebo použít materiály levnější. Obojí vede ke zvýšení ekonomie výroby.

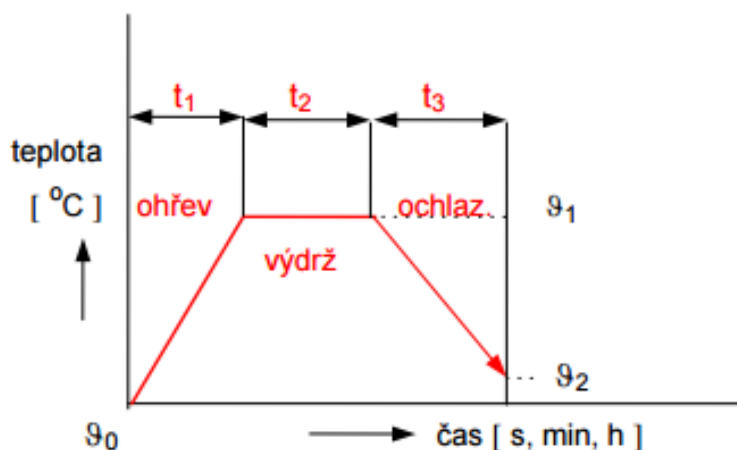
Tepelným zpracováním rozumíme všechny postupy, při nichž předmět nebo materiál v tuhém stavu záměrně ohříváme a ochlazujeme určitým způsobem tak, aby získal požadované vlastnosti.

Jedná se vždy o souhrn následujících operací:

- ohřev na určitou teplotu
- výdrž na této teplotě
- ochlazování určitou rychlostí na danou teplotu

V některých případech mohou tyto operace probíhat vícekrát za sebou za různých podmínek.

Rychlost ohřevu nebo ochlazování c se udává při vysokých rychlostech ve $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, při malých rychlostech ve $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, popř. $^{\circ}\text{C}/\text{h}$.



I když obě rychlosti nejsou zákonitě rovnoměrné (závisí na okamžitém teplotním spádu), přesto většinou uvažujeme průměrné rychlosti, které vypočítáme:

a) při ohřevu

$$c = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{t_1}$$

b) při ochlazování

$$c = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{t_3}$$

kde: ϑ_0 je výchozí teplota před ohřevem

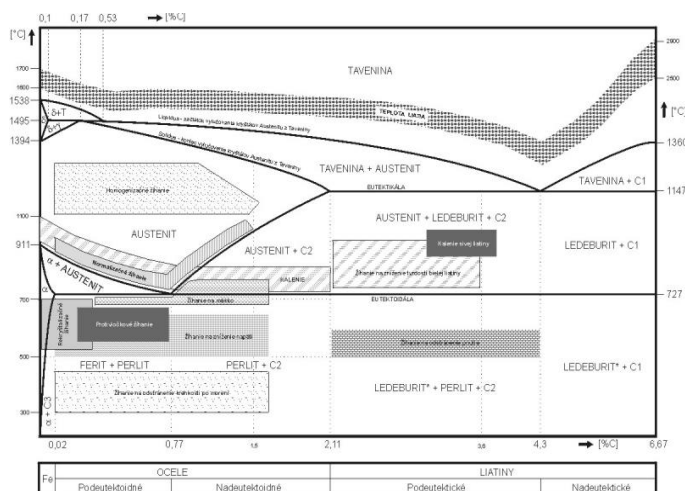
ϑ_1 je teplota ohřevu

ϑ_2 je požadovaná teplota na konci ochlazování

Tepelným zpracováním ovlivňujeme mechanické vlastnosti, jako pevnost, tvrdost, tažnost, vrubovou houževnatost, odolnost proti opotřebení atd. V mnoha případech je s tím spojena změna struktury, proto se vyžaduje znalost rovnovážných diagramů a fázových změn.

Protože dosažení rovnovážného stavu při fázových změnách v tuhém stavu je zcela určováno difuzí, bude pro výsledek tepelného zpracování rozhodující, jaký vliv bude mít průběh difúze. Průběh difúze je ovlivněn jednak teplotou a jednak výdrží (dobou) na určité teplotě, při níž ještě difúze může probíhat. Právě způsob ovlivnění difúze dělí tepelné zpracování do dvou základních skupin:

- Způsoby tepelného zpracování, které difúzi spíše podporují anebo ji brzdí jen málo. Tyto způsoby nazýváme všeobecně žíháním.
- Způsoby tepelného zpracování, které difúzi podstatně brzdí nebo ji úplně zamezují. Přitom nerovnováha stavu slitiny je zpravidla tím větší, čím větší je rychlost ochlazování. Hlavním představitelem je kalení.



6.2. Žíhání

Ve většině případů bývá cílem žíhání:

- snížení zbytkových napětí,
- odstranění následků předcházejícího mechanického zpracování,
- zlepšení technologických vlastností (tvařitelnosti za studena, obrobitelnosti),
- zmenšení chemické a strukturní heterogenity.

Rozhodujícím technologickým parametrem žíhání je teplota a doba výdrže na teplotě, když ochlazování bývá obvykle velmi pomalé. Žíhací teploty jednotlivých postupů vyplývají z rovnovážného diagramu Fe-Fe₃C .

Podle teploty lze rozdělit všechny druhy žíhání na:

Žíhání na snížení zbytkových napětí. Účelem je snížení vnitřních napětí v materiálu při tuhnutí odlitku, chladnutí po tváření za tepla i po tváření za studena, ale i v povrchových vrstvách po třískovém obrábění. Při teplotě žíhání 450 až 650 °C je mez kluzu tak nízká, že se zbytková napětí mohou vyrovnat lokální plastickou deformací. Podle velikosti, tvaru a materiálu součásti je nutná 2 až 10 h výdrž na teplotě s pomalým ochlazováním, aby se předešlo vzniku nových zbytkových napětí.

Žíhání rekrytalizační. Jedná se zpravidla o mezioperační žíhání při tváření nízkouhlíkové oceli za studena, které odstraňuje vzniklé zpevnění a regeneruje tvárné vlastnosti. Děje se tak ohřevem na teplotu do oblasti rekrytalizace 550 až 700 °C a vydrží 1 až 5 hodin. Tímto postupem lze i významně měnit tvar a velikost zrna, zpravidla se žíhá za účelem zjemnění zrna.

Žíhání na měkko.

Dochází při něm ke sferoidizaci eutektoidních karbidických částic v důsledku povrchového napětí. Změnou lamelárního perlitu na zrnitý lze u nízkouhlíkových ocelí zlepšit tvařitelnost za studena a u ocelí s obsahem nad 0,4 % C obrobitelnost. Rovněž lze žíháním připravit vhodnou výchozí strukturu pro následné kalení, zejména u eutektoidních a nadeutektoidních ocelí. Rovnoměrné rozložení zrnitých karbidů v základní feritické hmotě ulehčuje následující austenitizaci a zlepšuje celkové vlastnosti po zakalení, čehož se úspěšně využívá zejména u ložiskových ocelí. Teplota žíhání je blízká eutektoidní teplotě, případně se pohybuje v jejím okolí.

Zvýšení teploty nad Ac₁ resp. její kolísání kolem této hodnoty usnadňuje a urychluje sbalování karbidických částic. Doba žíhání je různá podle druhu oceli i předchozího tepelného zpracování a pohybuje se od 4 h u uhlíkových ocelí po 16 h pro vysokolegované oceli. Žíhání je ukončeno pozvolným ochlazováním v peci.

Žihání protivločkové.

Aplikuje se při nadkritickém obsahu vodíku v oceli, kdy dochází k náchylnosti tvorby vnitřních trhlin - vloček. Vločkám lze zabránit dlouhodobým ohřevem (až desítky hodin) při teplotách 650 až 750 °C, kdy v důsledku podstatného zvýšení difuzivity vodíku ve feritu se jeho obsah sníží pod kritickou hodnotu. Žihání je nutné vykonat bezprostředně po odlévání nebo tváření za tepla (před ochlazením na teplotu okolí), kdy přítomný vodík ještě nevytváří molekuly, které už nejsou schopny difúze a tím

i vytěsnění z oceli. Po dlouhodobé výdrži na žihací teplotě je vhodné ochlazovat alespoň do 500 °C velmi pomalu.

Žihání pro odstranění křehkosti po moření. Při odstraňování okují mořením dochází u ocelových součástí k difúzi vodíku do kovu a následné vodíkové křehkosti. Protože při moření je pronikání vodíku do oceli omezené, dá se vodík jednoduše vytěsnit žiháním při teplotě 300 °C až 500 °C po dobu 1 až 4 h

Žihání normalizační

Patří mezi nejužívanější postupy tepelného zpracování oceli, protože zajišťuje jemnozrnnou a rovnoměrnou strukturu po odlévání, tváření či dlouhodobém žihání za vysoké teploty. Klasický postup se užívá výhradně u podeutektoidních ocelí, kdy při teplotě 30 až 50 °C nad AC3 a výdrži 1 až 4 h, vzniká jemná rovnoměrná austenitická struktura, která po ochlazení na vzduchu transformuje na jemnozrnnou feriticko-perlitickou strukturu s příznivými mechanickými vlastnostmi. Výjimečně se aplikuje u nadeutektoidních ocelí k získání lepší redistribuce částic sekundárního cementitu, který se v důsledku pomalého ochlazování z dokovacích teplot vyloučil ve formě síťovin na hranicích zrn. Ohřevem nad Ac_m se karbidické síťoviny rozpustí v austenitu a rychlejším ochlazováním se zabrání jeho opětovnému vyloučení na hranicích zrn.

Žihání homogenizační.

Snižuje nehomogenitu chemického složení tlustostěnných odlitků, ve kterých došlo k výrazné dendritické segregaci. Dlouhodobým žiháním v rozsahu teplot 1 100 až 1 200 °C (obvykle asi 200 °C pod solidem) dochází dostatečnou difúzní rychlostí uhlíku i dalších prvků ke snížení odmišení a nežádoucí heterogenity. Výdrž na teplotě se řídí velikostí a tloušťkou odlitku a většinou vede k výraznému zhrubnutí zrna, což vyžaduje následné normalizační žihání.

Žihání rozpouštěcí.

Tímto žiháním se rozpouštějí karbidy, nitridy i další intermetalické fáze, což zvyšuje homogenitu austenitu a jeho nasycení legujícími prvky. Nejčastěji se využívá u vysokolegovaných austenitických ocelí, kde žiháním při teplotách 1 050 až 1 150 °C s

následným rychlým ochlazením, které zabrání opětovnému vyloučení fází, se získá čistě austenitická struktura.

Žihání izotermické.

Spojením tří druhů žihání - normalizačního, na měkko, na snížení vnitřních napětí, do jedné operace lze získat homogennější jemnozrnnou strukturu se zlepšenou obrobitelností. Postup začíná normalizačním žiháním, po kterém se ocel ochladí proudem vzduchu na teplotu 700 až 650 °C, při které v izotermické prodlevě probíhá rozpad metastabilního austenitu na jemný sferoidizovaný perlit. Výdrž na teplotě vyplývá ze znalosti diagramu IRA pro příslušnou ocel. Nakonec následuje ochlazení vzduchem. Proces je zvláště vhodný pro některé střednělegované oceli, které se obtížně žihají na měkko.

6.3. Kalení

Cílem kalení je zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti opotřebení oceli. Tyto vlastnosti nabízejí částečně nebo úplně nerovnovážné struktury, které lze získat ochlazením austenitu nadkritickou rychlostí. Podle fáze, která převládá ve výsledné struktuře, rozlišujeme kalení martenzitické nebo kalení bainitické.

Důležitým parametrem procesu je kalicí teplota, při které je ocel před ochlazením austenitizována. Správná kalicí teplota je u podeutektoidních ocelí asi 30 až 50 °C nad AC3, kde zajišťuje homogenní strukturu austenitu před rozpadem. U nadeutektoidních ocelí stačí ohřev jen asi 20 °C nad AC1, kdy výchozí strukturu tvoří heterogenní směs austenitu a nerozpuštěných karbidů, které po zakalení přispívají ke zvýšení odolnosti proti opotřebení. Nedodržení správné kalicí teploty vede ke zvýšení nežádoucích fází v konečné struktuře (ferit) nebo ke zhrubnutí zrna, což může vést až ke vzniku kalických trhlin.

Kalitelnost je schopnost oceli dosahovat ochlazením austenitizační teploty nerovnovážného stavu.

Zakalitelnost je dána maximální tvrdostí po kalení a závisí na obsahu uhlíku rozpuštěného v austenitu. Výsledná tvrdost je ovlivněna i výší kalicí teploty zvláště u nadeutektoidních ocelí.

Dělení kalení

- **Kalení základní** (obyčejné) je nejjednodušší, teplota klesá plynule pod M_S , kdy začne transformace austenitu na martenzit. Vznikají velká zbytková napětí, maximální deformace a proto není vhodné pro kalení tvarově složitých výrobků.

- **Kalení lomené** začíná ochlazováním nadkritickou rychlostí k potlačení perlitické přeměny (např. ve vodě) a pokračuje ochlazením v mírnějším prostředí (např. olej). Tím se zmenšuje rozdíl teplot na povrchu a ve středu výrobku a snižuje se tepelná napětí.
- **Kalení izotermické** je podobné termálnímu kalení s tím, že prodleva trvá v oblasti bainitické přeměny až do ukončení izotermického rozpadu austenitu. Tepelná i strukturální napětí jsou minimální, není nebezpečí deformace a vzniku trhlin. Nejstarším způsobem izotermického kalení je patentování, používané při výrobě drátů s vysokou pevností.
- **Kalení termální** dovoluje vyrovnat teploty v celém objemu kaleného předmětu, snížit tepelná napětí a zmenšit deformaci díky prodlevě nad teplotou M_S . *Ochlazení v intervalu martensitické přeměny probíhá zpravidla na vzduchu. Postup je vhodný pro tenkostěnné výrobky složitých tvarů ocelí, které mají bainitickou oblast dostatečně posunutou vpravo.*
- **Kalení zrn zmrázováním** vyžaduje dochlazení ve zmrazo-vacích lázních (ochlazovaných tekutým dusíkem), které má zabránit stabilizaci ZA (zbytkový austenit) u ocelí s nízkými teplotami M_S a M_f . *Aplikuje se na výrobky pracující při záporných teplotách, u měřicích nástrojů a u ocelí na ložiska, kde se vyžaduje tvarová stabilita.*
- **Kalení nepřetržité bainitické** se provádí u ocelí s bainitickou oblastí významně posunutou doleva. Výslednou strukturu tvoří směs bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu.

6.4. Popouštění

Popouštění je způsob tepelného zpracování ocelí, který zpravidla následuje bezprostředně po kalení. Ohřevem zakalené oceli na teploty nepřevyšující AC_1 dochází k rozpadu martenzitu a k přeměně zbytkového austenitu. Změny struktury a z nich vyplývající změny mechanických vlastností závisí především na výši propouštěcí teploty. Z technologického hlediska existuje:

- **popouštění při nízkých teplotách (do 300 až 350 °C), které snižuje zbytková napětí po kalení, zmenšuje obsah ZA a stabilizuje rozměry,**
- **popouštění při vyšších teplotách (nad 450 °C), při kterém dochází k úplnému rozpadu martenzitu, což se projevuje znatelným poklesem tvrdosti a pevnosti, ale také růstem plasticity a houževnatosti.**