

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2013/2014

Jan KAŠPAR

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2341R001 Konstrukce průmyslové techniky

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Optimalizace výběru materiálu z hlediska technologie výroby

Autor: **Jan KAŠPAR**  
Vedoucí práce: **Ing. Ivana MAZÍNOVÁ**

Akademický rok 2013/2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KAŠPAR**  
Osobní číslo: **S12B0191P**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **Konstrukce průmyslové techniky**  
Název tématu: **Optimalizace výběru materiálu z hlediska technologie výroby**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Prostudujte vedoucím práce předložené zdroje a přehledně zpracujte výběr materiálů z hlediska technologie výroby. K danému tématu vypracujte případovou studii.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod, cíl práce
2. Jednotlivé kapitoly
3. Případová studie
4. Shrnutí práce (závěr)

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford :  
Butterworth-Heinemann, 2011**

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ivana Mazínová**  
Katedra konstruování strojů  
Datum zadání bakalářské práce: **23. září 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí své bakalářské práce Ing. Ivaně Mazínové za odborné vedení a trpělivý přístup, který mi v průběhu psaní této práce poskytovala.

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Kašpar	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2341R001 „Konstrukce průmyslové techniky“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Mazínová	Jméno Ivana	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtně- te
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace výběru materiálu z hlediska technologie výroby.		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	54	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	54	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	x
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářské práce s názvem „Optimalizace výběru materiálu z hlediska technologie výroby“ krátce představuje proces výroby, jeho úskalí a poukazuje na provázanost volby materiálu a vhodné technologie výroby. Jedná se o obousměrný proces, kdy výběr vhodné technologie výroby přímo závisí na výběru materiálu a naopak. V praktické části je řešena případová studie, kdy se za pomoci CES softwaru vybírá vhodná výrobní technologie pro izolátor zapalovací svíčky, a tím demonstruje proces výběru vhodného materiálu/technologie výroby asistovaný počítačem.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>výroba, výrobní proces, materiál, CES software, optimalizace</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Kašpar	Name Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>	23-35-8 “Transport and handling machinery“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Mazínová	Name Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLÓMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Optimalization of material selection based on processing.		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	54	<b>TEXT PART</b>	54	<b>GRAPHICAL PART</b>	x
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The Bachelor Thesis titled „Optimalization of material selection based on processing“ shortly deals with the design itself and problems connected with it. It also shows that the choice of material is deeply interconnected with the choice of designing process. It is a two-way process when the choice of a suitable material affects the choice of designing process, and vice versa. The practical part is based on a case study. The process of finding a suitable material and/or designing process is assisted by CES program.
<b>KEY WORDS</b>	design, designing proces, material, CES (Computer Engineering Selector) software, optimalization



# Obsah

1. Úvod .....	5
2. Výroba .....	6
3. Procesy výroby a jejich výběr .....	8
3.1 Klasifikace výrobních procesů .....	9
3.1.1 Rozšiřující podtřídy skupiny tváření .....	10
3.1.2 Rozšíření skupiny spojování .....	12
3.2 Tvářecí procesy .....	12
3.2.1 Lití .....	12
3.2.2 Deformační procesy .....	14
3.2.3 Práškové metody .....	15
3.2.4 Výroba kompozitů .....	17
3.3 Spojovací procesy .....	21
3.4 Dokončovací procesy .....	22
3.4.1 Dokončovací procesy pro zlepšení technických vlastností .....	22
3.4.2 Dokončovací procesy, které se zaměřují na estetickou stránku výrobku .....	23
4. Výrobní proces a vlastnosti výrobku .....	24
5. Systematický výběr výrobního procesu .....	28
5.1 Strategie výběru .....	28
5.1.1 Překlad .....	29
5.1.2 Screening (testování) .....	29
5.1.3 Hodnocení .....	30
5.1.4 Dokumentace .....	30
5.2 Zavádění strategie .....	30
5.2.1 Kompatibilita materiálu a výrobního procesu .....	30
5.2.2 Kompatibilita výrobního procesu a tvaru .....	31
5.2.3 Tvářecí procesy: Hmotnost a tloušťka jednotlivých sekcí .....	32
5.2.3.1 Fyzická/fyzikální omezení velikosti a tloušťky části .....	34
5.2.3.2 Tolerance a drsnost .....	36
5.2.4 Spojování – Kompatibilita materiálů .....	38
5.2.4.1 Geometrie spoje a modus zatížení .....	39
5.2.4.2 Sekundární funkce spoje .....	39
5.2.5 Povrchová úprava – kompatibilita materiálu .....	39
5.2.5.1 Účel povrchové úpravy .....	39
5.2.6 Sekundární kompatibility .....	40
5.3 Hodnocení: výrobní náklady .....	40
5.3.1 Dodržovat standardy .....	40
5.3.2 Jednoduchost .....	40
5.3.3 Díly, které se dají snadno a rychle komplementovat .....	41

5.3.4	Nespecifikovat více výkonů, než je nezbytně nutné.....	41
5.4	Ekonomická hlediska pro výběr .....	41
5.4.1	Ekonomicky výhodná velikost várky .....	42
5.4.2	Vytvoření modelu nákladů .....	42
5.4.3	Technické vypracování modelu výrobních nákladů.....	45
5.5	Proces výběru výrobního procesu asistovaný počítačem .....	45
6.	Případová studie .....	47
6.1	Výběr procesu výroby izolátoru zapalovací svíčky asistovaný počítačovým programem 47	
6.2	Jednotlivé kroky pro výběr procesu výroby zapalovací svíčky v programu CES 2009. 47	
6.2.1	Vstupní požadavky .....	47
6.2.2	Výběr .....	49
7.	Závěr.....	57
8.	Použitá literatura.....	58

## Přehled použitých zkratek a symbolů

Použitá zkratka	Název
CAD	Computer-aided design
CES	Computer Engineering Selector
$T_m$	Bod tání
T	Teplota
HIP	Hot isostatic pressing
BMC	Bulk molding compound
SMC	Sheet molding compound
RPS	Rapid prototyping systems
FDM	Fused deposition modeling
BPM	Ballistic partije manufacture
SLA	Stereo-lithography
SGC	Solid grand curing
SLS	Selected laser sintering
EDM	Electro-discharge machining
$t$	tloušťka
DFA	Design for assembly
E	Modul pružnosti
$K_{1c}$	Lomová pevnost
$\epsilon_f$	Prodloužení
kg	kilogram
$\sigma_y$	Napětí na mezi kluzu

RMS	Root-mean-square
TiN	Nitrid Titanu
PIM	Powder injection molding
mm	Milimetry
T	Tolerance
R	Drsnost

## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 2-1 Schéma návrhu výroby .....	6
Obr. 2-2 Vliv nástrojů výroby a výběru materiálu na výrobní proces.....	7
Obr. 2-3 Volba procesu výroby je závislá na materiálu a tvaRU .....	8
Obr. 3-1 Taxonomie výrobních procesů.....	10
Obr. 3-2 Taxonomie výrobních procesů, kde je více rozvinuta rodina výrobního procesu tváření .....	11
Obr. 3-3 Taxonomie výrobních procesů, s částečně rozšířenými a více popsány rodinami spojování a dokončování .....	11
Obr. 3-4 Výrobní proces lití .....	13
Obr. 3-5 Formovací procesy.....	14
Obr. 3-6 Deformační procesy .....	15
Obr. 3-7 Prášková metoda.....	16
Obr. 3-8 Kompozitní metody tváření .....	18
Obr. 3-9 Rapid prototyping .....	19
Obr. 3-10 Obrábění.....	20
Obr. 3-11 Spojování operací .....	22
Obr. 3-12 Dokončovací procesy k ochraně a zlepšení vlastností .....	23
Obr. 3-13 Dokončovací procesy k zlepšení vzhledu .....	24
Obr. 4-1 Graf vlastností materiálu.....	25
Obr. 4-2 Pevnost a houževnatost.....	25
Tabulka 4-1 Kovové slitiny s typickými aplikacemi.....	26
Obr. 4-3 Slitina Mědi - pokles tažnosti. ....	26
Obr. 4-4 Tepelná vodivost a pevnost hliníkových slitin.....	27
Obr. 4-5 Nejlepší materiál pro výrobu kabelu s vysokou pevností a malým odporem. ....	27
Obr. 4-6 Změny v lomové houževnatosti a mezi kluzu pro nelegované oceli. ....	28
Obr. 5-1 Strategie výběru materiálu. Čtyři základní kroky .....	28
Obr. 5-2 Vývojový diagram pro strategii výběru výrobního procesu .....	29
Tabulka 5-1 Požadavky na výrobní proces .....	29
Obr. 5-3 Materiálové matrice – výrobní proces v závislosti na volbě materiálu.....	31
Obr. 5-4 Informace o kompatibilitě materiálu.....	32
Obr. 5-6 Výrobní proces v závislosti na hmotnosti.....	33
Obr. 5-7 Výrobní proces v závislosti na tloušťce sekce .....	34
Obr. 5-8 Tok tekutého kovu nebo polymeru .....	35
Obr. 5-9 Vliv tření a poměru stran na kování.....	35
Obr. 5-10 Poměr výšky k šířce při kování.....	36
Tabulka 5-2 Úrovně dokončování. ....	37

Obr. 5-11 Řez plochy znázorňující její nerovný povrch .....	37
Obr. 5-12 Graf výběru výrobního procesu v závislosti na toleranci. ....	38
Obr. 5-13 Graf výběru výrobního procesu v závislosti na drsnosti povrchu.....	38
Obr. 5-14 Společná geometrie.....	39
Tabulka 5-3 Funkce povrchových úprav .....	40
Obr. 5-15 Náklady na ostření tužky .....	42
Obr. 5-16 Graf závislosti výběru výrobního procesu v závislosti na velikosti ekonomické várky. ....	44
Obr. 5-17 Vstupy pro model nákladů.....	44
Tabulka 5-5 Symboly, definice a jednotky.....	45
Obr. 5-18 Příklad záznamu pro výrobní proces vstřikování plastů v CES softwaru.....	46
Tab. 6-1 Základní požadavky na komponentu .....	48
Obr. 6-1 Nový projekt v CES.....	49
Obr. 6-2 Zadávání požadovaných parametrů na výrobek v CES. ....	50
Obr. 6-3 Kritéria pro výběr výrobního procesu v CES. ....	51
Obr. 6-4 Tolerance v závislosti na Primárních výrobních procesech.....	51
Obr. 6-5 Výběr materiálu v CES. ....	52
Obr. 6-6 Výběr materiálu podle hmotnosti.....	52
Obr. 6-7 Výběr na základě velikost várky.....	51
Obr. 6-8 Výsledek – zobrazení výrobních procesů, které odpovídají zadaným parametrům.....	53
Obr. 6-9 První navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – CVD.....	54
Obr. 6-10 Druhý navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – Die pressing and sintering. ....	55
Obr. 6-11 Třetí navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – Die injection molding.....	56

## 1. Úvod

Žijeme v moderní době, obklopeni produkty vyrobenými z různorodých materiálů. Materiál však musí projít řadou náročných procesů, než se dostane k rukám spotřebitele ve své finální podobě. Výběr vhodného materiálu hraje při výrobě požadovaného produktu značnou roli. Nicméně není to jediný faktor, který je nutno brát v potaz. Výběr vhodného materiálu je totiž úzce spojen s dalšími faktory, především s požadavky na tvar produktu, jeho funkci a vhodnou technologii výrobního procesu.

Cílem této bakalářské práce je optimalizace výběru materiálu v konstrukčním procesu z hlediska technologie výroby.

V práci bude stručně představen výrobní proces z hlediska provázanosti jednotlivých kroků. Čtenář bude seznámen s jednotlivými technologiemi výroby v závislosti na zvoleném materiálu. V rámci případové studie bude poukázáno na možnosti moderní doby, kdy je možné proces výběru materiálu optimalizovat a nechat si pomoci s procesem výběru počítačem.

Bakalářská práce s tématem „Optimalizace výběru materiálu z hlediska technologie výroby“ bude rozdělena do dvou částí – teoretické a praktické. Praktickou část představuje několik kapitol. První z nich se bude stručně věnovat výrobě jako takové a zmíní několik zásadních kroků, kterými je nutné se při výrobě požadovaného produktu řídit.

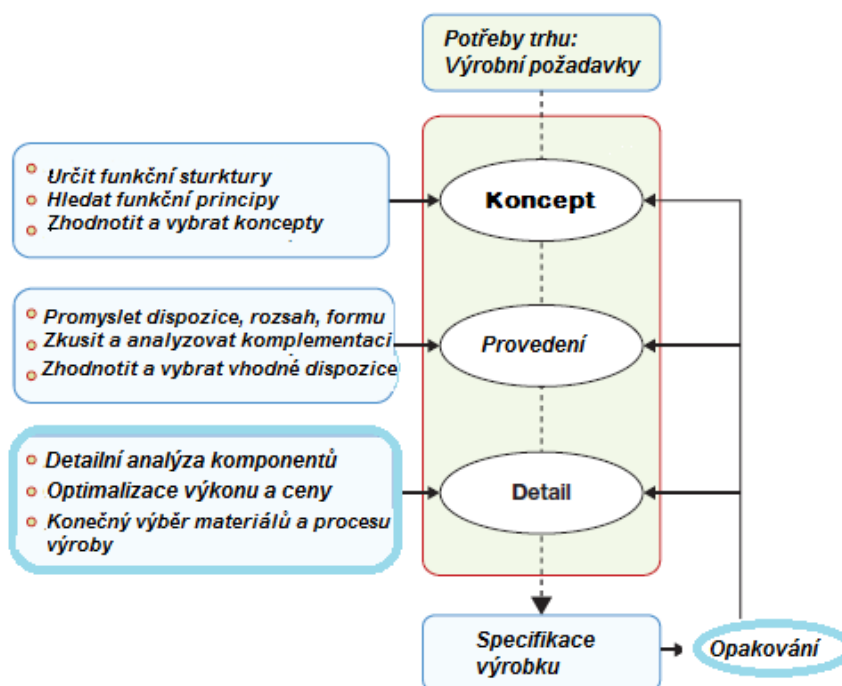
V další kapitole budou popsány a stručně charakterizovány vybrané výrobní procesy, s přihlédnutím k tomu, jaké materiály lze s jejich pomocí zpracovat. Budou zde rovněž zařazeny bližší informace o třech základních rodinách výrobních procesů – tváření, spojování a dokončování.

Čtvrtá kapitola bakalářské práce bude stručně pojednávat o tom, jak dokáží požadavky na vlastnosti výrobku ovlivnit výběr vhodné technologie výroby. V páté a zároveň závěrečné kapitole teoretické části práce bude představen systematický výběr technologie výrobního procesu v závislosti na několika faktorech – především kompatibilitě se zvoleným materiálem a například i na ekonomickém hledisku. Ve stejné kapitole budou krátce představena možnost využití počítačového softwaru CES pro asistenci s výběrem vhodné technologie výroby.

Praktickou část práce bude představovat poslední kapitola, která bude věnována případové studii. Text práce bude doplněn o několik obrázků a tabulek pro lepší ilustraci. Jako primární zdroj informací bude využita kniha *Materials Selection in Mechanical Design* od Michaela F. Ashbyho.

## 2. Výroba

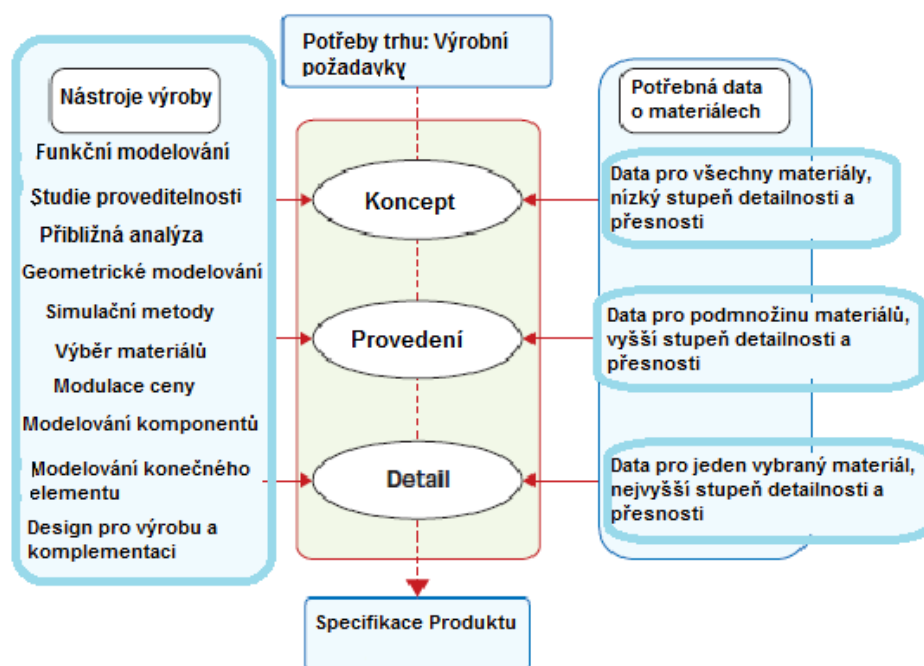
Průmyslová výroba je proces, který v sobě skrývá řadu vzájemně provázaných kroků. Prvotní impulz dává spotřebitel, který vyžaduje výrobu určitého produktu, odpovídajícího jeho požadavkům. Následuje krok, v němž je vypracován návrh projektu na výrobu požadovaného produktu. Ukáže-li se, že je návrh projektu uskutečnitelný, můžeme přistoupit k fázi provedení. Tato fáze zahrnuje výběr pracovních postupů, rozhoduje se o velikosti a tvaru, dochází k prvotním odhadům požadavků na výkon a celkové náklady. Jsou-li výsledky prvotních odhadů uspokojivé, můžeme vypracovat detailní návrh výroby. V této fázi dochází k optimalizaci výrobního procesu, kompletní analýze kritických parametrů, přípravě detailního návrhu výkresů (obvykle za pomoci programu CAD), upřesňují se požadavky na toleranci, přesnost, komplementaci, a dokončovací procesy (viz. obr. 2-1). [1][2]



**Obr. 2-1 Schéma návrhu výroby.** Výrobní proces začíná identifikací potřeb trhu/spotřebitele. Ty pak dále specifikují požadavky na výrobu prostřednictvím konceptu/návrhu, provedení a detailní analýzy. Přípravná fáze je zakončena závěrečnou specifikací produktu. Tyto kroky se následně opakují při každém výrobním procesu.

Výběr materiálu vstupuje na scénu v každém z těchto kroků a jednotlivých fázích. Nicméně v každé z nich s jinou důležitostí. Ve fázi přípravy jsou všechny materiály a výrobní procesy možnými kandidáty. V této fázi požadujeme především rychlý přístup k potřebným informacím pro širokou škálu materiálů, aniž bychom vyžadovali jejich větší přesnost. V další fázi, kdy dochází k zúžení prvotního výběru a přechodu na fázi provedení však již potřebujeme více detailní a přesnější informace. Jedině tak můžeme dojít ke konečnému výběru vhodných materiálů a výrobních procesů pro výrobu požadovaného produktu. Pro hodnocení konečných kandidátů pak potřebujeme informace nejvyšší kvality (viz. obr. 2-2).[1][2]

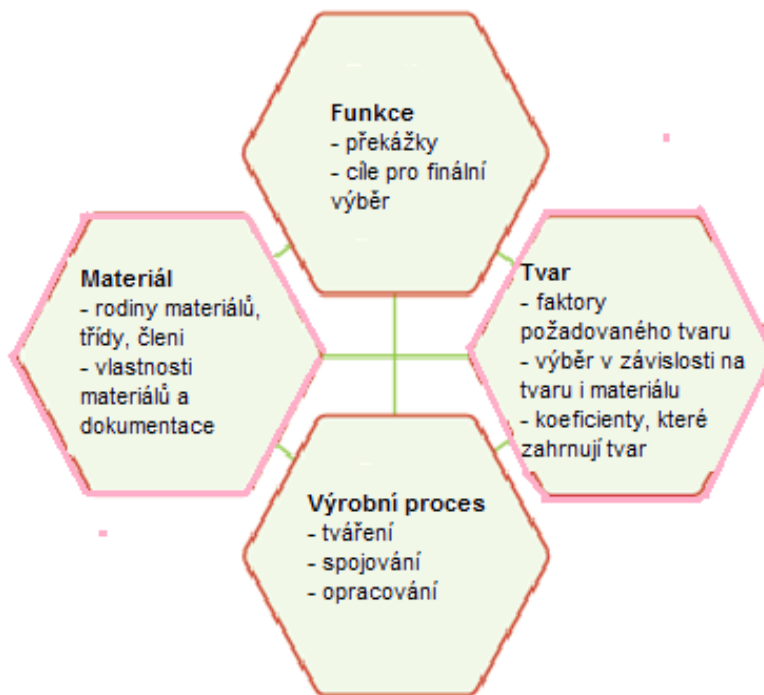




**Obr. 2-2 Vliv nástrojů výroby a výběru materiálu na výrobní proces. Informace o materiálech jsou nezbytné ve všech fázích výroby, ale liší se množstvím detailů a přesností. Opakování je součástí každého výrobního procesu.**

Existuje mnoho cest, jak se k vytouženým informacím na všech výše zmíněných úrovních dostat. Práce s těmito informacemi si vyžaduje pečlivý přístup, přičemž bychom se měli maximálně řídit požadavky na výrobu a zohlednit různorodost nabídky vhodných materiálů a uvědomit si úzkou spojitost mezi materiálem, tvarem, výrobním procesem, díky němuž tohoto tvaru dosáhneme, a funkcí, kterou by měl konečný produkt vykonávat. Rovněž bychom měli být schopni v rámci rozhodovacího procesu rychlé zpětné vazby a je-li to nezbytné vrátit se o krok zpět a vydat se jinou cestou. V dnešní době samozřejmě existuje mnoho nástrojů, které dokáží při nesnadném výběru a rozhodování pomoci. V této bakalářské práci budeme věnovat hlavní pozornost především počítačovému programu CES, a to v rámci případové studie (viz. kapitola 4).

Výběr materiálu je úzce spojen s vhodně zvoleným procesem výběru a s požadavky na tvar výsledného produktu. Abychom docílili požadovaného tvaru, materiál musí projít výrobním procesem, který v sobě zahrnuje tvářecí procesy (např. lití, kování, atd.), procesem odstraňování přebytečného materiálu (např. soustružení, vrtání, atd.), spojovacími procesy (např. sváření) a dokončovacími procesy (např. natírání). Funkce, materiál, tvar a výrobní proces jsou tak vzájemně propojeny (viz. obr. 2-3). Funkce finálního výrobku, jak již bylo zmíněno, ovlivňuje výběr materiálu. Materiál pak ovlivňuje výběr vhodného výrobního procesu skrze vlastnosti zvoleného materiálu. Na základě vlastností materiálu ho totiž můžeme zpracovat pomocí některého z výrobních procesů jako například litím, tepelným zpracováním, svářením a dalšími. Vybraný výrobní proces pak určuje jakého tvaru, velikosti, přesnosti, a samozřejmě ceny, můžeme docílit. Tyto vztahy jsou vzájemné – specifika tvaru omezují výběr volby materiálu a výrobního procesu, stejně jako specifika výrobního procesu omezují výběr materiálu a možné tvary. Čím více je výroba sofistikovaná, tím omezenější budou specifika a tím větší bude vzájemná interakce mezi jednotlivými kroky výroby. [1] [3]



**Obr. 2-3 Volba procesu výroby je závislá na materiálu a tvaru – atributy výrobního procesu jsou používány jako kritéria pro výběr. [1]**

Vzájemný vztah mezi funkcí, materiálem, tvarem a výrobním procesem tak představuje středobod výběru vhodného materiálu pro výrobu.

### 3. Procesy výroby a jejich výběr

Výrobní proces je proces, při němž se materiál tváří, spojuje a dokončuje. Existují stovky metod, které používáme při výrobním procesu. Jako příklad můžeme uvést odlévání, vstřikování, tavné svařování a elektrolytické leštění. Výběr výrobního procesu pro danou komponentu záleží na materiálu, z něhož bude tato komponenta vyrobena, na její velikosti, tvaru, požadované přesnosti a na počtu vyrobených komponent. Ve zkratce, záleží na výrobních požadavcích. [1] [11]

Abychom mohli proces výroby vybrat, musíme jej nejdříve klasifikovat. Podrobnou klasifikaci se zabývá kapitola 3.1. Tato klasifikace je dále rozvinuta v dalších podkapitolách, které se zabývají výrobními rodinami a jejich atributy. Dále také popisují, jaké materiály lze použít, jakých tvarů lze docílit a s jakou přesností mohou být komponenty vyrobeny. [1][11]

Proces výroby má dvojí funkci. Primární a nejvíce viditelnou funkcí jsou výrobní procesy tváření, spojování a dokončování. Méně viditelnou funkcí je pak funkce kontroly vlastností. Například vlastnosti kovů se dají zlepšit válcováním a kování; ocel se taví, aby se zlepšila její pevnost a tvrdost; polymery můžeme natahovat/tvarovat/tepelně upravovat a zlepšit tak jejich modul pružnosti; a keramika je lisována při vysokých teplotách, aby se zvýšila její pevnost. Vlastnosti jednotlivých procesů výroby a jejich vztahy mezi sebou jsou blíže specifikovány dále v bakalářské práci. [1][11]

Výběr procesu výroby – nalezení nejlepší shody mezi vlastnostmi výrobního procesu a požadavky na finální produkt – je předmět diskutovaný v podkapitole 4. Při používání metod popsaných v těchto podkapitolách bychom neměli zapomínat na to, že materiál, tvar a výroba spolu úzce souvisí, jak jsme již zmínili v předchozí kapitole. [1][11]

Vlastnosti materiálu a požadovaný tvar omezují výběr výrobního procesu. Kujné materiály mohou být kovány, válcovány a natahovány; ty, které jsou křehké, musí být tvarovány za použití práškových metod. Materiály, které se taví při nízkých teplotách na tekutiny s nízkou viskozitou, se dají lit. Požadovaný tvar rovněž ovlivňuje výběr výrobního procesu. Tenké tvary můžeme vyrobit jednoduše

pomocí válcování nebo tahem, ale nikoliv tvářením. Duté tvary nemůžeme vyrobit kováním, ale můžeme jich docílit i za pomoci odlévání či tváření. [1]

Stejně tak ale procesem výroby ovlivňujeme i konečné vlastnosti výrobku. Válcování a kování mění tvrdost a pórovitost kovů; zahlazuje spoje, které vyrobené komponenty obsahují, čímž se zvyšuje jejich síla a kujnost. Tepelné tváření dovoluje manipulovat se silou, kujností, a tvrdostí. Kompozity (nebo také kompozitní materiály) nelze takovým termínem nazvat až do doby, kdy jsou vyrobeny. Před jejich výrobou představují pouhou směsici polymerů a svazků vláken. [1] [11]

Stejně jako jiné aspekty výroby, i výběr samotného procesu výroby je opakující se procedura. První opakování dává jednu nebo více možných cest, kterými se při procesu výroby lze vydat. Proces výroby pak musí být znovu promyšlen a co nejvíce adaptován, aby se tak zjednodušila výroba a vybrala nejslibnější cesta k vytouženému cíli. Finální výběr procesu výroby pak závisí na výrobních nákladech, vyžadujících použití nákladových modelů a na dokumentaci – výrobní zásady a směrnice, historie konkrétního případu, a příklady výrobních procesů použitých při výrobě podobných produktů. Patříčná dokumentace rovněž pomáhá při vypořádání se s párováním výrobního procesu a vlastnostmi materiálů. [1] [11]

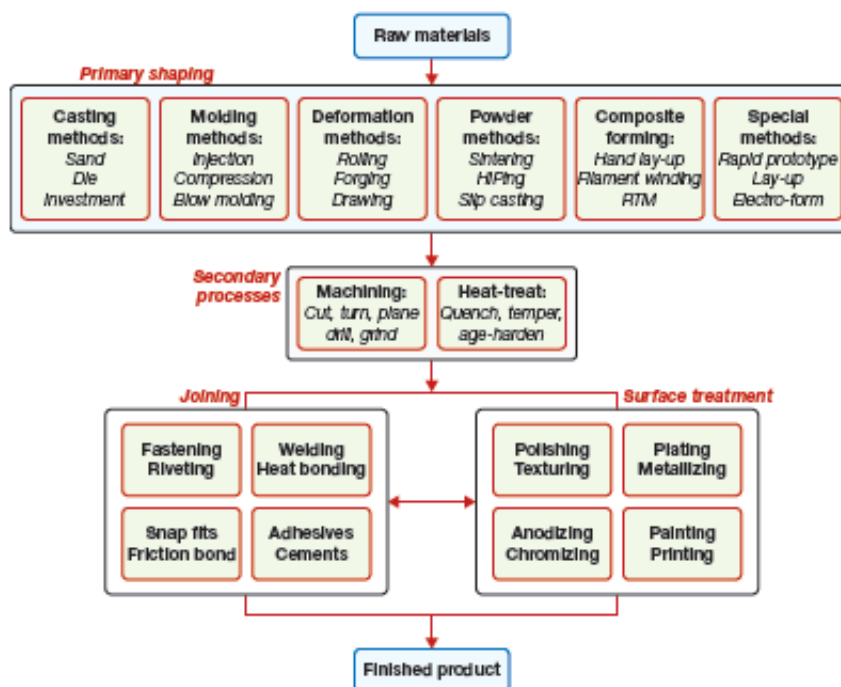
### 3.1 Klasifikace výrobních procesů

Výrobní procesy mohou být klasifikovány několika způsoby, jak je níže ukázáno v obrázku 3-1.

Při primárním tváření vzniká prvotní tvar. První řada ukazuje seznam šesti tříd primárních tvářecích procesů: *odlévání*, *tvarování*, *deformace*, *práškové metody*, *metody pro výrobu kompozitů*, a speciální metody jako například „*rapid prototyping*“ (= rychlá výroba modelů pomocí 3D tiskárny). Sekundární procesy pak modifikují tvar nebo vlastnosti. V obrázku jsou popsány jako „*obrábění*“, což přidává další vlastnosti již vytvarovanému tělu; a „*tepelné zpracování*“, což zdokonaluje povrch nebo celkové vlastnosti. Za těmito procesy následují spojování, opracování povrchu a dokončování. [1]

Obrázek 3-1 také představuje vývojový diagram, který znázorňuje jednotlivé cesty v rámci výrobního procesu. Tento diagram slouží předně jako ilustrace a neměli bychom ho brát jako jednotný úzus, vzhledem k tomu, že se pořadí jednotlivých kroků může lišit v závislosti na potřebách výroby. Nicméně z diagramu můžeme vyvodit základní poznatek, a to existenci tří širě specifikovaných výrobních rodin – tváření, spojování a dokončování. Atributy jednotlivých skupin se od sebe výrazně liší až takovým způsobem, že abychom o nich mohli posbírat a utřídit data, musíme k nim přistupovat odděleně. [1]

Abychom mohli výrobní procesy analyzovat detailněji, potřebujeme klasifikaci v podobě hierarchie. Obrázek 3-2 zobrazuje jednu z jejích částí. Jak jsme již zmínili, výrobní proces má tři základní rodiny: tváření, spojování a dokončování. Na obrázku 3-2 je skupina tváření dále rozšířena o podtřídy – *odlévání*, *deformace*, *tvarování*, a tak dále. Jedna z těchto podtříd – tváření – je dále podrozdělena do několika větví, abychom viděli její zástupce, jako jsou *rotační tváření* a *vstřikování*, a jiné. Každý z těchto procesů má své vlastní atributy, které se týkají materiálů, které při nich můžeme použít, tvarů, které při nich můžeme docílit, jejich velikosti, přesnosti, a optimální velikosti jedné várky (počet jednotek, které dokážeme při tváření vyrobit s největší ekonomickou efektivitou). [1]

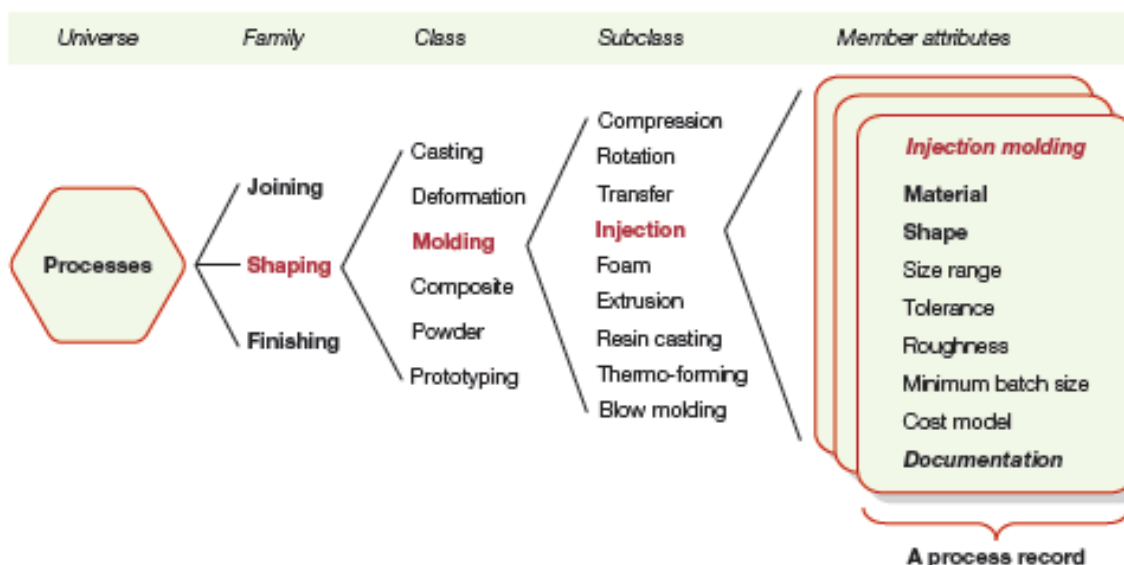


Obr. 3-1 Taxonomie výrobních procesů. První řádek obsahuje rodinu výrobních procesů, dále jsou zobrazeny sekundární procesy - obrábění a tepelné zpracování, rodiny spojování a dokončovacích procesů (povrchových úprav). [1]

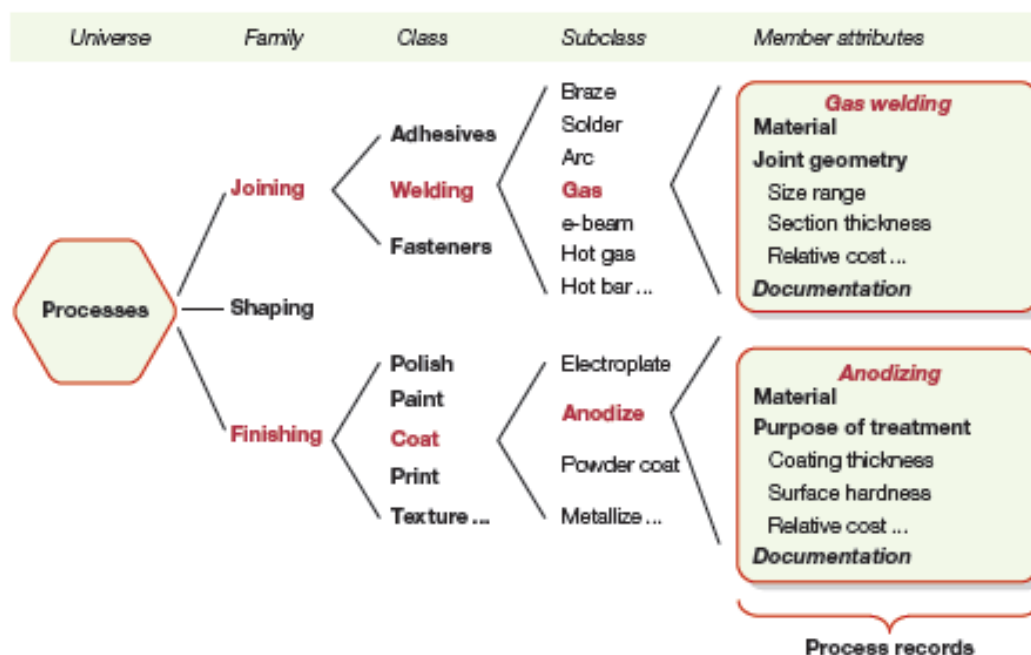
### 3.1.1 Rozšiřující podtřídy skupiny tváření

Rozšířením podtřídy odlévání stejnou měrou jakou jsme rozšířili skupinu tváření, docílíme následujícího výsledku:

1. sand casting - lití do pískové formy
2. shaping-casting - odstředivé lití
3. die casting - tlakové lití
4. investment casting- lití na model



Obr. 3-2 Taxonomie výrobních procesů, kde je více rozvinuta rodina výrobního procesu tváření. Každý člen rodiny je charakterizován souborem vlastností. Výběr výrobního procesu pak spočívá v tom zvolit ty procesy, které odpovídají výrobním požadavkům. [1]



Obr. 3-3 Taxonomie výrobních procesů, s částečně rozšířenými a více popsány rodinami spojování a dokončování. [1]

Další dvě rodiny výrobního procesu jsou částečně rozšířeny na obrázku 3-3. Rodina spojování obsahuje tři další podtřídy – *lepení*, *svarování* a *šroubování*. Na tomto obrázku je jedna z těchto podtříd, jmenovitě *svarování*, dále rozšířena o několik členů. Stejně jako tomu bylo výše, i členové této podtřídy mají své vlastní specifické vlastnosti. V první řadě jsou to materiály, které mohou spojovat. [1]

Od tohoto místa dále se pak ale vlastnosti liší od těch zmiňovaných v případě tváření. V tomto případě je důležitým faktorem geometrie spoje a to, jakým způsobem bude zatížen. Stejně důležitými jsou také požadavky na to, zda-li může či nemůže spoj být rozdělen, zda-li má být vodotěsný, zda-li má vést elektřinu, a tomu podobné. [1]

Dolní část obrázku je věnována rozšíření rodiny dokončování. Je zde znázorněno několik podtříd, které tato skupina obsahuje. Jedna z nich – povrchová úprava – je zde představena blíže. Stejně jako v případě tváření a spojování, i povrchová úprava je závislá na druhu materiálu, který má být zpracován. Zbylé vlastnosti se však liší. Nejdůležitějším atributem pro povrchovou úpravu je účel vybraného procesu (použití za účelem ochrany, zpevnění povrchu, dekorace, atd.), následovaný vlastnostmi povrchové látky samotné. [1]

### **3.1.2 Rozšíření skupiny spojování**

Rozšířením skupiny spojování stejným způsobem jako jsme rozšířili skupinu tváření dostaneme následující výsledek:

- 1. Rivets and staples – Nýtování a svorkování**
- 2. Joining-fasteners – spojení sponou/šroubování**
- 3. Threaded fasteners – závitový spoj**
- 4. Sewing - šití**
- 5. Snap fits - patenty**

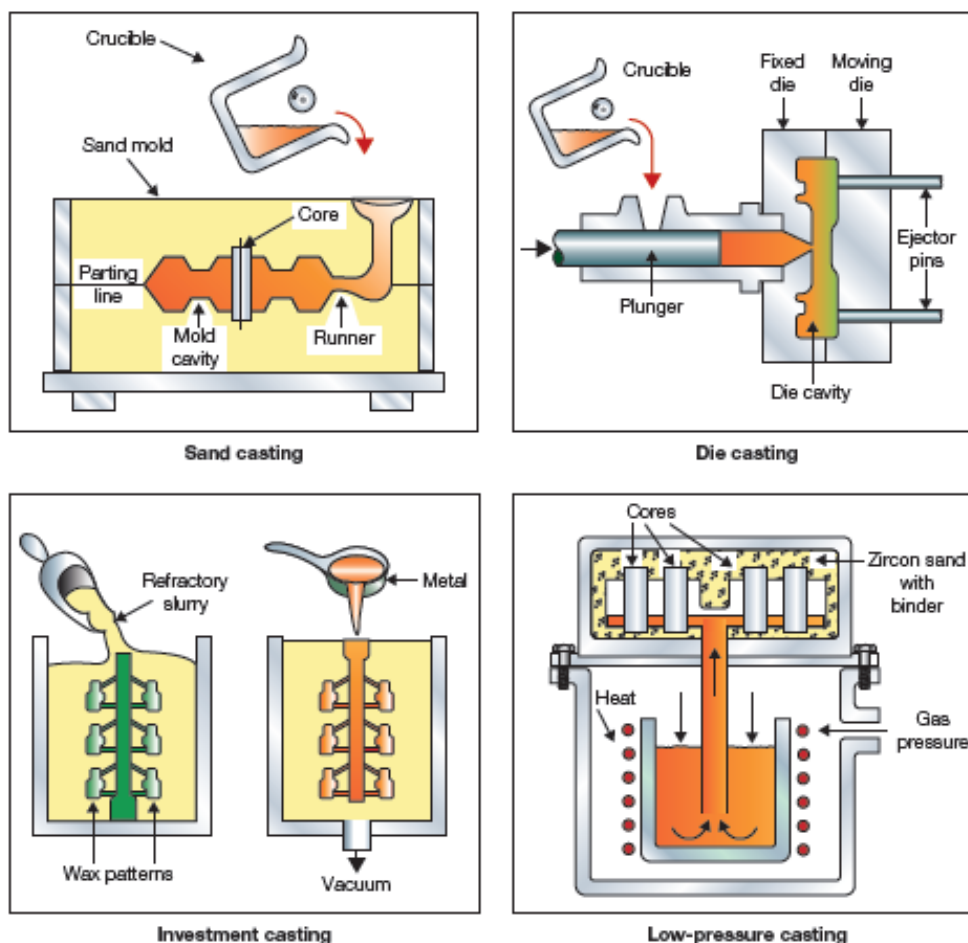
Po krátkém úvodním představení a klasifikaci procesů výroby se můžeme dále věnovat jednotlivým zástupcům. Následující charakteristika jednotlivých zástupců bude stručná, vzhledem k tomu, že detailní informace lze najít v celé řadě odborných publikací. [1]

## **3.2 Tvářecí procesy**

### **3.2.1 Lití**

V případě lití (obrázek 3-4) je tekutina lita nebo vtačena do formy, kde následně chlazením ztuhne. Lití se odlišuje od ostatních procesů nízkou viskozitou tekutiny, která vyplňuje formu tím, že využívá vlastní váhy a kopíruje stěny formy (stejně jako při lití za pomoci gravitace a lití na model). Sádrové formy pro jednorázové lití jsou levné, kovové formy pro tlakové lití několika dávek mohou být nákladné. Mezi těmito extrémy však existuje řada dalších metod lití – skořepinové lití, sádrový model, a tak dále. [1]

Tvary pro lití musí být navrženy tak, aby mohla tekutina snadno protéct všemi částmi formy a aby při postupném tuhnutí nevznikali sraženiny a dutiny tím, že se někde zachytí přebytečná tekutina. Kdykoliv je to jen možné, hustota jednotlivých částí výrobku musí být jednotná (hustota spojovaných částí by se neměla lišit o více než 2 faktory). Požadovaný tvar je navržen tak, aby se zkušební vzorek stejně jako finální odlitek dali snadno vyjmout z formy. Je-li to možné, složitým tvarům je lépe se vyhnout, protože při jejich výrobě dochází k tzv. „hot-tearing“ (popraskání výrobku a jemných fraktur, vzniklých tahem) vlivem postupného tuhnutí a scvrkání hmoty. Tolerance a povrchové úpravy pro komponenty vyrobené litím se liší. Existuje škála od těch horších - lití do sádrové formy, až po vynikající způsob pro dosažení maximální přesnosti za pomoci tavného lití.[1]

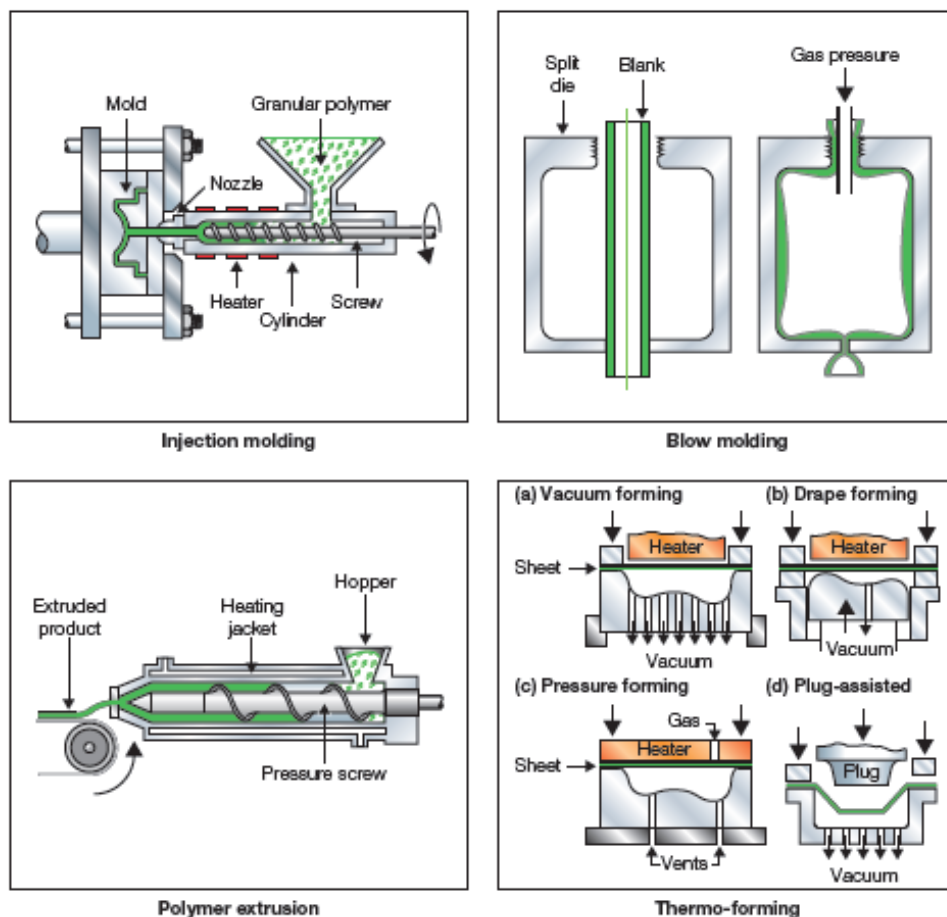


**Obr. 3-4 Výrobní proces liti.** Na obrázku jsou znázorněny jednotlivé postupy. Při odlévání do písku se tekutý kov nalije do rozdělené pískové formy. Při tlakovém liti je kapalina pod tlakem vtačena do kovové formy. Při liti na vytavitelný model je voskový model vložen do žáruvzdorného materiálu, tavením se dutina vyplňuje kovem. Při tlakovém liti je forma plněna spodem, což je lepší pro kontrolu tlaku a tok kovu do zápustky. [1]

Když se roztavený kov vlévá do formy, jeho průtok je turbulentní. Hmota vstřebává kyslík z povrchu formy a unáší s sebou nečistoty, čímž následně vznikají defekty na odlitku. Těmto defektům se předchází tím, že se forma plní zespodu tak, aby průtok formou byl laminární, poháněný vakuem nebo stlačeným vzduchem, jak je znázorněno na obrázku 3-4. [1]

Obrázek 3-5 zobrazuje formy, které jsou přizpůsobeny materiálům, které mají vysokou viskozitu, pokud jsou roztaveny, zejména se pak jedná o termoplasty a sklo. Žhavá, viskózní kapalina je vtačena nebo vstříknuta do tlakové formy pod značným tlakem, kde posléze vychladne a ztuhne. Forma musí vydržet opakované zatížení tlakem, teplotou a opotřebením, které vzniká oddělením a vyjmutím jednotlivých částí. Tyto vlastnosti činí takový proces výroby velmi nákladným. [1]

V této formě mohou být vyráběny i komplikovanější tvary, ale za cenu složitějšího tvaru samotné formy a stejně tak složitějšího způsobu vyjmutí odlitku. Formy pro termo-liti jsou naopak levné. Při různých variantách tohoto procesu se používá buď tlaku vzduchu, nebo vakua, které vtačí zahřátý polymerový plát do jednoduché formy (skládající se pouze z jednoho dílu). Vstříkování rovněž využívá tlaku vzduchu, aby se polymerový či skleněný plát rozšířil i do rozdělené vnější formy. [1]



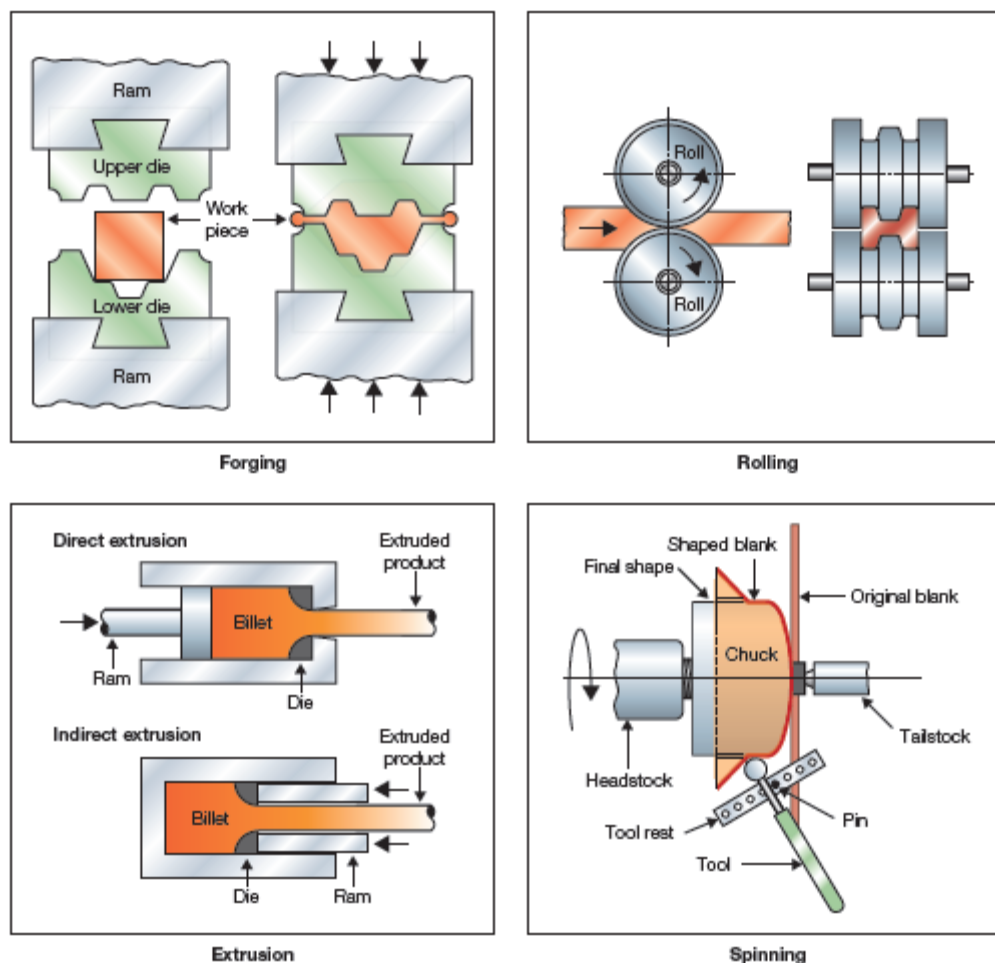
Obr. 3-5 Formovací procesy. [1]

Tento proces je rychlý, nízkonákladový a je vhodný pro masovou výrobu levných produktů, jako jsou například sklenice na mléko. Polymery, stejně jako kovy, mohou být vytlačeny. Všechny tyče, trubky a další prismatické součástky jsou vyráběny tímto způsobem.

### 3.2.2 Deformační procesy

Jak ukazuje obrázek 3-6, deformační procesy mohou být několika druhů – teplé, nebo studené – v závislosti na tavnému bodu ( $T_m$ ) zpracovávaného materiálu. Lisování, tepelné kování a tepelné válcování ( $T > 0.55 T_m$ ) má mnoho společného s litím i přesto, že zpracovávaný materiál je skutečně tuhý, nikoliv viskózní tekutina. Vysoká teplota snižuje pevnost hmoty a tím současně umožňuje rekrytalizaci, což oboje zároveň snižuje tlak při tváření. Tepelné zpracování ( $0.35 T_m < T < 0.55 T_m$ ) využívá tuhnutí pro zvětšení pevnosti konečného produktu, ale za cenu vyššího tlaku při tváření. [1]



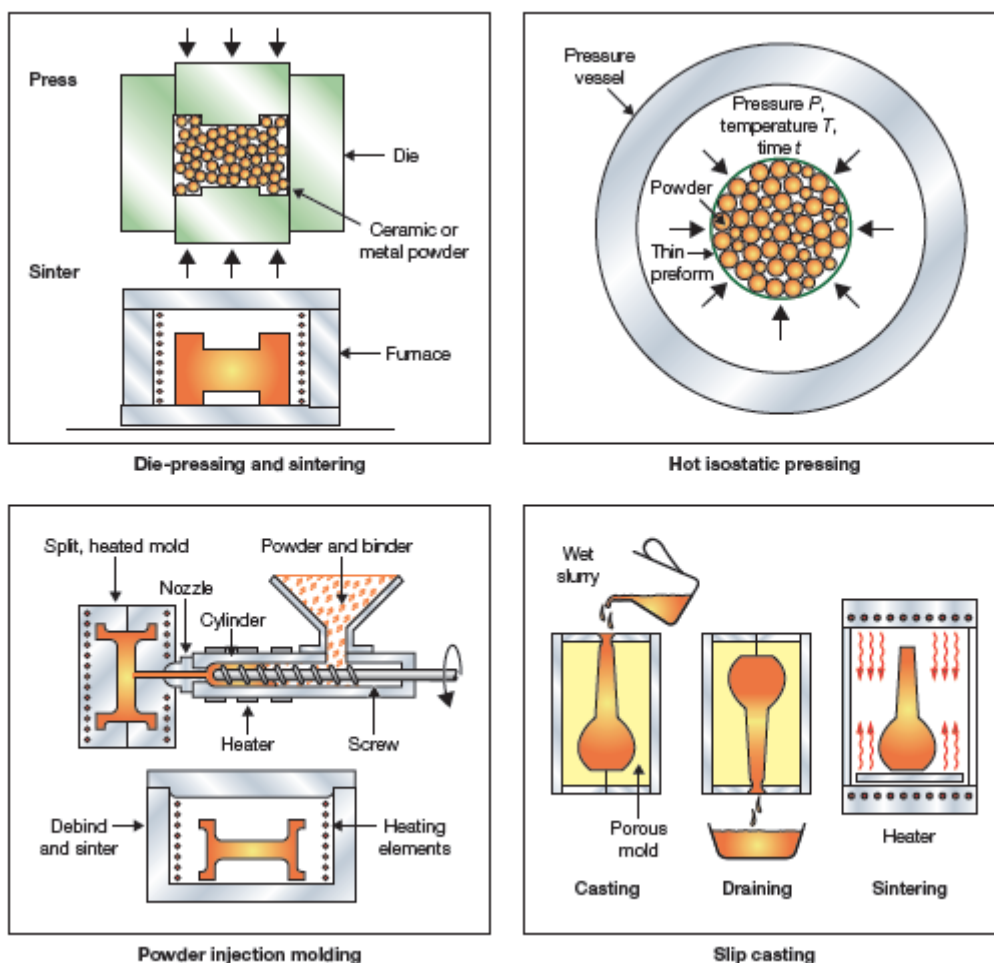


Obr. 3-6 Deformační procesy. [1]

Kované díly jsou vyráběny, abychom se vyhnuli náhlým změnám v hustotě a ostrému poloměru zakřivení, protože obě tyto vlastnosti způsobují velký nápor na jedno místo, čímž může dojít k roztržení nebo ohnutí, popřípadě zvlnění. Kování kovů za tepla dovoluje tvary do velké míry měnit, ale obecně tímto způsobem získáme nekvalitní povrch a nízkou toleranci kvůli oxidaci a deformaci. Kování za studena umožňuje velkou přesnost, ale tlak při tomto procesu je větší a deformace jsou omezeny zpevněním. [1]

### 3.2.3 Práškové metody

Obrázek 3-7 ukazuje, že práškovými metodami vytváříme tvary lisováním a potom slinováním jemných částic materiálu. Prášek může být stlačen za studena a potom slinován (zahřát až na  $0.8 T_m$ , abychom spojili rozptýl), může být také stlačen v rozehřáté formě („die pressing“), nebo uzavřený v tenké preformě, může být zahřát pod hydrostatickým tlakem („hot isostatic pressing“ nebo také „HIPing.“) [1]



Obr. 3-7 Prášková metoda. [1]

Kovy, které nelze odlévat, protože je můžeme tavit jen při velmi vysokých teplotách, nebo je nelze pro jejich pevnost deformovat, mohou být přetvořeny na prášek (za pomoci chemických metod) a potom v tomto stavu dále formovány a tvářeny. Tyto procesy však nejsou omezeny pouze pro použití „obtížných“ materiálů. Prakticky jakýkoliv materiál může být tvářen tím, že jej přeměníme na prášek a následně jej vystavíme tlaku a teplu. [1]

Práškové metody jsou nejčastěji používány, vyrábíme-li malé kovové části jako jsou řadicí páky či ložiska pro automobily a jiné části pro každodenní spotřebiče. Tyto metody jsou ekonomicky výhodné, co se týče využití materiálu, protože umožňují vyrobit požadované části z materiálů, které nemohou být zpracovány litím nebo nemohou být deformovány. Navíc lze těmito metodami vyrobit produkt, který potřebuje jen malé, či dokonce žádné dokončování.

Protože se tlak nešíří stejnoměrně skrze celou vrstvu prášku, neměla by délka lisované části přesáhnout 2,5-násobek jejího průměru. Jednotlivé části by měly být více či méně stejné, protože prášek se nese snadno přenáší kolem rohů. Stejně tak by tvar požadované části měl být co nejjednodušší a snadno vyjmutelný z formy. [1]

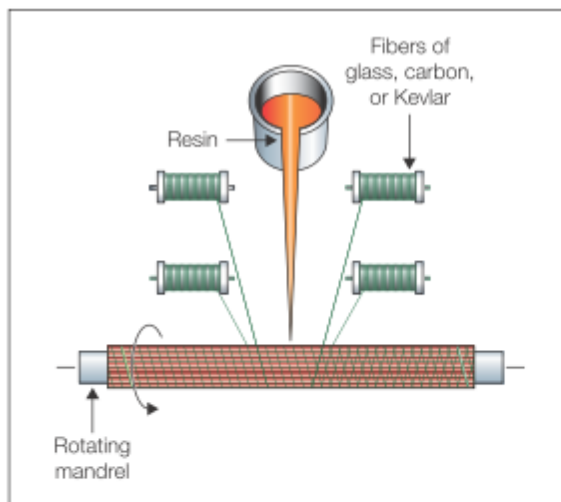
Keramika - materiál, který je obtížné tavit a nemožné deformovat, je běžně tvářen právě pomocí práškové metody. Při tzv. „slip casting“ se prášková směs vyrobena na vodní bázi vlije do sádrové formy. Stěna formy absorbuje vodu a tak vznikne odlitek, který je na povrchu polo-suchý. Přebytková tekutina odteče a vysušený odlitek se vypálí, abychom tak docílili keramické struktury. Například při „powder injection molding“ (vstřikování prášků - způsob, jakým se vyrábí například zapalovací svíčky) je keramický prášek stlačen běžným způsobem v polymerové formě a vytvářená část je následně vypálena. [1]

### 3.2.4 Výroba kompozitů

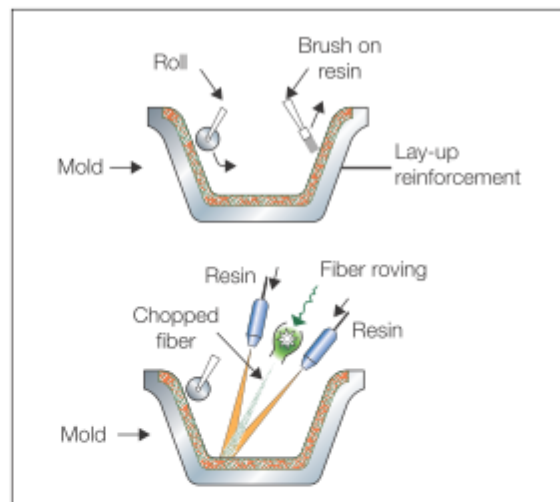
Na obrázku 3-8 je zobrazen proces pro výrobu kompozitů za pomoci polymerové matrice, zpevněné kontinuálními nebo sekanými vlákny. Velké komponenty se vyrábějí navíjením vlákna nebo vrstvením předem impregnovaných plátů uhlíku, skla nebo kevlarových vláken („pre-preg“) tak, abychom dosáhli požadované tloušťky a dalších vlastností. Některé kroky procesu výroby touto technologií mohou být zautomatizovány, nicméně i tak se jedná o jeden z pomalejších procesů a v případě, že se jedná o zásadní komponentu, je nezbytné provést rozsáhlé testování za pomoci ultrazvuku, abychom se ujistili, zda je komponenta skutečně celistvá. Vyššího stupně celistvosti dosáhneme při „vacuum-bag“ nebo „pressure-bag molding“, kdy dochází k vytlačení vzduchových bublin z matrice před její polymerací. Metody vrstvení jsou nejvhodnější pro výrobu nízkého počtu komponentů o vysoké kvalitě a při výrobě takzvaně „na míru“. [1]

Výrobky běžné spotřeby (jako například nárazníky aut či tenisové rakety) jsou vyráběny z kompozitů ze sekaných vláken. Směs („těsto“) pryskyřice a vláken se stlačí a zahřeje ve formě nebo je do lisovací formy vstříkována v podobě více tekuté směsi. V tomto případě je tok tekutiny důležitý pro spojení a nasměrování vláken, proto musí projektant úzce spolupracovat s výrobcem, aby bylo plně využito vlastností vybraného kompozitu. Zmíněná metoda je známá také jako „bulk molding compound“ – BMC nebo „sheet molding compound“ – SMC. [1]

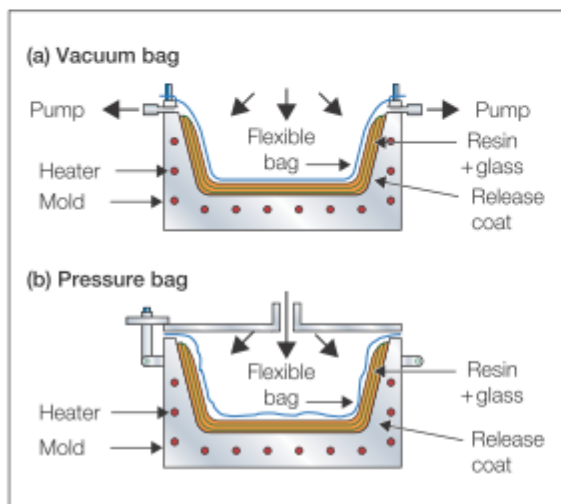
„Rapid prototyping systems“ (RPS) umožňují výrobu jednotlivých příkladů složitých tvarů na základě číselných dat vytvořených v CAD solid-modeling programu (obrázek 3-9). Motiv může být patrný již z vizualizace. Vzhled výrobku je vidět teprve s prvním prototypem. Může to být ten, s nímž vytváříme určitý vzor. Prototyp se pak stává předlohou, z níž vycházíme později při běžné výrobě. V případě složitějších procesů, při nichž dochází k montáži jednotlivých částí, může být prototypem postup prokázání správnosti složité geometrie tak, že se prokáže, že jednotlivé části lze skutečně spojit, a jsou dostupné. [1]



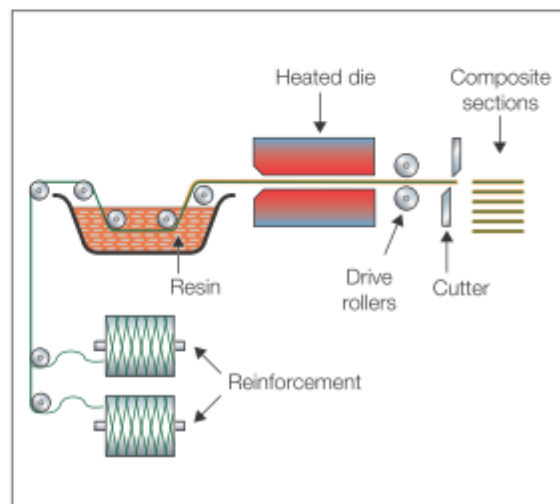
Filament winding



Hand and spray lay-up

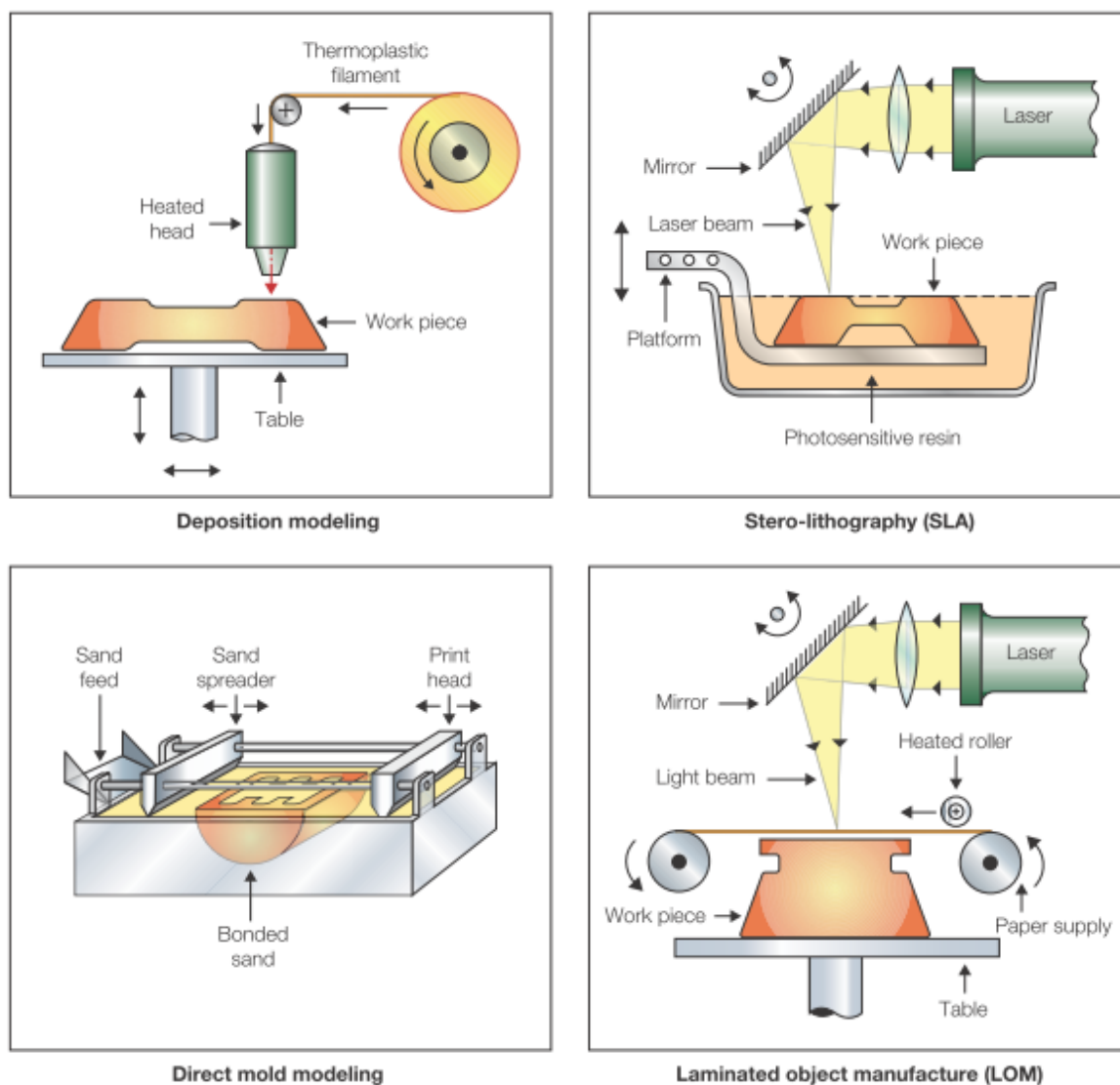


Vacuum and pressure-bag molding



Pultrusion

Obr. 3-8 Kompozitní metody tváření. [1]



Obr. 3-9 Rapid prototyping. [1]

Všechny RPS mohou vytvořit velkou škálu složitých tvarů s vnitřními dutinami, převisy a příčnými prvky, ačkoliv přesnost je v současné době omezena přinejlepším na  $\pm 0.3$  mm. Všechny RP metody vytvářejí tvary vrstvu po vrstvě, podobně jako trojrozměrný tisk, a jsou pomalé (obvyčejně od 4 do 40 hodin na jednotku). Existuje přinejmenším šest podtříd.

1. Tvar je vytvořen vtlačení termoplastu do jediné skenovací hlavy, která ji potom vyloučí jako tenkou vrstvu pasty („fused deposition modeling“ nebo FDM), jako malé kapičky („ballistic partije manufacture“, BPM), nebo ji vystříkne jako vytvarovanou hmotu podobně jako to dělají tiskárny při 3D tisku.

2. Laserem vyvolaná polymerizace monomeru citlivého na světlo („stereo-lithography“ nebo SLA). Po každém skenu je vyrobený kousek značně snížen, tak aby mohl nový monomer snadno pokrýt povrch.

3. Laserový výřez spojitelných papírových elementů. Každá vrstva, která je tenká jako vrstva papíru, je vyřezána laserovým paprskem a následně tepelně spojena s vrstvou předchozí.

4. Technologie založená na použití filtru – podobně jako u výroby mikrookruhů („solid grand curing“ nebo SGC). Řada několika filtrů umožní UV záření polymerizovat monomer citlivý na světlo a vytvářít požadovaný tvar vrstvu po vrstvě.

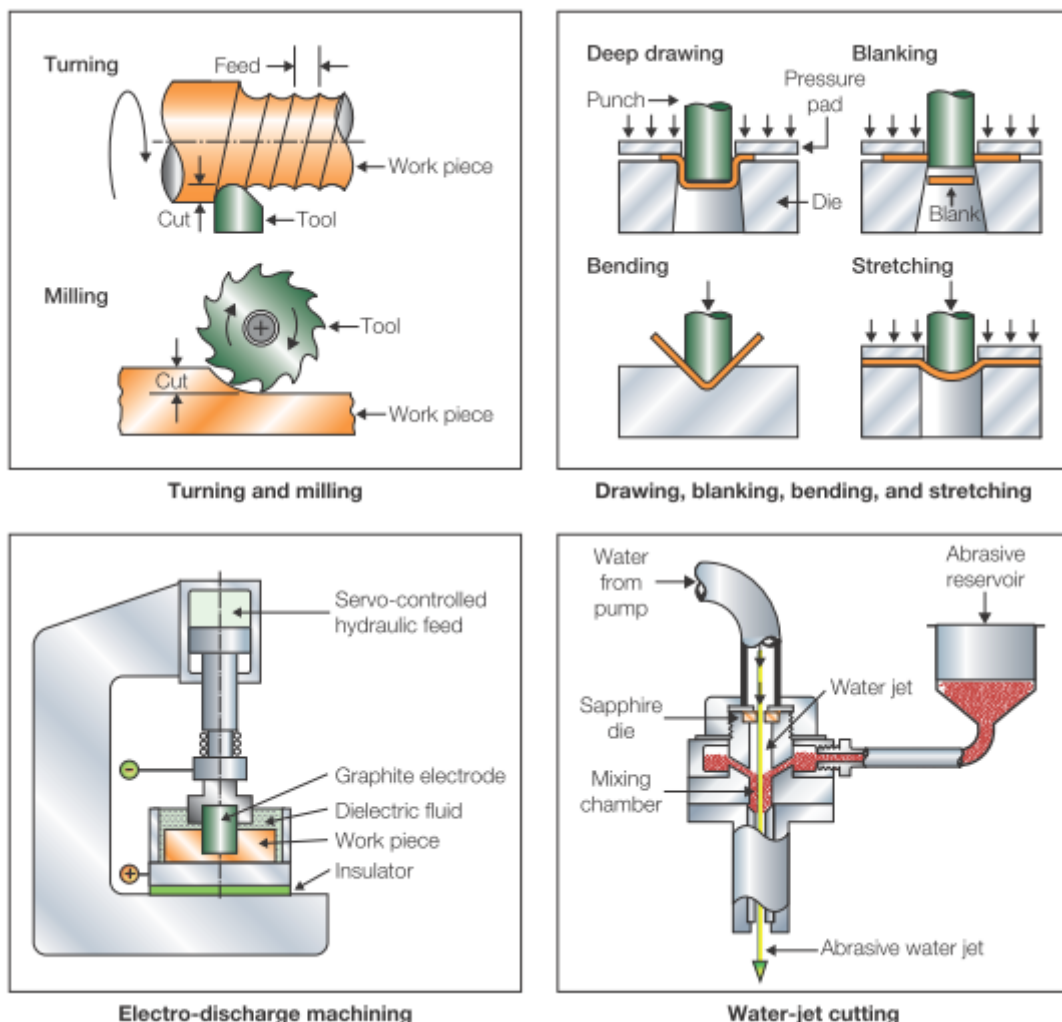
5. Třízené spékání (SLS, „selected laser sintering“) umožňuje výrobu komponentů přímo z termoplastů, kovů a keramiky. Laser, stejně jako při SLA, naskenuje vrstvu částic a speče tenkou

vrstvu na povrchu tam, kde ji zasáhne paprskem. Nová vrstva částic je rozprostřena na povrch a krok spékání je opakován, aby se tak vytvořil trojrozměrný prvek.

6. „Bonded sand holding“ (odlévání do poloztracené formy) umožňuje vytvořit velké a komplexní kovové součásti velice snadno. Při tomto procesu vstříkne hlava opatřená několika tryskami pojídlo do vrstvy písku, vytlačí a vytvoří tak tvar formy, podobně jako u „laser sintering“ (laserové spékání), ale mnohem rychleji. Po dokončení procesu je forma vyzdvihnuta a očištěna od přebytečného písku a použita v běžném procesu tváření. [1]

Aby byly užitečné, slouží prototypy vyrobené pomocí RPS jako matrice při odlévání silikonu, čímž umožňují vyrobení replik za použití pryskyřic nebo kovů (při vysoké teplotě).

Téměř všechny strojařské komponenty, ať už vyrobeny z kovů, polymerů nebo keramiky, jsou předmětem obrábění během procesu výroby (obrázek 3-10). Aby k tomu ale vůbec došlo, měli bychom při jejich navrhování myslet na to, aby takové komponenty mohli být snadno upevněny a upnuty, abychom dodrželi vysokou úroveň symetrie. Symetrické tvary totiž potřebují méně operací v případě obrábění. Kovy se značně liší ve své schopnosti být obráběny, v míře jednoduchosti výroby odštěpků, ve schopnosti vytvořit hladký povrch, a ve schopnosti vyrobít ekonomicky udržitelný nástroj (hodnoceno ve standardních testech). Jsou-li kovy obráběny pouze těžce, znamená to pro výrobce vyšší náklady. [1]



Obr. 3-10 Obrábění. [1]

Mnoho polymerů je lisováno do svého konečného tvaru. Pakliže je to nezbytné, mohou být obráběny, ale jejich nízké moduly pružnosti v tahu způsobují to, že se v průběhu obráběcího procesu elasticky prohýbají, což omezuje toleranci. Keramika a sklo mohou být broušeny a lapovány za vysoké tolerance a dokončovány (například v případě zrcadel u teleskopů). Existuje řada „speciálních“ obrá-

běžných metod, které mají zvláštní způsob aplikace včetně elektrojiskrového obrábění („electro-discharge machining“, EDM), ultrazvukové řezání, chemické leptání, řezání vodními a pískovými tryskami a elektronovými a laserovými paprsky. [1]

Tváření kovového plátu zahrnuje takové metody jako protlačování, ohýbání a tažení. Velikost děr do kovového plátu nemůže být svým průměrem větší, než je tloušťka plechu. Nejmenší poloměr, do něhož lze kovový plát ohýbat, jeho tvárnost/plasticita, je někdy vyjádřen jako násobek tloušťky plátu  $t$ : Hodnota 1 je dobrá, 1 ze 4 je průměr. Poloměr ohybu je nejlepší co možná největší, a nikdy menší než  $t$ . Plasticita také určuje, do jaké míry může být kov natahován, aniž by se zdeformoval. [1]

Obrábění je často sekundární operací, která doplňuje například odlévání nebo práškové metody proto, aby se zvýšila tolerance a zlepšila dokončovací fáze u konečného výrobku. Vyšší kvalita dokončování a tolerance znamená také vyšší náklady. [1]

### 3.3 Spojovací procesy

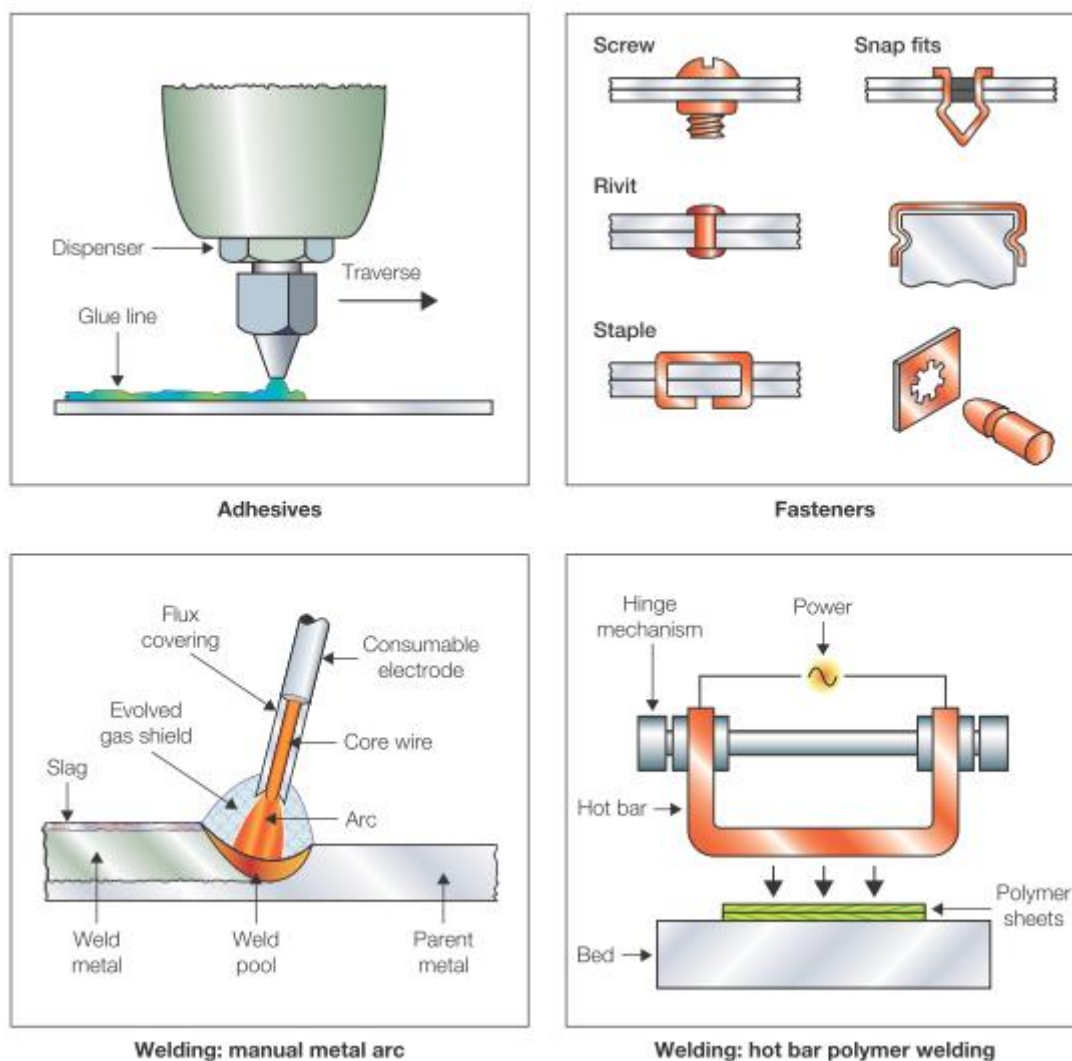
Obrázek 3-11 ukazuje, že spojování materiálů můžeme provést několika možnými způsoby. Téměř jakýkoliv materiál můžeme spojit pomocí adhesiv, ačkoliv docílení pevného a trvalého spoje může být obtížné. Šroubování, nýtování, sešití (svorkování) a spojování pomocí drážek jsou běžně používané způsoby pro spojování polymerů a kovů a mají společný jeden rys. Mohou být totiž kdykoliv rozebrány, pokud je potřeba. Svařování, největší ze skupin spojovacích procesů, je široce využíváno pro spojování kovů a polymerů, přičemž se v průběhu historie vyvinuly specializované metody pro každý z obou materiálů. *Svařování třením a třecí svařování promíšením* jsou závislé na teple a deformační síle, které jsou generovány třením a díky nimž dojde ke spojení dvou rozdílných kovů. Keramické materiály mohou být spojeny sami k sobě, ke sklu nebo ke kovům za pomoci *difúzního svařování*. [1]

Pokud mají k sobě být jednotlivé komponenty svařeny, musí být materiály, z nichž jsou vyrobeny charakterizovány svojí vysokou svařitelností. Stejně jako obrobiteľnosť, i svařitelnosť mieri kombináci základných vlastností. Nízka tepelná vodivosť dovoľuje svařenie pri nižšom dodávaní tepla, ale môže viesť k väčšiemu pokriveniu tvaru pri chlazení. Nízka teplotná rozťažnosť vedie k malým tepelným tlakom a teda k menšiemu riziku pokrivenia. [1]

Při svařování vyvineme vnitřní napětí, které je téměř shodné s hodnotou meze pevnosti původního materiálu. Toto napětí může být uvolněno tepelným zpracováním, ale to je nákladné. Je tedy lepší vyvarovat se následkům způsobeným tímto napětím tak, že připravíme dobrý návrh komponenty. Abychom toho dosáhli, součásti, které budou svařovány, by měly být vyrobeny z materiálů stejné tloušťky kdykoliv je to možné. Sváry bychom měli umístit tam, kde jsou napětí nebo odchylky nejmenší, a také bychom měli minimalizovat konečný počet svárů. [1]

Spojování velkého objemu materiálu je nákladné. Svařování, ohýbání, nebo využití adhesiv může být více ekonomicky výhodné. Metody projektování komponent pro jejich následné sestavení („Design for assembly“, DFA) poskytují seznam bodů, které nám napomáhají minimalizovat čas potřebný k sestavení komponenty. [1]





Obr. 3-11 Spojování operací. [1]

### 3.4 Dokončovací procesy

Dokončování představuje především procesy úpravy povrchu výrobku nebo jeho komplementaci. Některé z dokončovacích procesů se zaměřují na zlepšení mechanických nebo dalších technických vlastností, jiné procesy se naopak zaměřují na vylepšení vzhledu výrobku. [1]

#### 3.4.1 Dokončovací procesy pro zlepšení technických vlastností

*Broušení, lapování a leštění* (obrázek 3-12) zvyšují přesnost a hladkost povrchu, což je důležité především pro povrchy ložisek. Při *galvanickém pokovování* je na povrch výrobku nanesena tenká vrstva kovu, jejímž úkolem je ochránit výrobek před korozi a oděrkami. *Pokovování a natírání* jsou procesy, které jsou snadněji aplikovány na výrobky vyrobené z jedné větší části a mají vypouklý povrch – kanály, pukliny a štoly jsou nesnadno dostupné. Při *eloxování, fosfátování a chromátování* vzniká na povrchu výrobku tenká vrstva oxidu, fosfátu, nebo chromátu, čímž zvyšuje jeho odolnost proti korozi. [1]

Tepelné zpracování je nezbytnou součástí dokončovacích procesů u několika materiálů. Kalení slitin hliníku, titanu, a niklu dodává těmto kovům sílu ze struktury vyrobené kontrolovaným tepelným zpracováním – ochlazování při vyšší teplotě a následné kalení při teplotě nižší. Tvrdost a houževnatost oceli jsou kontrolovány podobným způsobem – kalením při tzv. „austenitické“ teplotě (kolem 800°C)

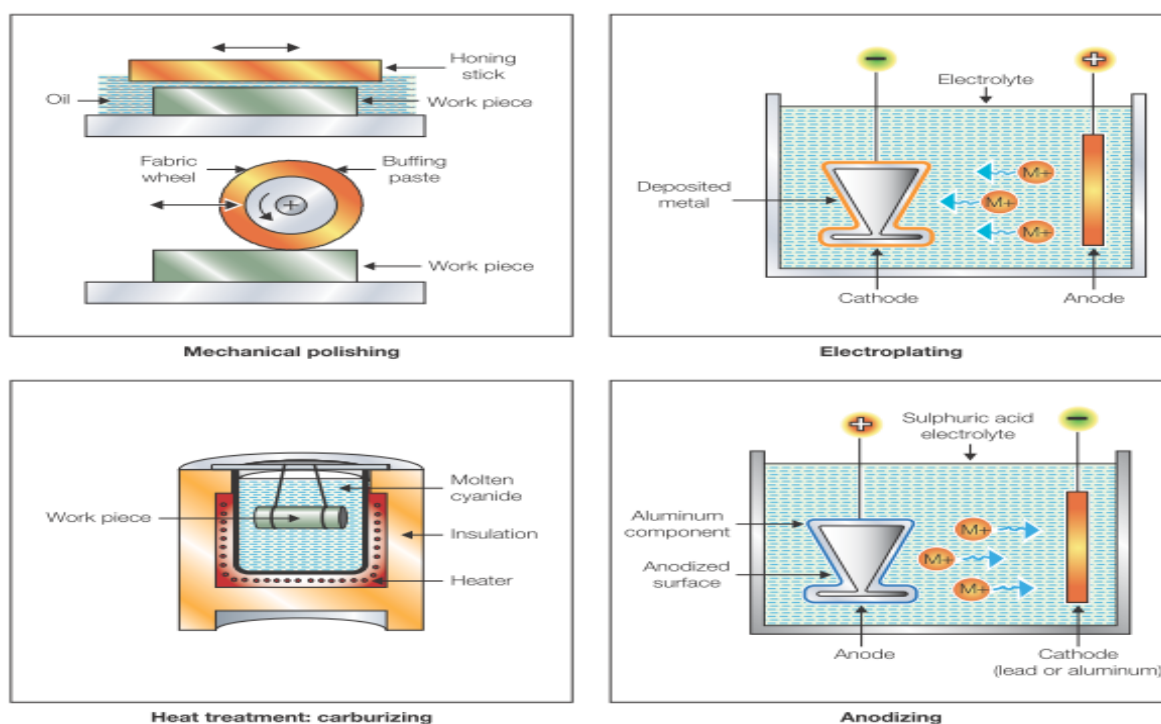


a ochlazením. Tímto způsobem lze opracovat buďto celý výrobek, jako při *cementování*, nebo jen povrchová vrstva, jako při kalení *plamenem a laserovým kalení*. [1]

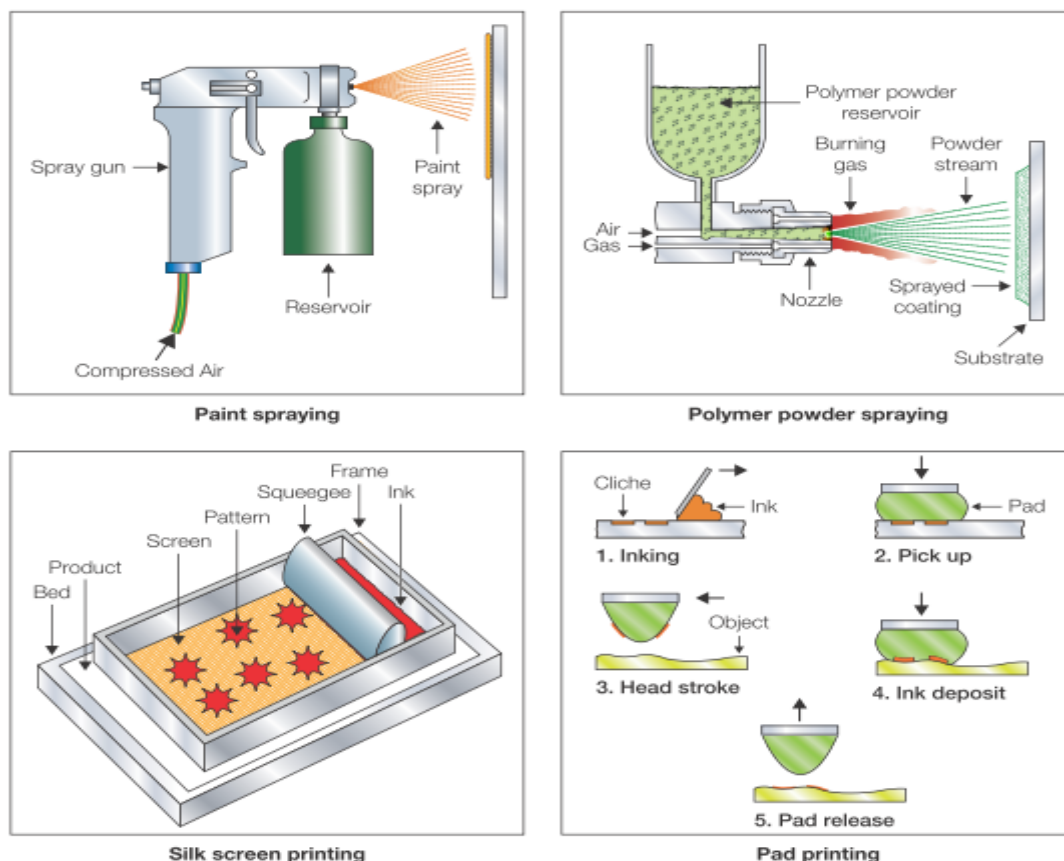
*Kalení* – prudké ochlazení – je velmi hrubá technika. Náhlé teplotní změny a s tím spojené smrštění může vyvolat pnutí dost velké na to, aby narušilo nebo zcela rozlomilo vyrobenou komponentu. Takové pnutí vzniká nerovnoměrným rozprostřením teploty, a to je zase spojeno s geometrií komponenty. Abychom se vyvarovali vzniku vnitřního pnutí, měla by být tloušťka komponenty co možná nejvíce konstantní. Nikde by však neměla být tak velká, aby rychlost kalení byla nižší než její kritická hodnota potřebná pro úspěšné tepelné zpracování. Měli bychom se vyhnout centřům pnutí, protože ty jsou zdrojem vad a příčinou rozlomení výrobku. Materiály, které byly lity nebo deformovány mohou obsahovat vnitřní pnutí, jehož se můžeme alespoň částečně zbavit pomocí *žihání*, dalšího způsobu tepelného zpracování. [1]

### 3.4.2 Dokončovací procesy, které se zaměřují na estetickou stránku výrobku

Proces, který byl právě popsán výše, může být použit také k tomu, abychom zlepšili vizuální a taktilní vlastnosti materiálu. Galvanické pokovování a eloxování patří mezi tyto příklady. Samozřejmě existuje celá řada dalších, z nichž je nejčastěji využíváno *natírání*. Barvy na bázi organického rozpouštědla poskytují povrchu výrobku odolné krytí s velice kvalitní konečnou úpravou, ale rozpouštědla představují problém pro ekologii a životní prostředí. Tento problém překonávají barvy na bázi vody, ale ty schnou pomaleji a výsledný nátěr není zdaleka perfektní. Při polymer-práškovém nátěru, nebo polymer-práškovém nástřiku je tenká vrstva termoplastu – nylonu, polypropylenu nebo polyetyleny – nanesena na povrch výrobku, čímž vytvoříme ochrannou vrstvu, která může být obarvena výrazně světlými barvami (obrázek 3-13). [1]



Obr. 3-12 Dokončovací procesy k ochraně a zlepšení vlastností. [1]

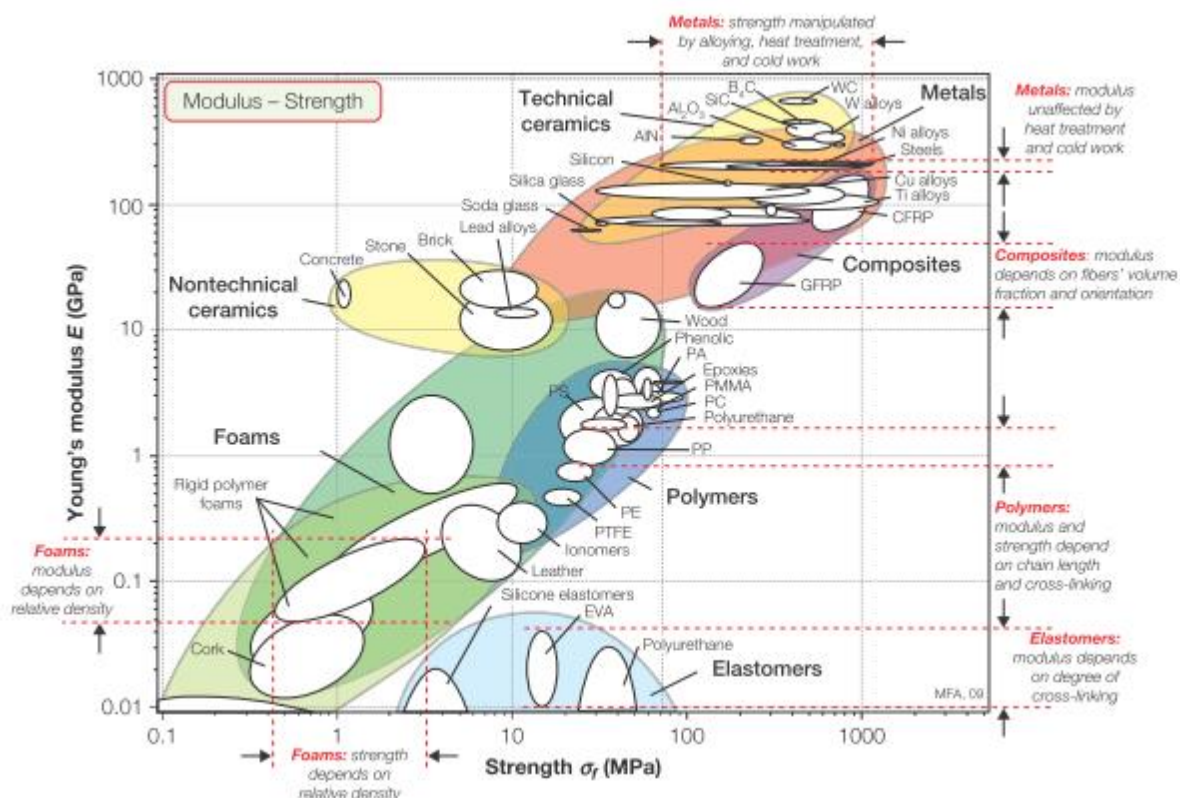


Obr. 3-13 Dokončovací procesy k zlepšení vzhledu. [1]

Při sítotisku (šablonový tisk/průtisk) je inkoust na bázi oleje protlačen přes síto, na němž je nanesena tenká ochranná vrstva tam, kde nechceme, aby byl olej propuštěn. Vícebarevný tisk vyžaduje postupné použití až čtyř rozdílných sít. Sítotisk se běžně používá k designovým úpravám rovných povrchů. Na oblých površích je třeba použít „tamponotisk“ (tamponový tisk), při němž se vzor vyrytý do kovové tiskové desky (tzv. „kliše“) natiskne a přeneseme na měkký gumový nosič (tzv. „tampon“). Tampon je přitlačen na výrobek a tím na něj také přeneseme požadovaný vzor. Kvalitního tisku je dosaženo především díky poddajnosti gummy, která přilne ke stěnám oblých tvarů. [1]

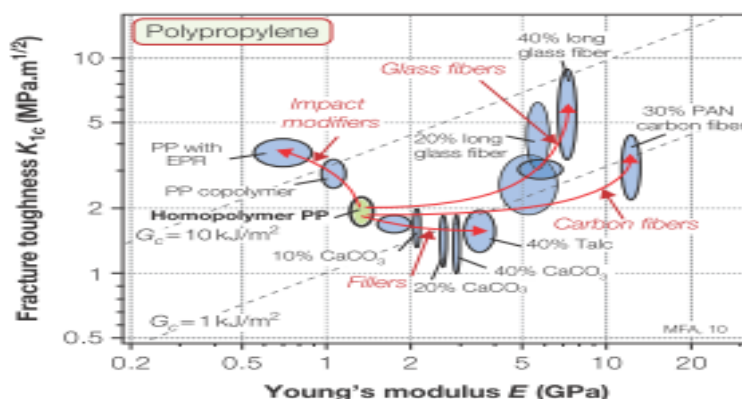
## 4. Výrobní proces a vlastnosti výrobku

Z velikosti bublin pro jednotlivé materiály v grafu zobrazujícího jejich vlastnosti na obrázku 4-1 je patrné, do jaké míry lze tyto vlastnosti výrobním procesem pozměnit. Anotace na obrázku 4-1, kopie grafu pro modul pružnosti v tahu a pevnost, ukazuje, do jaké míry mohou (nebo naopak nemohou) být tyto dvě vlastnosti materiálu kontrolovány při slévání, tepelném zpracování a zpracování za studena. Zcela rozlišné tvary bublin pro kompozitní materiály a pro pěny zohledňují fakt, že vlastnosti kompozitních materiálů jsou závislé na obsahu vláken a jejich orientaci, zatímco vlastnosti pěn se odvíjí od jejich poréznosti a hustoty. Modul pružnosti v tahu a pevnost polymerů a elastomerů závisí na délce řetězce a stupni vazby, aspektech struktury přímo kontrolované při zpracování. Pevnost zejména u keramických materiálů závisí na poréznosti, dalším z aspektů mikrostruktury, které je přímo ovlivňován při zpracování. [1]



Obr. 4-1 Graf vlastností materiálu. [1]

Obsah vláken, tvar a jejich uspořádání ovlivňuje vlastnosti kompozitních materiálů. Pevnost polymerů se pohybuje kolem faktoru 5 a jejich houževnatost kolem faktoru 20 v závislosti na chemickém složení, délce řetězce a stupni vazeb. Více dramatické změny jsou možné také pomocí *míšení*, *syčení*, *zpevňování* nebo *změkčování*. Obrázek 4-2 ukazuje, jak tyto procesy ovlivňují modul pružnosti  $E$  a lomovou pevnost  $K_{Ic}$  polypropylenu, PP. Míšení nebo polymerizace s elastomery, jako jsou EPR a EDPM (modifikátor), snižuje modul pružnosti, ale zvyšuje lomovou pevnost  $K_{Ic}$  a pevnost  $G_c$ . Plnění levným práškovým sklem, mastkem nebo uhlíčanem vápenatým zvyšuje modul pružnosti více než dvojnásobně. Toho je ale docíleno na úkor menší ztráty pevnosti. Změkčování (míšení s polymery o nízké molekulární hmotnosti) snižuje modul pružnosti ještě více dramaticky. Zmíněné procesy mohou změnit modul pružnosti polymeru o faktor 100 a pevnost o faktor 10. [1]



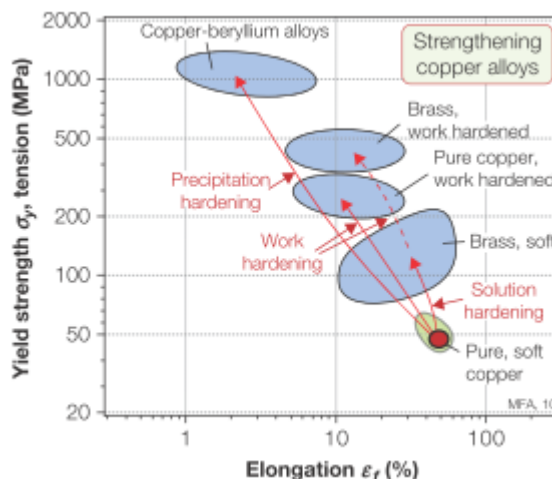
Obr. 4-2 Pevnost a houževnatost PP. [1]

Z vlastností materiálů, které se vědci a inženýři snažili měnit a manipulovat, je nejvíce prozkoumána zřejmě pevnost kovů a sloučenin. Je jednoduché odpovědět na otázku proč tomu tak je – viz. Tabulka 4-1, kde najdeme seznam možných aplikací těchto vlastností. Různé typy kalení jsou kombinovány, abychom docílili požadované pevnosti a houževnatosti. Na obrázku 4-3 je možné vidět velké zisky v pevnosti u měděných sloučenin, které byly zpracovány těmito postupy. Za dobré věci se ale musí platit. Cenou za zvýšení pevnosti je zde ztráta tažnosti (duktility), v tomto případě měřená prodloužením až k zlomu  $\epsilon_f$ . [1]

Alloy	Typical Uses	Solution Hardening	Precipitate Hardening	Work Hardening
Pure Al	Kitchen foil			✓✓✓
Pure Cu	Wire			✓✓✓
Cast Al, Mg	Automotive parts	✓✓✓	✓	
Bronze (Cu-Sn), Brass (Cu-Zn)	Marine components	✓✓✓	✓	✓
Non-heat-treatable wrought Al	Ships, cans, structures	✓✓✓		✓✓✓
Heat-treatable wrought Al	Aircraft, structures	✓	✓✓✓	✓
Low carbon steels	Car bodies, structures, ships, cans	✓✓✓		✓✓✓
Low alloy steels	Automotive parts, tools	✓	✓✓✓	✓
Stainless steels	Pressure vessels	✓✓✓	✓	✓✓✓
Cast Ni alloys	Jet engine turbines	✓✓✓	✓✓✓	

Symbols: ✓✓✓ = routinely used; ✓ = sometimes used.

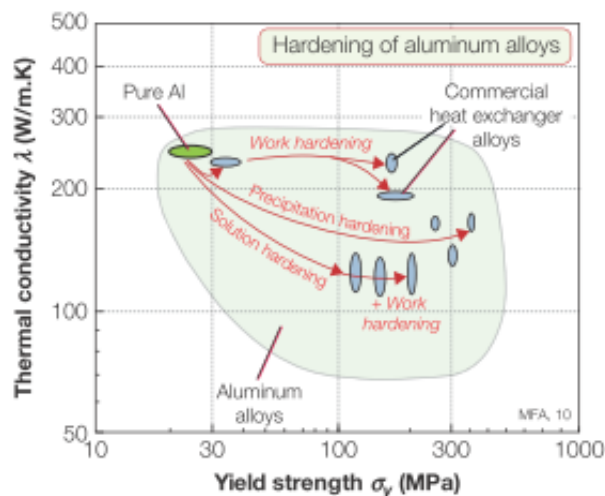
Tabulka 4-1- Kovové slitiny s typickými aplikacemi. [1]



Obr. 4-3 Slitina Mědi - pokles tažnosti. [1]

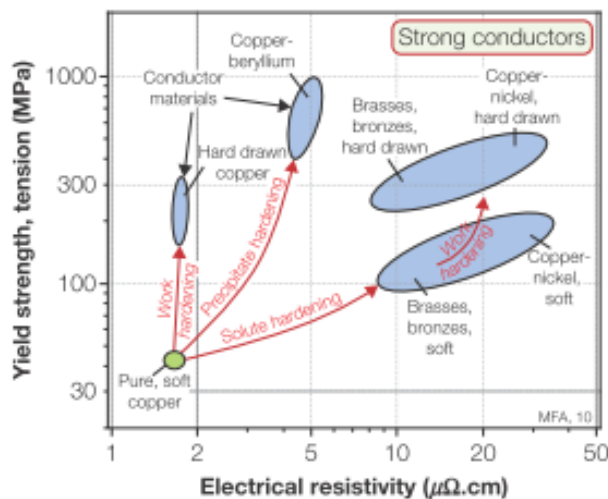
Pevnost a tažnost jsou vlastnosti odolnosti struktury a jsou závislé na složení a mikrostruktuře, a ty jsou zase kontrolovány při výrobě a zpracování. Do této skupiny vlastností patří také tvrdost, únavová pevnost, houževnatost, tepelná a elektrická vodivost. Většina procesů výroby je nastavena tak, abychom dosáhli požadované kombinace těchto vlastností. Nejlépe je můžeme vidět v grafech mini vlastností na obrázcích 4-2 a 4-3. Materiály pro výměnu tepla – tepelné výměníky, chemicko-technické zařízení – vyžadují velmi dobrou tepelnou vodivost s vysokou mírou pevnosti. Obrázek 4-4 ukazuje, jak zpracování mění tyto vlastnosti pro sloučeniny na bázi hliníku kalené různými způsoby kalení – „solid solution“, „work hardening“ a „precipitation hardening“. „Work hardening“ zvyšuje pevnost, aniž by nějak zásadně pozměňovalo vodivost. „Solid solution“ a „precipitation hardening“ představují více rozptýlených center a tím snižují vodivost. Mnoho elektrických zařízení – například

vysokorychlostní motory a přenosové soustavy – vyžadují materiály s dobrou vodivostí ale i vysokou pevností. [1]



Obr. 4-4 Tepelná vodivost a pevnost hliníkových slitin. [1]

Obrázek 4-5 ukazuje tyto změny a vlastnosti pro jeden z nejlepších vodičů – měď. Přidáme-li do sloučeniny roztok, zvyšujeme tím pevnost, ale atomy roztoku také fungují jako rozptýlená centra a zvyšují tak také elektrický odpor. Dislokace přidávají pevnost (tím, co nazýváme „work hardening“) a stejně tak rozptylují elektrony, ačkoli ne v takové míře jako roztok. Sraženiny („precipitates“) nabízejí nejvyšší nárůst v pevnosti pouze s malou ztrátou vodivosti. „Precipitation hardening“ (pouze s menším zbytkovým roztokem) a „work hardening“ jsou proto nejlepšími způsoby jak posílit vodiče. [1]

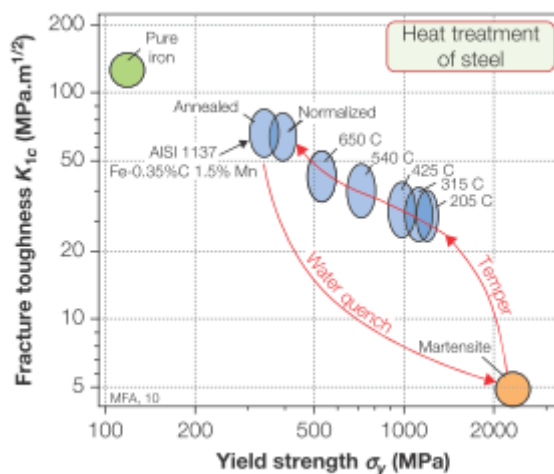


Obr. 4-5 Nejlepší materiál pro výrobu kabelu s vysokou pevností a malým odporem. [1]

Nikde není zpracování a manipulace s vlastnostmi materiálů více důležitá, než u tepelného zpracování oceli. Obrázek 4-6 ukazuje sekvenci pro ocel se středním obsahem uhlíku. Ocel je přetvořena v homogenní směs aby se v ní rozpustili všechny atomy uhlíku a následně je prudce zchlazena ve vodě nebo oleji, což ji přemění na tvrdý, křehký martenzit. Martenzit má vysokou hodnotu tvrdosti, ale je velice křehký – jeho lomová houževnatost je tak nízká, že je tento materiál prakticky nepoužitelný pro stavbu. Modulace (kalení) snižuje tvrdost a přidává pevnost, ale do jisté míry obnovuje houževnatost v závislosti na teplotě a času modulace („tempering“). Požadovaných vlastností je dosaženo důslednou kontrolou těchto faktorů. [1]



Zpracování tedy hraje klíčovou roli v manipulaci s vlastnostmi materiálů. Výrobní procesy proto vybíráme s ohledem na to, jakého tvaru a vlastností chceme u výsledného výrobku dosáhnout.

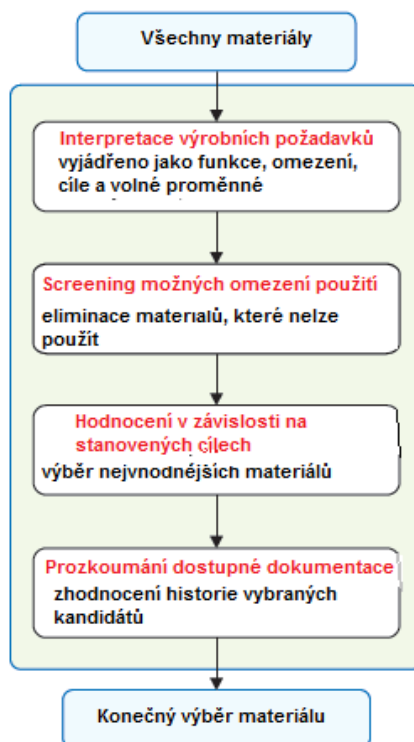


Obr. 4-6 Změny v lomové houževnatosti a mezi kluzu pro nelegované oceli. [1]

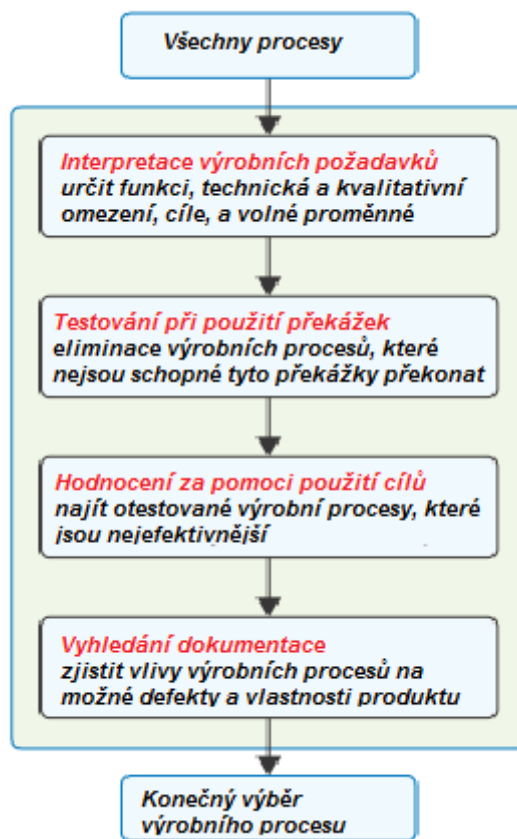
## 5. Systematický výběr výrobního procesu

### 5.1 Strategie výběru

Strategie pro výběr výrobního procesu je podobná výběru materiálů (viz. obr. 5-1). Obrázek 5-2 uvádí seznam již zmíněných kroků: *překlad, screening (testování), hodnocení a dokumentaci*.



Obr. 5-1 Strategie výběru materiálu. Čtyři základní kroky – interpretace, screening, hodnocení a dokumentace. Tyto kroky jsou dále popsány níže.



Obr. 5-2 Vývojový diagram pro strategii výběru výrobního procesu. [1]

### 5.1.1 Příklad

Jak jsme viděli v předchozích kapitolách, funkce komponenty diktuje počáteční výběr materiálu a tvaru. Tento výběr pak limituje výběr výrobního procesu. Je dobré vzít v úvahu dva typy omezení: technické – může daný proces vůbec zvládnout požadovanou práci? A kvalitativní - může to udělat dostatečně dobře? Vždy je aktuální alespoň jedno technické omezení: Slučitelnost materiálu a procesu. Kvalitativní omezení v sobě skrývá dosažení požadované přesnosti, povrchové úpravy, a profil vlastností tak, abychom se vyhnuli defektům. Obvyklý cíl výrobního procesu je také minimalizovat náklady. Volné proměnné jsou velmi limitovány výběrem samotného procesu a jeho parametry (jako teplota, průtoková rychlost a další). Tabulka 5-1 shrnuje výstupy tohoto kroku. [1]

Function	What must the process do? (Shape? Join? Finish?)
Constraints	What technical limits must be met? (Material and shape compatibility) What quality limits must be met? (Precision, avoidance of defects...)
Objectives	What is to be maximized or minimized? (Cost? Time? Quality?)
Free variables	Choice of process and process-operating conditions

Tabulka 5-1- Požadavky na výrobní proces. [1]

### 5.1.2 Screening (testování)

V tomto kroku aplikujeme omezení, abychom mohli eliminovat procesy, které nesplňují naše požadavky. Některé výrobní vlastnosti jsou pouze jednoduché rozsahy, vyjádřené čísla – velikost nebo hmotnost komponenty, kterou lze vybraným procesem vyrobit; přesnost, nebo hladkost povrchu, které

lze docílit. Ostatní jsou nečíselné – například seznam materiálů, na které může být proces aplikovaný. Požadavky jako například „vyrobený z hořčíku a vážící kolem 3 kg“ jsou jednoduše porovnatelné s atributy výrobního procesu, a tak lze eliminovat ty procesy, které nemohou tvářet hořčík nebo nemůžou pracovat s komponentou o váze 3kg. [1]

### 5.1.3 Hodnocení

Stejně jako předtím, je hodnocení založeno na jednom nebo více cílech, z nichž nejvíce patrný je ten minimalizovat náklady. V některých aplikacích můžeme tento požadavek nahradit cílem maximalizování kvality bez ohledu na cenu, i když více obvyklé je kompromis mezi oběma těmito cíli. [1]

### 5.1.4 Dokumentace

Testování a hodnocení si ne zrovna vhodně poradí s drobnějšími problémy v rámci kvality a produktivity. Ty jsou nejlépe dohledatelné pomocí dokumentace – konstrukční směrnice, nejlepší průvodci postupů, případové studie, chybové analýzy. Nejvíce důležitá technická odbornost se týká produktivity a kvality. [1]

Všechny typy výrobních nástrojů mají optimální operační rozsahy, v rámci nichž pracují nejlépe a vyrábějí kvalitní produkty bez kompromisů. Nepracování v rámci tohoto okna může vést k výrobním vadám, tak jako je nadměrná poréznost, lámavost, nebo zbytkové napětí. To v důsledku vede ke ztrátě produktivity, a pokud se to přenesení na uživatele, může to způsobit předčasné selhání. Dokumentace je proto nezbytná část výběru výrobního procesu. [1]

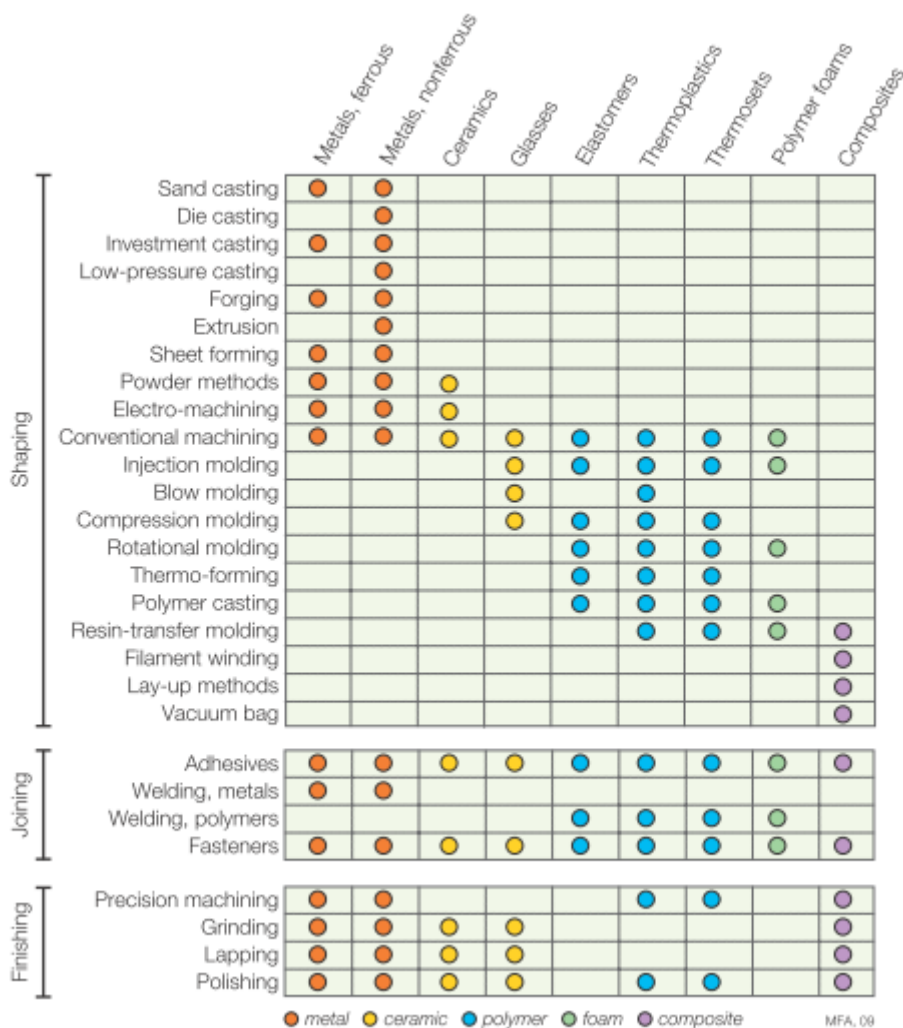
## 5.2 Zavádění strategie

Jak již bylo vysvětleno, každý proces je charakterizován souborem vlastností. Tyto vlastnosti jsou vhodně zobrazeny v jednoduchých diagramech a grafech. Poskytnou nám nástroje pro výběr, které potřebujeme pro testování (screening). Kopie z tištěných verzí ukázané zde jsou nezbytně zjednodušené a ukazující pouze omezený počet procesů a vlastností. Využití počítače dovoluje prozkoumat mnohem větší počet těchto parametrů. [1]

### 5.2.1 Kompatibilita materiálu a výrobního procesu

Obrázek 5-3 znázorňuje tabulku kompatibility materiálu a výrobního procesu. Tvářecí procesy jsou uvedeny v horní části, doplněny o kombinace kompatibilních materiálů, které jsou označeny barevnými body a odpovídají rodině materiálu. Použití tabulky pro „screening“ (testování) je velice jednoduché. Specifikujeme materiál a z tabulky vyčteme procesy, které jsou pro něj vhodné, nebo naopak specifikujeme výrobní proces a najdeme materiály, které jsou s jeho pomocí zpracovatelné. Diagonální rozmístění jednotlivých bodů v tabulce napovídá, že každá rodina materiálů – kovy, polymery, a další – má vlastní soubor výrobních procesů. Jistě existují drobné přesahy – práškové metody jsou kompatibilní (použitelné) s kovy i keramickými materiály, lití pak s polymery a sklem. Obrábění (pokud použito pro tváření) je kompatibilní (použitelné) téměř se všemi rodinami materiálů. Spojovací procesy s využitím adhesiv a upínacích zařízení jsou velmi univerzální a mohou být použity s většinou materiálů, zatímco svařovací metody jsou využitelné jen pro několik druhů materiálu. Dokončovací procesy jsou použity především pro tvrdší materiály, zejména kovy; polymery jsou lisovány (modelovány) do tvaru a zřídka kdy dále zpracovávány, s výjimkou dekorativních účelů. Proč tomu tak je zmíníme později. [1]





Obr. 5-3 Materiálové matrice – výrobní proces v závislosti na volbě materiálu. [1]

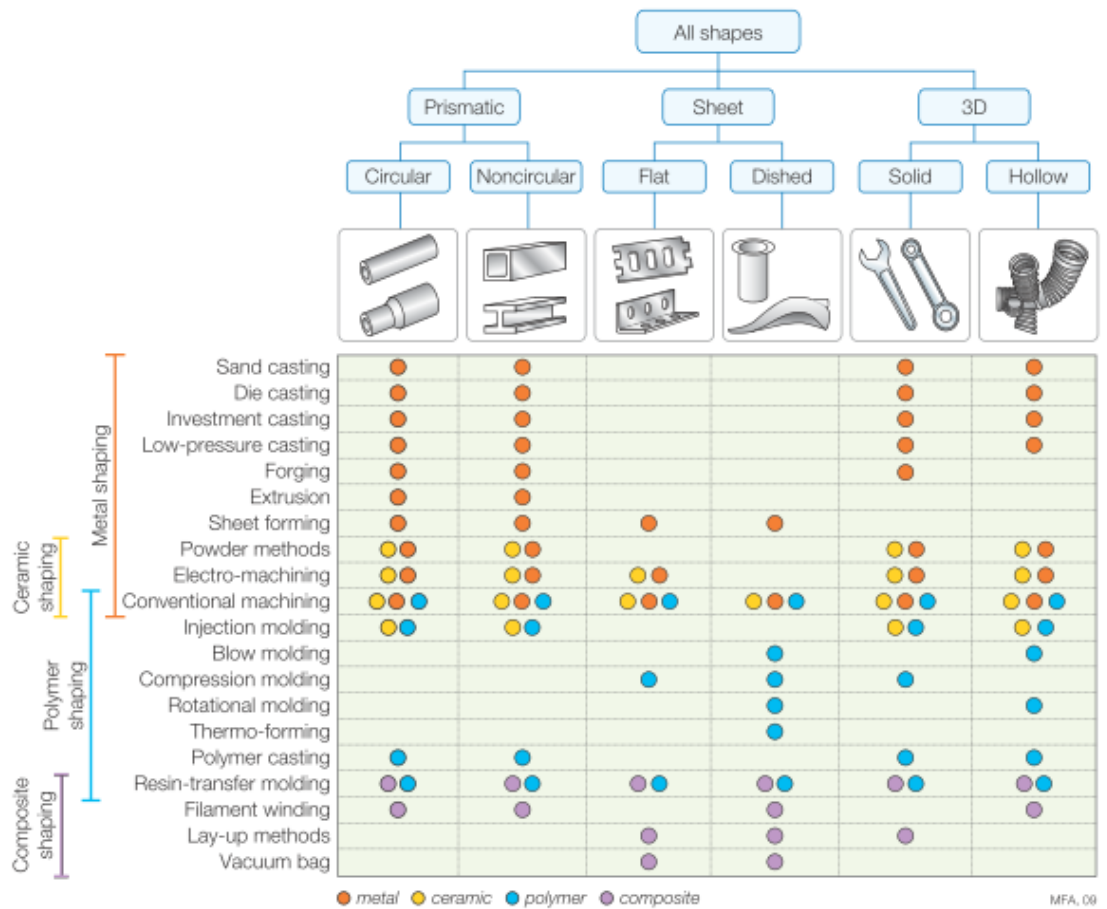
### 5.2.2 Kompatibilita výrobního procesu a tvaru

Tvar je vlastnost, která se dá charakterizovat ze všeho nejobtížněji. Mnoho procesů zahrnuje rotaci nebo translaci nástroje nebo materiálu, čímž navádí naše myšlení k osové symetrii, translační symetrii, jednotnosti částí a podobně. Otáčení vytváří asymetrické (nebo kruhové) tvary; vytlačování, rýsování, a válcování vytváří hranolové tvary, a to jak kruhové tak nekruhové. Procesy formování plechu vytváří ploché tvary (lisování) nebo klenuté tvary (rýsování). Některé procesy mohou vytvořit i trojrozměrné tvary. Některé z nich navíc mohou vytvořit duté tvary, zatímco ostatní nikoliv. Obrázek 5-4 znázorňuje zmíněné klasifikační schéma. [1]

Hranolové hrany zobrazeny nalevo a vyráběny pomocí válcování, vytlačování, nebo rýsování, mají speciální vlastnost – můžeme je vyrábět v nepřerušené délce (drát). Ostatní tvary takové délky dosáhnout nemohou. Jsou oddělené od ostatních a takové procesy nazýváme „dávkovým zpracováním“. Sériová výroba je vhodná pro dlouhé, hranolové výrobky jako jsou železniční koleje nebo běžnější výrobky typu trubky, desky a pláty. Cylindrické válce produkují pláty. Formovací válce vytváří více komplexní profily – železniční kolej je jeden z takových příkladů. Vytlačování je mimořádně univerzální proces sériové výroby, protože složité hranolové tvary, které obsahují vnitřní drážky a podélné prvky jako žebra a výztuhy, mohou být vyrobeny v jednom kroku. [1]

Tabulka kompatibility výrobního procesu a tvaru na obrázku 5-4 ukazuje spojení mezi těmito dvěma faktory. Pokud výrobní proces nemůže vytvořit tvar, který chceme, můžeme ho kombinovat se sekundárním výrobním procesem. S vedlejším procesem vytvoříme výrobní řetězec, abychom produk-

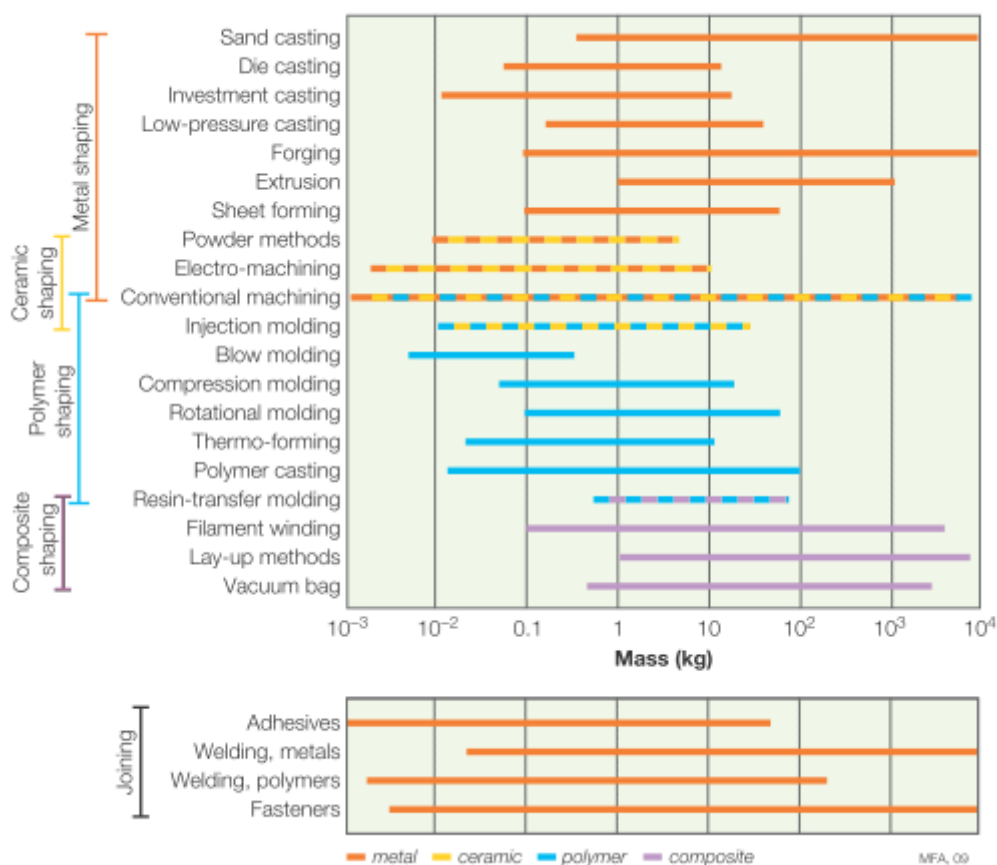
tu postupně dodali požadované vlastnosti. Obrábění dřívě vyrobených odlitků je zřetelným případem. Je třeba ale brát na vědomí, že každý dodatečný výrobní krok zvyšuje cenu. [1]



Obr. 5-4 Informace o kompatibilitě materiálu. [1]

### 5.2.3 Tvářecí procesy: Hmotnost a tloušťka jednotlivých sekcí

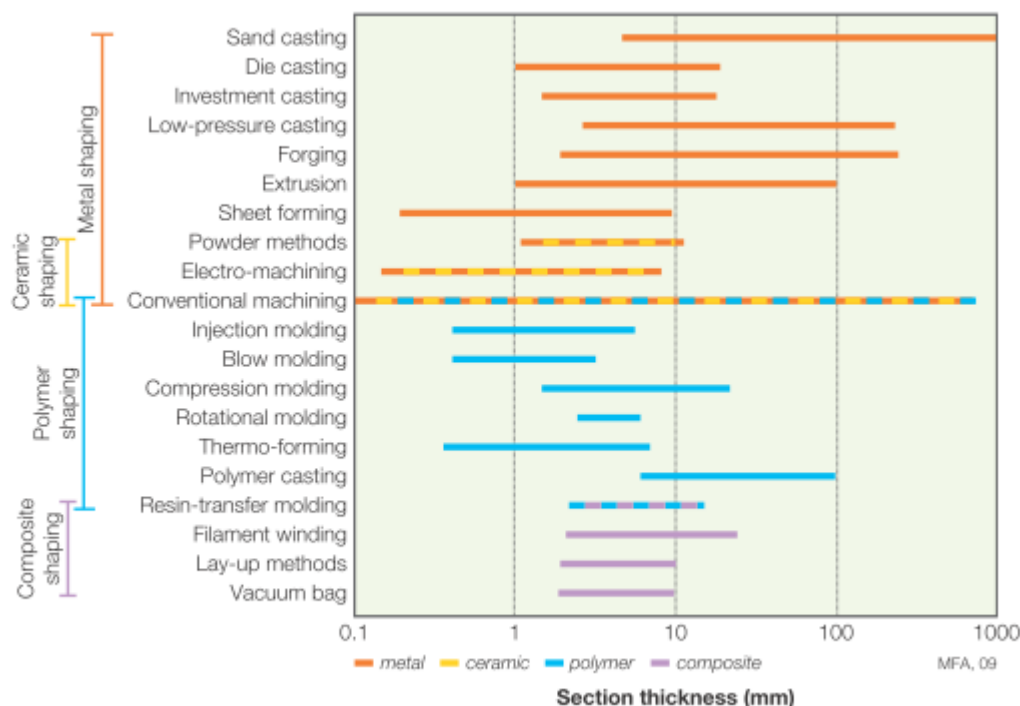
Velikost komponenty, kterou je možné vyrobit určitým procesem, je omezena. Obrázek 5-6 zobrazuje takové limity. Barevné kódování pro kompatibilitu materiálů bylo zachováno, přičemž více než jedna barva je použita, pokud je daný proces schopný pracovat s více než jednou rodinou materiálů. Velikost může být měřena objemem (množstvím) nebo hmotností, ale protože rozsah obou z nich má velké rozpětí, zatímco hustoty se liší pouze o faktor 50, nezáleží na tom, které hledisko zvolíme – velké věci jsou těžké, nehledě na to, z čeho jsou vyrobeny. Mnoho procesů se pohybuje v rozmezí hmotnosti kolem faktoru 1000. Všimněme si, že tento atribut je nejvíce zásadní při extrémních hodnotách. Drtivá většina komponentů se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 10 kg, pro něž bude prakticky každý proces fungovat. [1]



Obr. 5-6 Výrobní proces v závislosti na hmotnosti. [1]

Každý pruh v grafu ukazuje velikost rozsahu, který je daný proces schopen zvládnout bez větších technických problémů. Všechny z nich můžeme hnát do větších či menších extrémů, ale za cenu dalších nákladů, protože zařízení, které budeme muset pro tento proces použít, již nebude standardní. Během testování (screeningu) je tedy nezbytné rozpoznat „near misses“ (nepatrné odchylky) – procesy, které nesplňují požadavky jen s malým přesahem, ale pokud to bude opravdu nezbytné, můžeme je znovu zvážit a využít. [1]

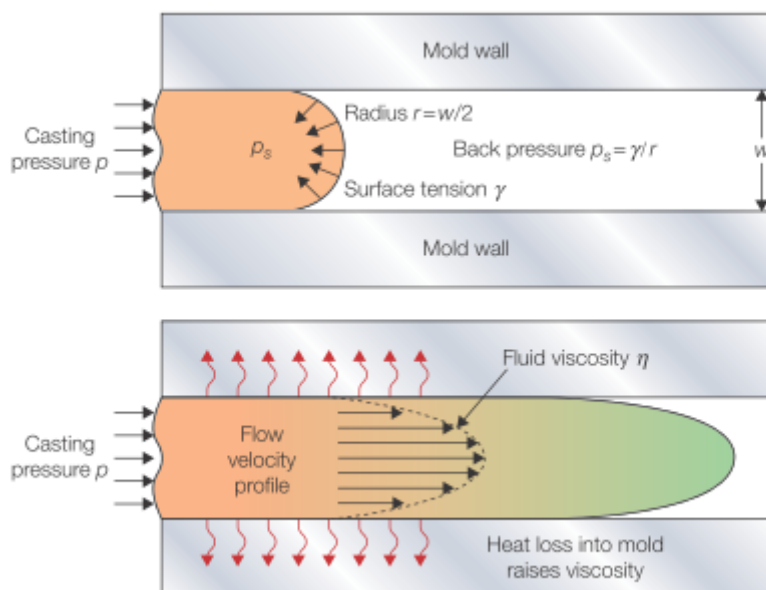
Obrázek 5-7 ukazuje další graf, který znázorňuje rozsah možné tloušťky jednotlivých sekcí, které je daný tvářecí proces schopný zpracovat. Dolní hranice těchto rozsahů – minimální tloušťka sekce – představuje bod, kde fyzikální pochody během výrobního procesu představují jistá omezení. Původ těchto omezení je předmětem následující podkapitoly. [1]



Obr. 5-7 Výrobní proces v závislosti na tloušťce sekce. [1]

### 5.2.3.1. Fyzická/fyzikální omezení velikosti a tloušťky části

Odlévání a lití jsou procesy, které jsou závislé na toku materiálu v kapalném nebo v polokapalném skupenství. Menší omezení na tloušťku úseku jsou důsledkem fyzikálních zákonů při průtoku kapaliny. Viskozita a povrchové napětí zabráňují toku kapaliny skrz rovné drážky (kanály), a tepelná ztráta vzniklá z plochy rozsáhlého povrchu tenkých částí ochlazuje tekoucí materiál, čímž zvyšuje viskozitu ještě před naplněním drážky (kanálu) (viz. obrázek 5-8). Čisté kovy ztuhnou při určité teplotě, pouze s nepatrným zvýšením viskozity, ale to neplatí pro slitiny. Ty totiž tuhnou každá při jiné teplotě. Rozpětí těchto teplot je známé jako „mushy zone“ („kašovitá zóna“). Při teplotách v této zóně je totiž slitina částečně kapalná a částečně pevná (tuhá). Rozpětí této zóny se může lišit od několika málo stupňů do několika set – tok kovů při lití tedy závisí na složení slitiny. Obecně platí, že vstřikování za vysokého tlaku a další metody odlévání umožňují vytvoření tenkých částí, ale nástroj pro takovou výrobu stojí více a čím rychlejší, tím více turbulentní tok může být příčinou větší poréz-  
nosti a tím i poškodit odlitek. [1]

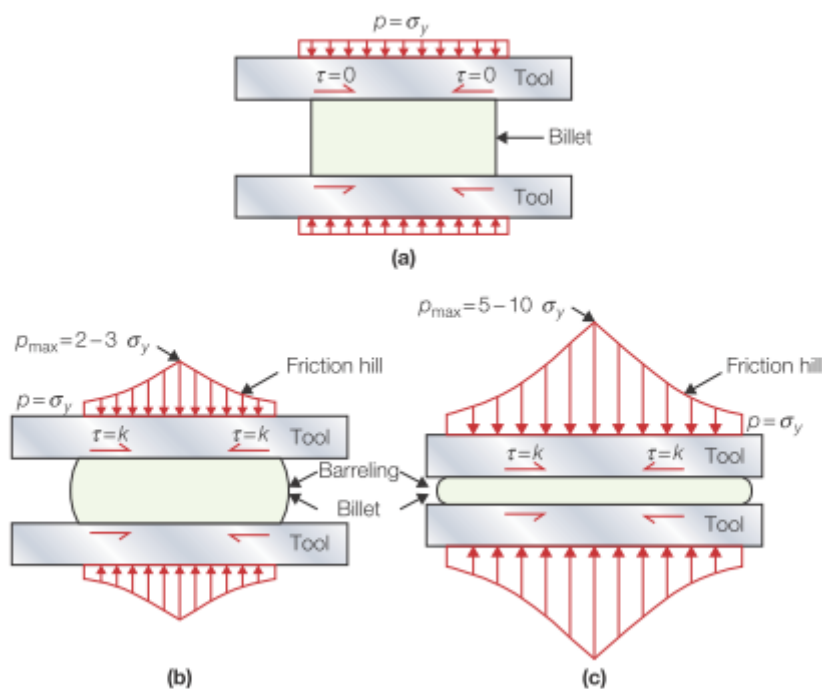


Obr. 5-8 Tok tekutého kovu nebo polymeru. [1]

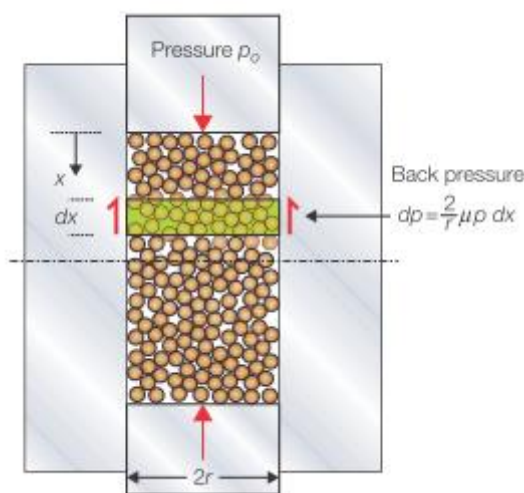
Horní limity pro velikost a počet částí v odlévání a lití jsou dané problémem srážení. Vnější vrstva při odlévání a lití se ochlazuje a tuhne první, čímž vytváří pevnou slupku. Když vnitřní vrstva následně ztuhne, změna v objemu může deformovat výrobek nebo zapříčinit prasknutí vzniklé slupky, popřípadě vznikne vnitřní kavitace. Problémy tohoto typu jsou nejzávažnější tam, kde se mění geometrie částí, protože tlak v těchto místech vyvolává tahová napětí, které vedou k tepelným trhlinám – prasknutí vzniklé tlakem při tepelném smrštění. Materiály různého složení jsou jinak náchylné k trhlinám vzniklým teplem – což je jen další příklad spojení mezi materiálem, výrobním procesem a konstrukčním návrhem. [1]

Tváření kovu deformací – horké nebo studené válcování, kování, nebo vytlačování – také vyžaduje tok. Tloušťka materiálu, která může být kována, válcována (za tepla), nebo vytlačována, je limitována tvárným tokem v podstatě stejným způsobem, jako je tloušťka materiálu limitována v odlévání viskozitou. Čím je sekce užší, tím je větší požadavek na válcovací tlak nebo na sílu kování. Obrázek 5-9 zobrazuje daný problém. Tření pozměňuje šíření tlaku na formě a pod válci. Když jsou dobře namazány, jako v bodě (a), distribuce materiálu je téměř jednoosá a materiál teče při napětí skluzu  $\sigma_y$ . S třením, jako v (b), se kov zadržává na formě a tlak kolísá, protože tření odporuje šíření materiálu po stranách, což vede k tzv. „friction hill“ („třecí kopec“). Oblast pod šířením tlaku je celkové formující zatížení, takže tření zvyšuje zatížení. Čím větší je poměr stran dané sekce (šířka/tloušťka), tím vyšší maximální tlak je nezbytný pro tváření, jako v (c). Tento příklad demonstruje podstatné omezení, které klade tření na tloušťku jedné sekce – velmi tenké sekce jednoduše přilnou k nástrojům a nepovolí, ani s velmi velkými tlaky. [1]

Tření také omezuje poměr stran v tváření práškovými metodami. Externě aplikovaný tlak je zmenšen třením stěny formy (obrázek 5-10) s výsledkem toho, že pokud je poměr stran příliš velký, ve formě vzniká nedostatečný tlak k tomu, aby stlačil prášek do středu výrobku. [1]



Obr. 5-9 Vliv tření a poměru stran na kování. [1]



Obr. 5-10 Poměr výšky k šířce při kování. [1]

### 5.2.3.2. Tolerance a drsnost

Přesnost a obráběný povrch komponentu (výrobku) jsou aspektem kvality. Jsou měřeny tolerancí a drsností povrchu **R**. Pokud jsou rozměry komponenty (výrobku) specifikovány, pak je specifikována i kvalita povrchu, i když ne nezbytně po celém povrchu. Kvalita povrchu je velice důležitá v kontaktních (dotýkajících se) místech povrchů jako jsou masky přírub, které musí těsnit nebo zapadnout do drážek. Kvalita povrchu je také důležitá pro zmírnění únavy materiálu a z estetického hlediska. Tolerance **T** na rozměr **y** je specifikována jako  $y = 100 \pm 0.1$  mm, nebo jako  $y = 50 + 0.01 / - 0.001$  mm, což naznačuje, že je větší volnost v navýšení rozměru, než v jeho zmenšení. Drsnost povrchu je specifikována jako horní hranice, například  $R < 100 \mu\text{m}$ . Požadavky na běžnou úpravu povrchu něko-

lika výrobků jsou znázorněny v tabulce 5-2. Tabulka rovněž uvádí typické výrobní procesy, které mohou těchto požadavků dosáhnout. [1]

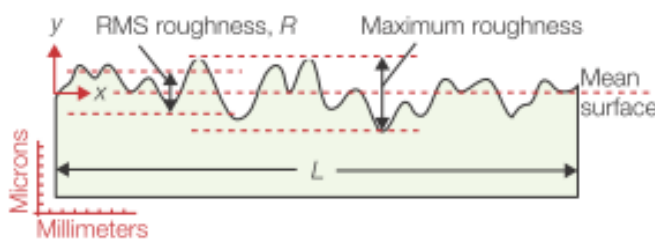
Drsnost povrchu je míra nerovnosti na povrchu (obrázek 5-11). Je definována jako kvadratický průměr („root-mean-square“, RMS) profilu povrchu:

$$R^2 = \frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx$$

Jedním způsobem, jak ji změřit je vést ostrý, světelný snímací hrot po povrchu ve směru  $x$  a zároveň měřit jeho vertikální profil  $y(x)$ , jako při přehrávání gramofonové desky. Optická profilometrie, která je rychlejší a mnohem přesnější, využívá laserovou interferometrii k tomu, aby zmapovala nerovnosti povrchu. Tolerance  $T$  je očividně vyšší než  $2R$ . Ve skutečnosti, protože  $R$  je kvadratický průměr drsnosti, nejvyšší drsnost, a tedy absolutně nejnižší limit pro toleranci, je více než  $5R$ . Skutečné procesy dávají toleranci, která se pohybuje od  $10R$  do  $1000R$ . [1]

Finish, $\mu\text{m}$	Process	Typical Application
$R = 0.01$	Lapping	Mirrors
$R = 0.1$	Precision grind or lap	High-quality bearings
$R = 0.2-0.5$	Precision grinding	Cylinders, pistons, cams, bearings
$R = 0.5-2$	Precision machining	Gears, ordinary machine parts
$R = 2-10$	Machining	Light-loaded bearings, noncritical components
$R = 3-100$	Unfinished castings	Nonbearing surfaces

Tabulka 5-2- Úrovně dokončování. [1]



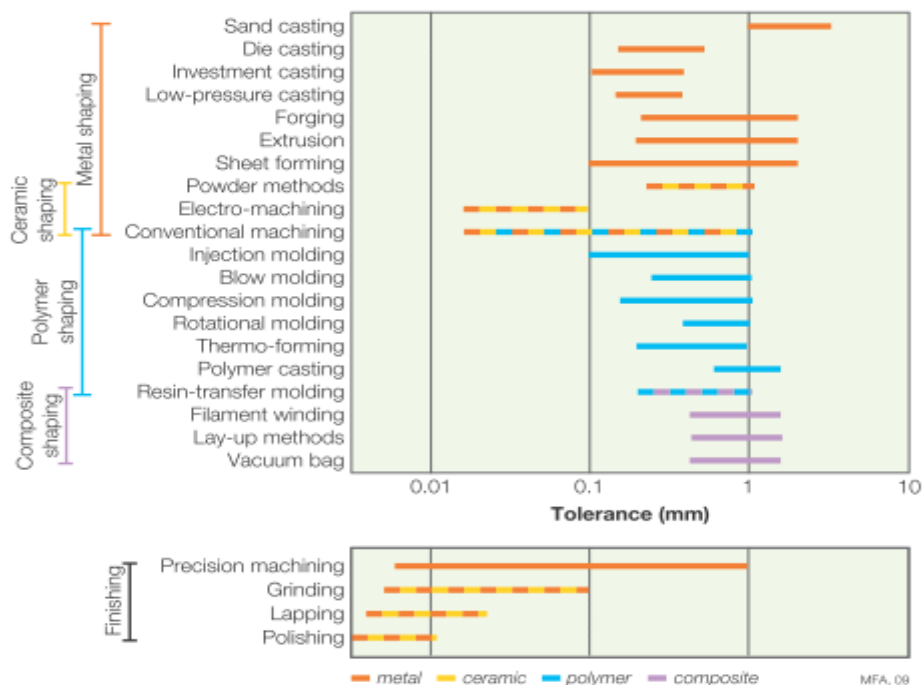
Obr. 5-11 Řez plochy znázorňující její nerovný povrch. [1]

Obrázky 5-12 a 5-13 ukazují charakteristické rozsahy tolerance a drsnosti, jichž jsou vybrané procesy schopny, přičemž bylo zachováno barevné kódování pro rodiny materiálů. Data pro dokončovací procesy jsou doplněna pod tvářecími procesy. Odlévání do polo ztracené formy vytváří drsný povrch, odlévání do kovové formy vytváří hladší povrchy. Žádné tvářecí procesy však nejsou schopné vyrobit lepší povrch než  $T = 0.1 \text{ mm}$  a  $R = 0,5 \mu\text{m}$ .

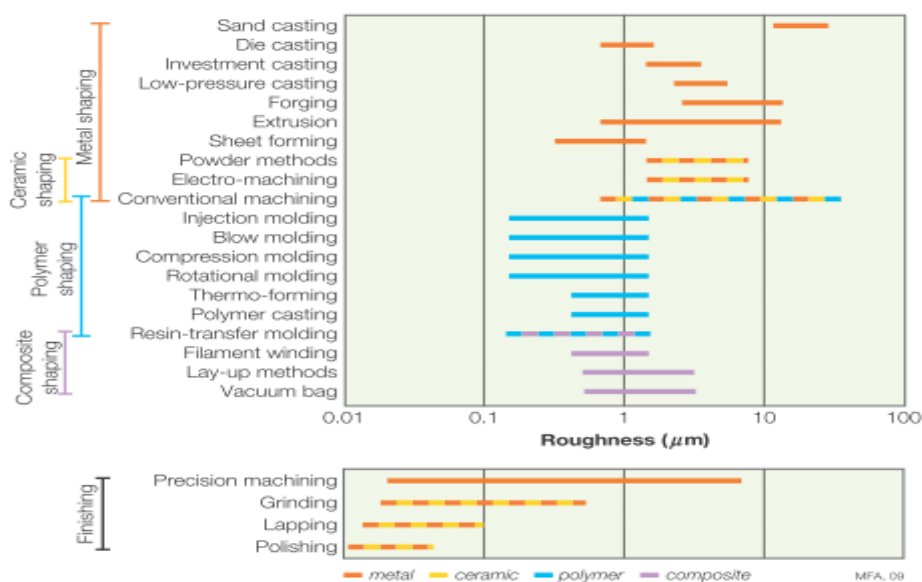
Obrábění, které je schopné velké rozměrové přesnosti a povrchové úpravy, je běžně používáno následně po odlévání a deformačních procesech, abychom dosáhli požadované tolerance nebo úpravy povrchu. Tím pak vytvoříme řetězec výrobních procesů. Kovy a keramické materiály mohou být broušeny a lapovány, abychom dosáhli větší přesnosti a hladkosti povrchu. Velký teleskopický reflektor má toleranci přibližně  $5 \mu\text{m}$  a drsnost kolem  $1/100$  na rozměr okolo metru a více. Nicméně přesnost a konečná úprava povrchu s sebou přináší také náklady. Výrobní náklady exponenciálně rostou, čím vyšší jsou nároky na přesnost a konečnou úpravu. Je tedy velmi nákladnou chybou tyto dva aspekty příliš specifikovat.



Odlité polymery přejímají konečnou úpravu povrchu z formy, která byla použita pro jejich odlití a mohou tedy být velice hladké, a tedy i obrábění pro dokončení výrobku je málokdy nezbytné. Tolerance lepší než +/- 2 mm jsou jen zřídkakdy možné, protože vnitřní napětí vzniklé odléváním může způsobit pokřivení a protože polymery se v procesu vlní. [1]



Obr. 5-12 Graf výběru výrobního procesu v závislosti na toleranci. [1]



Obr. 5-13 Graf výběru výrobního procesu v závislosti na drsnosti povrchu. [1]

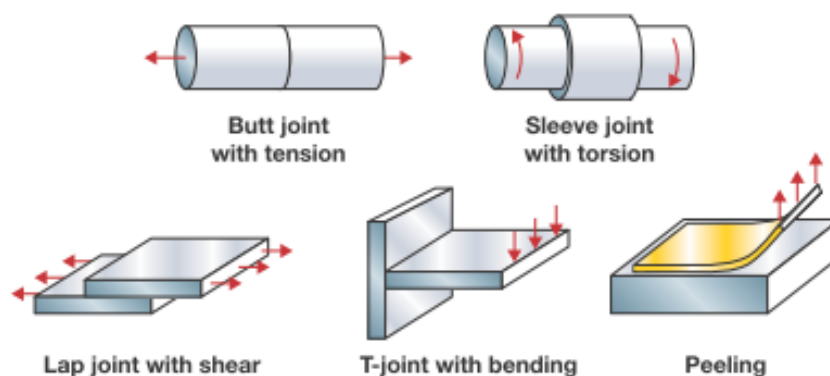
## 5.2.4 Spojování – Kompatibilita materiálů

Spojovací procesy pro kovy, polymery, keramické materiály a sklo se liší. Vybrané adhesiva spojí některé materiály a jiné nikoliv. Svařecí metody pro polymery se liší od těch pro svařování kovů, a keramické materiály, které nemůžeme svařovat, jsou místo toho spojovány difúzním svařováním nebo



glazovány. Obrázek 5-14 znázorňuje vztah materiálů a výrobních procesů, přičemž jsou zde zahrnuty 4 třídy spojovacích procesů. [1]

Pakliže je spoj mezi dvěma rozdílnými materiály, musí být spojovací proces kompatibilní s oběma. Adhesiva a použití spojovacích materiálů dovoluje spojení dvou rozdílných materiálů, mnoho svářecích procesů však nikoliv. Pokud jsou dva kovy spojovány takovým způsobem, že jsou v elektrickém kontaktu, dochází ke korozi, pokud je spoj namočen. Tomu se lze vyhnout, pokud opatříme materiály ve spoji krycí vrstvou. Nerovnováha při tepelném rozpínání způsobuje vnitřní napětí ve spoji, pokud se mění teploty, což může vést k pokřivení nebo k poničení. Identifikace vhodného spojovacího procesu pro spojování rozdílných materiálů je jedním z kroků při dokumentaci. [1]



Obr. 5-14 Společná geometrie. [1]

#### 5.2.4.1. Geometrie spoje a modus zatížení

Geometrie spoje a způsob zatížení (obrázek 5-14) ovlivňuje výběr výrobního procesu. Adhesivní spoje umožňují trhání, ale jsou velmi chabé, pokud jde o loupání (škrábání) – vezmeme v úvahu odtrhávání adhesivní pásky. Adhesiva vyžadují velkou pracovní plochu – „lap joints“ (spoje, kdy se materiál překrývá v drážkách, překládané spoje) pracují vcelku dobře, ale „butt joints“ (spoje, kdy použijeme šrouby, atd.) nikoliv. Nýty a svorky jsou také vcelku adaptovatelné pro překládané spoje („lap joints“), ale jsou méně stabilní v pnutí. Sváry a závitky jsou více adaptovatelné, ale i pro ně je důležitý výběr procesu výroby a geometrie spoje pro zatížení. [1]

#### 5.2.4.2. Sekundární funkce spoje

Spoj může mít funkci těsnění a můžeme od něj požadovat, aby zabránil průniku plynům a kapalinám. Můžeme od něj chtít, aby vodil nebo naopak izoloval teplo a elektrický proud, nebo aby byl schopen pracovat při vysoké operační teplotě. Může být trvalý nebo schopný opětovného rozebrání, když životnost produktu skončí a můžeme ho tak recyklovat nebo znovu použít. Závitky a adhesiva, povolené rozpouštědlem nebo teplem to umožňují. [1]

### 5.2.5 Povrchová úprava – kompatibilita materiálu

Jak již bylo zmíněno výše, povrchová úprava je více důležitá pro kovy než pro polymery. [1]

#### 5.2.5.1. Účel povrchové úpravy

Všechny typy povrchové úpravy navyšují výrobní náklady, ale přidaná hodnota této úpravy může někdy být značná. Tabulka 5-3 ilustruje rozdílnost funkcí, které poskytuje povrchová úprava. Některé z nich poskytují ochranu, jiné zvyšují výkon, ostatní jsou pak spíše estetické. Ochrana povrchu kom-

ponenty zvyšuje její životnost a zvyšuje interval mezi dobou pro její údržbu. Krycí vrstvy na povrchu řezných nástrojů umožňují rychlejší výkon a větší produktivitu. A povrchy z vytvrzeného materiálu dovolují zaměnit substrátové slitiny za levnější materiál – například, čistou uhlíkovou ocel s cementovaným povrchem nebo s vrstvou tvrdého nitridu titanu (TiN) namísto více nákladných slitin oceli. [1]

### 5.2.6 Sekundární kompatibility

Některé povrchové úpravy jako eloxování zanechávají rozměry, přesnost, drsnost povrchu nezměněné. Nanášení vrstev (např. galvanické pokovování) na povrch mění rozměry jen mírně, ale může přitom stále zanechat zcela hladký povrch. Nanášení tenké vrstvy polymerového prášku dává vzniknout poměrně silné, hladké vrstvě na povrchu, ostatní, jako rytí vytváří tlustou vrstvu a drsný povrch, který je třeba ještě opracovat. „Line-of-sight“ vrstvení nanáší vrstvy na povrch pouze tam, kam zdroj navedeme, čímž zanechá některá místa na povrchu nedotčená. Další způsob, tzv. „throwing power“, pokrývá rovné i zakřivené povrchy stejně dobře. Mnoho procesů povrchových úprav vyžaduje teplo. Ty však mohou být použity pouze na materiály, které snesou nárůst teploty. Některé nátěry se aplikují za studena, jiné však vyžadují zahřátí alespoň na 150°C. Tepelné zpracování jako cementování nebo nitridování, které nanáší vrstvy na tvrdý povrch, musí být zahřátý po delší dobu až na 800°C, což může změnit mikrostrukturu materiálu, který pokrýváme. [1]

Corrosion protection, aqueous environments	Thermal insulation
Corrosion protection, gas environments	Electrical insulation
Wear resistance	Magnetic response
Friction control	Decoration
Fatigue resistance	Color
Thermal conduction	Reflectivity

Tabulka 5-3- Funkce povrchových úprav. [1]

## 5.3 Hodnocení: výrobní náklady

Část nákladů na výrobu jakékoliv komponenty (součástky) jsou samozřejmě i náklady vynaložené na použitý materiál. Zbytek pak činí náklady na výrobu dané komponenty. Výrobní proces v takovém případě zahrnuje tváření, spojování a dokončování výrobku. Předtím, než se zaměříme na detaily, je důležité zmínit čtyři jednoduchá pravidla, jak se dají náklady na výrobu snížit a které by měl vzít v úvahu každý projektant, pokud tomu situace dovolí. [1]

### 5.3.1 Dodržovat standardy

Pakliže již někdo vyrobil komponentu (součástku), kterou potřebujeme, bude jistě mnohem levnější ji koupit, než znovu vyrobit. V případě, že požadovanou komponentu ještě nikdo nevyrobil, bude jistě levnější ji tedy vyrobit z nějakého běžně dostupného materiálu, nejlépe již naskladněného (např. ocelové pláty, pruty, válce), než se snažit vyrobit komponentu z materiálů nestandardních tvarů a za použití speciálních forem. Vždy bychom se měli snažit použít standardní materiály a jejich co nejmenší počet. Tímto jednoduchým krokem snížíme náklady na uskladnění materiálu a snížíme počet nástrojů, které bude muset výrobce použít. V neposlední řadě může tento krok pomoci s recyklací (opětovným použitím již vyrobených komponentů). [1]

### 5.3.2 Jednoduchost

Bude-li se muset výrobek strojově opracovat, každá jeho manipulace a opětovné přemístění na stroji navyšuje cenu. Nákladnějším je rovněž použití speciálních nástrojů. V případě, že musí svářec

součástku svařit, musí mít ke komponentě vždy volný přístup a být schopen vidět, co dělá. Je-li součástka vyráběna ve formě, vytavena nebo kována, musíme vzít v potaz fakt, že pro rovnoměrný tok tekutin potřebných pro takové procesy je nezbytný vysoký (a nákladný) tlak, a že nepravidelné a složité tvary forem takové procesy mnohdy velmi komplikují. Zamysleme se nad projektem požadované komponenty nejprve sami. Je takový návrh vhodný? Nedosáhli bychom menší úpravou vzhledu vhodnějšího návrhu? [1]

### 5.3.3 Díly, které se dají snadno a rychle komplementovat

Komplementace finálního výrobku trvá určitý čas a čas jsou peníze. Jsou-li režijní náklady pouhých 60 korun na hodinu, pak každá minuta komplementace k této částce přidává další korunu. Projekt na komplementaci („Design for Assembly“, DFA) řeší tento problém za pomoci několika jednoduchých kritérií a pravidel. Ve zkratce můžeme zmínit následující:

1. Minimalizovat počet dílů finálního výrobku.
2. Navrhnout díly tak, aby do sebe samy při komplementaci zapadaly.
3. Použít spojovací metody, které jsou rychlé. Rychloupínáky nebo bodové svařování jsou rychlejší než použití závitů nebo adhesiv.

### 5.3.4 Nespecifikovat více výkonů, než je nezbytně nutné

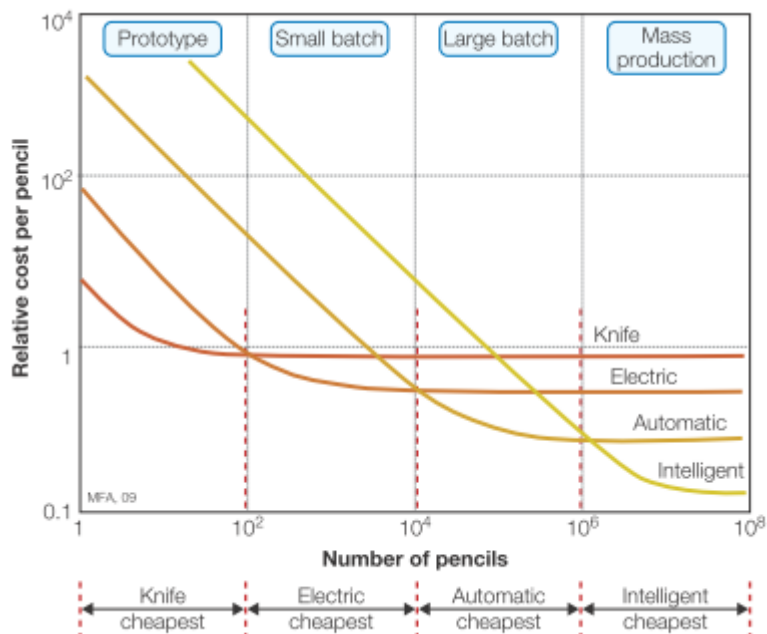
Za výkon se musí vždy platit. Legování některých kovů je nákladné kvůli nutnosti použít přídavné materiály. Zpracování vysoce odolných polymerů je náročné kvůli jejich složitému chemickému složení. Některé keramické materiály vyžadují v procesu výroby důkladnější kontroly. Tím vším rostou náklady. Kromě toho, vysoce odolné materiály se hůře zpracovávají. Tlak potřebný pro tváření (ať už pro kovy nebo pro polymery) jsou vyšší, opotřebení nástrojů je větší, kujnost těchto kovů je mnohdy nižší, což dělá deformační procesy nesnadné až nemožné. To vede k tomu, že výrobce musí najít nové cesty k vytouženému výsledku. Tváření práškovou metodou nebo investice do složitějších typů lití než do těch běžných nebo mechanického zpracování, použití nákladného zařízení pracujícího při vyšších teplotách, to vše hraje při výpočtu nákladů také svou roli. Čím vyšší jsou požadavky na výkon při zpracování materiálu, tím vyšší jsou výrobní náklady. Nakonec jsou zde také otázky tolerance a drsnosti/hrubosti. Náklady rostou exponenciálně s každým požadavkem na dokonalost a finální úpravu povrchu. Závěr je tedy jednoduchý – výroba a především vysoké požadavky na ni stojí peníze. Neměli bychom to tedy se specifiky na výrobu přehánět. [1]

Abychom se posunuli dále, musíme zohlednit všechny další faktory, které přispívají k navýšení výrobních nákladů, spolu s jejich původem.

## 5.4 Ekonomická hlediska pro výběr

Potřebujeme-li nabrousit tužku, můžeme to udělat nožem. Pokud ale potřebujeme nabrousit tužek tisíc, vyplatí se koupit elektrické ořezávatko. V případě, že je tužek k nabroušení milion, budeme si nejspíš přát, abychom měli automatizovaný systém pro jejich ořezání. Abychom se vypořádali s rozdílnými délkami a tloušťkou jednotlivých tužek, můžeme jít ještě dál a přát si systém kontrolovaný mikroprocesorem a se sensory, které by měřily rozměry každé tužky, tlak při broušení a tak dále – ve zkratce tedy inteligentní systém, který by rozeznal a přizpůsobil by se velikosti tužky. Výběr procesu tedy potom závisí na počtu tužek, které si přejeme ořezat, tedy na velikosti várky. Nejlepší volbou je pak takový proces, při němž je cena za ořezání jedné tužky nejnižší. [1]

Obrázek 1-32 ukazuje schéma znázorňující změnu ceny ořezání jedné tužky při různé velikosti celé várky. Nůž nestojí mnoho, ale tato metoda je pomalá, a proto je cena práce vysoká. Ostatní metody vyžadují značně větší počáteční investici, ale za jejich pomoci je proces mnohem rychlejší, čím snižuje náklady na práci. Poměr mezi výší vloženého kapitálu a průměrem pak formuje křivky v grafu. Nejlepší volba na obrázku 5-15 je potom křivka nejnižší – nůž pro zhruba 100 tužek, elektrické ořezávatko pro 102 až 104 tužek, a automatizovaný systém pro 104 až 106 tužek, a tak dále. Každý proces tak má velikost várky, která je ekonomicky výhodná. [1]



Obr. 5-15 Náklady na ostření tužky. [1]

#### 5.4.1 Ekonomicky výhodná velikost várky

Výrobní náklady tvoří velké množství nezávislých proměnných, z nichž ne všechny dokáže projektant ovlivnit. Vytváření cenového modelu je popsáno v následující kapitole, ale – musíme vzít v potaz znepokojující náznaky z předchozí věty – je vždy uklidňující mít alternativní, i když jen přibližný, náhradní plán. Ekonomicky výhodná velikost várky takový plán nabízí. Hodnoty pro procesy popsané v této kapitole jsou uvedeny na obrázku 5-15.

Proces s ekonomicky výhodnou velikostí várky v rozsahu B1 – B2 je vhodný a konkurenceschopný ostatním, pakliže výsledný výstup procesu se pohybuje právě v tomto rozsahu. Stejně jako tomu bylo u příkladu s ořezáváním tužek a velikostí várky od 102 – 104. Ekonomicky výhodná velikost várky je běžně zahrnuta do výběru výrobního procesu.

Jednoduchou cestou jak zařadit ekonomiku do výběru výrobního procesu je zhodnotit možné procesy na základě jejich efektivity pro určité velikosti várek a vybrat následně ty, které jsou ekonomicky nejvýhodnější pro velikost várky, kterou hodláme aktuálně vyrobit. Přesto tento postup není zcela bez chyb. Mnoho proměnných nemůžeme do tohoto výběru zařadit, aniž by nedošlo k drobnému zkreslení. Modelový příklad nákladů nám poskytuje lepší vhled do problematiky. [1]

#### 5.4.2 Vytvoření modelu nákladů

Pro výrobu komponenty potřebujeme několik zdrojů (obrázek 5-15), z nichž každý má přidružené náklady. Konečná výše nákladů je tedy součet všech výdajů na zdroje, které k výrobě potřebujeme (viz. detail v tabulce 5-5). Tedy náklady na výrobu komponenty o hmotnosti  $m$  zahrnuje cenu  $C_m$  (\$/kg) materiálu a surovin, z nichž je vyrobena. Rovněž musíme připočítat cenu použitých nástrojů  $C_t$  (\$) a zařízení  $C_c$  (\$), v němž budou jednotlivé nástroje použity. Výroba také potřebuje čas, za nějž platíme průměrnou taxu  $C_{oh}$  (tedy v jednotkách \$/hod), která zahrnuje cenu práce, administrativy, a pronájem prostor. Výroba dále vyžaduje energie, které platíme navíc pouze pokud je proces výroby skutečně energeticky náročný.

V opačném případě se ale energie obvykle započítávají do celkových nákladů nebo jsou zahrnuty v  $C_{oh}$ , jako tomu je i v našem příkladu. A konečně, do nákladů musíme také započítat cenu informací,

jmenovitě cenu výzkumu a vývoje, licenční poplatky. I to totiž musíme zohlednit v ceně za jednotku času a přičíst to k celkovým nákladům.

Zkusme si teď představit výrobu komponenty (výstupní jednotka) vážící  $m$  kg, vyrobenou z materiálu o ceně  $C_m$  (\$/kg). Prvním faktorem, který tak přispěje k ceně jednotky je cena materiálů  $mC_m$  zvětšený faktorem  $1/(1-f)$ , kde  $f$  je zlomek pro odpad – zlomek pro počáteční materiál, který končí jako odpad. Dostaneme tak vzorec:

$$C_1 = \frac{mC_m}{(1-f)}$$

Cena  $C_1$ , která označuje náklady na soubor nástrojů, použitých při výrobě – formy, upínáky, atd. – je označována za tzv. jednoúčelové náklady – náklady vynaložené speciálně na výrobu jedné konkrétní komponenty. Tato hodnota je odepsána proti numerické hodnotě  $n$  jednoho výrobního cyklu. Samozřejmě, že se nástroje opotřebovávají. Pokud se tedy jedná o dlouhý výrobní cyklus, bude nezbytné nástroje obměnit, a tak náklady na použité nástroje můžeme vypočítat následovně:

$$C_2 = \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left( \frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right\}$$

$n_t$  je v tomto vzorci počet jednotek, které dokáží nástroje vyrobit do té doby, než musí být vyměněny, a  $\text{Int}$  je funkce celého čísla. Výraz ve složených závkách jednoduše zvyšuje náklady na použité nástroje o cenu jednoho souboru nástrojů vždy když je  $n$  vyšší než  $n_t$ .

Náklady na celé výrobní zařízení  $C_c$  jsou naopak jen zřídka jednoúčelové. Dané zařízení – například lis – může být využit k výrobě několika různých komponent pouze tím, že změníme jeho nastavení, popřípadě vyměníme formy, atd. Je tedy běžné, že náklady na pořízení nutného zařízení – víceúčelového zařízení – a náklady na zapůjčení samotného kapitálu na jeho pořízení – můžeme přeměnit na režijní náklady tak, že je vydělíme hodnotou doby  $t_{wo}$ , po níž si můžeme kapitál odepisovat (řekněme 5 let), dobou, za níž se nám investice navrátí. Hodnota  $C_c/t_{wo}$  je potom cena za hodinu – za předpokladu, že zařízení používáme nepřetržitě. To se stává ale málokdy, proto je výraz ještě vydělen faktorem zátěže  $L$  – zlomek doby, po níž je zařízení aktivně využito. Cena za jednotku je potom cena za hodinu vydělená rychlostí  $n$ , jakou jsou výrobky vyráběny:

$$C_3 = \frac{1}{n} \left( \frac{C_c}{L t_{wo}} \right)$$

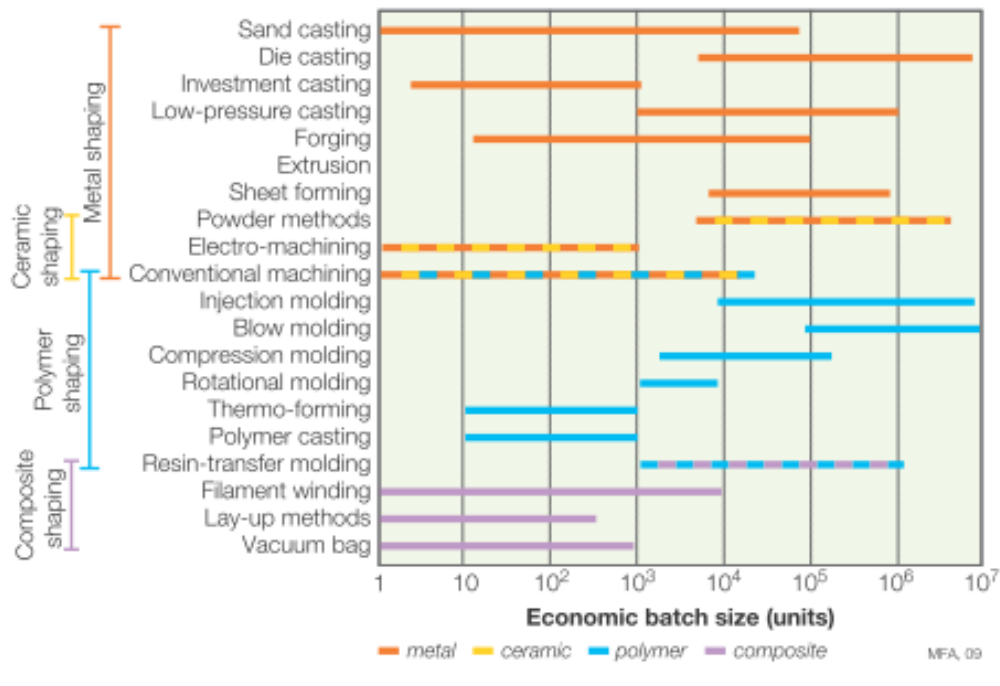
Konečně musíme také zohlednit režijní náklady  $C_{oh}$ . Ty dostaneme tak, že cenu za jednotku vydělíme rychlostí produkce  $n$  jednotek za hodinu (zprůměrováno pro výrobní cyklus, pro případ odstávek):

$$C_4 = \frac{C_{oh}}{n}$$

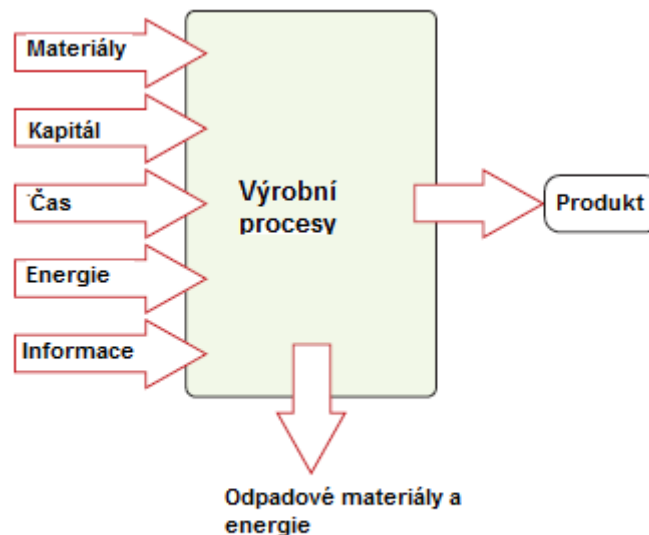
Celková hodnota nákladů na výrobu jedné komponenty je tedy součet všech výše zmíněných hodnot a konečný vzorec má tak následující podobu:

$$C = \frac{mC_m}{(1-f)} + \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left( \frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right\} + \frac{1}{n} \left( \frac{C_c}{L t_{wo}} + C_{oh} \right)$$

Z této rovnice můžeme vyčíst a shrnout, že náklady na výrobu komponenty mají tři hlavní příspěvovatele/faktory – cenu materiálu na vyrobenou jednotku, která je nezávislá na velikosti výrobní várky a rychlosti; jednoúčelové náklady na vyrobenou jednotku, které se liší a vypočítají jako převrácená hodnota objemu výroby (1/n); a hrubé režijní náklady na jednotku, které se liší a vypočítají jako převrácená hodnota výrobní rychlosti (1/n). Rovnice popisuje soubor křivek, které vztahují cenu C k velikosti várky n, jedna křivka pro každý proces. Každá z křivek má tvar té z grafu ilustrujícího příklad ořezávání tužek na obrázku 1-32. [1]



Obr. 5-16 Graf závislosti výběru výrobního procesu v závislosti na velikosti ekonomické várky. [1]



Vstupy pro model nákladů.

Obr. 5-17 Vstupy pro model nákladů.[1]

Resource	Symbol	Unit
Materials: including consumables	$C_m$	\$/kg
Capital: cost of tooling	$C_t$	\$
cost of equipment	$C_c$	\$
Time: overhead rate, including labor, administration, rent ...	$\dot{C}_{oh}$	\$/hr
Energy: cost of energy	$\dot{C}_e$	\$/hr
Information: R & D or royalty payments	$\dot{C}_i$	\$/year

Tabulka 5-5- Symboly, definice a jednotky. [1]

### 5.4.3 Technické vypracování modelu výrobních nákladů

Následující rovnice:

$$C = \frac{mC_m}{(1-f)} + \frac{C_t}{n} \left\{ \text{Int} \left( \frac{n}{n_t} + 0.51 \right) \right\} + \frac{1}{\dot{n}} \left( \frac{C_c}{L_{t_{wo}}} + \dot{C}_{oh} \right)$$

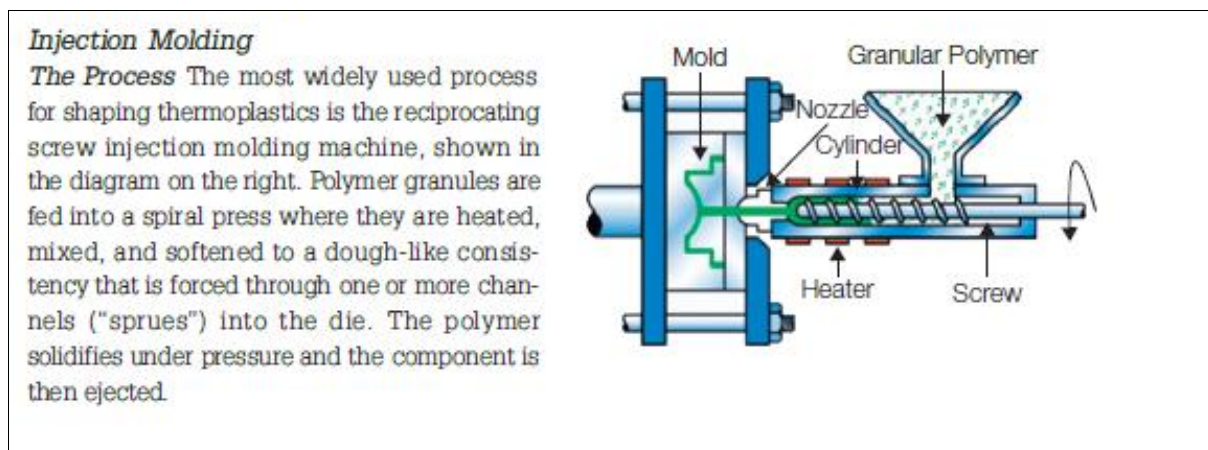
představuje první krok při modelovém výpočtu nákladů. Větší přesnosti je možné dosáhnout s technickými modely nákladů, které využívají znalosti vzájemné interakce mezi projektováním, výrobním procesem a náklady. Náklady na pořízení zařízení závisí na velikosti a stupni automatizace. Náklady na použité nástroje a výrobní rychlost závisí na složitosti procesu. Tyto a mnoho dalších závislých proměnných mohou být zachyceny v teoretickém nebo empirickém vzorci nebo vyhledávacích tabulkách, které mohou být začleněny do modelu nákladů, aby tak zpřehlednily hodnocení konkurujících si výrobních procesů. [1]

## 5.5 Proces výběru výrobního procesu asistovaný počítačem

Jsou-li výrobní atributy uloženy do databáze s odpovídajícím uživatelským rozhraním, můžeme vyrobit přehledové tabulky, z nichž si může uživatel následně vybrat a v nichž může snáze manipulovat s jednotlivými políčky pro výběr.

CES platforma, zmíněná výše, je příkladem takového systému. Tato databáze obsahuje záznamy, z nichž každý popisuje atributy jednotlivých výrobních procesů. Příklad na obrázku 5-18 ukazuje jeden typický záznam – konkrétně pro vstřikování plastů. Schéma ukazuje, jak výrobní proces funguje a je doplněn krátkým popisem. Schéma je doplněno i o seznam několika atributů – tvary, kterých můžeme tímto procesem dosáhnout, atributy vztahující se k tvarům a fyzickým vlastnostem, a rovněž ty, které se vztahují k ekonomickým parametrům. V záznamu pak také najdeme krátkou dokumentaci ve formě zásad, technických poznámek, a typických využití. Číselné atributy jsou zde uloženy ve formě rozsahů, které naznačují vhodnost daného procesu pro určité případy. Každý záznam je spojen se záznamy materiálů, které jsou vhodné pro daný výrobní proces, což umožňuje využít materiál jako jedno z kritérií pro vyhledávání. Užší výběr vhodných kandidátů na výrobní proces je vytvořen ve dvou krocích: vyhledáme a eliminujeme procesy, které nesplňují výrobní požadavky, a v druhém kroku stanovíme žebříček zbývajících procesů podle ekonomického hlediska. Aby toho mohlo být dosaženo, je do CES softwaru vložen vzorec pro výpočet modelu nákladu uvedený výše v kapitole 5.4.3. Záznamy obsahují přibližná data pro hodnoty rozsahu potřebného kapitálu a náklady na nástroje ( $C_c$  a  $C_t$ ) a také rychlost výroby ( $n$ ). Rovnice obsahuje další parametry, které nejsou zahrnuty v záznamu, protože patří k těm atributům, které nejsou vlastní vybranému výrobnímu procesu, ale odvíjí se od projektu nebo vybraného materiálu, stejně jako od ekonomiky a tedy i lokace, kde se nachází výrobní továrna. Uživatel musí dodat požadované informace, které pohodlně vloží do dialogového okna. Výstupem je tedy porovnání ceny v závislosti na velikosti várky. [1][7]





**Obr. 5-18 Příklad záznamu pro výrobní proces vstřikování plastů v CES softwaru.[1]**

*(Vstřikování plastů – Výrobní proces – Nejčastěji používaný výrobní proces pro tváření termoplastů je za pomoci vstřikovacího listu, ukázaného na obrázku vpravo. Plastový granulát se připraví v násypce a postupně nabírá šnekem vstřikolisu, kde je zahříván na požadovanou teplotu, míchán, a kde následně změkne až do kašovitě hmoty - taveniny, která je protlačena (vstříknuta pod vysokým tlakem) skrze jeden nebo více kanálů až do vstřikovací formy. Polymer zde tuhne pod tlakem a hotová komponenta je poté vyjmuta z formy.)*



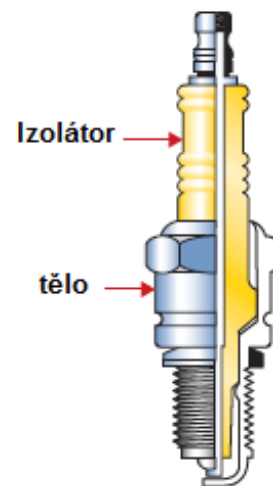
## 6. Případová studie

### 6.1 Výběr procesu výroby izolátoru zapalovací svíčky asistovaný počítačovým programem

Po teoretickém představení problematiky výběru výrobního procesu v závislosti na druhu materiálu se zaměříme na konkrétní příklad. V této kapitole bakalářské práce tak představíme systematický postup pro výběr procesu výroby vybrané komponenty, v našem případě izolátoru zapalovací svíčky. Pro výběr vhodného procesu výroby použijeme počítačový program CES (Computer Engineering Selector).

Pro výběr vhodného procesu výroby je potřeba projít několika kroky. V první řadě je nezbytné znát vstupní parametry požadované komponenty. Vstupem jsou pro nás tedy výrobní požadavky a výstupem seznam vybraných procesů, které jsou schopné tyto požadavky splnit a díky nimž můžeme vyrobit požadovanou komponentu. V případě, že nám program nabídne několik možností, vybíráme z nich na základě dalších kritérií, například na základě ekonomického hlediska.

Výběr procesu se řídí standardním vzorcem, jinými slovy bychom měli dodržovat určitý postup. V programu zvolíme nový projekt a postupně pracujeme s jednotlivými vstupními informacemi, které do programu zadáváme. V jednotlivých kartách pak specifikujeme dané výrobní požadavky na materiál, tvar, velikost, minimální počet částí, přesnost a další. Následně jsou tyto požadavky vloženy do výrobní matice, vyhodnoceny programem a uživatel s nimi může dále pracovat tak, že blíže specifikuje a vybere oblasti hledání. Procesy, které spadají do oblastí hledání, jsou vhodné pro výrobu požadovaného komponentu podle výrobních požadavků a stávají se tak vhodnými kandidáty pro konečný výběr. Pakliže ani jeden z procesů nesplňuje výrobní požadavky, musíme přehodnotit vstupní kritéria a výrobní požadavky na komponentu. V některých případech může dojít také k tomu, že abychom docílili požadovaných výrobních vlastností, musíme jednotlivé navržené výrobní procesy kombinovat. [9]



### 6.2 Jednotlivé kroky pro výběr procesu výroby zapalovací svíčky v programu CES 2009

CES systém umožňuje pracovat uživateli s předem definovanými limity a omezeními na materiál, tvar, hmotnost, počet částí, toleranci, a drsnost povrchu, a přesto přijít s podмноžinou procesů, které splňují všechna tyto omezení. Jako s nadstavbou uvedeného procesu může uživatel dále pracovat s ekonomickými hledisky vybraného procesu výroby. V této souvislosti je pro uživatele nezbytné znát velikost požadované várky. [9]

#### 6.2.1 Vstupní požadavky

Struktura zapalovací svíčky je znázorněna na obrázku výše. Jedná se o komponentu složenou z několika částí, z nichž jednou je právě izolátor. Ten se vyrábí z keramického materiálu, jmenovitě oxidu hlinitého. Tvar zapalovací svíčky můžeme vidět na obrázku. Je souměrný podle osy, dutý a stupňovitý. Komponenta váží přibližně 0,05 kg a má průřez alespoň 1,2 mm.

Přesnost je velice důležitá, protože izolátor je součástí celé sestavy. Ve vstupních požadavcích se uvádí přesnost +/- 0,3 mm a drsnost povrchu v hodnotě menší než 10  $\mu\text{m}$ . Izolátory se vyrábějí ve velkém počtu. Jedna výrobní várka čítá 100 000 kusů. Náklady by měly být tak nízké, jak je to jen

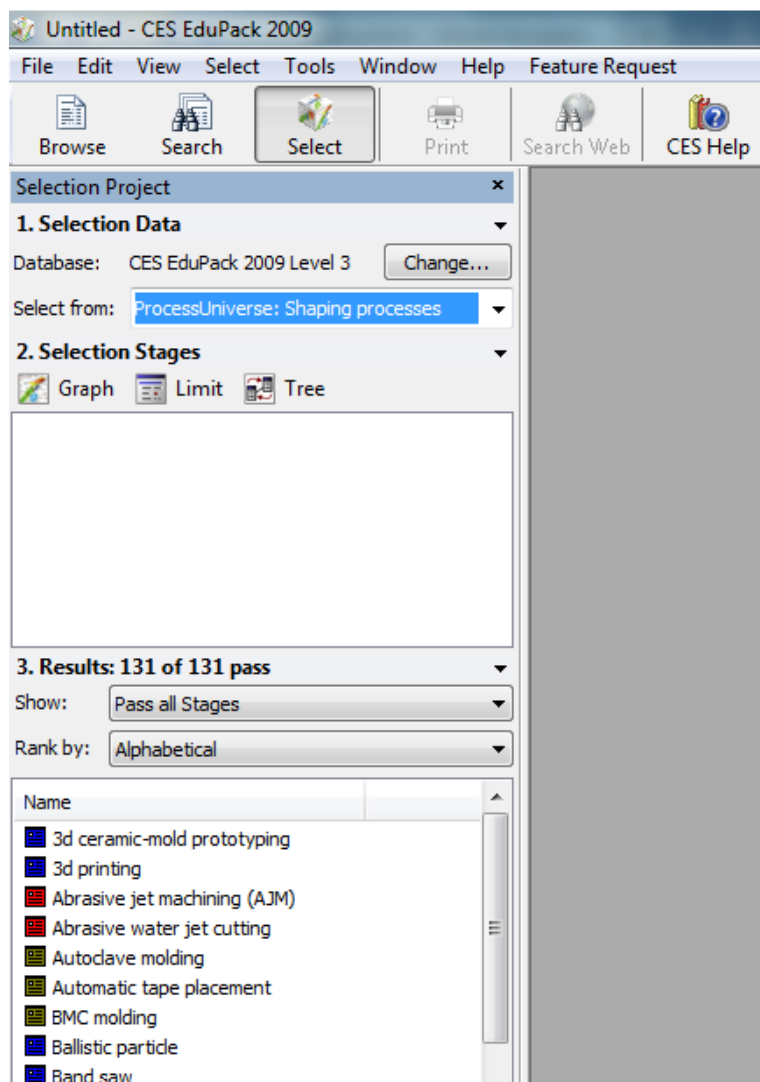
možné. Tabulka 6-1 uvádí přehled základních požadavků, s nimiž budeme v naší případové studii pracovat. [9]

<b>Funkce</b>	Izolátor		
<b>Omezení:</b>	Materiál:	Keramika (oxid hlinitý)	
	Tvar:	3D dutý	Technická omezení
	Hmotnost:	0,04 – 0,06 kg	
	Minimální průřez:	1,5 mm	
	Tolerance:	<+/- 0,3 mm	Omezení kvality
	Drsnost povrchu:	< 10 μm	
	Velikost várky:	100 000 kusů	Ekonomická omezení
<b>Cíl</b>	Výběr procesu výroby		
<b>Volné proměnné</b>	Operační podmínky výroby		

**Tab. 6-1 - Základní požadavky na komponentu**

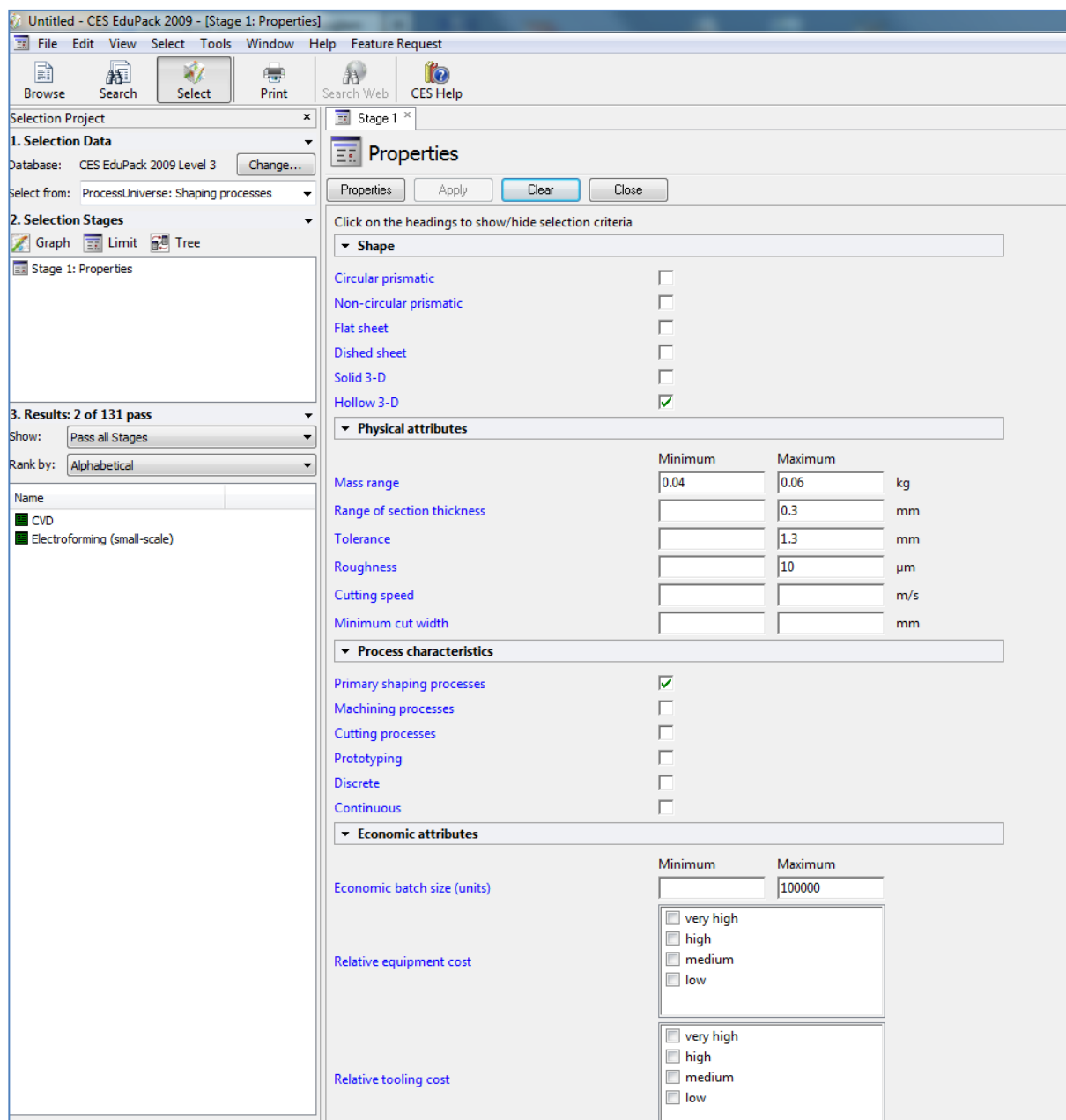
## 6.2.2 Výběr

V prvním kroku v práci s programem CES založíme nový projekt a postupně pracujeme s jednotlivými záložkami, do nichž zadáváme požadované limity, viz. Obr. 6-1. [9]



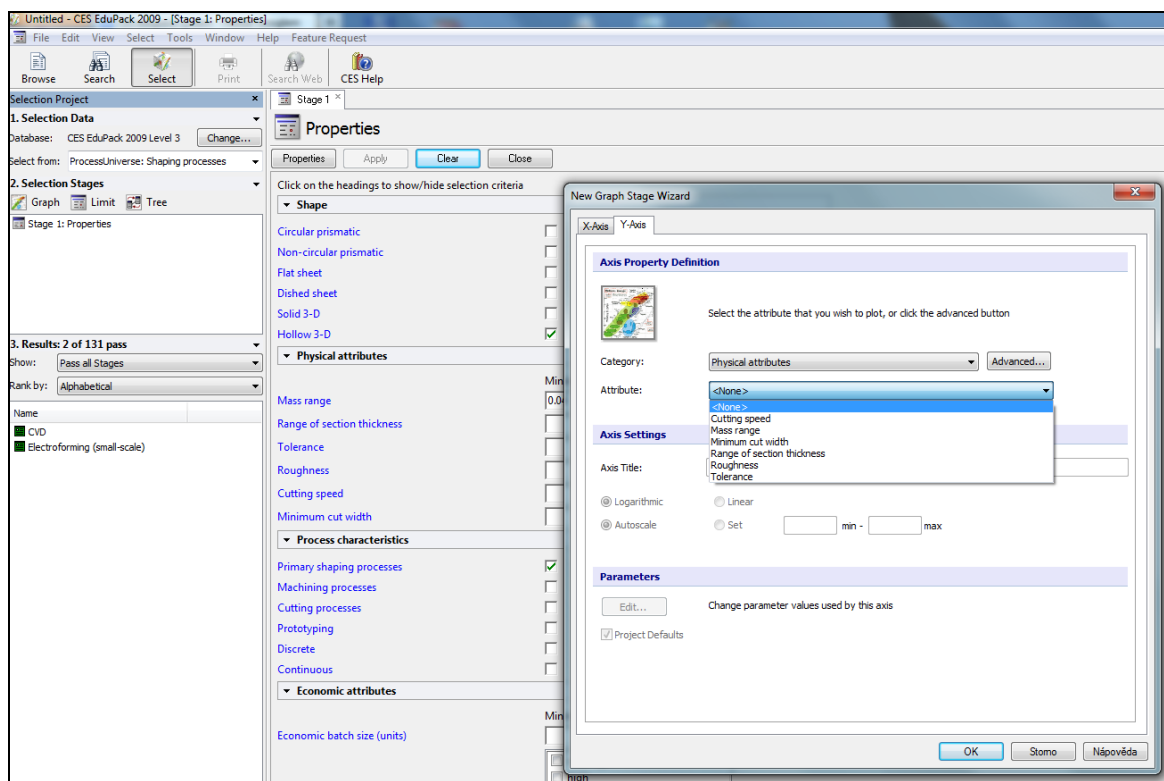
Obr. 6-1 – Nový projekt v CES.

Postupně tak procházíme jednotlivé fáze procesu výběru a specifikujeme jednotlivé vlastnosti. Do prvního dialogového okna vepíšeme stanovené limity – tolerance, hmotnost, atd. Viz. obrázek 6-2. [9]

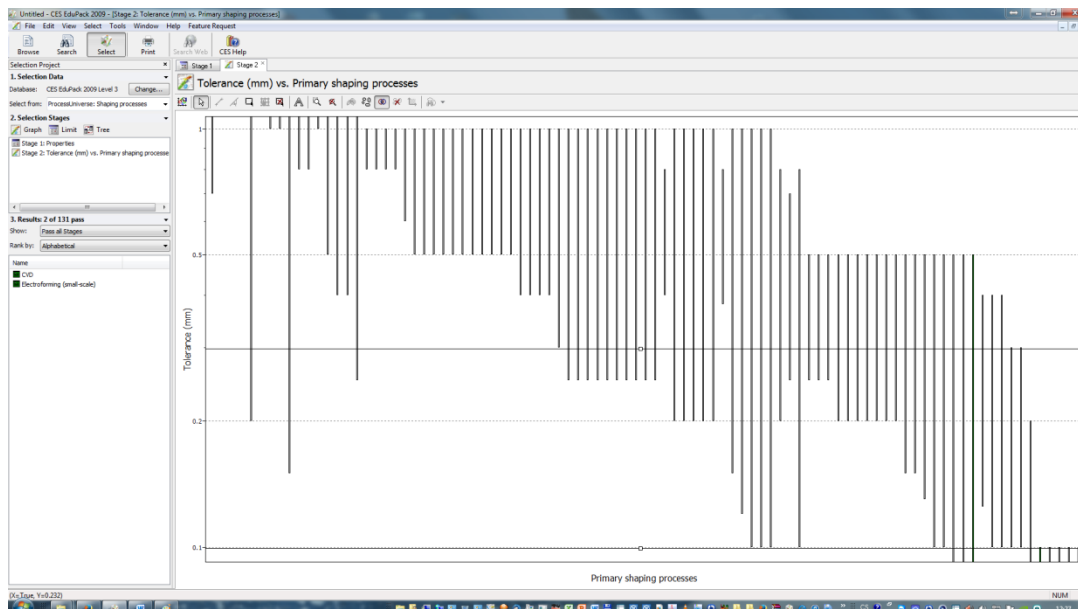


Obr. 6-2 – Zadávání požadovaných parametrů na výrobek v CES.

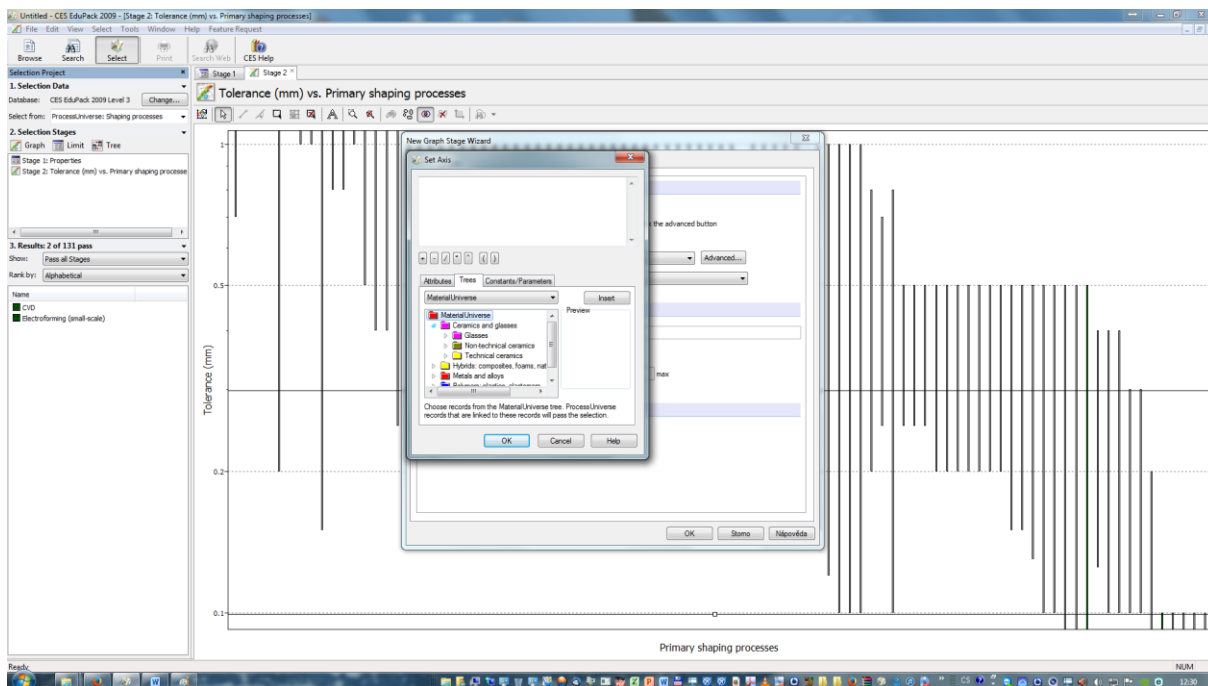
V dalším kroku zadáváme ostatní kritéria, přičemž výsledné hodnoty se nám zobrazí v grafické podobě a my máme možnost výběr dále zužovat. Viz. obrázek 6-3. [9]



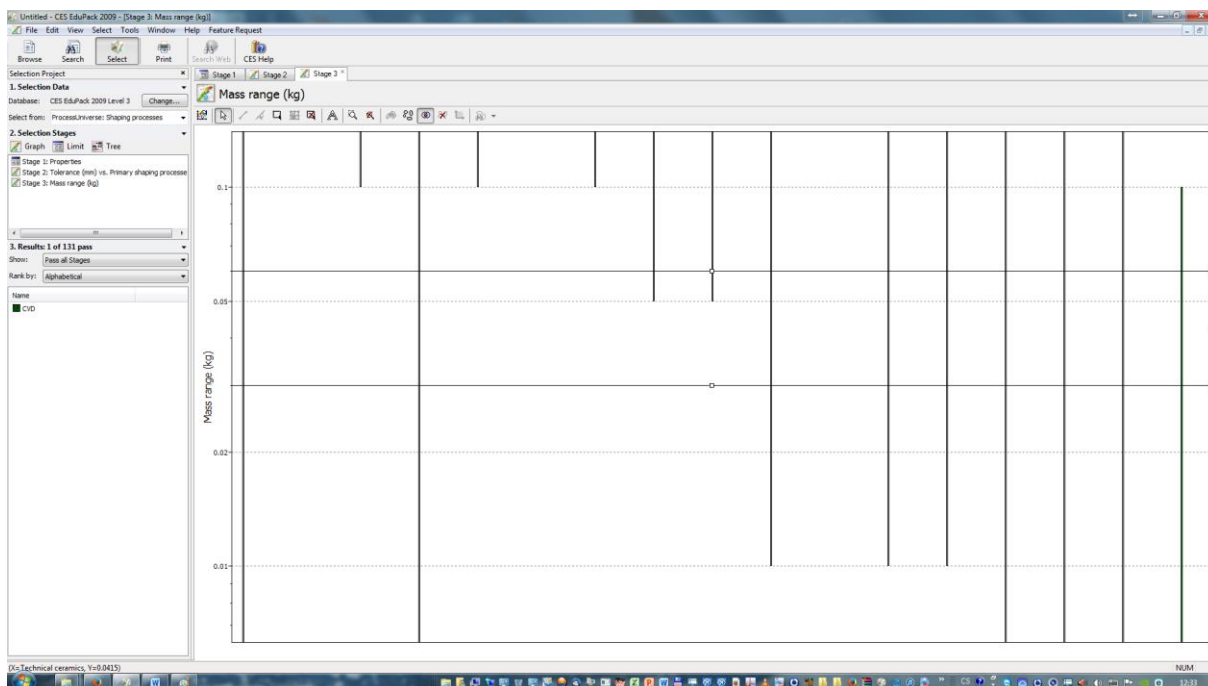
Obr. 6-3 – Kritéria pro výběr výrobního procesu v CES.



Obr. 6-4 - Tolerance v závislosti na Primárních výrobních procesech. Na obrázku je patrné zúžení výsledných hodnot.



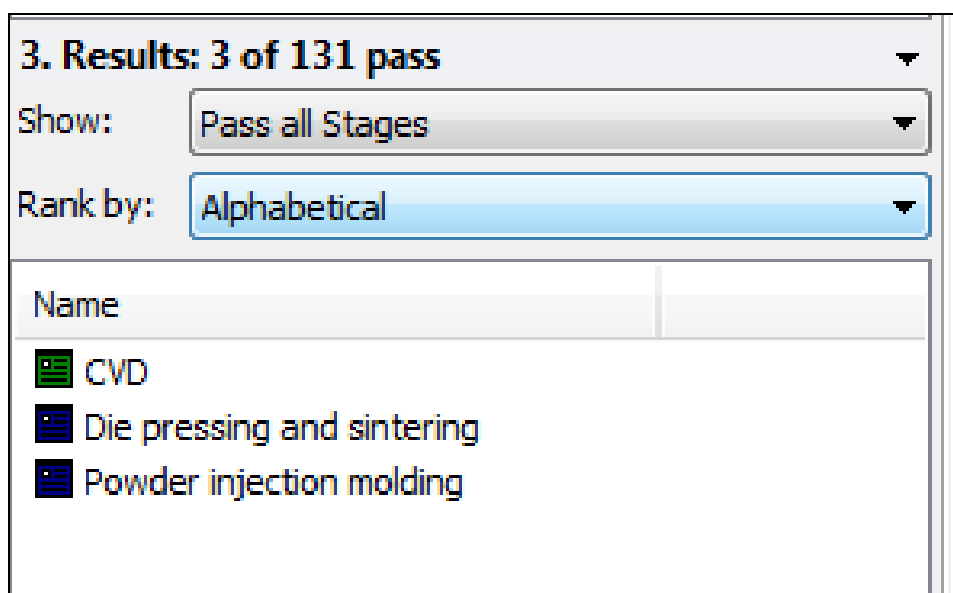
Obr. 6-5 – Výběr materiálu v CES.



Obr. 6-6 – Výběr materiálu podle hmotnosti.



Obr. 6-7 – Výběr na základě velikost várky.



Obr. 6-8 Výsledek – zobrazení výrobních procesů, které odpovídají zadaným parametrům.

Aplikace omezení uvedených v tabulce v začátku kapitoly vyřadí všechny, až na tři procesy ze své databáze – CVD, die pressing a sintering a powder injection molding (PIM). Tyto výrobní procesy jsou tak vhodnými kandidáty pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky. [9]

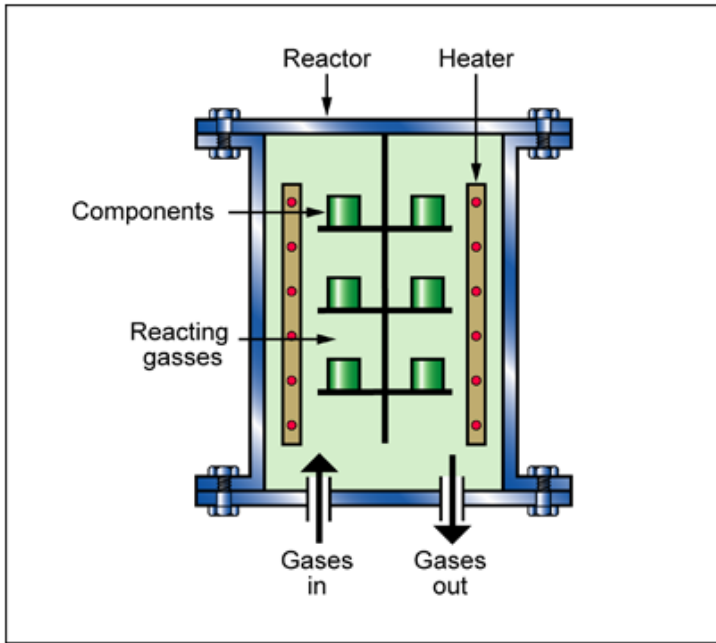
Layout: All processes
Show/Hide

**General**

**Designation**  
Deposition: CVD

**The process**  
In CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (CVD), a reactant gas is fed to the processing chamber where it decomposes at the surface of a heated workpiece liberating one material for either absorption by or accumulation on the workpiece.  
The process is often used to improve wear and corrosion resistance (e.g. of cutting tools), but also can be used to produce final products such as turbine blades and ceramic disks (for tap valves).

**Process schematic**



The schematic shows a rectangular reactor chamber. At the top, there are two vertical tubes labeled 'Reactor' and 'Heater'. Inside the chamber, there are several green cylindrical components mounted on a central vertical shaft. Two vertical tubes on the left and right sides are labeled 'Reacting gasses'. At the bottom, there are two ports: 'Gases in' with an upward arrow and 'Gases out' with a downward arrow.

**Shape**

- Circular prismatic ✓
- Non-circular prismatic ✓
- Flat sheet ✓
- Dished sheet ✓
- Solid 3-D ✓
- Hollow 3-D ✓

**Physical attributes**

Mass range	* 0.001	- 0.1	kg
Range of section thickness	* 0.1	- 3	mm
Tolerance	* 0.05	- 0.5	mm
Roughness	* 0.01	- 0.4	µm

**Process characteristics**

Obr. 6-9 – První navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – CVD.



## Die pressing and sintering

Layout: All processes Show/Hide

### General

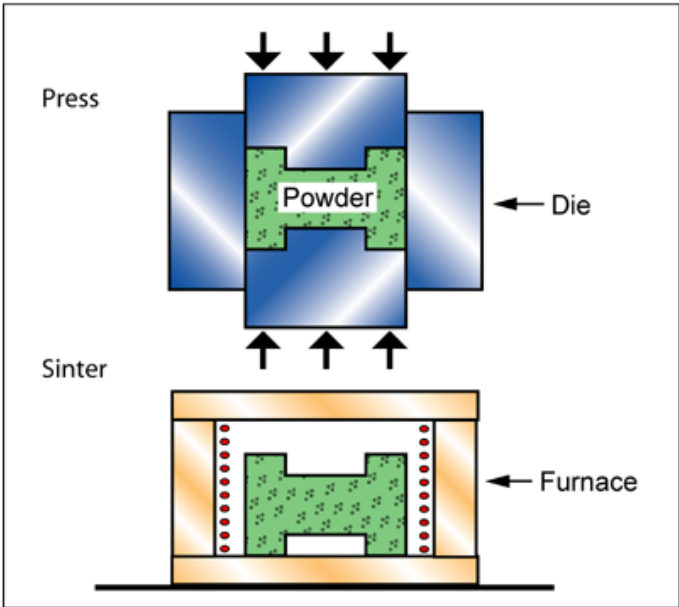
#### Designation

Powder methods: die pressing

#### The process

In DIE PRESSING AND SINTERING, metal or ceramic powders are blended and then pressed in a closed die to form a green compact of the desired shape. The 'green' compact is then sintered by heating it in a controlled atmosphere to a temperature just below the melting point to bond the contacting surfaces of the particles. Components made of unusual materials or mixtures can be produced this way. The process can be suitable for any material, but is mainly used for metals and ceramics. Split dies cannot be used for a variety of technical reasons thus imposing shape limitations. Because of the high abrasive nature of the metal powders, dies are made from steel or tungsten carbide, and are therefore expensive.

#### Process schematic



#### Shape

- Circular prismatic ✓
- Non-circular prismatic ✓
- Solid 3-D ✓
- Hollow 3-D ✓

#### Physical attributes

Mass range	0.01	-	5	kg
Range of section thickness	1.5	-	8	mm
Tolerance	0.1	-	0.5	mm
Roughness	1.6	-	6.3	µm

Obr. 6-10 – Druhý navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – Die pressing and sintering.

## Powder injection molding

Layout: All processes Show/Hide

### General

#### Designation

Powder methods: powder injection molding (PIM)

#### Tradenames

Metal Injection Molding (MIM); Ceramic Injection Molding (CIM)

#### The process

In POWDER INJECTION MOLDING, the metal or ceramic powder is mixed with a thermoplastic binder (up to 50%) and injected under pressure into heated molds on standard injection molding machines. Most of the binder is removed from the molded components by thermal or solvent processing. Parts are then sintered to near full density. The mechanical properties are generally superior to those of traditional P/M parts and not significantly less than those of wrought metal of the same composition. The molding step is fast, but debinding and sintering are slow and therefore constitute a major item in the cost equation. PIM differs from conventional P/M techniques in that much finer powders (2-10 microns) are used, and therefore the availability of suitable powders limits the current materials selection. The process has cost advantages for small complex components made of specialist materials. Variations of PIM are: the Witec process, the Cabot process and the 'binderless' MIM process.

#### Process schematic

The schematic illustrates the two main stages of PIM. In the first stage, a split, heated mould is used to inject a mixture of powder and binder. The mixture is fed into a cylinder containing a screw, which is heated by a heater. The screw rotates, pushing the mixture into the nozzle. In the second stage, the part is debinded and sintered in a mould with heating elements.

### Shape

- Circular prismatic ✓
- Non-circular prismatic ✓
- Solid 3-D ✓
- Hollow 3-D ✓

### Physical attributes

Obr. 6-11 – Třetí navrhovaný výrobní proces pro výrobu izolátoru zapalovací svíčky – Die injection molding.

## 7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo optimalizovat výběr materiálu z hlediska technologie výroby. V textu byl krátce představen proces výroby, jeho úskalí a poukázáno na provázanost volby materiálu a vhodné technologie výroby. Jedná se o obousměrný proces, kdy výběr vhodné technologie výroby přímo závisí na výběru materiálu a naopak. Cíl práce byl splněn v několika krocích.

V rámci teoretické části práce byl stručně představen proces výroby a čtenář byl seznámen s problematikou taxonomie jednotlivých výrobních procesů. Stejně tak bylo pojednáno o charakteristice jednotlivých procesů a jejich podtříd v závislosti na použitém materiálu. Byl představen vzájemný vliv hned několika důležitých faktorů, které nelze při výrobě přehlížet. Jedná se zejména o zvolený materiál, požadavky na funkci konečného produktu, tvar a technologii výroby. Jako další možný faktor, ke kterému se v dnešní době přihlíží stále více, je nutné zmínit výrobní náklady, a tedy i ekonomické hledisko.

Hlavní pozornost v praktické části byla věnována případové studii. V ní bylo využito poznatků z teoretické části a důraz byl kladen na výběr materiálu z hlediska výrobní technologie asistovaný počítačem. Pro simulaci výběru vhodné technologie výroby bylo využito softwaru CES (Computer Engineering Selector). V simulovaném příkladu bylo cílem najít vhodný proces výroby pro izolátor zapalovací svíčky. V úvodní části bylo třeba zvážit všechny požadavky na finální výrobek – funkci, tvar, materiál, hmotnost, cenu, toleranci, přesnost, atd., a v jednotlivých krocích je zadat do počítačového systému. Práce s programem je snadná a intuitivní. Jsou-li jasně stanovené primární požadavky na výrobu, včetně volby materiálu, program nabídne v průběhu minut několik nejvhodnějších kandidátů na technologii výroby pro požadovaný materiál. Výhodou počítačového programu je rovněž to, že lze o vybraných technologiích výroby zjistit maximum informací na jednom místě v přehledné databázi (viz. obrázky v kapitole 6). Tento nástroj je tak velice vhodný pro použití při optimalizaci a standardizaci výběru materiálu z hlediska technologie výroby a naopak.

Text práce doplňuje několik obrázků a tabulek pro lepší názornost a přehlednost.

## 8. Použitá literatura

- [1] ASHBY, M.. *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011.
- [2] ASHBY, M., SHERCLIFF, H., & CEBON, D. *Materials: Engineering, science, processing and design* (2nd ed.).Oxford : Butterworth-Heinemann, 2010.
- [3] BUDINSKI, K.G., & BUDINSKI, M.K. (2010). *Engineering materials, properties and selection* (9th ed.). Prentice Hall.
- [4] CALLISTER, W.D. (2010). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- [5] DIETER, G.E. (1991). *Engineering design, a materials and processing approach* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- [6] DIETER, G.E., & SchMidt, L.C. (2009). *Engineering design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- [7] ESAWI, A., & ASHBY, M.F. (1998). Computer-based selection of manufacturing processes: Methods, software and case studies. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 212, 595–610.
- [8] FARAG, M.M. (2008). *Materials and process selection for engineering design* (2nd ed.). CRC Press, Taylor and Francis.
- [9] Granta Design (2010). The CES Edu system and other teaching resources, accessed from [www.grantadesign.com/education/](http://www.grantadesign.com/education/)
- [10] HOULDCROFT, P. (1990). *Which process?.* Abington Publishing.
- [11] KALPAKJIAN, S., & SCHMIDT, S.R. (2008). *Manufacturing processes for engineering materials* (5th ed.). Prentice Hall.
- [12] LEWIS, G. (1990). *Selection of engineering materials*. Prentice-Hall.
- [13] SHACKELFORD, J.F. (2009). *Introduction to materials science for engineers* (7th ed.). Prentice Hall.
- [14] SWIFT, K.G., & BOOKER, J.D. (1997). *Process selection, from design to manufacture*. Arnold.