



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**ÚSTAV
ŘÍZENÍ A EKONOMIKY
PODNIKU**

Název tématu výukového materiálu

Aditivní výroba a metodika výběru technologie

Výukový předmět

MODERNÍ NÁSTROJE VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ

Autoři

Ing. Pavel Scholz

Výukový materiál navazuje na interní grant Fakulty strojní ČVUT v Praze s názvem Vnitřní soutěž 2015, který se zaměřoval na problematiku aditivní výroby. Tento materiál však vznikl ve volném čase autora a nebyl nikterak financován.



Obsah

Úvod	3
1 Problematika rozhodování.....	4
2 Etapy rozhodovacího procesu výběru aditivní technologie	5
2.1 Krok 1: Analýza rozhodovacího problému	5
2.2 Krok 2: Určení míry nejistoty	5
2.3 Krok 3: Stanovení a popis možných řešení	6
2.4 Krok 4: Stanovení a popis hodnotících kritérií	6
2.5 Krok 5: Sestavení a vyplnění hodnotící matice (tabulky)	6
2.6 Krok 6: Normalizace hodnocení.....	7
2.7 Krok 7: Určení pořadí a nejvhodnější varianty řešení.....	7
2.8 Krok 8: Ověření výsledků a analýza citlivosti.....	8
3 Praktický příklad – Výběr aditivní technologie pro výrobu pojezdových koleček	9
3.1 Krok 1: Analýza rozhodovacího problému	9
3.2 Krok 2: Určení míry nejistoty	10
3.3 Krok 3: Stanovení a popis možných řešení	11
3.4 Krok 4: Stanovení a popis jednotlivých hodnotících kritérií.....	11
3.5 Krok 5: Sestavení a vyplnění hodnotící matice (tabulky)	12
3.6 Krok 6: Normalizace hodnocení.....	13
3.7 Krok 7: Určení pořadí jednotlivých variant řešení.....	14
3.8 Krok 8: Ověření výsledků a analýza citlivosti.....	15
Závěr.....	17
Seznam zdrojů	18
Příloha 1: Rozhodovací strom.....	19

Úvod

Původním smyslem rapid prototypingu, jako technologie výroby 3D objektů, byla možnost vytvořit představu o vzhledu designových a konstrukčních návrhů, a to jak z pohledu čistě vizuálního, tak z pohledu zástavby do montážního celku. Dnešní využití je však již mnohem širší, protože metody rapid prototypingu začínají být využívány pro tzv. rapid manufacturing (RM), tedy výrobu finálních produktů (produktů konečného užití). Příčina spočívá v neschopnosti tradičních technologií vyrábět zákazníkům na míru mnoho malých množství často různě tvarově komplexních produktů v odpovídající kvalitě v potřebném čase a s co nejnižšími náklady. Právě RM může být schopen v této oblasti požadavky zákazníků plnit. A ukazuje se, že ze strany podniků zájem existuje, příkladem může být Boeing Rocketdyne (výroba dílů pro mezinárodní vesmírnou stanici, součásti pro stíhačky F-18), Siemens a Phonak (výroba naslouchátek) apod.

V souvislosti s možností tvarově přizpůsobit výrobek zákazníkovi však vyvstává určitá míra nejistoty, jaké v reálu požadavky zákazníků na tvar opravdu budou. Výsledné požadavky zákazníka totiž budeme znát až v době finální poptávky po výrobě. Účelem tohoto materiálu tedy bude představit metodiku výběru technologie RM při nejistotě tvarové složitosti výrobku, respektive její jednotlivé kroky, a tuto metodiku následně prezentovat na reálném příkladu.

[6,8]

1 Problematika rozhodování

Řešením rozhodovacích problémů se zabývá vědní oblast nazvaná teorie rozhodování, která vznikala již v 40. a 50. letech 20. století. Obecně se teorie rozhodování zaměřuje na studium jednak obsahové (meritorní) stránky rozhodování, dále procesní (formálně-logické) stránky rozhodování a také instrumentální stránky. V průběhu let vznikly různé dílčí rozhodovací teorie, které se od sebe odlišují tím, na co se zaměřují (např. na subjekt rozhodování a jeho chování, výsledný užitek, ...). V našem případě, kdy budeme vybírat vhodnou aditivní technologii, se blíže zaměříme pouze na oblast vícekritériálního rozhodování za nejistoty.

Vícekritériální rozhodování se zaměřuje na celkové ohodnocení užtku jednotlivých variant v případě více odlišných kritérií. Zatímco v předmětu Management a ekonomika podniku, kde byla tato problematika vysvětlena poprvé¹, jsme rozhodovali za určitosti (tzn., že každá varianta nabývala pro jednotlivá kritéria jediné pevně dané hodnoty – užtku), v případě RM se budeme bavit o vícekritériálním rozhodování za nejistoty.

Jak sám název napovídá, tak v procesu rozhodování za nejistoty se do vícekritériálního rozhodování zapracovává určitá míra nejistoty. V našem případě, případě RM, půjde o nejistotu spojenou s výsledným tvarem součásti (zdroj nejistoty), která je odvislá od zákaznickových požadavků. Obecně by zdrojů nejistoty mohlo být více, dovolíme si však malé zjednodušení a omezíme se pouze na tento jeden zdroj, protože ostatní zdroje by byly spíše okrajového charakteru. Abychom tuto nejistotu mohli zapracovat do našeho rozhodování a následně ji modelovat, je nutné stanovit uzavřený interval s minimální $z_{\min}$ a maximální $z_{\max}$ hodnotou, které bude zdroj nejistoty nabývat ($Z \in [z_{\min}; z_{\max}]$). Tento interval pak bude transformovat naši nejistotu do výsledku rozhodování.

Nyní musíme určit způsob, jak budeme na základě intervalu vybírat výsledné řešení. Obecně k tomu slouží tzv. kritéria.² Pro rozhodování o volbě vhodné RM technologie se však považuje za vhodné pouze jediné kritérium – Hurwiczovo kritérium. Jeho použití je založeno na tom, že pro krajní hodnoty intervalu $[z_{\min}; z_{\max}]$ počítáme vážený průměr, kde za váhu dosazujeme tzv. koeficient optimismu α ($0 \leq \alpha \leq 1$) a jeho doplněk do jedné. Koeficient optimismu představuje vlastně postoj rozhodovatele k riziku. Pokud je α zvolena v rozsahu $0,5 \leq \alpha \leq 1$, je rozhodovatel považován za optimistu. Pro α zvolenou v rozsahu $0 \leq \alpha \leq 0,5$ je rozhodovatel pesimista.

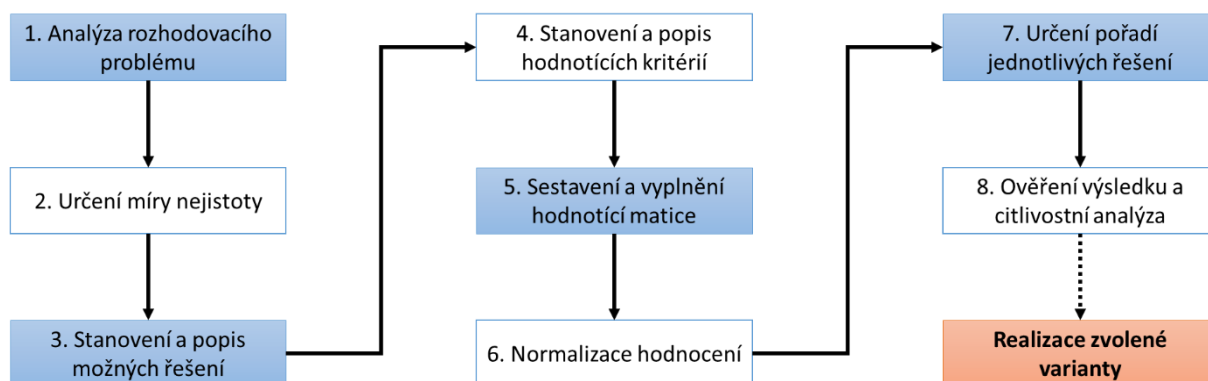
[5,6,9,19]

¹ Blíže viz [19].

² Blíže viz [5,20].

2 Kroky rozhodovacího procesu při výběru aditivní technologie

Samotný proces vícekritériálního rozhodování za nejistoty probíhá v několika etapách (Obr. 1), kdy počet etap je závislý na složitosti rozhodovacího problému. Každé etapě je nutné přikládat odpovídající pozornost.



Obr. 1 Etapy rozhodovacího procesu [zdroj: vlastní]

2.1 Krok 1: Analýza rozhodovacího problému

Zaměřuje se na identifikaci a popis rozhodovacího problému, před kterým rozhodovatel stojí. Ověřuje se, zda se daný problém již řešil nebo zda se řeší poprvé. Definují se důvody, proč tento problém vznikl, případně se určují okrajové podmínky (např. max. požadovaná produktivita nebo výkon strojů, max. požadované užité rozměry strojů apod.).

2.2 Krok 2: Určení míry nejistoty

Pokud tak nebylo učiněno již při vývoji výrobku, je nutné určit míru možnosti zákaznického přizpůsobení z pohledu kvalitativního (možnosti přizpůsobení) a kvantitativního (již samotné určení nejistoty).

Z kvalitativního pohledu jde o dva kroky – o určení stupně, jak moc si zákazník bude moci výsledný produkt přizpůsobit. Da Silveira a kolektiv [15] definovali 8 stupňů takového přizpůsobení: od nejsložitějšího případu, kdy jde o návrh celého produktu zákazníkem (8), přes výběr z předdefinovaných návrhů (7), montáž výrobku z vybraných modulů (6), ..., až k nejjednoduššímu řešení bez volby přizpůsobení – standardizace (1).

Následně když máme vybrán stupeň možnosti přizpůsobení, určíme možný rozsah přizpůsobení zákazníkem. Kamrani (2005) problematiku popisuje např. na obuvi. Stupeň přizpůsobení obuvi bude (6) – zákazník si bude vybírat, z čeho se obuv bude kompletovat. V rámci tohoto stupně mu však umožníme pouze výběr vložky z několika možností, zatímco podešev a svrchní část boty budou standardizovány.

Nakonec musíme kvantifikovat míru přizpůsobení – stanovit krajní hodnoty zdroje nejistoty – interval $[z_{\min}; z_{\max}]$.

2.3 Krok 3: Stanovení a popis možných řešení

Na základě rozpoznání a analýzy rozhodovacího problému je nutné určit přípustnou množinu řešení. Ta mohou být již známa, protože jde o opakující se problém, nebo je nutné je nejdříve vytvořit³. Pokud jsou již řešení známa, můžeme pro určení jejich přípustné množiny využít např. rozhodovací strom, který je jedním z nástrojů rozhodovací teorie. Na základě okrajových podmínek stanovených v 1. kroku zde postupně vybíráme přípustná řešení. Rozhodovací strom si můžeme vytvořit vlastní nebo např. využít některý z již existujících (viz např. Příloha 1)⁴.

Následně by měla být jednotlivá řešení co nejdetailněji⁵ popsána. Nemělo by se zapomenout na hlavní výhody a nevýhody řešení, včetně důsledků. Vhodné je využít například ilustrací pomocí obrázků, schémat, výkresů apod. Z pohledu RM v současnosti existuje na světě celkově více než 34 výrobců strojů pro aditivní technologie a další přibývají (odhad k 2015). Výběr bude tedy čím dál komplikovanější.

2.4 Krok 4: Stanovení a popis hodnotících kritérií

V závislosti na řešeném problému a vybraných variantách řešení se určí kritéria, na základě kterých budou jednotlivé varianty vyhodnoceny. Mezi nejčastější kritéria pro výběr technologie RM patří přesnost, mez pevnosti v tahu, tvrdost, teplota tvarové stálosti, odpor, výrobní čas, náklady výroby apod. U jednotlivých kritérií je popsán jejich význam, je pro ně určena stupnice a jednotky. Např. náklady budeme měřit v Kč, EUR atd. a budeme je chtít minimalizovat.

Jak si ukážeme na praktickém příkladu v Kap. 3, v závislosti na řešeném problému pak některá kritéria využívají stupnice založené na intervalu stanoveném na základě matematických operací: např. objem výrobku, plocha, ... Slovní stupnice u kvalitativních kritérií se převádí na číselnou stupnici. Může jít například o geometrickou složitost (ve smyslu schopnosti technologie vyrobit složitý výrobek), kdy se použije intervalové stupnice např. od 1 do 10, kde 10 představuje nejvyšší složitost.

Na závěr 4. kroku se určí relativní váha důležitosti hodnotících kritérií⁶. Kritérium mající váhu blížící se k 1, je důležitější než kritéria, jejichž váha se blíží 0.

2.5 Krok 5: Sestavení a vyplnění hodnotící matice (tabulky)

Sestavíme tabulku, kde v prvním řádku jsou uvedena kritéria, a v druhém řádku máme váhy důležitosti kritérií. V prvním sloupci jsou jednotlivé varianty řešení, pod něž je vhodné doplnit charakteristiku jednotlivých kritérií (typ, preference – maximalizace/minimalizace, jednotky). Sestavenou tabulku následně vyplníme – doplníme hodnoty kritérií pro varianty řešení (každou aditivní technologii, stroj, materiál apod.).

³ Obecně je možné využít různých metod pro tvorbu variant: intuitivní metody (Brainstorming, Brainwriting, Gordonova metoda, ...) a systematicko-analytické metody (morfologická analýza, metoda analogie, metoda dimenzování, ...). Blíže viz [5,20].

⁴ Blíže viz [7,12].

⁵ Důvodem je účast odborníků z různých oblastí a vše musí být správně pochopeno.

⁶ Určení váhy se provádí pomocí jedné z následujících metod: metoda pořadí, metoda bodovací, metoda párového srovnání. Blíže viz [5,19,20].

Pokud by některé z řešení svými hodnotami překročilo námi vymezenou stupnici, máme dvě možnosti:

1. Můžeme řešení úplně vyřadit, protože nesplňuje námi stanovené podmínky.
2. Nebo řešení nevyhovující podmínkám ponecháme v matici s tím, že na tuto skutečnost budeme brát zřetel při konečném hodnocení. Důvodem může být jednak problematika ostré dolní a horní hranice stanovených podmínek, kdy hodnota hranici překračuje jen velmi lehce. Nebo zájem porovnat výsledky jednotlivých variant včetně těch nepřijatelných a posoudit, jak zásadní jsou rozdíly mezi variantami. Pro výpočet pak za takovou hodnotu dosazujeme 0.

2.6 Krok 6: Normalizace hodnocení

Když jsme určili hodnotu kritérií pro jednotlivé varianty řešení problému, je nutné provést tzv. normalizaci. Jedná se o nalezení společné hodnotící základny, kdy každá hodnota kritéria se pohybuje mezi 0 a 1. V případě, že je preferována maximální hodnota kritéria, provede se normalizace podle následujícího vzorce:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{ij,min}}{a_{ij,max} - a_{ij,min}}$$

Pokud je preferována minimální hodnota kritéria, vzorec nabývá následující formy:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij,max} - a_{ij}}{a_{ij,max} - a_{ij,min}}$$

kde:

r_{ij} ... normalizovaná hodnota pro i-té kritérium, j-tou variantu řešení

a_{ij} ... hodnota i-tého kritéria pro j-tou variantu

$a_{ij,max}$... maximální hodnota, které nabývá i-té kritérium

$a_{ij,min}$... minimální hodnota, které nabývá i-té kritérium

2.7 Krok 7: Určení pořadí a nejvhodnější varianty řešení

V 7. kroku určíme pořadí jednotlivých variant a to tak, že nejprve provedeme agregaci hodnotících kritérií pomocí následujících rovnic. Pro případ rozhodování za nejistoty (kritéria pro jednotlivé varianty nabývají určitého minima a maxima – např. objem) má rovnice dva tvary:

$$M_{i,min} = \sum_{j=1}^n I_j \cdot r_{ij}^{min}$$

$$M_{i,max} = \sum_{j=1}^n I_j \cdot r_{ij}^{max}$$

kde:

M_j ... agregovaná hodnota varianty j

n ... počet variant řešení

I_i ... váha i -tého kritéria

$r_{ij}^{\min}$... normalizovaná minimální hodnota pro i -té kritérium, j -tou variantu řešení

$r_{ij}^{\max}$... normalizovaná maximální hodnota pro i -té kritérium, j -tou variantu řešení

Nyní pomocí koeficientu optimismu α , který si stanovíme, vyhodnotíme jednotlivé varianty řešení podle následujícího vzorce:

$$\beta_i = \alpha \cdot M_{i,\max} + (1 - \alpha) \cdot M_{i,\min}$$

Nakonec jednotlivé varianty seřadíme tak, že budeme preferovat vždy řešení s vyšším koeficientem β .

2.8 Krok 8: Ověření výsledků a analýza citlivosti

Výsledky z předchozího kroku zkontrolujeme. V případě potřeby provedeme citlivostní analýzu, která se může zaměřit jak na změnu váhy jednotlivých kritérií, tak na změny některých vstupních hodnot jako jsou náklady na materiál, náklady na pracovníky apod. Jednotlivá řešení pak seřadíme podle přepočítaných výsledků.

[4,6,8,9,16]

3 Praktický příklad – Výběr aditivní technologie pro výrobu pojezdových koleček

Následující příklad⁷ se zaměřuje na výběr RM technologie pro Albion, Inc., což je společnost zaměřující se na výrobu a montáž pojezdových koleček (Obr. 2) pro běžné i průmyslové použití. Příklad budeme řešit po jednotlivých etapách tak, jak byly představeny výše.

3.1 Krok 1: Analýza rozhodovacího problému

Společnost Albion, Inc. si zakládá jednak na tom, že nabízí velmi rozsáhlý sortiment standardizovaných pojezdových koleček pro uspokojení co největší části běžných potřeb a přání zákazníků. Zároveň se ale snaží trh oslovit cestou, kdy si zákazník může nechat kolečka vyrobit na zakázku dle svého přání. Při takto rozsáhlé nabídce vzniká potřeba velkého množství dílů: různé typy koleček, materiálů (železo, ocel, polyuretan, phenol, guma a jejich kombinace), ložisek apod., z kterých jsou pojezdová kolečka složena, a také potřeba velkého množství náradí a nástrojů (formy, obráběcí nástroje, ...) pro výrobu. Není tedy možné udržovat na skladě vše, protože by to nebylo ekonomické. Ovšem pro společnost je zároveň důležité svá kolečka dodávat rychle a zároveň levně, k tomu všemu často v malém množství. V této souvislosti se právě jeví jako výhodné využití RM technologií, které oproti tradičním technologiím přinášejí následující výhody:

- Vyrobit najednou více různých typů koleček, a to jak v malém, tak středním množství. Vše bez potřeby nástrojů a speciálních forem, které jsou mnohdy drahé a jejich dodání trvá, což umožňuje snížit náklady a čas dodání zakázky.
- RM nabízí na rozdíl od klasických výrobních procesů tvarově složitou výrobku podle přání zákazníků za stále přijatelné náklady.



Obr. 2 Pojezdová kolečka Albion, Inc. [1]

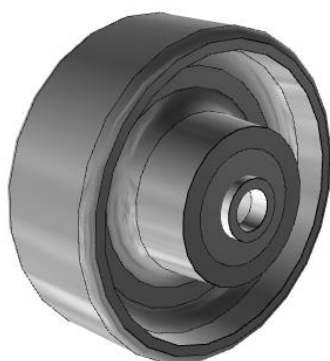
V rámci našeho rozhodování se konkrétně zaměříme na výběr vhodné RM technologie pro zakázkovou výrobu ocelových koleček, jejichž tvar ukazuje Obr. 3 a Obr. 4. Mezi základní požadavky společnosti na vlastnosti budoucí RM technologie patří:

- Použití oceli – technologie musí umět zpracovat materiály z oceli.

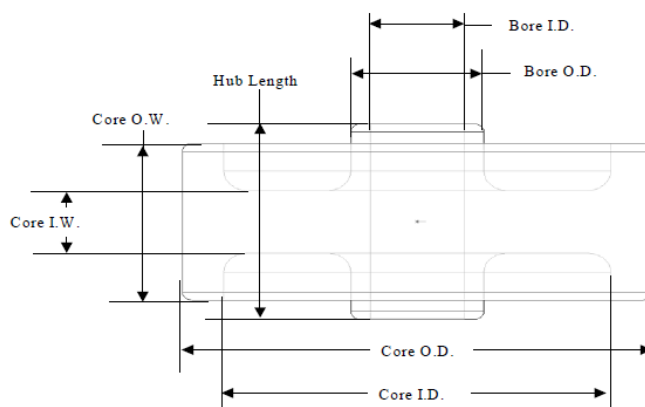
⁷ Příklad převzat primárně ze zdroje [17], který je veřejně dostupnou závěrečnou vysokoškolskou prací, a dále jsou sledovány zdroje [6,9,16]. V [6,16,17] je pojednáváno také o výběru vhodného stroje a materiálu pro výrobu skořepin pro naslouchadla.

- Produktivita – pro společnost je důležitá rychlost výroby, jako kritického faktoru úspěchu.
- Jednoduchá obsluha – umožňuje obsluhu širokým spektrem uživatelů, což zvyšuje využití technologie a zrychluje dodávky.
- Minimální náklady – prodej výrobků se stejnou kvalitou, ale nižší cenou, zvyšuje atraktivitu výrobků. Nižší náklady zároveň umožňují při neproporcionálním snížení ceny zvýšit marži.
- Kvalita povrchu – špatná kvalita může u zákazníka vytvářet představu nekvalitního výrobku.
- Velikost součástí – technologie musí dokázat vyrobit největší předpokládaný rozměr kolečka.

Tyto požadavky nám vzhledem k velkému počtu existujících RM technologií pomohou se zúžením počtu potenciálních řešení v 3. kroku tak, abychom pracovali např. s pouze 5 až 6 řešeními, a také nám pomohou při určování váhy jednotlivých kritérií.



Obr. 3 3D model pojezdového kolečka [1]



Obr. 4 Výkres pojezdového kolečka [17]

3.2 Krok 2: Určení míry nejistoty

Kvalitativní stupeň míry přizpůsobení zákazníkovi určíme na rozhraní stupně (8), zákazník si sice nebude moci navrhnout celé kolečko sám, z důvodu použití standardizovaných šroubů bude pevně dán vnitřní průměr a délka díry, ale všechny ostatní parametry si již bude volit. Kvantitativně míru přizpůsobení určíme na základě volených parametrů a jejich rozměrových intervalů, které určil konstruktér. Ukazuje je Obr. 3 a Obr. 4 a následující Tab. 1:

Tab. 1 Parametry kolečka a jejich interval [vlastní podle 17]

		Vnější průměr kolečka	Vnitřní průměr kolečka	Vnější průměr náboje	Vnitřní průměr náboje	Délka náboje	Vnější šířka kolečka	Vnitřní šířka kolečka
Rozměr [mm]	Min	100	90	38	32	64	38	12
	Max	150	140	58	32	64	125	32

Výslednou nejistotou pro rozhodování pak bude objem kolečka v intervalu $[1,7 \cdot 10^5 \text{ mm}^3; 1,2 \cdot 10^6 \text{ mm}^3]$. Spodní hodnota objemu bude dopočtena nebo určena z 3D modelu na základě

minimálních rozměrů a horní na základě maximálních rozměrů, které si zákazník může zvolit v Tab. 1. Minimální a maximální hodnota objemu se pak promítne do propočtu pořadí řešení skrze propočet minimálních a maximálních hodnot výrobního času a nákladů.

3.3 Krok 3: Stanovení a popis možných řešení

Mezi možná řešení, se kterými bude dále pracováno, byly zařazeny následující technologie: Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Melting (EBM), Laser Engineered Net Shaping (LENS), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM). Původně připadaly v úvahu i další tři řešení, které však byly vyřazeny pro nesplnění základních požadavků: PROMETAL a Ultrasonic Object Consolidation (UOC), které však neumožňují zpracování materiálů z oceli, a také Direct Metal Laser Melting (DMLM), protože jde o teprve vyvíjenou technologii.

Jednotlivé technologie (řešení) zde nebudou blíže popisovány, protože byly popsány již v jiných materiálech. Za běžných okolností by se zde však vyskytoval jejich detailní popis.

3.4 Krok 4: Stanovení a popis jednotlivých hodnotících kritérií

Pro hodnocení jednotlivých variant řešení rozhodovacího problému byla vybrána následující kritéria:

- Mez pevnosti v tahu (R_m [MPa]): Představuje nejvyšší hodnotu napětí, při jejímž překročení se materiál zlomí.
- Tvrdost podle Rockwella C (H [HRC]): Je definována jako odolnost materiálu proti vnikání tělesa do povrchu.
- Hustota (ρ [%]): – finální hustota po všech operacích. Hustota je úměrná množství pórů nalezených na povrchu. Tyto póry určují výslednou drsnost povrchu.
- Rozlišení (R [mm]): Představuje nejmenší rozměr, který lze technologií vytvořit. Jednotka stupnice.
- Tvarová složitost (TS, interval bodů 1 až 10): Schopnost technologie vytvářet složité výrobky, konkrétně v tomto případě přesahující části výrobku.
- Výrobní čas (Čas [hod/kus]): Čas potřebný k výrobě součásti. Neobsahuje následné činnosti chemicko-tepelného zpracování. Budeme potřebovat minimální a maximální hodnotu, která byla určena na základě objemu skořepiny.
- Náklady (N [USD/kus]): Obsahují všechny náklady spojené s výrobou jako výrobní náklady, materiálové náklady, odpisy, provozní náklady apod. Jako v předchozím případě budeme potřebovat min. a max. hodnotu, která byla určena základě objemu skořepiny.

Pro jednotlivá kritéria jsme dále určili stupnici s min. a max. přípustnými hodnotami – viz Tab. 2:

Tab. 2 Stupnice jednotlivých kritérií [vlastní podle 17]

		Kritéria									
		Mez pevnosti	Tvrdost	Hustota	Rozlišení	Tvarová složitost		Výrobní čas		Náklady	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max
Stupnice	Type	Poměr	Poměr	Poměr	Poměr	Interval		Poměr		Poměr	
	Dolní hodnota	500	10	95	2	1		2		25	
	Horní hodnota	2500	70	100	0,1	10		120		1000	
	Preferováno	2500	70	100	0,1	10		2		25	
	Jednotky	Mpa	HRC	%	mm	Body		hod./kus		USD/kus	

A také jejich relativní váhu, k čemuž bylo využito metody párového srovnání. Postup určení relativní váhy kritérií zde nebudeme konkrétně popisovat, jelikož jde o znalosti získané z předchozích předmětů, pouze si uvedeme konkrétní hodnoty (Tab. 3). Tým expertů určující váhu mohou tvořit např. zástupci odběratele, výrobce výrobku a výrobce či dodavatele výrobní technologie.

Tab. 3 Relativní váha kritérií [vlastní podle 17]

		Kritéria									
		Mez pevnosti	Tvrdost	Hustota	Rozlišení	Tvarová složitost		Výrobní čas		Náklady	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max
Relativní váha		0,167	0,143	0,071	0,024	0,214	0,214	0,190	0,190	0,190	0,190

Největší váha 0,214 byla přidělena tvarové složitosti, kterou je schopná technologie vyrobit, protože má vliv na schopnost vyrábět přečnívající části kolečka. Vysokou váhu má také výrobní čas a náklady, protože jde o důležitou konkurenční výhodu společnosti. Vzhledem k už tak velmi vysokému rozlišení většiny RM technologií není toto kritérium pro rozhodování stěžejní, a tudíž má nejmenší váhu.

3.5 Krok 5: Sestavení a vyplnění hodnotící matice (tabulky)

Na základě kroků 3 a 4 sestavíme hodnotící matici (Tab. 4), kde v druhém sloupci jsou uvedeny názvy jednotlivých řešení, v dalších sloupcích jsou pak uvedena hodnotící kritéria, která jsou v dolní části tabulky blíže specifikována. Na závěr celou tabulku doplníme hodnotami, kterých jednotlivá řešení dosahují.

Tab. 4 Matice hodnotami kritérií pro jednotlivá řešení [vlastní podle 17]

		Kritéria									
		Mez pevnosti	Tvrdost	Hustota	Rozlišení	Tvarová složitost		Výrobní čas		Náklady	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max
Relativní váha		0,167	0,143	0,071	0,024	0,214	0,214	0,190	0,190	0,190	0,190
Varianty řešení	DMD	1800	53	100	1,016	4	6	10,43	72,25	29,48	168,15
	DMLS	600	21	95	0,3	7	10	17	117,79	396,98	2045,93
	EBM	1430	50	100	1,2	7	10	4,27	29,56	134,41	508,56
	LENS	1703	53	100	0,762	4	6	2,06	14,28	64,17	306,52
	SLM	2000	60	99,5	0,15	7	10	11,25	77,96	237,43	1340,57
	SLS	606	15	100	0,6	7	10	17	117,79	180,67	889,63
Stupnice	Typ	Poměr	Poměr	Poměr	Poměr	Interval		Poměr		Poměr	
	Dolní hodnota	500	10	95	2	1		2		25	
	Horní hodnota	2500	70	100	0,1	10		120		1000	
	Preferováno	2500	70	100	0,1	10		2		25	
	Jednotky	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Body		hod./kus		USD/kus	

Při pohledu do tabulky vidíme, že technologie DMLS a SLM nesplňují stanovené podmínky nákladového kritéria, obě překračují maximální stanovenou hodnotu. Pro výpočet je však v řešení ponecháme, abychom mohli sledovat, na jakém pořadí tyto varianty skončí, a budeme za tyto hodnoty dosazovat do výpočtů 0 (v Tab. 5 označeny zeleně).

3.6 Krok 6: Normalizace hodnocení

Provedeme normalizaci (Tab. 5) podle vzorců uvedených dříve. Postup výpočtu si ukážeme na kritériu mez pevnosti a výrobní čas (v tabulce zobrazeno oranžovou barvou). Pro kritérium mez pevnosti preferujeme co největší hodnotu, a proto výpočet normalizované hodnoty pro toto kritérium a řešení DMD bude vypadat následujícím způsobem (za max. a min. dosazujeme dolní a horní hodnotu stupnice):

$$r_{11} = \frac{a_{11} - a_{11,min}}{a_{11,max} - a_{11,min}} = \frac{1800 - 500}{2500 - 500} = 0,6500$$

Pro kritérium výrobní čas preferujeme co nejmenší hodnotu, a proto výpočet normalizované hodnoty pro toto kritérium a řešení DMD bude vypadat následujícím způsobem:

$$r_{16(min)} = \frac{a_{16(min),max} - a_{16(min)}}{a_{16(min),max} - a_{16(min),min}} = \frac{120 - 10,43}{120 - 2} = 0,9286$$

$$r_{15(max)} = \frac{a_{16(max),max} - a_{16(max)}}{a_{16(max),max} - a_{16(max),min}} = \frac{120 - 72,25}{120 - 2} = 0,4047$$

Zde vypočtené hodnoty jsou v Tab. 5 zvýrazněny oranžovou barvou.

Tab. 5 Matice normalizovaných hodnot [vlastní podle výpočtů a podle 17]

		Kritéria									
		Mez pevnosti	Tvrdost	Hustota	Rozlišení	Tvarová složitost		Výrobní čas		Náklady	
						Min	Max	Min	Max	Min	Max
Relativní váha		0,167	0,143	0,071	0,024	0,214	0,214	0,190	0,190	0,190	0,190
Varianty řešení	DMD	0,6500	0,7167	1,0000	0,5179	0,3333	0,5556	0,9286	0,4047	0,9954	0,8532
	DMLS	0,0500	0,1833	0,0000	0,8947	0,6667	1,0000	0,8729	0,0187	0,6185	0,0000
	EBM	0,4650	0,6667	1,0000	0,4211	0,6667	1,0000	0,9808	0,7664	0,8878	0,5040
	LENS	0,6015	0,7167	1,0000	0,6516	0,3333	0,5556	0,9995	0,8959	0,9598	0,7113
	SLM	0,7500	0,8333	0,9000	0,9737	0,6667	1,0000	0,9216	0,3563	0,7821	0,0000
	SLS	0,0530	0,0833	1,0000	0,7368	0,6667	1,0000	0,8729	0,0187	0,8403	0,1132

3.7 Krok 7: Určení pořadí jednotlivých variant řešení

V tomto kroku nejprve provedeme agregaci hodnotících kritérií, a to zvlášť pro spodní hodnotu intervalu (pro minimum) a zvlášť pro horní hodnotu (pro maximum). Kritéria, která nejsou intervalová a mají pouze jednu hodnotu, se dosazují do obou výpočtů stejně. Ukázka výpočtu pro DMD:

$$\begin{aligned}
 M_{1,min} = M_{DMD,min} &= \sum_{j=1}^n I_j \cdot r_{ij}^{min} \\
 &= 0,167 \cdot 0,6500 + 0,143 \cdot 0,7167 + 0,071 \cdot 1,0000 + 0,024 \cdot 0,5179 + 0,214 \cdot 0,3333 + 0,190 \cdot 0,9286 + 0,190 \cdot 0,9954 = 0,731
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{1,max} = M_{DMD,max} &= \sum_{j=1}^n I_j \cdot r_{ij}^{max} \\
 &= 0,167 \cdot 0,6500 + 0,143 \cdot 0,7167 + 0,071 \cdot 1,0000 + 0,024 \cdot 0,5179 + 0,214 \cdot 0,5556 + 0,190 \cdot 0,4047 + 0,190 \cdot 0,8532 = 0,652
 \end{aligned}$$

Nyní zohledníme nejistotu pomocí koeficientu optimismu α , který stanovíme na 0,7, abychom mohli určit pořadí.

$$\beta_1 = \beta_{DMD} = \alpha \cdot M_{i,max} + (1 - \alpha) \cdot M_{i,min} = 0,7 \cdot 0,652 + (1 - 0,7) \cdot 0,731 = 0,68$$

Čím vyšší je hodnota funkce β , tím preferovanější je dané řešení. Výsledné pořadí a hodnoty funkce M a funkce β pro jednotlivá řešení ukazuje následující tabulka.

Tab. 6 Tabulka hodnot M_{min} , M_{max} , Hurwiczova kritéria a výsledn. pořadí [vlastní dle výpočtů a dle 17]

		M min	M max	Hurwiczovo kritérium	Pořadí
Varianty řešení	DMD	0,731	0,652	0,68	3
	DMLS	0,482	0,274	0,34	6
	EBM	0,752	0,709	0,72	1
	LENS	0,733	0,714	0,72	2
	SLM	0,798	0,613	0,67	4
	SLS	0,578	0,349	0,42	5

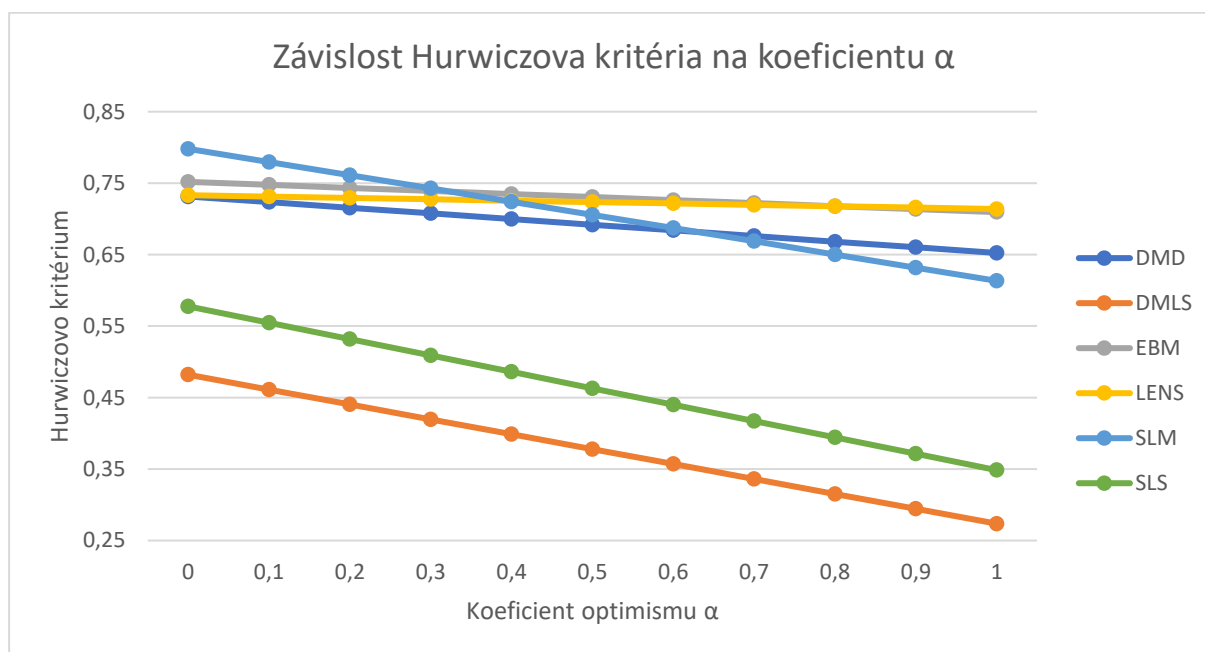
3.8 Krok 8: Ověření výsledků a analýza citlivosti

Z hlediska správnosti výsledků můžeme na základě našich znalostí říct, že výsledky vychází podle očekávání a jsou v pořádku. Při pohledu na Tab. 6 vychází jako nejlepší řešení použití technologie EBM a LENS, jejichž hodnota Hurwiczova kritéria se liší pouze v řádu tisícín. Je to dáno zejména výbornými výrobními časy a také obstojnými náklady (viz Tab.4). Řešení, která nesplnila naše podmínky, se umístily na v pořadí 4. a 6. místě, v celkovém hodnocení tedy nehrají nikterak zásadní roli.

Citlivostní analýzu zaměříme na dvě oblasti:

1. Analýzu citlivosti výsledků na velikosti koeficientu optimismu α

Cílem této analýzy by mělo být jednak ověření, zda nedochází k zásadním změnám v pořadí navrhovaných řešení na předních místech, pokud by byl koeficient α o něco málo nižší nebo vyšší. A dále nás bude zajímat celkově, k jak zásadním změnám v pořadí dochází v celém rozsahu koeficientu α ($0 \leq \alpha \leq 1$). Pokud bychom propočítali pro všechna řešení výši Hurwiczova kritéria pro hodnoty koeficientu α v intervalu $0 \leq \alpha \leq 1$ a hodnoty kritéria vynesli do spojnicového grafu, dostali bychom následující graf (Obr. 5):



Obr. 5 Závislost Hurwiczova kritéria na koeficientu α [vlastní podle výpočtů a podle 17]

Při pohledu na Obr. 5 můžeme konstatovat, že technologie EBM a LENS nejsou nejvýhodnější pouze pro $\alpha = 0,7$, či jeho o něco vyšší či menší hodnotu, ale pro koeficient optimismu α v rozsahu $0,6 \leq \alpha \leq 1$. Pro nižší hodnoty $0 \leq \alpha \leq 0,3$ je nejvýhodnější SLM, která však nenaplnuje námi stanovené podmínky, a nemůže být tudíž zahrnuta do výsledného hodnocení.

2. Analýzu citlivosti výsledků při změně relativní váhy hodnotících kritérií

Vytvoříme druhý scénář, při kterém bude váha všech kritérií shodná, přibližně 0,143 (1/7). Koeficient α ponecháme na 0,7. Dle Tab. 7 je pořadí řešení na tuto změnu sice citlivé, i přesto je nejvýhodnějším řešením opět LENS. Za to na druhém místě v pořadí došlo ke změně, je

zde technologie SLM, která byla v prvním scénáři na 4. místě. Je to pro nás ale signál, že pokud bychom kladli větší důraz na jiná kritéria, je pořadí jiné a je nutné si tyto dopady uvědomovat. SLM ovšem nesplnila námi zadaná kritéria a nelze ji tedy uvažovat, pro ilustraci jde však o důležitou ukázkou.

Tab. 7 Analýza citlivosti na změnu váhy kritérií [vlastní podle výpočtů a podle 17]

		M min	M max	Hurwiczovo kritérium	Pořadí
Varianty řešení	DMD	0,735	0,671	0,69	4
	DMLS	0,469	0,307	0,36	6
	EBM	0,727	0,689	0,70	3
	LENS	0,752	0,733	0,74	1
	SLM	0,832	0,688	0,73	2
	SLS	0,608	0,429	0,48	5

Na závěr každého rozhodovacího problému, výběru vhodné RM technologie nevylučujeme, bychom neměli zapomínat na limity rozhodovacího procesu, jež jsou v tomto případě tyto:

1. Na rozdíl od technických kritérií, jako jsou mez pevnosti, drsnost apod., která jsme schopni poměrně přesně orientačně určit, je určení kritéria výrobního času (tím pádem i nákladů) komplikovanější, protože vyžaduje nespočet měření. Výrobní čas totiž není proporcionální vzhledem k velikosti součásti nebo jejich počtu (výrobní dávce). Bez praktického ověření je tedy obecně obtížné určit, která aditivní technologie je v tom daném případě zrovna rychlejší.
2. Výsledky jsou platné pro konkrétní účel – v tomto případě výrobu pojezdového kolečka. Pokud se v průběhu realizace vybraného řešení změní účel výběru, změní se nejenom pořadí jednotlivých technologií, ale např. i strojů v rámci stejné technologie.
3. Zejména ekonomická stránka technologie nebo přímo stroje je věcí daného rozhodovacího okamžiku. Stačí, aby výrobci objevili novou oblast pro využití stroje nebo nový trh a vstupní hodnoty mohou být zastaralé.

[6,9,16,17]

Závěr

Rozhodovací problémy existují snad ve všech oblastech lidské činnosti. Na jejich řešení se zaměřuje teorie rozhodování. Jak by se mohlo mylně zdát, poznatky z teorie rozhodování se v oblasti aditivních technologií nevyužívají jen při rozhodování o výběru vhodné technologie, stroje nebo materiálu, ale představují také důležitý prostředek např. při rozhodování o volbě správné orientace součásti při výrobě⁸. V našem výkladu jsme se však zaměřili právě na vysvětlení postupu výběru RM technologie pro výrobu, protože jde o jeden z nejčastěji řešených problémů.

RM technologie se výborně hodí pro zakázkovou výrobu tvarově složitých součástek v malých sériích. Abychom mohli v takovém případě vybrat jednu nejvhodnější RM technologii je nutné použít v praxi postup často používaný, a to vícekriteriální rozhodování. Vzhledem k tomu, že však nemůžeme určit přesnou velikost výrobku, je nutné postup modifikovat na vícekriteriální rozhodování za nejistoty s využitím Hurwiczova kritéria. Zdroj nejistoty je zde konkrétně reprezentován minimálním a maximálním objemem součásti vypočítaným na základě konstruktérem stanovených min. a max. rozměrů, ze kterých si bude moci zákazník vybírat. Tato nejistota se následně promítá do dalších kritérií vícekriteriálního rozhodování, kterými jsou nejčastěji výrobní čas a náklady. Jakmile provedeme normalizaci hodnocení jednotlivých kritérií a následnou agregaci, je nutné přistoupit k zohlednění nejistoty do výsledného pořadí výhodnosti jednotlivých variant – výpočet Hurwiczova kritéria. Ten se vypočítá jako vážený průměr pomocí koeficientu optimismu α . Na závěr je vhodné ověřit pravdivost výsledků a provést analýzu citlivosti výsledků na výši koeficientu α , váhu kritérií apod.

V praxi je pak možné využít další modifikované postupy (metodiky) založené na vícekriteriálním rozhodování⁹. K některým z nich vznikly v minulosti i softwarové nástroje na bázi Matlabu, MS Excel apod. Obecně při použití jakékoliv metodiky je nutné mít na paměti, že tato metodika musí být: nestranná, nesmí čistě kvantifikovat pořadí, postup musí být důsledně vysvětlen, uživatel musí znát možnosti volby kritérií apod., musí vycházet z aktuálních informací např. o technologiích, a musí poskytovat odkazy na další informace jako jiné metody, ...

Ještě dodejme, že by samozřejmě bylo možné zvolit postup v podobě vícekriteriálního rozhodování za jistoty, kdy bychom problém zjednodušili a počítali pouze s průměrným objemem, mohlo by však dojít ke značnému zkreslení. Zároveň bychom tím popřeli značné výhody aditivních technologií obecně – výroba tvarově složitých součástí v malých množstvích.

⁸ Blíže viz [3].

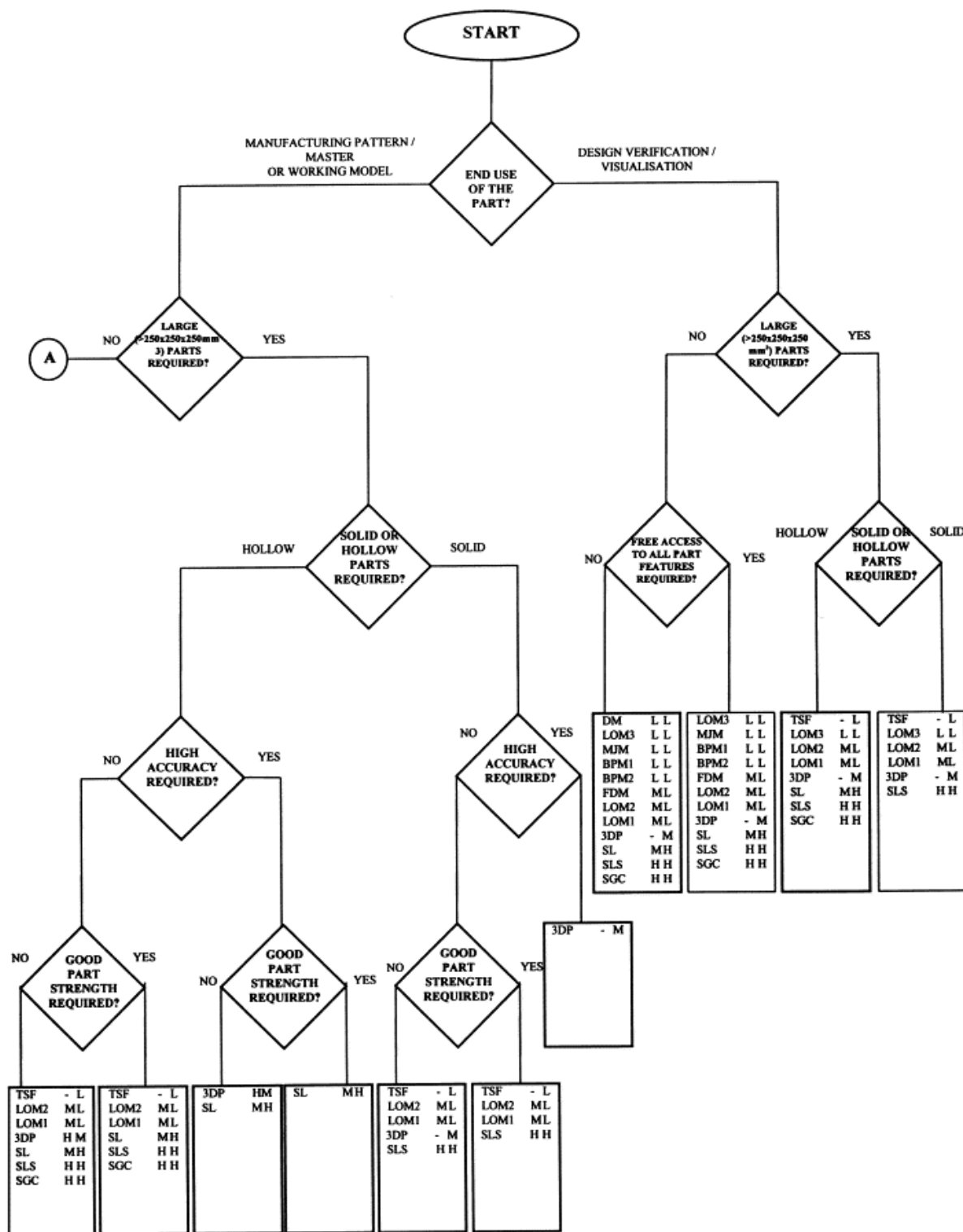
⁹ Blíže viz [2,10,11,13,14,18].

Seznam zdrojů

1. ALBION CASTERS. *Albion Casters* [online]. 2015 [cit. 2015-07-23]. Dostupné z: <http://www.albioncasters.com/>
2. BYUN, H.S. a K.H. LEE. A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, 26(11-12): 1338-1347 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1007/s00170-004-2099-2.
3. BYUN, Hong-Seok a Kwan H. LEE. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2006, 22(1): 69-80 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1016/j.rcim.2005.03.001.
4. FERNANDEZ, M. G. Decision Support in Concurrent Engineering - The Utility-Based Selection Decision Support Problem. *Concurrent Engineering* [online]. 2005, 13(1): 13-27 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1177/1063293x05050912.
5. FOTR, Jiří a kol. *Manažerské rozhodování: postupy, metody a nástroje*. 2., přeprac. vyd. Praha: Ekopress, 2010. 474 s. ISBN 978-80-86929-59-0.
6. GIBSON, I., ROSEN, D. W. a STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, ©2010. xxii, 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3.
7. GORSKI, Filip, Wiesław KUCZKO, Radosław WICHNIAREK, Adam DUDZIAK, Maciej KOWALSKI a Przemysław ZAWADZKI. Choosing optimal rapid manufacturing process for thin-walled products using expert algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management* [online]. 2010, 3(2) [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.3926/jiem.2010.v3n2.p408-420.
8. HERMANN, Amy a Janet K. ALLEN. SELECTION OF RAPID TOOLING MATERIALS AND PROCESSES IN A DISTRIBUTED DESIGN ENVIRONMENT. In: *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences*. Las Vegas, Nevada, 1999, s. 12. Dostupné také z: http://www.srl.gatech.edu/publications/1999/jka.herrmann.ASME.selection_rapid_tool.99.pdf
9. KAMRANI, A. K., NASR, E. A. *Rapid Prototyping: Theory and Practice*. Springer US, 2006. 324 s. ISBN 978-0-387-23290-4.
10. Lan, H., DING, Y. a J. HONG. Decision support system for rapid prototyping process selection through integration of fuzzy synthetic evaluation and an expert system. *International Journal of Production Research* [online]. 2005, 43(1): 169-194 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1080/00207540410001733922.
11. NAGAHANUMAIH, K. SUBBURAJ a B. RAVI. Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development. *Computers in Industry* [online]. 2008, 59(2-3): 262-276 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1016/j.compind.2007.06.021.
12. PHAM, D.T a R.S. GAULT. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1998, 38(10-11): 1257-1287 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1016/s0890-6955(97)00137-5.
13. RAO, R. Venkata a K.K. PADMANABHAN. Rapid prototyping process selection using graph theory and matrix approach. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, 194(1-3): 81-88 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.003.
14. SHENDE, Vikram a Dr. Prafulla KULKARNI. Decision Support System for Rapid Prototyping Process Selection. *International Journal of Scientific and Research Publications* [online]. 2014, 4(1) [cit. 2015-07-23]. ISSN 2250-3153. Dostupné z: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0114/ijsrp-p2588.pdf>
15. SILVEIRA, Giovanni Da, Denis BORENSTEIN a Flávio S FOGLIATTO. Mass customization: Literature review and research directions. *International Journal of Production Economics* [online]. 2001, 72(1): 1-13 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1016/s0925-5273(00)00079-7.
16. WILSON, Jamal O. a David ROSEN. Selection for Rapid Manufacturing Under Epistemic Uncertainty. In: *Volume 4b: Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference* [online]. 2005 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1115/detc2005-85264.
17. WILSON, Jamal Omari. *Selection for Rapid Manufacturing under Epistemic Uncertainty* [online]. Georgia, 2006 [cit. 2015-07-23]. Dostupné z: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/10569>.
18. ZHANG, Yicha a Alain BERNARD. An integrated decision-making model for multi-attributes decision-making (MADM) problems in additive manufacturing process planning. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2014, 20(5): 377-389 [cit. 2015-07-23]. DOI: 10.1108/rpj-01-2013-0009.
19. ZRALÝ, Martin. *Management a ekonomika podniku: sbírka úloh pro cvičení*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 216 s. ISBN 978-80-01-05460-4.
20. ŽÁČEK, Vladimír. *Teorie managementu*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. 208 s. ISBN 978-80-01-03963-2.

Příloha 1: Rozhodovací strom

Rozhodovací strom pro volbu technologie Rapid Prototyping [12].



NOTE:

Processes are listed, followed by an estimate of their capital and running costs. These can be either high (H), medium (M) or low (L).

