ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metody výroby lopatek vodní turbíny
Methods of production of water turbine blades

AUTOR: Jan Belobrad

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Chrášťanský

PRAHA 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Belobrad** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457631**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody výroby lopatek vodní turbíny

Název bakalářské práce anglicky:

Methods of production of water turbine blades

Pokyny pro vypracování:

Cíle práce:
1) Seznámení s problematikou
2) Charakteristika možných výrobních metod, jejich výhody a nevýhody
3) Volba vhodných technologií výroby lopatek
4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

podle pokynů vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Chrášťanský, ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. František Tatíček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**

Ing. Lukáš Chrášťanský	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

15.5.2018 Belobrad

Datum převzetí zadání Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů**.**

V Praze dne: ……. ……

Podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Lukáši Chrášťanskému za odborné vedení a za ochotu konzultovat danou problematiku při vypracovávání této bakalářské práce. Mé poděkování patří i panu Ing. Františku Tatíčkovi, Ph.D., za poskytnutí cenných rad a věcných poznámek a Ing. Břetislavu Machkovi s pomocí při experimentu.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název bakalářské práce:	Metody výroby lopatek vodní turbíny
Akademický rok:	2017/2018
Autor:	Jan Belobrad
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Chrášťanský

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výroby lopatek vodní turbíny. Předmětem práce je vytvoření souhrnu možných metod výroby lopatek a na základě určitých kritérií vybrat nejvhodnější metody. Teoretická část pojednává o základní charakteristice technologie tváření, popisu možných metod výroby a použitých materiálových jakostech. Dále jsou navrženy nejvhodnější metody výroby lopatek. V praktické části je provedeno experimentální ověření jedné z navržených metod.

Klíčová slova: lopatky vodní turbíny, tváření kovů, metody výroby

Rozsah práce a příloh

Počet stran:	**44**
Počet obrázků:	**25**
Počet tabulek:	**14**

Annotation

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Manufacturing Technology

Title of work: Methods of production of water turbine blades

Academic year: 2017/2018

Author: Jan Belobrad

Supervisor: Ing. Lukáš Chrášťanský

Abstract:

The bachelor thesis describes problematics of production of water turbine blades. Subject of thesis is to create summary of possible manufacturing methods of water turbine blades and according to certain criteria to choose the best production methods. The introductory part deals with basic characteristics of metal forming technology, description of possible methods of production and used materials. Furthermore, the most advantageous methods of production of water turbine blades are suggested. In the practical part is performed experimental verification of one of the suggested methods.

Keywords: water turbine blades, metal forming, methods of production

Volume of work

Number of page: **44**

Number of pictures: **25**

Number of tables: **14**

Obsah

Seznam zkratek a symbolů ... 9
1 ÚVOD ... 10
2 CHARAKTERISTIKA TVÁŘENÍ KOVŮ ... 11
2.1 Rozdělení tváření podle teploty ... 11
2.1.1 Tváření za tepla ... 12
2.1.2 Tváření za studena ... 12
2.1.2 Tváření za poloohřevu ... 13
2.2 Rozdělení podle tepelného efektu ... 13
2.2.1 Izotermické tváření ... 13
2.2.2 Adiabatické tváření ... 13
2.2.3 Polytropické tváření ... 13
2.3 Rozdělení podle stupně deformace ... 13
2.4 Rozdělení podle působení tvářecí síly ... 14
2.4.1 Objemové tváření ... 14
2.4.2 Plošné tváření ... 14
2.5 Plastická deformace kovů ... 14
3 POPIS MOŽNÝCH METOD VÝROBY LOPATEK VODNÍ TURBÍNY ... 16
3.1 Kování ... 16
3.1.1 Volné kování ... 16
3.1.2 Zápustkové kování ... 17
3.1.3 Hamrování ... 17
3.2 Ohýbání ... 18
3.2.1 Ohraňování ... 18
3.2.2 Ohyb v tvarovém nástroji ... 19
3.2.3 Zakružování ... 19
3.3 Tváření nepevným nástrojem ... 19
3.3.1 Metoda Guerin ... 20
3.3.2 Metoda Marform ... 20
3.3.3 Metoda Hydroform ... 21
3.3.4 Metoda Verson-Wheelon ... 21
3.4 Tváření výbuchem ... 22
3.5 Elektromagnetické tváření ... 22

3.6 Výroba lisovacím nástrojem 23
4 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU LOPATEK VODNÍ TURBÍNY 24
4.1 Konstrukční ocel 11 523 (dle ČSN 41 1523) 24
4.2 Korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1) 25
4.3 Korozivzdorná ocel X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1) 25
5 NÁVRH OPTIMÁLNÍ METODY VÝROBY LOPATEK VODNÍ TURBÍNY 27
5.1 Technologické postupy 28
5.1.1 Hamrování 28
5.1.2 Ohyb v tvarovém nástroji + Hamrování 28
5.1.3 Ohraňování + Hamrování 28
5.1.4 Ohraňování + Nepevný nástroj 29
5.1.5 Ohraňování modifikovaným nástrojem 29
5.1.6 Ohraňování + Tvarový nástroj 29
5.1.7 Ohraňování + Tvarový nástroj + Hamrování 29
5.1.8 Ohraňování + Tvarový nástroj + Nepevný nástroj 30
5.1.9 Ohraňování + Laser 30
5.1.10 Lisování 30
5.1.11 Kování za tepla 30
5.1.12 Zakružování + Ohraňování 31
5.1.13 Zakružování + Nepevný nástroj 31
5.1.14 Tváření výbuchem 31
5.1.15 Elektromagnetické tváření 31
5.2 Stanovení vah kritérií 32
5.3 Výběr vhodné metody 33
5.4 Závěrečné zhodnocení 35
6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – HAMROVÁNÍ 37
7 Závěr 40
Použitá literatura 41
Seznam obrázků 43
Seznam tabulek 44

Seznam zkratek a symbolů

R_e	Minimální mez kluzu
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu
R_m	Pevnost v tahu
A	Tažnost
ω	Dílčí agregovaná hodnota
VK	Váha kritéria
K	Kritérium
V	Varianta

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výrobních metod, jimiž se vyrábí lopatky Francisovy turbíny. Vodní turbína je nezbytnou součástí každé vodní elektrárny. Elektrárny produkují elektřinu, která je v dnešní době nezbytná k životu. Princip tvorby elektřiny spočívá v generátoru, který přeměňuje mechanickou energii turbíny na energii elektrickou. Jedním v současnosti nejrozšířenějším typem turbíny je Francisova turbína. Byla vyvinuta Jamesem B. Francisem v roce 1849. Francisovi se s touto turbínou podařilo dosáhnout až 90% účinnosti, což v té době vzbudilo značnou pozornost. Francisova turbína je označována jako přetlaková neboli reakční, protože za oběžným kolem dochází k poklesu tlaku. Francisovy turbíny se skládají zpravidla ze čtrnácti, šestnácti nebo osmnácti lopatek. Podle konstrukce turbíny, která se téměř vždy liší buď velikostí, nebo tvarem, bývají lopatky rozměrově i tvarově unikátní. Jejich životnost je vysoká, a proto je možné, že se lopatky pro konkrétní turbínu nebudou i několik desítek let znovu vyrábět.

Lopatky se dají vyrábět celou řadou metod. Mezi ně patří například obrábění, slévání nebo tváření v kombinaci se svařováním. V poslední době se začalo ustupovat od litých a obráběných lopatek kvůli jejich plnému profilu. Lopatky vyráběné těmito metodami jsou těžké a silově namáhají ostatní části turbíny, což může neblaze ovlivňovat celkovou životnost turbíny. Hlavní motivací je tedy snaha nahradit technologie slévání a obrábění jinou metodou výroby. Jako nejvýhodnější se jeví tváření v kombinaci se svařováním. Tvářené lopatky bývají vyráběny ze 2 až 3 částí, které jsou svařeny k sobě do tvaru skořepiny. Zevnitř jsou pak vyztuženy žebrem. Kromě snížení hmotnosti jsou tvářené části výhodné i z hlediska použití kvalitnějšího materiálu, snížení výrobního času, omezení vnitřních vad nebo snížení nákladů na výrobu a manipulaci s dílem.

Cílem bakalářské práce je shrnout většinu možných výrobních postupů z oblasti technologie tváření a na základě určitých kritérií vybrat ty nejvíce vhodné pro výrobu.

2 CHARAKTERISTIKA TVÁŘENÍ KOVŮ

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, tato práce se zabývá pouze možnými metodami tváření pro výrobu lopatek turbíny, a to především z důvodu snížení hmotnosti lopatek. Proto je nutné znát základní charakteristiku tváření.

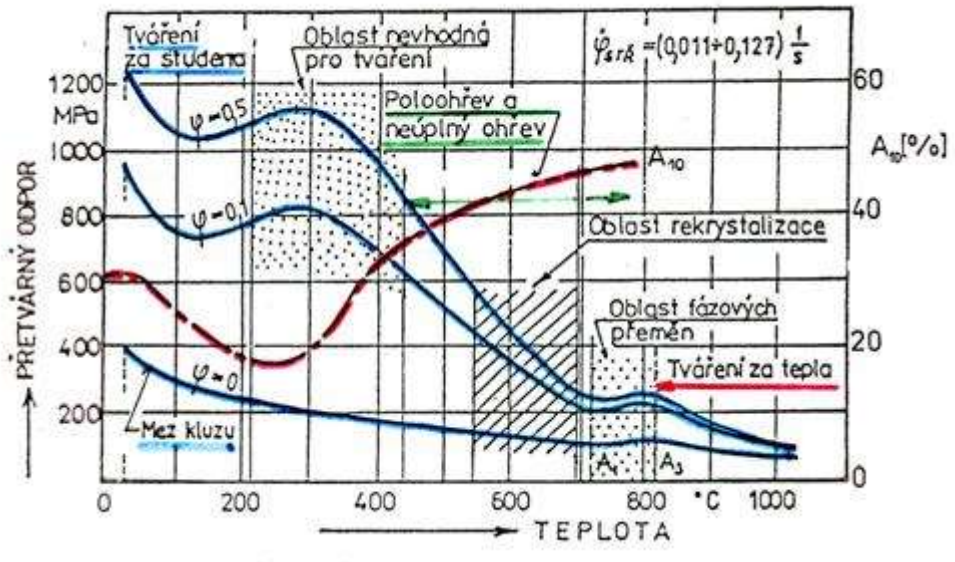
Tváření kovů je výrobní postup, jehož cílem je změna tvaru a rozměrů výrobku působením nástroje na materiál. Vnější síly nástroje způsobují v materiálu plastické deformace, kterými se dosahuje nejen požadovaného tvaru a rozměrů, ale dochází i ke změně mikrostruktury tvářeného materiálu, která ovlivňuje jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. Tváření je beztřísková metoda, která vyniká svou hospodárností, protože při ní vzniká jen malé množství odpadu. Mezi další výhody této výrobní technologie patří: vysoká produktivita práce (malý počet operací pro dosažení konečného tvaru výrobku), vysoká rozměrová přesnost výrobků, lepší mechanické vlastnosti než stejná součást vyrobená litím či obráběním. Nevýhody jsou vysoká cena strojů a nástrojů a rozměrové omezení konečného výrobku. [2][8]

Tváření lze dělit dle několika kritérií:

a) Podle teploty
b) Podle tepelného efektu
c) Podle stupně dosažené deformace
d) Podle působení tvářecí síly

2.1 Rozdělení tváření podle teploty

Při rozdělení tváření podle teploty rozlišujeme tváření za tepla, tváření za studena a tváření za poloohřevu. Tyto druhy tváření jsou definovány vztahem k rekrystalizační teplotě. Při rekrystalizační teplotě dochází k uzdravovacím procesům u zrn, která byla plasticky deformována tvářením pod touto teplotou. Velikost rekrystalizační teploty je asi 40% teploty tání kovu. [8]



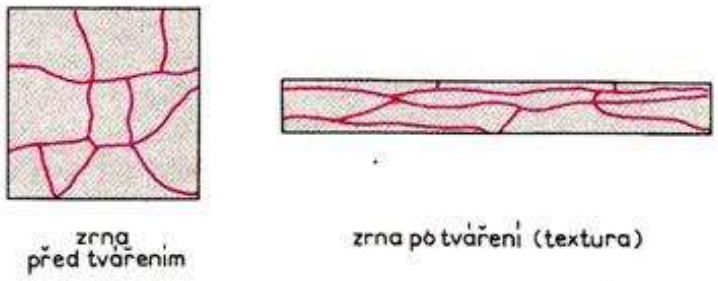
Obr.1 – Rozdělení tváření podle teploty [8]

2.1.1 Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou. Současně s deformací dochází k odstraňování deformačního zpevnění a deformační textury vlivem procesů rekrystalizace a zotavení. V důsledku rekrystalizace se zrna neustále obnovují a přetvoření je téměř neomezené. Rekrystalizace odstraňuje pnutí, snižuje pevnost a tvrdost, ale zvyšuje tažnost. Ohřevem se snižuje přetvárný odpor, a proto stačí ke změně tvaru výrobku síly několikrát menší, než jsou potřeba při tváření za studena, díky čemuž jsou stroje méně silově namáhané. Stroje mohou být menší a spotřeba energie je nižší. Tváření za tepla však neprobíhá bez problémů. Velké nevýhody tohoto způsobu tváření jsou nekvalitní povrch vlivem okujení, oxidace materiálu (ztráta a oduhličení), nižší rozměrová přesnost kvůli smršťování, vysoká energetická náročnost a tepelné namáhání strojů a nástrojů. Také dochází k hrubnutí zrna, což způsobuje problémy během dalších technologických operací. [1][9]

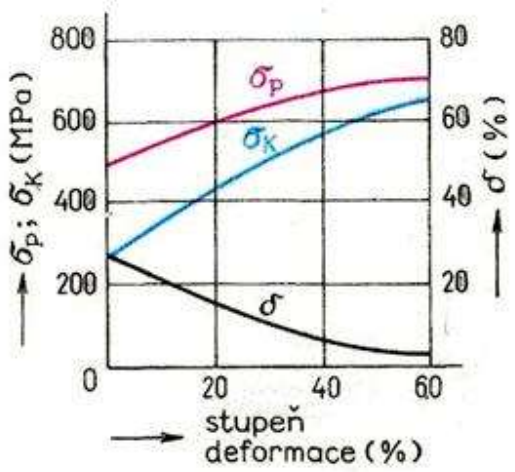
2.1.2 Tváření za studena

Tváření za studena probíhá za teplot nižších, než je rekrystalizační teplota. Deformací se materiál zpevňuje (roste mez pevnosti a mez kluzu, ale klesá tažnost) a vzniká deformační textura (zrna po tváření). Zrna se deformují ve směru tváření. Na obr. 2 je znázorněno zrno před a po tváření.



Obr. 2 – Deformační textura [8]

S rostoucí deformací roste odpor proti dalšímu tváření, a nakonec materiál už není schopen měnit svůj tvar v důsledku ztráty veškeré plasticity. Ohřevem výrobku po tváření za studena je možné obnovit plastické schopnosti materiálu. Tímto způsobem se získávají výrobky s velmi přesnými rozměry i tvarem (nedochází ke smrštění), vysokou kvalitou povrch (bez vzniku okujení) a lepšími mechanickými vlastnostmi vlivem zpevnění. Jelikož během tváření výrazně roste přetvárný odpor a zvětšují se tvářecí síly, jsou vyvíjeny vyšší požadavky na stroje a nástroje než u tváření za tepla. Mezi další nevýhody patří limitovaná tvárnost a různé zpevňování v různých místech materiálu. [1][8]



Obr. 3 – Změna mechanických vlastností v závislosti na stupni deformace [8]

2.1.2 Tváření za poloohřevu

Tento způsob tváření je střední cestou mezi tvářením za tepla a tvářením za studena. Tváření probíhá pod rekrystalizační teplotou, a proto je proces doprovázen zpevněním materiálu. Ohřevem se zajišťuje snížení přetvárného odporu, a tedy lepší tvárnosti než při tváření za studena. [1]

2.2 Rozdělení podle tepelného efektu

Při tváření se velká část energie přeměňuje v teplo. Podle toho, kam teplo odchází, se tváření dělí:

a) Izotermické tváření
b) Adiabatické tváření
c) Polytropické tváření

2.2.1 Izotermické tváření

Proces, při kterém je všechno vytvořené teplo odvedeno do okolí a teplota materiálu zůstává stejná.

2.2.2 Adiabatické tváření

Proces, při kterém veškeré teplo zůstává v materiálu a je využito na zvýšení teploty tohoto materiálu.

2.2.3 Polytropické tváření

Proces, při kterém je část tepla odvedena do okolí a část tepla zůstává v materiálu. Teplota se zvyšuje, ale méně než u adiabatického tváření. [3]

2.3 Rozdělení podle stupně deformace

Klíčovým měřítkem při tomto dělení tváření je stupeň deformace za určité teploty a rychlosti deformace bez rizika vytvoření povrchové trhliny. Podle toho se tváření dělí na:

a) Procesy, kdy je vyvíjen velmi malý tlak mezi nástrojem a výrobkem. K tváření jsou nutné malé vnější síly a povrch materiálu, který se dotýká nástroje je mnohem menší než povrch volného materiálu.
b) Procesy, kdy je vyvíjen velký tlak mezi nástrojem a výrobkem. K tváření jsou nutné velké vnější síly a povrch materiálu, který se dotýká nástroje je zhruba stejný jako povrch volného materiálu.
c) Procesy, kdy je vyvíjen velmi velký tlak mezi nástrojem a výrobkem. K tváření jsou nutné velmi vysoké vnější síly a povrch materiálu, který se dotýká nástroje je větší než povrch volného materiálu. [8]

2.4 Rozdělení podle působení tvářecí síly

Z tohoto hlediska dělíme tváření na dvě kategorie.

2.4.1 Objemové tváření

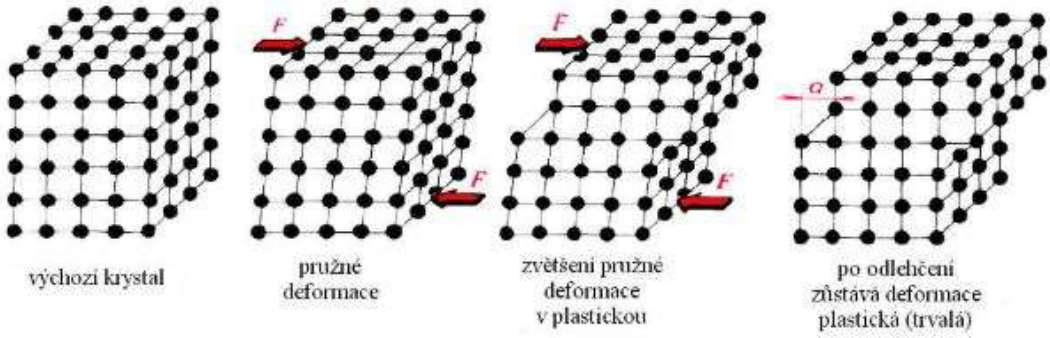
Objemové tváření je trojrozměrný případ tváření, kdy k deformaci dochází ve všech třech prostorových směrech. Při změně tvaru polotovaru se značně mění jeho průřez, a tím pádem se zvyšuje poměr průřezu k objemu. Typicky používanými polotovary jsou ingoty, špalky, kaloty a tyče kruhových průřezů. Mezi zástupce objemového tváření patří válcování, kování, tažení drátů a protlačování. [3][9]

2.4.2 Plošné tváření

Během plošného tváření se téměř nemění průřez polotovaru, ale mění se pouze jeho tvar. Deformace nastává ve dvou osách a poměr průřezu k objemu zůstává prakticky stejný. Typickým polotovarem pro tento druh tváření je plech nebo součást z plechu. Do plošného tváření můžeme zařadit technologické operace ohýbání, stříhání, rovnání a tažení. [3]

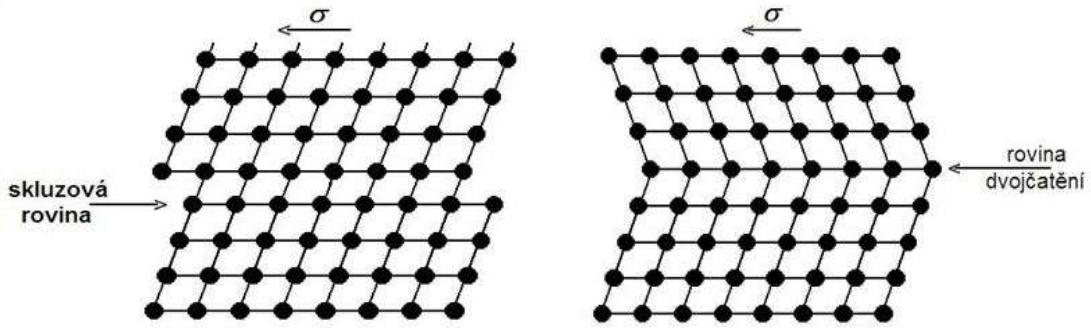
2.5 Plastická deformace kovů

Deformace je děj, při kterém dochází ke změně tvaru krystalové mřížky, tedy i celkového tvaru, za působení vnějších sil. Rozlišujeme deformaci elastickou a plastickou. Při elastické deformaci platí Hookův zákon a po odstranění vnější síly se těleso vrací do původního tvaru. Naopak plastickou deformací rozumíme nevratný děj, kde po odlehčení zůstává těleso v deformovaném stavu. Tváření probíhá právě za působení plastické deformace, bez které by nebylo možné dosáhnout změny tvaru tvářeného materiálu. [8]



Obr. 4 – Schéma elastické a plastické deformace [8]

Existují dva základní mechanismy plastické deformace, skluz a dvojčatění. Deformace skluzem spočívá v pohybu dislokací směrem, kterým působí napětí až dokud nevystoupí přebytečné atomy na povrch. Při dvojčatění se nejprve natočí krystalová mřížka do polohy vhodné pro skluz a následně k samotnému skluzu dochází. [8]



Obr. 5 – Schéma skluzu(vlevo) a dvojčatění(vpravo) [12]

3 POPIS MOŽNÝCH METOD VÝROBY LOPATEK VODNÍ TURBÍNY

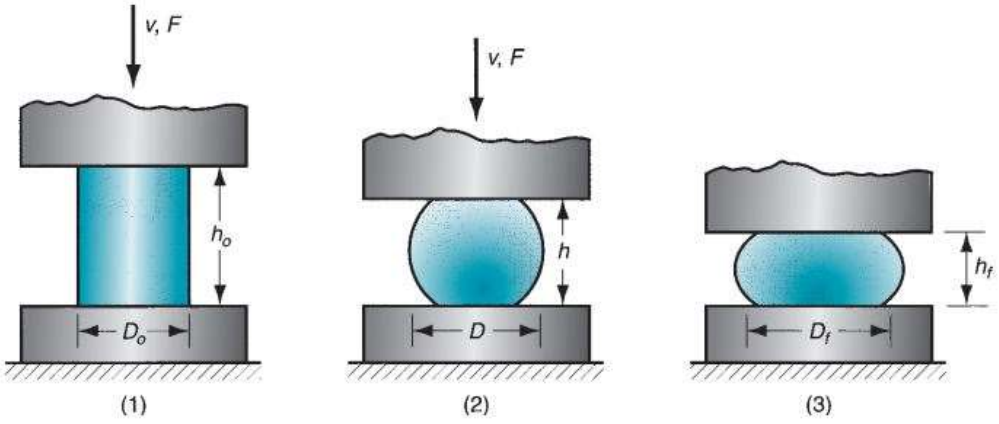
Finálního tvaru lopatek se může dosahovat několika výrobními postupy. Jak již bylo zmíněno v úvodu, kvůli nižší hmotnosti lopatek se nebudou popisovat metody slévání a obrábění. Tváření je tedy jediná varianta výroby, která bude probírána. Lopatky lze tvářet níže charakterizovanými metodami nebo jejich kombinací. Při výrobě, kde je využita kombinace metod, je většinou materiál předtvarován jednou metodou a druhou metodou je pak dokončen.

3.1 Kování

Kování je tvářecí proces, při kterém se materiál deformuje stálým tlakem nebo pomocí úderů mezi dvěma kovadly. Tvářecí stroj, jenž využívá úderů se nazývá buchar, zatímco stroj, který aplikuje stálý tlak se nazývá lis. Nejvíce je kování prováděno za tepla, ale pro určité aplikace je běžné kovat i za studena. Kování se dělí na volné kování a zápustkové kování. [4]

3.1.1 Volné kování

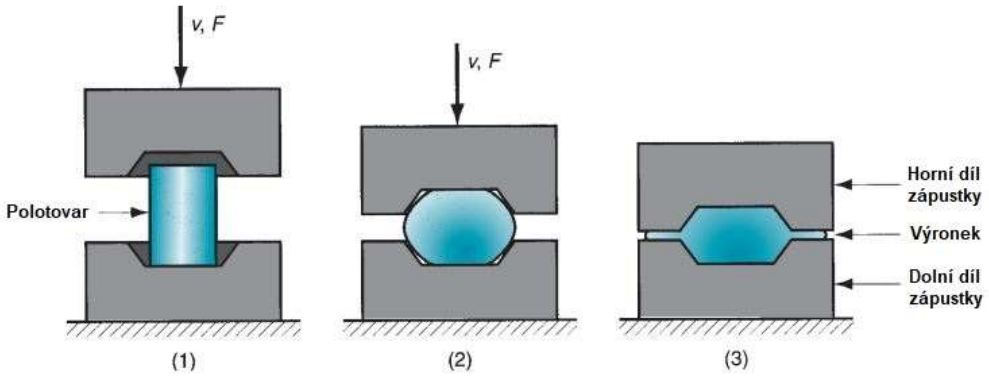
Tento způsob kování je jednou z nejjednodušších tvářecích operací. Materiál je deformován mezi dvěma buď plochými nebo tvarovými kovadly. Tvary kovadel jsou jednoduché. Mezi nejčastější tvary se řadí rovinná, válcová nebo úhlová kovadla. Finálního tvaru se dociluje nejen pomocí univerzálních kovadel, ale i manipulací a polohováním dílu při kování. Polohování je důležité, jelikož bez něj má materiál tendenci deformovat se do tvaru soudečku z důvodu tření mezi kovadly a materiálem. Tato metoda se obecně používá především, pokud je nutné tvarovat pouze malé množství materiálu, kdy se nevyplatí vyrábět zápustky; pokud jsou vlastnosti materiálu po volném kování uspokojivé nebo pokud se jedná o tváření velkých kusů, které by nešli zpracovat zápustkovým kováním. Běžnými operacemi volné kování jsou: pěchování, při kterém se zmenšuje výška, ale zvětšuje se plocha průřezu; prodlužování, při kterém je prakticky vykonáno víc operací pěchování vedle sebe a dále například osazování, přesazování nebo děrování. [5][8]



Obr. 6 – Schéma volného kování [4]

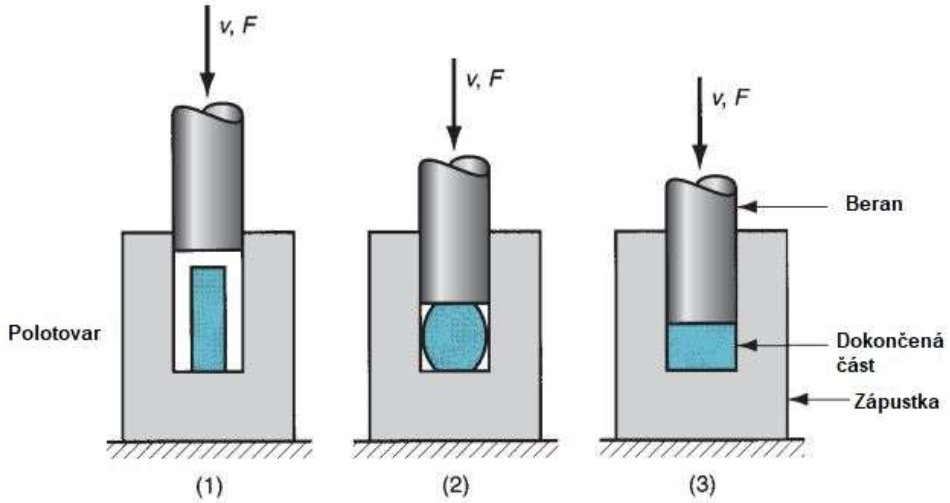
3.1.2 Zápustkové kování

V případě zápustkového kování materiál získá tvar podle tvaru zápustky. Zápustka může být jednodílná nebo dvoudílná. Častější je však použití dvou kovacích dutin. Materiál, který se již nevejde do zápustky a je vytlačen ven se nazývá výronek. Podle konstrukce zápustky se rozlišují dva druhy zápustkového kování, výronkové a bezvýronkové. Výronek má důležitou funkci. Výronkem je kontrolován tok materiálu a díky tomu se zápustka dokonale vyplní materiálem, včetně rohů. Ideálně by však měl vzniknout co nejmenší výronek. Zápustkové kování vyniká hlavně svou přesností oproti volnému kování, vysokou produktivitou a snadnou obsluhou. [5][8]



Obr. 7 – Schéma zápustkového kování [4]

U bezvýronkového kování je materiál plně obsažen v zápustce a během deformace se netvoří žádný výronek. Na bezvýronkové kování jsou kladeny speciální požadavky na rozdíl od výronkového kování. Velmi důležité je, aby objem materiálu odpovídal objemu prázdného prostoru zápustky s velmi nízkou tolerancí. Pokud je polotovar moc velký, nadměrné tlaky mohou poškodit zápustku i stroj, zatímco když je moc malý, tak se zápustka nevyplní. Kvůli těmto požadavkům se bezvýronkové kování hodí hlavně pro výrobu jednoduchých a symetrických součástí, a pro tváření lehko tvařitelných materiálů. Často se také nazývá přesné kování. [4]



Obr. 8 – Schéma bezvýronkového kování [4]

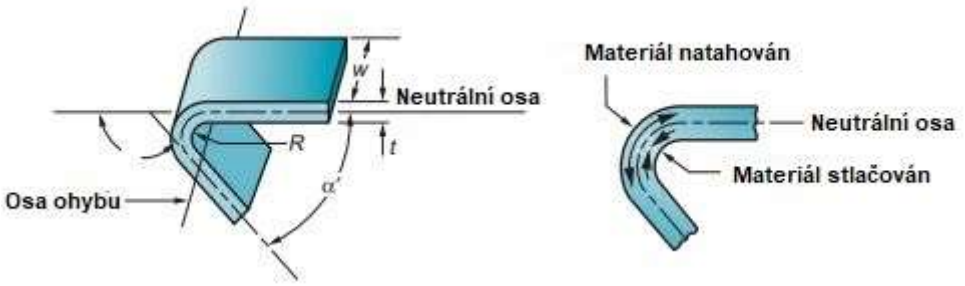
3.1.3 Hamrování

Technologickým procesem hamrování rozumíme volné kování plechu za studena tvarovými nástroji. K tomuto způsobu tváření plechu se využívá úderů

bucharu. K deformaci pak dochází mezi dvěma kovadly. Pro realizaci se předpokládá vysoká kvalifikace personálu z důvodu polohování dílu.

3.2 Ohýbání

Ohýbání je zástupcem plošného tváření, při kterém se mění tvar součásti, ale nemění se objem. Tloušťka plechu se s deformací nemění vůbec nebo jen velmi málo. Ohýbání je definováno jako trvalé deformování materiálu do různých úhlů ohybu, ke kterému dochází zatěžováním kovu okolo přímé osy. Během této operace je materiál na vnější straně natahován, zatímco na vnitřní straně je materiál stlačován. „Dovolené prodloužení vnějších vláken závisí především na tažnosti materiálu a jakosti povrchu.“ [2][4]

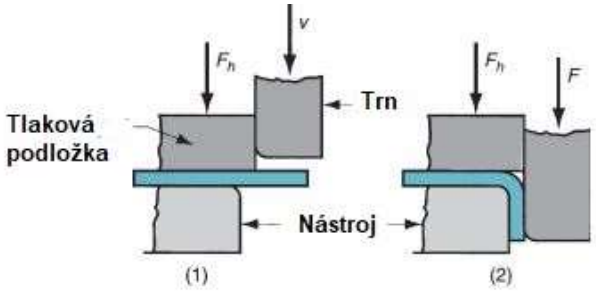


Obr.9 – Schéma ohýbání [4]

Elastická deformace ve značné míře doprovází deformaci plastickou v podobě odpružení, proto se nesmí zanedbávat. Odpružení zapříčiňuje, že se plech vrací do původního tvaru. Nástroj určený k ohýbání se nazývá ohýbadlo a výrobek se nazývá ohybek. Existuje mnoho druhů ohýbání, které může probíhat za tepla i za studena. Mezi základní druhy ohýbání patří například ohraňování, ohýbaní do tvaru U a V nebo zakružování. [4][8]

3.2.1 Ohraňování

Při ohraňování je plech umístěn na kovadlo tak, že část plechu přes něj přesahuje. Část plechu na kovadle je přidržována silou, kterou vytváří tlaková podložka, zatímco ohraňovací trn ohne část plechu přesahující přes okraj. Úhel ohybu může být maximálně 90˚ nebo menší. Se složitějšími trny se dá dosáhnout úhlu ohybu i přes 90˚. Nástroj je možno i tvarově modifikovat, díky čemuž je možno vytvarovat i složitější dílce pouze ohraňovacím lisem. Nástroje pro ohraňování jsou složitější a dražší než nástroje pro ohýbání do tvaru V. Pro ohraňování se používá ohraňovací lis. [4]

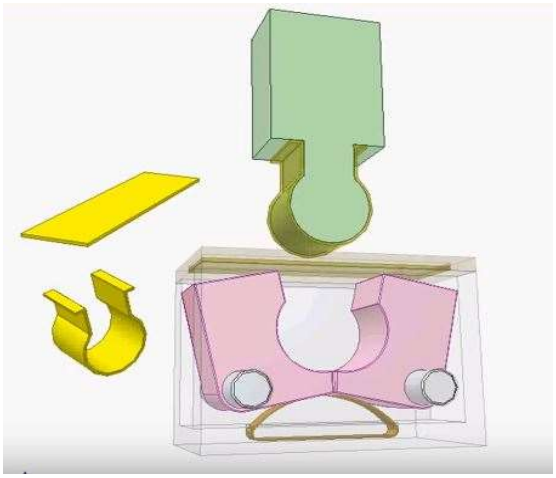


Obr. 10 – Schéma ohraňování [4]

Využití laseru při ohraňování – Laser se používá hlavně pro předehřev při ohraňování těžko tvařitelných materiálů. V tepelně ovlivněných oblastech vzniká vnitřní pnutí, jenž usnadňuje celý proces. Výhodou je také snížení přetvárných sil.

3.2.2 Ohyb v tvarovém nástroji

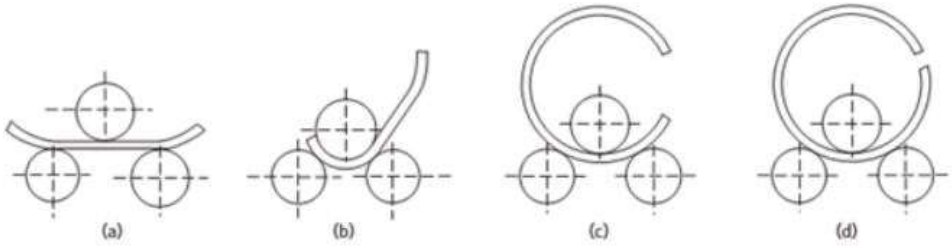
Ohyb probíhá speciálním tvarovým nástrojem, který umožňuje na jeden pracovní zdvih ohýbadla provést 2 a více pracovních operací. Na obr. 11 je znázorněn ohyb v tvarovém nástroji. Vlevo je žlutý díl před a po ohýbání. Zelené ohýbadlo nejprve ohne díl do tvaru U a zároveň donutí růžový nástroj tvarovat díl do konečného tvaru. Výsledný výrobek pak vzniká ve dvou operacích během jednoho pracovního zdvihu ohýbadla. [13]



Obr. 11 – Příklad ohybu v tvarovém nástroji [13]

3.2.3 Zakružování

Zakružování je výrobní metoda, která využívá tří nebo více válců k ohýbání plechu do požadovaného tvaru. Běžnými tvary jsou válec a kužel. Uspořádání válců přesně udává k jak velkému ohybu dojde. Různého zakřivení se dosahuje změnou vzdálenosti a úhlem mezi válci. Proces je vhodný pro ohýbaní tenkých i tlustých plechů (i 30 mm). Tlustší plechy je pak nutné předehřát na teplotu tváření za tepla. Ohýbání plechu zakružováním je výhodné v tom, že se během procesu netvoří na plechu hrany jako u jiných druhů ohýbání. [8][10]



Obr. 12 – Schéma procesu zakružování [14]

3.3 Tváření nepevným nástrojem

Tváření nepevným nástrojem řadíme mezi plošné tváření za studena. Nepevný nástroj je sestrojen ze dvou částí. Jedna část je pevná a její tvar se v průběhu

tváření nemění, zatímco druhá část nástroje je pružná a její tvar se mění. Jako pružná část nástroje se využívá především pryž (metody Guerin a Marform) nebo pryž v kombinaci s kapalinou (metody Hydroform, Hydro-mec a Verson-Wheelon). [11]

3.3.1 Metoda Guerin

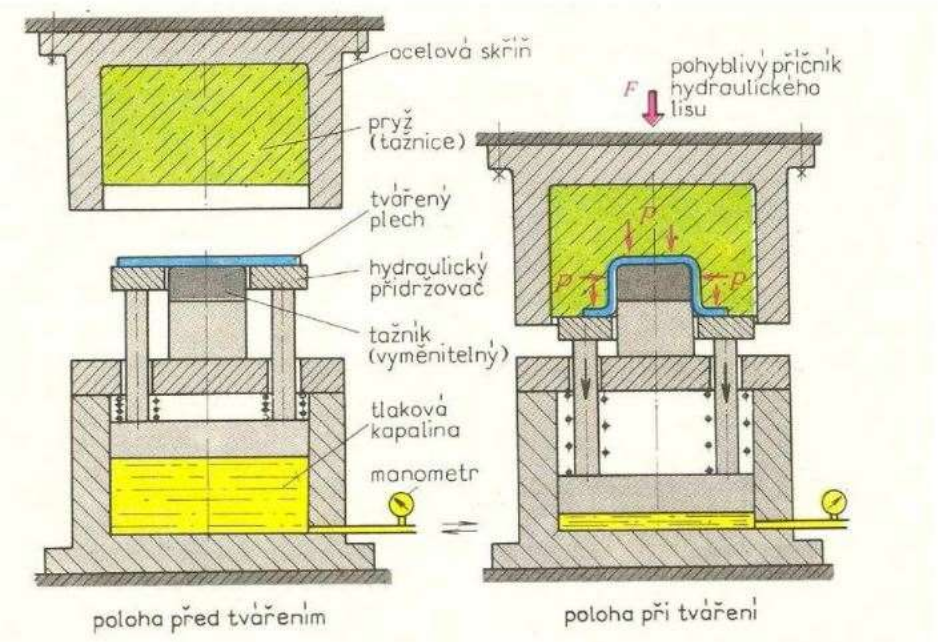
Této metody se využívá k technologickým operacím ohýbání, stříhání a tažení mělkých tvarů. Pryžové desky jsou upevněny v ocelové skříni lisu a slouží jako pružný nástroj. Plech je umístěn s přesahem na tažníku. K deformaci dochází tlakovou silou lisu, kterou přenáší pryž. Metoda je vhodná především pro tváření tenkých plechů s tloušťkou 1-2 mm a používá se především v kusové a malosériové výrobě.

Obr. 13 – Schéma ohýbání metodou Guerin [11]

Mezi výhody metody Guerin patří nízká cena a jednoduché provedení nástroje, univerzální použití a snadná údržba nástroje. Nevýhodou je malá životnost vnějších vrstev pryže nebo malá využitelnost plechu. Tato metoda není vhodná k hlubokému tažení, protože při něm vznikají na plechu vlnité okraje. [11][6]

3.3.2 Metoda Marform

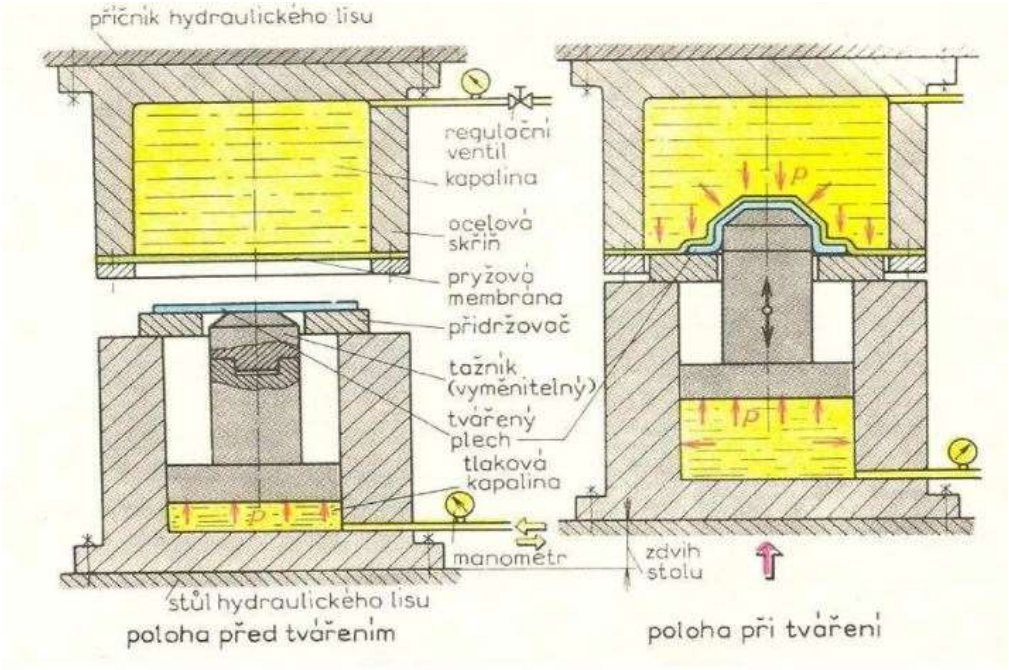
Metoda Marform se vyvinula z metod Guerin a Verson-Wheelon jako varianta pro realizaci hlubokého tažení. Princip těchto metod je téměř stejný. Změna spočívá v přidání hydraulického přidržovače, který dokáže eliminovat vznik vlnitých okrajů, které vznikají při hlubokém tažení metodou Guerin. Tlak, jenž působí na plech při hlubokém tažení je kontrolován ventilem. Výhody i nevýhody jsou podobné. [7]



Obr. 14 – Schéma metody Marform [11]

3.3.3 Metoda Hydroform

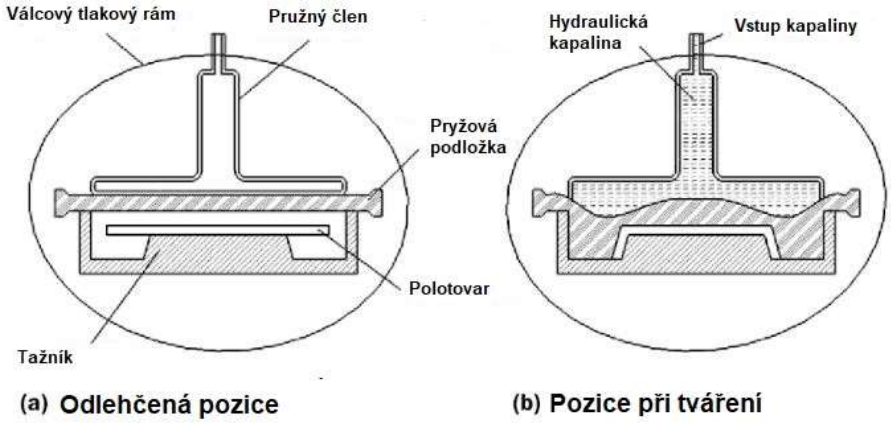
Tato metoda se stejně jako metoda Marform používá především pro hluboké tažení. Od metody Marform se liší tím, že je pryžová tažnice v ocelové skříni nahrazena kapalinou, kterou ve skříni drží pryžová membrána. Plech je umístěn na tažník, který je pomocí tlakové kapaliny tlačen proti pryžové membráně. Tímto způsobem dochází k deformaci materiálu. Výhodou oproti metodám využívající pouze pryž je značné zvýšení životnosti tažnice. [7]



Obr. 15 – Schéma metody Hydroform [11]

3.3.4 Metoda Verson-Wheelon

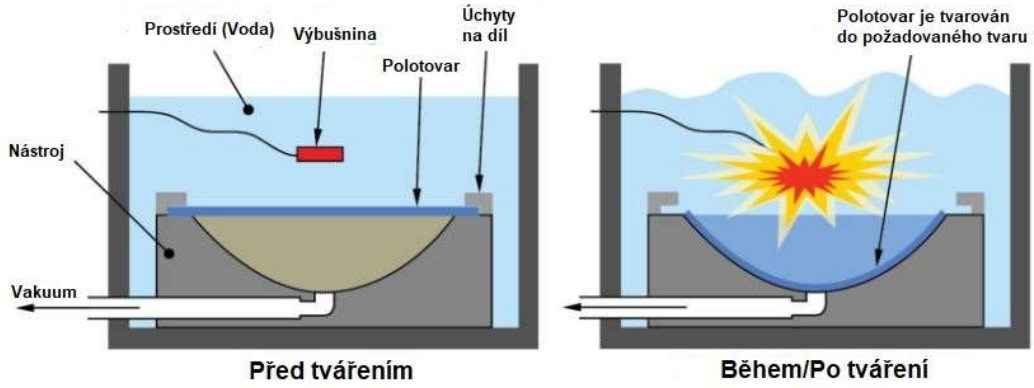
Metoda Verson-Wheelon je v mnoha ohledech podobná metodě Guerin. Místo samotné pryže je plech tvářen pryží a kapalinou. Metoda využívá tlak kapaliny, který tlačí na pryžovou podložku, přes kterou je tvářen plech. Využívá vyššího tlaku a je určena zejména k tváření mělkých částí. Pružný člen nutí přilnout pryžovou podložku na konturu plechu. Když je pružný člen v nejnižší pozici, napumpuje se do něj hydraulická kapalina. Hydrostatická síla pak působí na dílec ve všech bodech a dochází k deformaci. [7]



Obr. 16 – Schéma metody Verson-Wheelon [6]

3.4 Tváření výbuchem

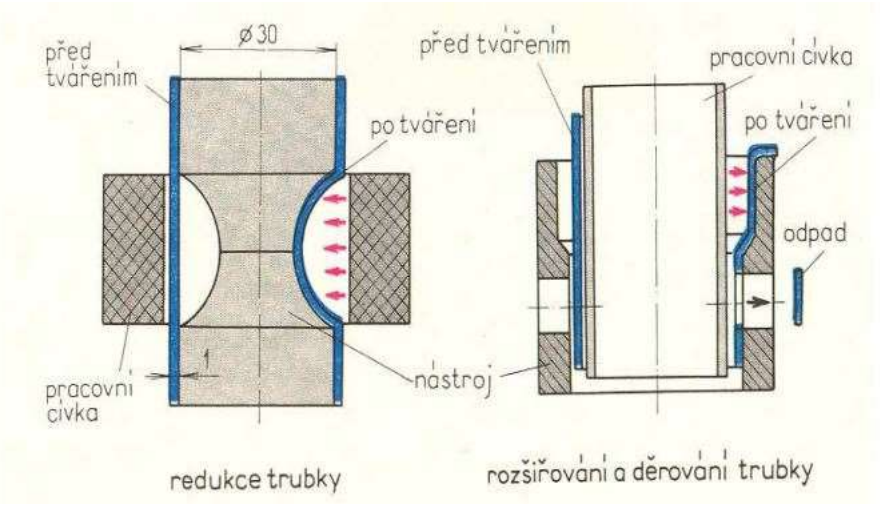
Princip metody spočívá v deformaci plechu tlakovou vlnou, kterou způsobí exploze výbušniny. Tlaková vlna se může šířit rychlostí až 250 m/s. Účinek exploze se zvyšuje s vyšším množstvím trhaviny nebo s použitím prostředí o vyšší hustotě. Výbušnina může být umístěna přímo na plechu nebo je mezi plechem a výbušninou prostředí. Jako prostředí se nejčastěji využívá vzduch, voda, písek nebo hlína. Tváření výbuchem je výhodné hlavně pro kusovou výrobu rozměrných částí. Výbuch spolehlivě vytvaruje i těžko tvařitelný materiál. Nevýhodami této metody jsou vyšší požadavky na bezpečnost práce a kvalifikovanost personálu. [8][11]



Obr. 17 – Schéma tváření výbuchem [15]

3.5 Elektromagnetické tváření

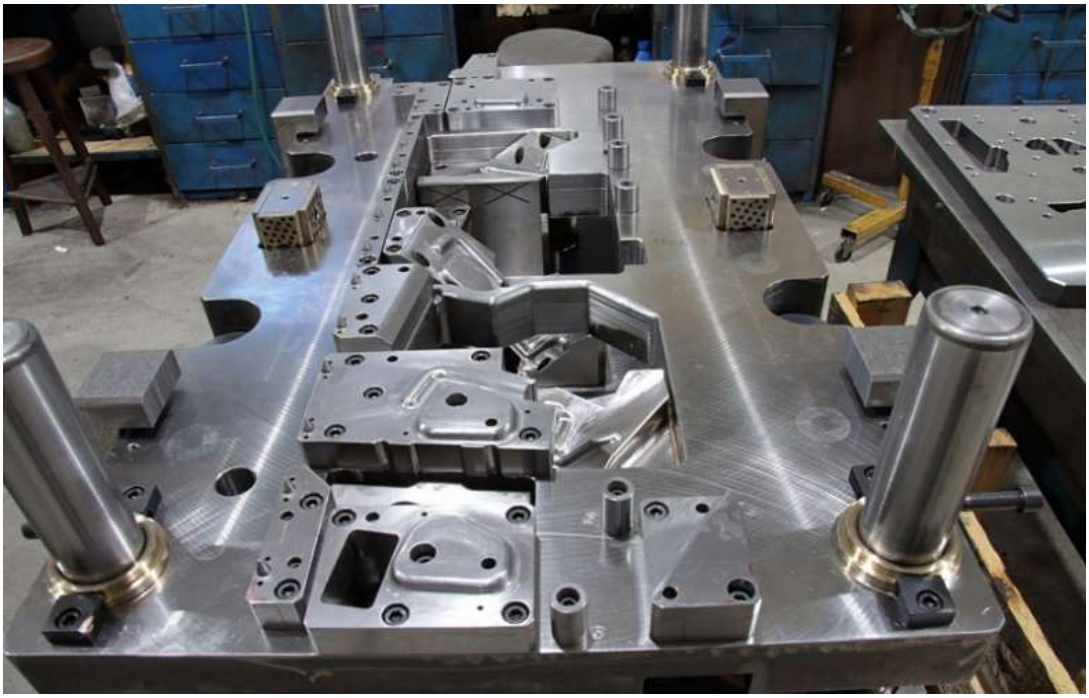
Elektromagnetické tváření je proces, při kterém se využívá magnetického pulsu ke změně tvaru plechu. Z nabitého kondenzátoru se pošle značný elektrický impuls do cívky a proud vytvoří magnetické pole. Při narušení magnetického pole vodivým materiálem se v materiálu tvoří vířivé proudy. Vířivé proudy v materiálu vytvářejí své vlastní magnetické pole, které je odpudivé vůči původnímu magnetickému poli cívky. Odpudivé síly pak formují materiál do požadovaného tvaru. Z popisu je zřejmé, že je tato metoda funkční pouze pro vodivé materiály. Používá se zejména pro plechy malých tlouštěk a rozměrově malé díly. [16]



Obr. 18 - Schéma použití elektromagnetického tváření [11]

3.6 Výroba lisovacím nástrojem

Lisováním se rozumí tváření plechů za studena. Proces probíhá s využitím lisů a nástrojů, kterými se dosahuje finálního tvaru součásti. Mezi základní operace lisování patří zejména ohýbání, stříhání, prostřihování, vystřihování a kovotlačení. Lisovací nástroje se dělí na jednoduché, postupové, sloučené a sdružené. Jednoduchým nástrojem se dosáhne finálního tvaru dílce po jednom pracovním úkonu. Postupový nástroj se používá pro dva a více pracovních úkonů stejným nástrojem. Při lisování sloučeným nástrojem dochází ke sloučení více pracovních úkonů stejného druhu. Sdruženým nástrojem pak dochází k více pracovním úkonům najednou různého druhu. [17][18]



Obr. 19 – Postupový lisovací nástroj [19]

4 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU LOPATEK VODNÍ TURBÍNY

Materiály pro tvářené lopatky turbíny se volí zejména podle toho, v jakém prostředí bude daná turbína pracovat. Před samotnou výrobou je nutné toto prostředí dobře znát. Zvolení nekvalitního materiálu může značně ovlivnit životnost lopatek. Například při nasazení turbíny v písčitých vodách se může velmi snadno stát, že bude docházet k otěru vlivem pískových částic. Proto je velmi důležité pro toto prostředí zvolit materiál, který je otěruvzdorný. Korozivzdornost je další důležitá vlastnost, kterou by měl daný materiál pro konstrukci lopatek splňovat. Dalšími kritérii může být cena materiálu nebo složitost jeho opracování. Pro výrobu lopatek vodní turbíny se využívají hlavně 3 oceli: konstrukční ocel 11523, korozivzdorná austenitická ocel X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1) a korozivzdorná martenzitická ocel X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1).

4.1 Konstrukční ocel 11 523 (dle ČSN 41 1523)

Jedná se o nelegovanou uhlíkovou jemnozrnnou konstrukční ocel s vysokou jakostí.

Tab. 1 – Chemické složení oceli ČSN 41 1523

Prvek	**C**	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**N**
Obsah (v %) max.	0,2	1,6	0,55	0,03	0,03	0,012

Tab. 2 – Mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 1523

Minimální mez kluzu R_e (v MPa)	355
Pevnost v tahu R_m (v MPa)	470 - 630
Tažnost A (v %)	22

Mechanické vlastnosti uvedené v tabulce (Tab. 2) platí pro malé tloušťky materiálu, které odpovídají plechům. Pokud je součást tvářena za tepla platí mechanické vlastnosti z (Tab. 2) až po normalizačním žíhání.

Tato ocel je vhodná především ke svařování, ale i k tváření. Běžně se používá k výrobě svařovaných konstrukcí, dutých svařovaných profilů, ohýbaných součástí nebo součástí strojů a automobilů.

Vzhledem k tomu, že se jedná o běžnou konstrukční ocel, bude cena materiálu menší než u dalších dvou nabízených ocelí. Uhlíkové oceli jsou také odolné vůči opotřebení. [20][21][27]

4.2 Korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1)

Ocel X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1) je korozivzdorná chrom-niklová austenitická ocel.

Tab. 3 – Chemické složení oceli X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1)

Prvek	**C**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**N**
Obsah (v %) max.	0,07	19,5	10,5	0,8	0,11

Tab. 4 – Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1)

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (v MPa)	210 - 230
Pevnost v tahu R_m (v MPa)	540 - 750
Tažnost A (v %)	45

Mechanické vlastnosti uvedené v tabulce (Tab. 4) platí pro malé tloušťky materiálu, jenž odpovídají plechům. Pro správné mechanické vlastnosti je nezbytná jemnozrnná struktura, které se dosahuje rozpouštěcím žíháním.

Korozní odolnost je nejdůležitější vlastností této oceli. Tuto vlastnost nejlépe zlepšují legující prvky chrom a molybden. Ocel je odolná vůči širokému spektru látek jako jsou voda, vodní pára, slabé kyseliny nebo vlhkost vzduchu. Není odolná proti korozi v přímořských oblastech a v tepelně ovlivněných místech je ocel náchylná k mezikrystalové korozi. Tato ocel je dobře svařitelná, dobře tvařitelná, ale hůře obrobitelná. Na rozdíl od martenzitických korozivzdorných ocelí není kalitelná.

Tuto ocel nalezneme ve všech odvětvích průmyslu, především pak v potravinářském, chemickém, pivovarnickém apod. Tato ocel je také ideální volbou pro konstrukci motorových vozidel či lékařských nástrojů. Na rozdíl od konstrukční oceli ČSN 41 1523 bude tato ocel dražší. [22][23][28]

4.3 Korozivzdorná ocel X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1)

Jedná se o nízkouhlíkovou martenzitickou korozivzdornou ocel, která vyniká svou pevností, houževnatostí a odolností vůči korozi.

Tab. 5 – *Chemické složení oceli X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1)*

Prvek	**C**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**N**
Obsah (v %) max.	0,05	14	4,5	0,7	0,02

Tab. 6 – *Mechanické vlastnosti oceli X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1)*

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (v MPa)	520
Pevnost v tahu R_m (v MPa)	700-800
Tažnost A (v %)	12 - 15

Tato ocel vykazuje velmi dobrou korozní odolnost v širokém spektru korozních prostředí jako jsou voda nebo slabé kyseliny. V prostředích s výskytem solí tato ocel však neodolává korozi. Velkou měrou se na korozivzdornosti podílí také kvalita povrchu dané oceli. Mezi hlavní vlastnosti patří velmi obtížná svařitelnost, dobrá tvařitelnost a obtížná obrobitelnost. Pro bezproblémové tváření by se měla tato ocel tvářet za tepla.

Typickou oblastí použití této oceli je chemický průmysl, hydroelektrárny a turbíny. Nejčastěji se používá na výrobu pump, armatur a lopatek turbín.
[22][24][25][26][28]

5 NÁVRH OPTIMÁLNÍ METODY VÝROBY LOPATEK VODNÍ TURBÍNY

Optimální metoda výroby lopatek vodní turbíny bude zvolena na základě vícekriteriálního rozhodování. Důležitými kritérii pro volbu vhodné výrobní metody jsou přesnost tvaru lopatky, pracnost výroby, provozní náklady strojů, náklady na nástroj a požadavek na kvalifikaci personálu.

Přesností tvaru lopatky rozumíme, jak hodně bude dodržen požadovaný tvar lopatky. Při tvarování určitými metodami mohou totiž vznikat nepřesnosti od požadovaného tvaru jako např. hrany při ohraňování. Kritérium pracnost výroby vyjadřuje náročnost úkonů při výrobě lopatky. Náklady na provoz výrobních zařízení popisuje kritérium provozní náklady strojů. Předpokládá se dostupnost všech zmíněných zařízení pro výrobu. Vybraná technologie by měla respektovat malou sériovost. Tuto skutečnost bude nejlépe reflektovat kritérium náklady na nástroj. Některé výrobní metody jsou náročnější např. z hlediska manipulace a polohování dílu při výrobě nebo s ohledem na bezpečnost práce, proto poslední kritérium určuje, jak moc musí být personál kvalifikovaný pro provedení dané výrobní metody. V následujících tabulkách (Tab. 7) a (Tab. 8) jsou označeny kritéria a varianty.

Tab. 7 – Seznam kritérií pro vícekriteriální rozhodování

K1	Přesnost tvaru lopatky
K2	Pracnost výroby
K3	Provozní náklady strojů
K4	Náklady na nástroje
K5	Požadavek na kvalifikaci personálu

Výsledný tvar lopatky lze vyrobit jednou výrobní metodou pouze zřídka, proto se ve většině případů výroby využívá kombinace dvou nebo více metod. První metodou pak může být lopatka předtvarována a další metodou dokončena.

Tab. 8 – Seznam variant pro vícekriteriální rozhodování

V1	Hamrování
V2	Ohyb v tvarovém nástroji + Hamrování
V3	Ohraňování + Hamrování
V4	Ohraňování + Nepevný nástroj
V5	Ohraňovací lis s modifikovaným nástrojem
V6	Ohraňovaní + Tvarový nástroj
V7	Ohraňování + Tvarový nástroj + Hamrování
V8	Ohraňování + Tvarový nástroj + Nepevný nástroj
V9	Ohraňování + Laser
V10	Lisování
V11	Kování za tepla
V12	Zakružování + Ohýbání
V13	Zakružování + nepevný nástroj
V14	Tváření výbuchem
V15	Elektromagnetické tváření

5.1 Technologické postupy

Tato podkapitola krátce shrnuje všechny použitelné technologické postupy. Každá metoda bude stručně popsána a zhodnocena s ohledem na pět vybraných kritérií. To bude fungovat jako vstup pro vícekriteriální rozhodování, kterým se vybere nejvhodnější metoda výroby. Nutno podotknout, že u všech zde popsaných postupů bude nutno v určité fázi výroby použít minimálně jeden svarový spoj.

5.1.1 Hamrování

Při výrobě tímto technologickým postupem je lopatka složena ze dvou dílů, které jsou svařeny k sobě. Nízký počet dílů zajišťuje menší náročnost svařovacího procesu. Pracnost výroby závisí především na velikosti lopatek. Pro menší lopatky je pracnost značně nižší než pro velké lopatky. Pro větší a těžší lopatky může výrobní čas narůst z důvodu manipulace s dílem při hamrování i na několik hodin. Již ze zmíněného polohování dílů mezi pracovními zdvihy bucharu plyne, že personál bude vyžadovat vysokou kvalifikaci pro tento způsob výroby. Výhodou je, že při vysoké zručnosti pracovníka může být finální tvar lopatky velmi přesný. Jako výrobní stroj se použije libovolný buchar. Provozní náklady na toto výrobní zařízení budou zhruba 600-800 Kč. Náklady na nástroje budou velmi nízké cca. desetikoruny na hodinu práce, protože jsou užita obyčejná kovadla. Metoda je vhodná spíše pro malé velikosti lopatek.

5.1.2 Ohyb v tvarovém nástroji + Hamrování

Stejně jako při hamrování je lopatka dvoudílná. Tvarovým nástrojem se nejprve ohne náběžná hrana lopatky do předběžného tvaru a následným hamrováním je pak lopatka tvářena do finálního tvaru. Pracnost výroby je nižší než při pouhém hamrování. Díky použití tvarového nástroje je výrobní čas snížen asi na polovinu. Předpokládá se vysoká kvalifikovanost pracovníků z důvodu použití operace hamrování. Použitá výrobní zařízení jsou hydraulický lis a libovolný buchar. Provozní náklady na hydraulický lis budou poměrně vysoké (cca. 2000 Kč), na buchar pak kolem 600-800 Kč. Náklady na tvarový nástroj budou nízké z důvodu malé velikosti a tvarové složitosti nástroje. Výhodou je, že pro rozměrově a tvarově podobné lopatky se může tento nástroj použít znovu. Náklady na kovadla bucharu jsou v desetikorunách. Výhodami a nevýhodami je metoda srovnatelná s hamrováním, ale je lepší s ohledem na pracnost.

5.1.3 Ohraňování + Hamrování

Lopatka je stejně jako v předchozích technologických postupech svařena ze dvou dílů. Ohraňováním je provedeno předtvarování lopatky a hamrováním se dosáhne konečného tvaru. Pracnost výroby je srovnatelná s ohybem v tvarovém nástroji a následném hamrování. Personál musí být vysoce kvalifikován nejen kvůli operaci hamrování, ale i kvůli operaci ohraňování, kde je nutné dávat pozor na správnou realizaci ohybů. Výrobní zařízení je zde ohraňovací lis a libovolný buchar. Provozní náklady jsou nižší než u předchozího technologického postupu, protože provozní náklady na ohraňovací lis budou značně menší než na lis hydraulický. Pro ohraňování se užije standardních nástrojů, proto je cena nižší než v případě ohybu v tvarovém nástroji. Náklady na kovadla jsou analogicky v řádech desítek korun.

5.1.4 Ohraňování + Nepevný nástroj

Další metoda, při které je lopatka složena ze dvou dílů. Předtvarování je provedeno ohraňováním a finální tvar je získán tvářením nepevným nástrojem. Tváření pouze nepevným nástrojem by bylo velmi nevýhodné, protože by se značně snížila životnost tohoto nástroje z důvodu větší deformace. Zatímco při předtvarování ohybem se prodlouží životnost nepevného nástroje a zároveň se dosáhne i vysoce přesného tvaru. Tloušťka materiálu je při tomto postupu omezena do 6 mm, jelikož s tloušťkou poroste tvářecí síla a značně se bude snižovat životnost nepevného nástroje. Výrobní čas je odhadován na polovinu na rozdíl od hamrování. Kvalifikace pracovníků by měla být vysoká pro zajištění správného sledu ohybů na ohraňovacím lisu. Náklady na výrobní zařízení jsou vyšší než při ohraňování a hamrování. Použitá výrobní zařízení jsou ohraňovací lis a hydraulický lis. Provozní náklady na hydraulický a ohraňovací lis jsou obdobné jako u předchozích metod. Nástroje pro ohraňování budou standardní a náklady na nepevný nástroj budou záležet na tloušťce plechu, avšak budou spíše vyšší.

5.1.5 Ohraňování modifikovaným nástrojem

Dvoudílná lopatka je připravována pomocí ohraňovacího lisu se speciálně upraveným nástrojem. Modifikace spočívá v proměnlivé šířce nebo výšce nástroje. Upravený nástroj v kombinaci s vysokou zručností pracovníka umožňuje vytvarovat obě části lopatek pouze na ohraňovacím lisu. Přesnost finálního tvaru nebude optimální, jelikož pouze ohraňováním nebude možné zhotovit oblý tvar lopatky. Pracnost výroby je střední. Očekává se vysoce kvalifikovaný personál pro práci s ohraňovacím lisem. Náklady na výrobní zařízení budou nízké vzhledem k použití pouze ohraňovacího lisu. Cena nástroje však bude značně vysoká, protože bude nutné vyrobit zcela nový nástroj.

5.1.6 Ohraňování + Tvarový nástroj

Lopatka je při tomto postupu svařena ze tří dílů. Jedním dílem je náběžná hrana, která se vytvoří pomocí tvarového nástroje. Další dvě části lopatky budou ohýbany na ohraňovacím lisu. Konečný tvar lopatky nebude zcela přesný z důvodu použití ohraňovacího lisu. Lopatky se mohou očekávat lehce hranaté. Výrobní čas je však jeden z nejkratších v porovnání se zmíněnými metodami. Výhodou je také, že personál nemusí být pro tento výrobní postup vysoce kvalifikován jako u metod předešlých, jelikož nejsložitější díl nebude ohraňován, ale vytvarován tvarovým nástrojem. K výrobě bude použit hydraulický lis a ohraňovací lis. Ikdyž budou výrobní náklady na hydraulický lis vyšší, tak bude nejsložitější část lopatky vyrobena ve velmi krátkém čase. Náklady na tvarový nástroj se mohou očekávat vysoké. Při návrhu nástroje je vhodné uvažovat použití pro více druhů lopatek. Náklady na ohraňovací nástroj budou nízké vzhledem k použití standardních nástrojů.

5.1.7 Ohraňování + Tvarový nástroj + Hamrování

Technologický postup téměř stejný jako postup předchozí, tedy podkapitola číslo **5.1.6**. Rozdíl je ten, že části lopatek připravené na ohraňovacím lisu budou ještě tvarovány do přesnějšího tvaru hamrováním. To se projeví na zvýšení výrobního času a kvalifikovanosti personálu oproti postupu bez hamrování. K výrobním zařízením přibyde libovolný buchar. Co se týče nástrojů, cena se téměř nezvedne, protože budou použita pouze standardní kovadla.

5.1.8 Ohraňování + Tvarový nástroj + Nepevný nástroj

Tento technologický postup je téměř totožný jako předešlé postupy z podkapitol číslo **5.1.6** a **5.1.7**. Změna spočívá v použití nepevného nástroje k dotvarování ohýbaných segmentů. Pracnost výroby a požadavek na kvalifikaci pracovníků se tím zvýší, ale za to se dosáhne velmi přesného konečného tvaru lopatky. Kromě hydraulického a ohraňovacího lisu bude použit další hydraulický lis pro tváření nepevným nástrojem. Tím se značně zvýší provozní náklady na stroje. Cena nepevného nástroje bude záviset hlavně na tloušťce tvářeného plechu, která velmi ovlivňuje životnost, avšak mohou se očekávat spíše vyšší náklady na nepevný nástroj.

5.1.9 Ohraňování + Laser

Modifikace procesu ohraňovaní z předešlých technologických postupů z podkapitol číslo **5.1.6**, **5.1.7** a **5.1.8**. Za pomocí laseru se vytváří v materiálu vnitřní pnutí, které usnadní tvarování plechu a zmenší potřebné tvářecí síly. Přidáním laseru mezi výrobní zařízení razantně vzrostou náklady na stroje. Zároveň pak vzroste výrobní čas a bude potřeba kvalifikovanější personál pro práci s laserem. Náklady na ohraňovací nástroje zůstanou stejné. Nezmění se ani přesnost výroby.

5.1.10 Lisování

Jednotlivé díly lopatky, ať už dvojdílné nebo třídílné, budou vyráběny pomocí lisovacího nástroje. Všechny díly nebude možné lisovat pouze jedním nástrojem, proto pro každý díl bude použit vlastní lisovací nástroj. Použití této metody bude omezeno tloušťkou plechu z důvodu rostoucích tvářecích sil. Přesnost konečného tvaru lopatky bude vysoká. Jedná se o jednu z nejméně pracných variant výroby. Požadavek na kvalifikaci personálu je velmi nízký. Jako výrobní zařízení se použije buď hydraulický nebo mechanický lis. Velmi nízký výrobní čas zaručuje i nízké provozní náklady na lis. Odhadem se bude jednat o desetikoruny na jeden vyrobený kus. Všechny zmíněné výhody však budou vykoupeny velmi vysokou cenou lisovacího nástroje, jehož výrobní náklady mohou dosahovat velmi vysokých částek, v tomto případě může převyšovat cenu v řádech stovek tisíc Kč. Metoda bude vhodná především při výrobě většího počtu kusů z důvodu snížení celkových nákladů na výrobu.

5.1.11 Kování za tepla

Na lisu budou tvářeny za tepla jednotlivé části lopatek. Stejně jako v případě lisovacího nástroje bude potřeba pro každou část lopatky vlastní tvarová kovadla. Tento postup je použitelný na rozdíl od lisovaní pro větší tloušťky materiálu. Tloušťka plechu by měla přesahovat alespoň 10 mm, protože pro menší tloušťky plechu bude docházet k rychlému ochlazování, tím pádem by byl ohřev materiálu značně neefektivní. Konečný tvar lopatky bude touto metodou vyroben velmi přesně. Mezi další výhody bude patřit snížení výrobního času nebo nízký požadavek na kvalifikaci personálu. Mezi výrobní zařízení je nutné zahrnout pec, která je potřeba pro ohřev materiálu. Velikost pece může omezovat maximální velikost lopatek. Náklady na pec budou vyšší z důvodu vysoké energetické náročnosti. Provozní náklady na mechanický či hydraulický lis budou nízké kvůli nízkému výrobnímu času. Lze konstatovat, že největší nevýhodou tohoto postupu jsou opět velmi vysoké náklady

na nástroj. Cenu ovlivní hlavně jeho velikost a tvarová složitost. Celkové výrobní náklady je možné snížit výrobou většího počtu dílů.

5.1.12 Zakružování + Ohraňování

Pomocí operace zakružování bude připraven plech do kuželového tvaru. Plech se poté svaří k sobě. Takto připravený polotovar bude dotvarován dalším ohýbáním. Jedním z nejjednodušších způsobů je dotvarování na ohraňovacím lisu. Výhodou této metody je, že téměř není omezená tloušťkou zpracovávaného plechu. Avšak pro větší tloušťky plechu značně porostou lisovací síly. Výsledný tvar po ohraňování nebude příliš přesný. Pracnost i požadavek na kvalifikaci personálu však budou nízké. Použitá výrobní zařízení budou ohraňovací lis a zakružovací stroj. Náklady na nástroje budou nízké vzhledem k použití standardních nástrojů.

5.1.13 Zakružování + Nepevný nástroj

Výrobní metoda, která je velmi podobná metodě z předchozí podkapitoly. Plech je opět nejprve připraven do kuželového tvaru. Dotvarování proběhne nepevným nástrojem, konkrétně metodou hydroforming, která se v tomto případě použije ve smyslu rozšiřování trubek. Dokončení nepevným nástrojem zaručí větší přesnost dílů v porovnání s dokončením na ohraňovacím lisu. Pracnost výroby bude nízká, avšak razantně vzrostou provozní náklady strojů kvůli přidání stroje vhodného pro metodu hydroforming. Pro správné použití nepevného nástroje by měl být personál středně kvalifikován ve srovnání s ostatními zmíněnými metodami. Náklady na nástroje budou nízké. Oproti předchozí metodě však bude omezena použitelnost pouze na plechy o malých tloušťkách.

5.1.14 Tváření výbuchem

Jednotlivé díly lopatky budou vyrobeny pomocí nekonvenční metody tváření výbuchem. Metoda je obzvlášť výhodná při tváření obtížně tvařitelných materiálů a velkých kusů plechu. Se správným provedením lze očekávat vysokou přesnost vyrobených částí. Ačkoliv je tváření výbuchem obecně považováno za velmi málo produktivní metodu, tak z hlediska výroby lopatek s ohledem na již zmíněné metody je pracnost poměrně nízká. Touto metodou se vyprodukuje i několik dílů za hodinu. Personál musí být pro výkon tohoto způsobu tváření vysoce kvalifikován. Při použití až příliš velkého množství výbušniny může dojít k poničení materiálu. Špatné umístění výbušniny může zase vést k nedokonalému vylisování požadovaného tvaru. Personál však musí dbát i na zajištění dostatečné bezpečnosti pro provedení této výrobní metody. Ačkoliv budou náklady na nástroje při tomto způsobu tváření nízké, tak na druhou stranu mohou být náklady na vybavení pracovišť poměrně vysoké. [15]

5.1.15 Elektromagnetické tváření

Části lopatky jsou vytvořeny elektromagnetickým tvářením. K provedení je potřeba pouze jednostranný nástroj, jelikož druhou polovinu tvoří cívka. Jedná se o velmi přesnou metodu výroby, protože nevzniká skoro žádné odpružení. Elektromagnetické tváření vyniká velmi nízkou pracností. Tímto postup lze vyrobit i několik dílů za vteřinu. Proces vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál. Vzniklým elektrickým obvodem protékají velmi vysoké proudy, a proto jsou zapotřebí vyšší nároky na bezpečnost. Náklady na nástroj jsou nízké, ale cena celého zařízení může být celkem vysoká.

Tab. 9 – Shrnutí výrobních variant s ohledem na vybraná kritéria

Kritérium / Varianta	K1	K2	K3	K4	K5
V1	Vysoká	Střední	Střední	Velmi Nízké	Vysoký
V2	Vysoká	Nízká	Vysoké	Nízké	Vysoký
V3	Vysoká	Nízká	Střední	Nízké	Vysoký
V4	Vysoká	Nízká	Vysoké	Vysoké	Vysoký
V5	Nízká	Střední	Nízké	Vysoké	Vysoký
V6	Nízká	Nízká	Vysoké	Vysoké	Nízký
V7	Vysoká	Střední	Vysoké	Vysoké	Střední
V8	Vysoká	Střední	Vysoké	Vysoké	Střední
V9	Nízká	Vysoká	Vysoké	Nízké	Vysoký
V10	Vysoká	Velmi nízká	Nízké	Velmi vysoké	Nízký
V11	Vysoká	Velmi nízká	Vysoké	Velmi vysoké	Nízký
V12	Nízká	Nízká	Střední	Nízké	Nízký
V13	Vysoká	Nízká	Vysoké	Nízké	Střední
V14	Vysoká	Nízká	Vysoké*	Nízké	Vysoký
V15	Vysoká	Velmi nízká	Vysoké*	Nízké	Vysoký

*U variant V13 a V14 znamená kritérium K3 náklady na vybavení pracovišť místo provozních nákladů strojů.

5.2 Stanovení vah kritérií

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, vhodné metody pro výrobu lopatek vodní turbíny budou vybrány na základě vícekriteriálního rozhodování. Jako vstup pro vícekriteriální rozhodování je využita tabulka číslo 9, ve které je shrnuto porovnání uvažovaných metod s ohledem na pět vybraných kritérií. Dalším nezbytným krokem pro určení nejvhodnějších metod k výrobě lopatek je stanovit váhu vybraných kritérií. Váha kritérií je vypočítána podle hodnocení tří expertů, kteří mají přehled v této problematice. Hodnocení kritérií bude provedeno metodou pořadí (5 - nejdůležitější kritérium a 1 - nejméně důležité kritérium). Mezi experty, jenž hodnotili tato kritéria patří vedoucí této práce Ing. Lukáš Chrášťanský, tedy expert 1, konzultant k této práci Ing. František Tatíček, Ph.D., tedy expert 2, a na základě získaných znalostí při vypracovávání této práce připadne role jednoho z expertů i mé osobě jako autorovi práce, tedy expert 3. V následující tabulce jsou již vyplněná hodnocení jednotlivých kritérií.

Tab. 10 – Expertní hodnocení kritérií dle metody pořadí a váhy kritérií

Kritérium / Expert	K1	K2	K3	K4	K5	∑
Expert 1	5	3	2	4	1	15
Expert 2	4	3	2	5	1	15
Expert 3	5	2	3	4	1	15
∑	14	8	7	13	3	45
Váha kritéria	0,311	0,177	0,155	0,288	0,066	

Příklad výpočtu: $$VK1 = \frac{14}{45} = 0{,}311$$

Podle mého hodnocení bude nejdůležitější dosáhnout, co možná nejpřesnějšího tvaru lopatek pro jejich správnou funkci a tím i celé turbíny. Vzhledem k tomu, že u některých metod výroby mohou být náklady na nástroje až v řádech statisíců a tím pádem nepochybně vyšší než provozní náklady strojů, tak za druhé nejdůležitější kritérium považuji náklady na nástroje. Jako třetí kritérium dle důležitosti jsem zvolil provozní náklady strojů. Volba tohoto kritéria před druhým nejméně důležitým kritériem pracnost výroby je dle mého názoru poměrně diskutabilní vzhledem k tomu, že vyšší výrobní čas a náročnost může znamenat vyšší celkové provozní náklady. Požadavek na kvalifikaci personálu vidím jako nejméně důležité kritérium. Pro případné zvýšení důležitosti tohoto kritéria by bylo nutné znát konkrétní firmu a její personál.

S expertem č.1 jsem se shodl téměř ve všech bodech mimo kritéria provozní náklady nástrojů a pracnost výroby. Podle hodnocení považuje expert č.1 pracnost výroby jako důležitější kritérium než provozní náklady strojů.
Pro experta č.2 jsou zásadní především náklady na nástroje kvůli již zmíněným možným velmi vysokým nákladům a až poté výsledná přesnost lopatek. Ve všem ostatním se shoduje s expertem č.1.

Nejvýznamnějším kritériem se stala výsledná přesnost lopatek s váhou kritéria $VK1 = 0{,}311$. Těsně za tímto kritériem skončilo kritérium náklady na nástroje s váhou kritéria $VK4 = 0{,}288$. Po nich kritérium pracnost výroby s váhou kritéria $VK2 = 0{,}177$. Dále kritérium provozní náklady strojů s váhou kritéria $VK3 = 0{,}155$. A jako poslední se umístilo kritérium požadavek na kvalifikaci personálu s váhou kritéria $VK5 = 0{,}066$.

5.3 Výběr vhodné metody

Výběr vhodné metody proběhne metodou bodovací. Jak jsem již zmínil v minulé podkapitole, tabulka č. 9 bude využita jako vstup pro výběr vhodné metody. Varianty jsou v tabulce slovně ohodnoceny pro každé kritérium od velmi vysoká po velmi nízká. Podle toho, jestli je kritérium výnosové(V) nebo nákladové(N) se oboduje slovní hodnocení. Pro výnosové kritérium platí, čím vyšší, tím lepší, zatímco pro nákladové kritérium platí, čím nižší, tím lepší. V následující tabulce je znázorněno ohodnocení slovního popisu pomocí bodů od jedné do pěti.

Tab. 11 – Body odpovídající slovnímu hodnocení z tabulky č. 9

Slovně	Velmi vysoký	Vysoký	Střední	Nízký	Velmi nízký
Výnosové kritérium	5	4	3	2	1
Nákladové kritérium	1	2	3	4	5

Tímto způsobem se obodují varianty v tabulce č. 9.

Tab. 12 – Obodování tabulky č.9 podle tabulky č.11

Kritérium / Varianta	K1	K2	K3	K4	K5
V1	4	1	3	5	2
V2	4	2	2	4	2
V3	4	2	3	4	2
V4	4	2	2	2	2
V5	2	3	4	2	2
V6	2	4	2	2	4
V7	4	3	2	2	3
V8	4	3	2	2	3
V9	2	2	2	4	2
V10	4	5	4	1	4
V11	4	5	2	1	4
V12	2	4	3	4	4
V13	4	4	2	4	3
V14	4	4	2	4	2
V15	4	5	2	4	2
Typ kritéria	**V**	**N**	**N**	**N**	**N**

Nyní je potřeba vynásobit počet bodů s váhou kritéria, čímž vznikne dílčí agregovaná hodnota. Tyto hodnoty se pro každou variantu sečtou a podle tohoto součtu dílčích agregovaných hodnot se určí nejvýhodnější varianta výroby. Čím vyšší agregovaná hodnota, tím lepší výrobní metoda.

Tab. 13 – Výběr nejlepší metody výroby

Kritérium / Varianta	K1	K2	K3	K4	K5	∑
V1	1,244	0,531	0,465	1,440	0,132	**3,812**
V2	1,244	0,708	0,31	1,152	0,132	**3,546**
V3	1,244	0,708	0,465	1,152	0,132	**3,701**
V4	1,244	0,708	0,31	0,576	0,132	**2,970**
V5	0,622	0,531	0,62	0,576	0,132	**2,481**
V6	0,622	0,708	0,31	0,576	0,264	**2,48**
V7	1,244	0,531	0,31	0,576	0,198	**2,859**
V8	1,244	0,531	0,31	0,576	0,198	**2,859**
V9	0,622	0,354	0,31	1,152	0,132	**2,57**
V10	1,244	0,885	0,62	0,288	0,264	**3,301**
V11	1,244	0,885	0,31	0,288	0,264	**2,991**
V12	0,622	0,708	0,465	1,152	0,264	**3,211**
V13	1,244	0,708	0,31	1,152	0,198	**3,612**
V14	1,244	0,708	0,31	1,152	0,132	**3,546**
V15	1,244	0,885	0,31	1,152	0,132	**3,723**
Váha kritéria	**0,311**	**0,177**	**0,155**	**0,288**	**0,066**	

Příklad výpočtu dílčí agregované hodnoty pro V1 a K1:

$$\omega = 4 * 0{,}311 = 1{,}244$$

Z vícekriteriálního rozhodování vychází, že jako nejvýhodnější metody výroby lopatek turbín se jeví běžné tvářecí postupy jako hamrování, ohraňování s dokončením pomocí hamrování nebo zakružování a dotvarování pomocí nepevného nástroje. Vysoko se umístily i některé nekonvenční metody jako elektromagnetické tváření nebo tváření výbuchem.

5.4 Závěrečné zhodnocení

Výsledky z tabulky číslo 14 tvoří velmi dobrý obraz o vhodnosti jednotlivých výrobních postupů z hlediska mnou zvolených 5 kritérií. Avšak je nutné brát také v potaz skutečnost, že pravděpodobně každá metoda bude mít i své nedostatky. Při hamrování může razantně vzrůstat pracnost, pokud se budou vyrábět velké lopatky, ale pro menší velikosti lopatek bude tato metoda velmi produktivní. V pořadí druhá metoda, elektromagnetické tváření, bude bezkonkurenční metodou pro výrobu malých lopatek z plechů o velmi malé tloušťce, ale pro výrobu rozměrnějších lopatek bude tato metoda absolutně nevhodná ba i nepoužitelná z důvodu velké tloušťky plechu nebo pořízení adekvátního vybavení, se kterým by šlo vytvarovat i větší lopatky. Při ohraňování může mít ohraňovací lis velké potíže s tvářením náběžné hrany, protože v určitém okamžiku už téměř přestane docházet k ohybu, ale lisovací síly porostou teoreticky do nekonečna. Zakružování s dokončením pomocí metody hydroforming bude mít zase potíže s plechy o větších tloušťkách. Ten samý problém se může očekávat i při tváření výbuchem. Metody jako lisování a kování za tepla zase bude nutné pečlivě zhodnotit z ekonomického hlediska kvůli velmi vysokým nákladům na nástroje. Investice do těchto metod s ohledem na malou sériovost lopatek by se nemusela vyplatit.

Tab. 14 – Pořadí výrobních postupů

Pořadí	Výrobní postup	Agregovaná hodnota
1.	Hamrování	3,812
2.	Elektromagnetické tváření	3,723
3.	Ohraňování + Hamrování	3,701
4.	Zakružování + Nepevný nástroj	3,612
5. – 6.	Ohyb v tvarovém nástroji + Hamrování	3,546
5. – 6.	Tváření výbuchem	3,546
7.	Lisování	3,301
8.	Zakružování + Ohraňování	3,211
9.	Kování za tepla	2,991
10.	Ohraňování + Nepevný nástroj	2,970
11. – 12.	Ohraňování + Tvarový nástroj + Hamrování	2,859
11. – 12.	Ohraňování + Nepevný nástroj + Tvarový nástroj	2,859
13.	Ohraňování + Laser	2,57
14.	Ohraňování modifikovaným nástrojem	2,481
15.	Ohraňování + Tvarový nástroj	2,48

Celkově, na základě porovnání jednotlivých metod pomocí vícekriteriálního rozhodování, se nejhůře jeví metody, které nebyly schopny dosáhnout přesného tvaru lopatky. Dalším důležitým faktorem s nepatrně menším vlivem je cena nástrojů. Výrobní postupy na konci tabulky v sobě kombinují malou přesnost konečného tvaru lopatky a vysokou cenu nástrojů, tyto kritéria měla největší váhu pro volbu vhodné metody. Z výše zmíněných důvodů se na konci tabulky umístily metody jako ohraňování modifikovaným nástrojem a ohraňování s dokončením tvarovým nástrojem. Prostředek tabulky pořadí obsazovaly většinou výrobní postupy, které měli vysokou cenu nástrojů, ale za to vysokou přesnost tvaru lopatek a naopak.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – HAMROVÁNÍ

Experimentální část ověřuje technologický postup hamrování jako jeden z nejvýhodnějších možných výrobních postupů. Hamrování se jeví jako metoda, která je při vysoké zručnosti pracovníka, pro rozměrově menší lopatky, poměrně málo pracná. Experiment simuluje tvorbu nejsložitější části lopatky, tedy náběžné hrany. Hamrování probíhalo na standardním kompresorovém bucharu s upraveným kovadlem, na kterém byly navařeny dvě podpěry pro snadnější docílení požadovaného ohybu. Pro potřeby experimentu byli zvoleny dílce z korozivzdorné oceli X3CrNiMo 13-4 (dle ČSN EN 10027-1) o tloušťce 10 mm a šířce 50 mm. Délka součásti v případě tohoto experimentu není důležitá.

Obr. 20 – Zkušební vzorky (tloušťka)

Obr. 21 – Zkušební vzorky (šířka)

Obr. 22 – Upravené kovadlo

Obr. 23 - Hamrování

Obr. 24 – Náběžné hrany o různých rádiech

Obr. 25 – Možné konstrukce lopatek

Experimentem bylo ověřeno, že hamrováním lze vytvořit náběžnou hranu lopatky jen na několik desítek úderů bucharu. Při vysoké zručnosti pracovníka, který manipuluje s dílem při hamrování, se bude výrobní čas jedné náběžné hrany pohybovat v rozmezí 15-30 sekund v závislosti na požadovaném ohybu a počtu úderů bucharu.

7 Závěr

Ve své bakalářské práci se zabývám možnými metodami výroby lopatek vodních turbín a výběrem těch nejvhodnějších metod pro výrobu.

V úvodní části práce je seznámení se základní problematikou procesu tváření a faktorů, které je ovlivňují. Jsou popsány jednotlivé výrobní technologie z hlediska jejich fungování. Všechny zmíněné metody se dají v určité části výroby použít k tvarování lopatek.

Dále jsou popsány materiálové jakosti, které se běžně používají pro výrobu lopatek vodních turbín. Jedná se o konstrukční ocel 11 523, která je používána pro méně náročné provozy, dále pak korozivzdorné oceli 18-10 (pro méně namáhané díly v možném korozně působícím prostředí) a 13-4 (díly namáhané na opotřebení – abraze a eroze).

Následně jsem vytvořil souhrn možných technologických postupů pro výrobu lopatek. Pro tyto výrobní postupy jsem provedl porovnání pomocí vícekriteriálního rozhodování na základě pěti kritérií. Z vícekriteriálního rozhodování vyšla jako nejlepší výrobní metoda hamrování. Hamrování vyniká především schopností vytvořit velmi přesný tvar lopatky, pokud s dílem operuje zkušený pracovník, nízkou cenou nástrojů a nízkou pracností při výrobě menších lopatek.

V experimentální části jsem ověřil pracnost výrobního postupu hamrování, tím že jsem simuloval hamrování nejsložitější části lopatky, náběžné hrany. Výrobní čas náběžné hrany se pohyboval mezi 15-30 sekundami. Experiment potvrdil nízkou časovou náročnost procesu hamrování.

Použitá literatura

[1] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0415-9.

[2] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, c1998. ISBN 80-7183-054-2.

[3] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-877-1.

[4] GROOVER, Mikell. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes and systems*. Fourth edition. 2010. ISBN 978-0470-467002.

[5] EDITED BY UDAY SHANKER DIXIT a R. GANESH NARAYANAN. *Metal forming: technology and process modelling*. New Delhi: McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2013. ISBN 9781259007347.

[6] RAMEZANI, Maziar. a Zaidi M. RIPIN. *Rubber-pad forming processes: technology and applications*. Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-549-7.

[7] LASCOE, O.D. *Handbook of fabrication processes*. 5. printing. Metal Park, Ohio: ASM International, 1988. ISBN 0871703025.

[8] *KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI: SKRIPTA TECHNOLOGIE 2* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm

[9] Tváření kovů - teorie. *Centrum odborné technické přípravy* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=38835&revision=-1&instance=2

[10] *The library of manufacturing: Sheet metal bending* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html

[11] KUBÍČEK, Miroslav. *Zvláštní způsoby tváření za studena* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_20-18.pdf

[12] DROZD, Zdeněk. Superlehké slitiny hořčíku. *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/3099081/

[13] *Bending die 1* [online]. 1.4.2015 [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=O6ykFfYGpvU

[14] *Schematic diagram of roll bending process* [online]. In: . [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://www.machinemfg.com/3-roll-bending-machine-working-principle-rolling-process/

[15] Explosive forming. *Engineeringclicks.com* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://www.engineeringclicks.com/explosive-forming/

[16] High energy rate forming. *Thelibraryofmanufacturing.com* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/high_energy_rate_forming.html

[17] Tváření kovů. *Centrum odborné technické přípravy* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=20459&instance=2

[18] Tváření za studena. *Strojní lyceum* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep13.pdf

[19] Lisovací nástroje. In: *HMB* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.hmb.cz/lisovaci-nastroje/

[20] Přehled vlastností oceli S355JO. *Bolzano* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP-prehled_vlastnosti_S355J0.pdf

[21] Jakosti ocelí. *Feromat* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli

[22] Korozivzdorné oceli - vlastnosti. *Cedinox* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf

[23] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI. *Italinox* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2

[24] 1.4313. *Rdsspipes* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.rsdsspipes.com/stainless-steel/en-1-4313-aisi-415-stainless-steel-pipes-plates-sheets-tubes-fittings-flanges/

[25] 1.4313. *Dew-stahl* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4313_en.pdf

[26] 1.4313. *Xlmetal* [online]. [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: http://www.xlmetal.cz/materialy/nerezova-ocel/14313.html

[27] ČSN 41 1523. *Ocel 11 523*. Praha: Český normalizační institut, 1994.

[28] ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

..

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozdělení tváření podle teploty

Obrázek 2 – Deformační textura

Obrázek 3 – Změna mechanických vlastností v závislosti na stupni deformace

Obrázek 4 – Schéma elastické a plastické deformace

Obrázek 5 – Schéma skluzu(vlevo) a dvojčatění(vpravo)

Obrázek 6 – Schéma volného kování

Obrázek 7 – Schéma zápustkového kování

Obrázek 8 – Schéma bezvýronkového kování

Obrázek 9 – Schéma ohýbání

Obrázek 10 – Schéma ohraňování

Obrázek 11 – Příklad ohybu v tvarovém nástroji

Obrázek 12 – Schéma procesu zakružování

Obrázek 13 – Schéma ohýbání metodou Guerin

Obrázek 14 – Schéma metody Marform

Obrázek 15 – Schéma metody Hydroform

Obrázek 16 – Schéma metody Verson-Wheelon

Obrázek 17 – Schéma tváření výbuchem

Obrázek 18 – Schéma použití elektromagnetického tváření

Obrázek 19 – Postupový lisovací nástroj

Obrázek 20 – Zkušební vzorky (tloušťka)

Obrázek 21 – Zkušební vzorky (šířka)

Obrázek 22 – Upravené kovadlo

Obrázek 23 – Hamrování

Obrázek 24 – Náběžné hrany o různých rádiech

Obrázek 25 – Možné konstrukce lopatek

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Chemické složení oceli ČSN 41 1523

Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti oceli ČSN 41 1523

Tabulka 3 – Chemické složení oceli X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1)

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti oceli X5CrNi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1)

Tabulka 5 – Chemické složení oceli X3CrNi 13-4 (dle ČSN EN 10027-1)

Tabulka 6 – Mechanické vlastnosti oceli X3CrNi 13-4 (dle ČSN EN 10027-1)

Tabulka 7 – Seznam kritérií pro vícekriteriální rozhodování

Tabulka 8 – Seznam variant pro vícekriteriální rozhodování

Tabulka 9 – Shrnutí výrobních variant s ohledem na vybraná kritéria

Tabulka 10 – Expertní hodnocení kritérií dle metody pořadí a váhy kritérií

Tabulka 11 – Body odpovídající slovnímu hodnocení z tabulky č. 9

Tabulka 12 – Obodování tabulky č. 9 podle tabulky č. 11

Tabulka 13 – Výběr nejlepší metody výroby

Tabulka 14 – Pořadí výrobních postupů