

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104237-103349

**Progresívne metódy výroby statorových
a rotorových zväzkov laminačných platní
v elektromotoroch so zameraním na upevnenie
magnetov**

Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104237-103349

**Progresívne metódy výroby statorových
a rotorových zväzkov laminačných platní
v elektromotoroch so zameraním na upevnenie
magnetov**

Diplomová práca

Študijný program: výrobné technológie a výrobný manažment
Študijný odbor: strojárstvo
Školiace pracovisko: Ústav výrobných technológií
Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD.
Konzultant: Ing. Martin Klukay

Trnava 2024

Bc. František Beňo



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. František Beňo**
ID študenta: 103349
Študijný program: výrobné technológie a výrobný manažment
Študijný odbor: strojárstvo
Vedúci práce: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD.
Vedúci pracoviska: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD.
Konzultant: Ing. Martin Klukay
Miesto vypracovania: MTF STU so sídlom v Trnave, ZF Slovakia, a.s., Trnava

Názov práce: **Progresívne metódy výroby statorových a rotorových zväzkov laminačných platní v elektromotoroch so zameraním na upevnenie magnetov**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

- 1 Súčasný stav v oblasti elektromotorov a podrobná analýza konvenčných spôsobov výroby statorových a rotorových laminačných zväzkov
- 2 Teoretický rozbor konvenčného spôsobu výroby laminačných zväzkov strihaním a požiadavky kladené na kvalitu laminačného zväzku
- 3 Teoretický rozbor požiadaviek kladených na laminačný zväzok pre upevnenie magnetov
- 4 Progresívna metóda upevnenia magnetov v rotorových zväzkoch

Termín odovzdania diplomovej práce: 21. 04. 2024
Dátum schválenia zadania diplomovej práce: 14. 02. 2024
Zadanie diplomovej práce schválil: prof. Ing. Peter Šugár, CSc. – garant študijného programu

PodĎakovanie

Týmto spôsobom by som sa chcel veľmi poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Jozef Bílikovi, PhD. za jeho odborné pripomienky, poznatky a vedenie diplomovej práce. Taktiež veľká vďaka patrí konzultantovi práce Ing. Martinovi Klukayovi zo spoločnosti ZF Slovakia a.s., za poskytnutie údajov, rád a konzultácii pri písaní tejto práce.

Diplomová práca vznikla v rámci projektu "Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu, s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov" (026STU-4/2023) s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

ABSTRAKT

BEŇO, František, Bc.: *Progresívne metódy výroby statorových a rotorových zväzkov laminačných platní v elektromotoroch so zameraním na upevnenie magnetov*. [Diplomová práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. – Vedúci práce: doc. Ing. Jozef Bílik, PhD. – Trnava MTF STU, 2024. 95 s.

Táto diplomová práca sa zameriava na analýzu a porovnanie konvenčných a progresívnych metód výroby statorových a rotorových zväzkov laminačných platní v elektromotoroch, so špecifickým dôrazom na proces upevňovania magnetov.

Prvým krokom analýzy je dôkladné preskúmanie súčasného stavu v oblasti elektromotorov a detailná analýza tradičných spôsobov výroby statorových a rotorových laminačných zväzkov. Ďalej sa práca zaoberá procesom strihania laminačných platní a stanovením podmienok kladených na kvalitu laminačného zväzku.

Hlavnou témou práce je však progresívne upevňovanie magnetov v rotorových zväzkoch pomocou vstrekovania plastického materiálu do magnetických vreciek. Táto inovatívna metóda poskytuje potenciálne významné vylepšenia v spoľahlivosti a výkonnosti elektromotorov v porovnaní s tradičnými spôsobmi upevňovania magnetov.

V závere sa práca zameriava na meranie síl potrebných na odobratie magnetov, čo je kľúčovým krokom pri hodnotení trvanlivosti a spoľahlivosti elektromotorov využívajúcich progresívne metódy upevňovania magnetov.

Výsledky tejto analýzy by mali poskytnúť užitočné poznatky pre spoločnosť ZF Slovakia a.s., umožňujúc im identifikovať a využiť potenciálne oblasti inovácie a zlepšenia ich výrobných procesov.

Kľúčové slová: Laminačný zväzok, progresívne metódy, rotor, stator, upevňovanie magnetov, elektromotor

ABSTRACT

BEŇO, František, Bc.: *Progressive methods of manufacturing stator and rotor bundles of laminating plates in electric motors with a focus on fixing magnets*. [Diploma Thesis] – Slovak University of Technology Bratislava. Faculty of Material Science and Technology; Institute of Production Technology. – Supervisor: doc. Ing. Jozef Bilik, PhD. – Trnava MTF STU, 2024. 95 p.

This master's thesis focuses on the analysis and comparison of conventional and progressive methods for manufacturing stator and rotor laminations in electric motors, with a specific emphasis on the process of magnet attachment.

The first step of this analysis involves a thorough examination of the current state of electric motors and a detailed analysis of traditional methods for manufacturing stator and rotor laminations. Furthermore, the thesis explores the process of laminating plate cutting and establishes the conditions required for the quality of laminations.

However, the main focus of this thesis lies in the progressive method of magnet attachment in rotor laminations using injection of plastic material into magnetic pockets. This innovative approach offers potentially significant improvements in the reliability and performance of electric motors compared to traditional methods of magnet attachment.

In conclusion, the work focuses on measuring the forces required to remove magnets, which is a key step in evaluating the durability and reliability of electromotors using progressive methods of magnet fixation. The results of this analysis should provide valuable insights for ZF Slovakia a.s., enabling them to identify and leverage potential areas for innovation and improvement in their manufacturing processes.

Key words: Lamination stack, progressive methods, rotor, stator, magnet attachment, electric motor

OBSAH

ZOZNAM PRÍLOH.....	10
ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK	11
ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ A ZOZNAM TABULIEK.....	12
ÚVOD.....	15
1 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI ELEKTROMOTOROV A PODROBNÁ ANALÝZA KONVENČNÝCH SPÔSOBOV VÝROBY STATOROVÝCH A ROTOROVÝCH LAMINAČNÝCH ZVÄZKOV	16
1.1 Teória o elektromotoroch a akú úlohu v nich zohrávajú laminačné zvázky	16
1.2 Typy elektromotorov	17
1.2.1 Asynchrónny indukčný motor	17
1.2.2 Synchronný motor s permanentným magnetom (PSM)	17
1.2.3 Bezkomutátorový jednosmerný motor (BLDC)	17
1.2.4 Indukčné motory	17
1.2.5 Spínané reluktančné motory (SRM)	17
1.3 Konštrukcia elektromotorov	18
1.3.1 Stator.....	18
1.3.2 Rotor	22
1.4 Spôsob výroby lamely statora a rotora	26
1.4.1 Konvenčné metódy výroby lamiel statora a rotora.....	26
1.4.2 Progresívne metódy výroby statorov a rotorov.....	27
1.5 Spôsoby spájania laminačných zväzkov	29
1.5.1 Blacklack	29
1.5.2 Zváranie	30
1.5.3 Lepenie.....	31
1.5.4 Interlocking.....	32
1.6 Spôsoby upevnenia magnetov v laminačnom zväzku	33

2	PROCES STRIHANIA A PODMIENKY Kladené na kvalitu laminačného zväzku	34
2.1	Postup strihania lamiel rotora a statora	34
2.2	Základné parametre pre výber vhodného materiálu laminačných zväzkov	41
2.2.1	Hrúbka materiálu	41
2.2.2	Mechanické vlastnosti	42
2.2.3	Magnetické vlastnosti	42
2.2.4	Povrchová úprava a jej hrúbka	43
2.3	Kontrola samostatného strihu po procese strihania	43
2.4	Smer valcovania plechu	51
2.4.1	Mechanické vlastnosti a vplyv smeru valcovania pri procese strihania	52
2.4.2	Druhy valcovania	53
2.4.3	Vzájomne natáčanie laminačných zväzkov na elimináciu vplyvu smeru valcovania	54
2.5	Skúšky vykonávané na laminačnom zväzku	55
2.5.1	Axiálny retenčný test (Axial retention test)	55
2.5.2	Skúška pevnosti v ťahu	56
2.5.3	Odtrhávací test (Peeling test)	57
2.5.4	Epsteinov test	58
3	PROGRESÍVNE UPEVNŔOVANIE MAGNETOV V ROTOROVÝCH ZVÄZKOCH	59
3.1	Zariadenia, stroje a prípravky použité pri realizovaní experimentálnej časti	60
3.2	Materiály použité pri experimente	63
3.3	Postup výroby 3D vzoriek rotora pomocou technológie SLA	64
3.4	Návrh a výroba formy	68
3.5	Upevňovanie magnetov do vreciek na magnety pomocou vstrekovania roztaveného plastického materiálu	70
4	MERANIE SÍL POTREBNÝCH NA ODOBROTIE MAGNETOV	76

4.1	Zariadenia a prípravky použité pri meraní síl potrebných na odobratie magnetov	76
4.2	Proces merania síl	77
4.2.1	VHDPE – voľné uloženie magnetov, vysokohustotný polyetylén	78
4.2.2	VPP- voľné uloženie magnetov, polypropylén.....	79
4.2.3	THDPE – tesné uloženie magnetov, vysoko – hustotný polyetylén.....	81
4.2.4	TPP - tesné uloženie magnetov, polypropylén	82
4.3	Vyhodnotenie merania	84
ZÁVER		86
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV		88

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – Výkres návrhu prvej časti formy

PRÍLOHA B – Výkres návrhu druhej časti formy

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK

EDM	Elektroiskrové obrábanie
PSM	Synchrónny motor s permanentným magnetom
BLDC	Bezkomutátorový jednosmerný motor
SRM	Spínané reluktančné motory
TIG	Zváranie interným plynom
MAG	Zváranie aktívnym plynom
LFC	Nízko cyklová únava
HFC	Vysoko cyklová únava
HDPE	Vysoko – hustotný polyetylén
PP	Polypropylén
3D	Trojrozmerný
UV	Ultrafialové žiarenie
IPA	Izopropylalkohol
SLA	Stereolitografia
FDM	Fused Deposition Modeling
VHDPE	Voľné uloženie magnetov, vysoko – hustotný polyetylén
VPP	Voľné uloženie magnetov, polypropylén
THDPE	Tesné uloženie magnetov, vysoko – hustotný polyetylén
TPP	Tesné uloženie magnetov, polypropylén

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ A ZOZNAM TABULIEK

Obr. 1 Stator (Aumann 2024)	18
Obr. 2 Laminačný zväzok statora (KMMP 2024)	19
Obr. 3 Vinutie statora (EASA 2024)	20
Obr. 4 Izolácia (Elmotec Statomat 2024)	20
Obr. 5 Obvody (Agroad 2024).....	21
Obr. 6 Púzdro (Indiamart 2024).....	22
Obr. 7 Rotor (Carpenter Electrification 2024).....	23
Obr. 8 Laminačný zväzok rotora (R.Bourgeois 2024).....	23
Obr. 9 Magnety	24
Obr. 10 Hriadeľ (WF 2024)	26
Obr. 11 Laserom vyrezaná lamela	27
Obr. 12 Lamela vyrobená pomocou technológie Slinky design.....	28
Obr. 13 Rotor rozdelený na segmenty (Global Source 2024).....	29
Obr. 14 Laminačný zväzok spojený technológiou zvarovania (Voestalpine 2023)	30
Obr. 15 Laminačný zväzok spojený technológiou lepenia (Voestalpine 2023)	32
Obr. 16 Lamela s ohýbacími prvkami	34
Obr. 17 Lamela s vybratím na ohnutie ohýbacích prvkov.....	34
Obr. 18 Strihanie magnetických vreciek rotora	35
Obr. 19 Strihanie druhej časti magnetických vreciek rotora	35
Obr. 20 Strihanie vonkajšieho priemeru lamely rotora.....	36
Obr. 21 Kompletne vystrihnutá lamela rotora	36
Obr. 22 Aplikácia lepidla na vystrihnutú lamelu rotora	37
Obr. 23 Strihanie chladiaci drážok lamely statora	38
Obr. 24 Strihanie druhej časti chladiacich drážok lamely statora.....	38
Obr. 25 Strihanie drážok na statorové vinutie	39
Obr. 26 Strihanie presného vnútorného priemeru lamely statora	39
Obr. 27 Strihanie presného vonkajšieho priemeru lamely statora	40
Obr. 28 Kompletne vystrihnutá lamela statora	40
Obr. 29 1. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)	44
Obr. 30 2. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)	44
Obr. 31 3. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)	45
Obr. 32 4. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)	45

Obr. 33 Tvar strižnej plochy a jednotlivé pásma po strihaní (Bílik a kol. 2010)	46
Obr. 34 Závislosť strižnej sily od strižnej medzery (Bílik a kol. 2010)	47
Obr. 35 Vplyv strižnej medzery na kvalitu strižnej plochy	48
Obr. 36 Pracovný diagram pri strihaní v strihadlách	49
Obr. 37 Pracovný diagram pri strihaní na tabuľových nožniciach	49
Obr. 38 Valcovanie plechu (Fimosteel 2024)	52
Obr. 39 Pozdĺžne valcovanie (Daily Automation 2024)	53
Obr. 40 Priečne valcovanie (Daily Automation 2024)	54
Obr. 41 Axiálny retenčný test	56
Obr. 42 Skúška pevnosti v ťahu	57
Obr. 43 eXpert 7601 Adhesive and Peel Testovací systém (Admet 2024)	58
Obr. 44 3D tlačiareň Formlabs Form 2 (Treatstock 2024)	60
Obr. 45 Svetelná polymerizačná lampa Formlabs Form 2 Curing (Mikran 2024)	61
Obr. 46 Čistička Formlabs Form 2 Washing (Support Formlabs 2024)	61
Obr. 47 Vstrekovací lis BABYPLAST horizontálny	62
Obr. 49 Prvá a druhá časť formy	63
Obr. 50 Vzorka rotora v prostredí programu Creo Parametric	66
Obr. 51 Proces 3D tlače vzoriek rotora	66
Obr. 52 Proces oplachovania 3D vzoriek rotora	67
Obr. 53 Proces vytvrdzovania 3D vzoriek rotora	68
Obr. 54 Proces čistenia 3D vzoriek rotora	68
Obr. 55 Návrh prvej časti formy v programe Solid Edge ST9	69
Obr. 56 Návrh druhej časti formy v programe Solid Edge ST9	70
Obr. 57 Proces čistenia vstrekovacieho lisu BABYPLAST	71
Obr. 58 Upnutie prvej a druhej časti vstrekovacej formy	72
Obr. 59 Úprava vzoriek pred vložením do formy	73
Obr. 60 Upnutá vzorka vo forme	74
Obr. 61 Proces vstrekovania plastického materiálu	74
Obr. 62 Orezané a upravené vzorky	75
Obr. 63 Trhacie zariadenie Tinius Olsen MODEL 300ST	76
Obr. 64 Prípravok na testovanie	77
Obr. 65 Graf pre malý magnet vzorky VHDPE vygenerovaný v programe Horizon	78
Obr. 66 Graf pre veľký magnet vzorky VHDPE vygenerovaný v programe Horizon	79
Obr. 67 Vzorka VHDPE s vytlačenými magnetmi	79

Obr. 68 Graf pre malý magnet vzorky VPP vygenerovaný v programe Horizon	80
Obr. 69 Graf pre veľký magnet vzorky VPP vygenerovaný v programe Horizon	80
Obr. 70 Vzorka VPP s vytlačenými magnetmi	81
Obr. 71 Graf pre malý magnet vzorky THDPE vygenerovaný v programe Horizon	81
Obr. 72 Graf pre veľký magnet vzorky THDPE vygenerovaný v programe Horizon	82
Obr. 73 Vzorka THDPE s vytlačenými magnetmi	82
Obr. 74 Graf pre malý magnet vzorky TPP vygenerovaný v programe Horizon	83
Obr. 75 Graf pre veľký magnet vzorky TPP vygenerovaný v programe Horizon	83
Obr. 76 Vzorka TPP s vytlačenými magnetmi	84
Tab. 1 Parametre vstrekovacieho lisu BABYPLAST horizontálny (Cecho 2024)	62
Tab. 2 Parametre materiálu Vysoko - hustotný polyetylén HDPE	64
Tab. 3 Parametre materiálu Polypropylén PP	64
Tab. 4 Hodnoty teploty pre oblasti lisu nastavené na lise BABYPLAST	72
Tab. 5 Vstrekovacie časy a nastavenia lisu BABYPLAST	72
Tab. 6 Hodnoty sily F potrebnej na vytlačenie magnetov	84

ÚVOD

Elektrické motory predstavujú kľúčové komponenty v rôznych technologických aplikáciách, od priemyselných robotov po elektrické vozidlá. Ich efektívnosť a spoľahlivosť závisia od kvality ich základných komponentov, ako sú statorové a rotorové laminačné zväzky. V posledných rokoch sa zvýšil záujem o optimalizáciu výrobných metód týchto zväzkov, najmä pokiaľ ide o progresívne upevnenie magnetov.

Práca sa zameriava na progresívne metódy používané pri výrobe statorových a rotorových laminačných zväzkov v elektrických motoroch, so špecifickým dôrazom na upevnenie magnetov. S cieľom poskytnúť komplexné porozumenie začína analýza súčasného stavu v oblasti elektrických motorov a podrobný prieskum konvenčných metód výroby statorových a rotorových laminovaných jadier.

Následne je rozoberaný teoretický rámec konvenčnej metódy výroby laminačných zväzkov pomocou strihania, spolu s požiadavkami na kvalitu laminačných zväzkov. Okrem toho sú analyzované teoretické požiadavky na laminačných zväzkoch - pokiaľ ide o upevnenie magnetov, cieľom je vymedziť konkrétne požiadavky na tento kľúčový komponent.

Navyše práca preskúma progresívnu metódu upevnenia magnetov v rotorových laminačných zväzkoch, konkrétne vstrekovanie plastu do magnetických vreciek. Tento inovatívny prístup ponúka sľubné vyhliadky na zlepšenie trvanlivosti a spoľahlivosti elektrických motorov a preto si zaslúži dôkladné preskúmanie.

Nakoniec sa práca snaží uzavrieť štúdium merania síl potrebných na odobratie magnetov, poskytujúc nepostrádateľné poznatky o účinnosti progresívnej metódy upevnenia magnetov a jej dôsledkoch na výkon a životnosť elektrických motorov.

1 SÚČASNÝ STAV V OBLASTI ELEKTROMOTOROV A PODROBNÁ ANALÝZA KONVENČNÝCH SPÔSOBOV VÝROBY STATOROVÝCH A ROTOROVÝCH LAMINAČNÝCH ZVÄZKOV

Prvá kapitola diplomovej práce je zameraná na podrobný prehľad súčasného stavu v oblasti elektromotorov a podrobnú analýzu konvenčných spôsobov výroby statorových a rotorových laminačných zväzkov. Sú v nej obsiahnuté body ako úvod do elektromotorov, základné pojmy, časti elektromotorov, spôsoby spájania aj spôsoby upnutia magnetov v týchto zväzkoch.

1.1 Teória o elektromotoroch a akú úlohu v nich zohrávajú laminačné zväzky

Čo je elektromotor

Je to zariadenie, ktoré mení elektrickú energiu na mechanickú prácu - väčšinou ide o rotačný stroj. Jeho princíp fungovania spočíva vo využití sily pôsobiaceho magnetického poľa. Jednoducho povedané, využíva vzájomnú priťahovaciu a odpudzovaciu silu elektromagnetov, alebo priťahovaciu silu elektromagnetov a železa. Riadenie polaritu a sily magnetu sa dosahuje reguláciou veľkosti elektrického prúdu, ktorý cez neho prechádza. Existujú tri režimy alebo spôsoby fungovania elektromotorov: motorický, generátorický a režim brzdy (Vybo Industrial Gears 2023).

Laminačné zväzky a ich úloha

Princíp laminačných zväzkov spočíva v stohovaní lamiel, ktoré spoločne vytvárajú stator a rotor elektromotora (Weiss 2023). Tieto lamely sú zhotovené z ocele s elektrickými vlastnosťami a sú izolované pomocou vrstiev izolácie na minimalizáciu strát spôsobených vírivými prúdmi počas dynamickej magnetickej prevádzky (VAC 2023). Lamely sú usporiadané a spojené tak, aby vytvorili jadro, ktoré sa následne používa pri ďalšej montáži a kompletizácii statora a rotora elektromotora. Na výrobu lamiel sa používajú rôzne výrobné metódy ako laserové rezanie, drôtové rezanie EDM, či najčastejšie používaná metóda výroby lamiel strihaním (HV Wooding 2021). Použitie lamiel v elektromotoroch zvyšuje účinnosť a znižuje energetické straty spôsobené vírivými prúdmi (Weiss 2023). Čím väčšia je hrúbka materiálu samotných lamiel v zväzku, tým väčšie sú energetické straty.

1.2 Typy elektromotorov

V odvetví automobilového priemyslu sú v rôznych vozidlách (vrátane elektromobilov) využívané rôzne typy elektromotorov. Kľúčové varianty elektromotorov používané v automobilovom priemysle sú nasledovné:

1.2.1 Asynchrónny indukčný motor

Tento elektromotor pracuje na princípe indukcie, pričom rotor sa pohybuje menšou rýchlosťou než magnetické rotačné pole statora, čo znamená, že pracuje asynchrónne so statorom. Vinutia v rotore nie sú skratované, ale sú vyvedené von cez zberacie krúžky a skratované cez prídavné odpory. Prúdový tok v rotore je možné ovládať cez odpory mimo elektromotora (Oswos 2023). Asynchrónne motory sú známe svojou robustnosťou, spoľahlivosťou a nízkou cenou. Majú širokú aplikáciu v rôznych odvetviach - od spotrebičov po elektrické vozidlá (Servax 2023).

1.2.2 Synchronný motor s permanentným magnetom (PSM)

Na rozdiel od ASM motorov, tieto sú vybavené permanentnými magnetmi na rotore. Vynikajú vysokou hustotou výkonu, efektívnosťou a precíznou reguláciou. Sú veľmi populárne a využíva ich väčšina automobilových spoločností vo svojich vozidlách (Muhamad 2023).

1.2.3 Bezkomutátorový jednosmerný motor (BLDC)

Elektrické motory BLDC využívajú na rotore permanentné magnety a elektronickú komutáciu na napájanie vinutia. Poskytujú vysokú účinnosť, spoľahlivosť a kompaktné rozmery, čo z nich robí bežnú voľbu pre elektrické vozidlá, ktoré často využívajú spoločnosti ako Chevrolet a Hyundai (Muhamad 2023).

1.2.4 Indukčné motory

V elektrických vozidlách sa rovnako využívajú indukčné motory. Tieto motory nezávisia na permanentných magnetoch a sú známe svojou spoľahlivosťou a minimálnymi požiadavkami na údržbu (Energy5 2023).

1.2.5 Spínané reluktančné motory (SRM)

Tieto motory predstavujú ďalší typ využívaný v elektrických vozidlách. Sú charakteristické jednoduchou a odolnou konštrukciou, čo ich robí vhodnými pre aplikácie v automobilovom priemysle (Circuit Digest 2023).

1.3 Konštrukcia elektromotorov

Stator a rotor reprezentujú dva základné prvky elektromotorov. Stator predstavuje nepohyblivú časť týchto zariadení, zatiaľ čo rotor je ich časťou so schopnosťou pohybu. Stator pozostáva zo statického jadra tvoreného laminačnými plechmi, vinutia, izolácie, púzdra a obvodov, zatiaľ čo rotor obsahuje taktiež jadro z laminačných plechov, magnety, vyvažovacie platne a hriadeľ. Stator vytvára rotačné magnetické pole vďaka trojfázovému napájaniu, pričom rotor sa otáča pod vplyvom elektromagnetickej sily indukovanej v dôsledku elektromagnetickej indukcie. Hlavnou funkciou statora je poskytnúť obal vinutia statora, ktorý umožňuje tvorbu magnetického poľa v zariadení. Naopak, úlohou rotora je poháňať mechanickú záťaž, ktorá je pripojená k jeho hriadeľu (Circuit Globe 2023).

1.3.1 Stator

Stator (Obr.1) má viacero úloh v elektrických strojoch, generátoroch a motoroch. Jeho hlavnou úlohou je vytvárať magnetické pole, ktoré vzájomne pôsobí s rotorom a vytvára krútiaci moment a spúšťa rotáciu (Elprocus 2013). Stator je tvorený jadrom s laminačných platní a vinutiami, ktoré sú zhotovené z izolovaného drôtu. Tieto vinutia sú pripojené k zdroju elektrickej energie. Cievky statora produkujú magnetické pole, ktoré interaguje s magnetickým poľom rotora, vytvára krútiaci moment a otáčanie, pričom elektrická energia je transformovaná na mechanickú, v elektromotoroch a generátoroch, a opačne. Stator zohráva kľúčovú úlohu v udržiavaní stability a spoľahlivosti elektromotora alebo generátora tým, že udržiava rotor v pevnej polohe a bráni nadmerným kolísaniam (ASE 2023). V prípade zariadení poháňaných kvapalinou, ako sú turbíny a meniče krútiaceho momentu, stator riadi tok kvapaliny do, alebo z rotujúcej časti systému. Stručne povedané, primárnou funkciou statora je vytvárať magnetické pole, ktoré vzájomne pôsobí s rotorom, vytvára krútiaci moment, premeniť energiu medzi elektrickými a mechanickými formami a udržiavať stabilitu a spoľahlivosť.



Obr. 1 Stator (Aumann 2024)

Stator sa ďalej skladá z nasledovných častí:

Laminačný zväzok statora

V elektromotoroch pozostávajú laminačné jadrá rotorov a statorov (Obr.2) z veľkého množstva tenkých plechových lamiel vyrobených z elektromagnetickej ocele, ktoré sú zvyčajne naskladané a následne spojené tak, aby vytvorili veľké množstvo vrstiev na dosiahnutie lepších elektromagnetických vlastností. Použitie veľkého množstva jednotlivých lamiel namiesto uceleného kusu ocele nám znižuje straty spôsobené vírivými prúdmi. Jadrá statorov zvyčajne obsahujú stovky ocelových lamiel. Vo väčšine prípadov výrobcovia produkujú tieto lamely pomocou dierovacích a raziacich lisov, prípadne počítačom riadeným laserovým zariadením. Proces zahŕňa vrstvenie jednotlivých lamiel na seba, pre dosiahnutie požadovanej finálnej dĺžky laminačného zväzku. Okrem požadovanej dĺžky zväzku musí zväzok tiež obsahovať požadované množstvo jednotlivých lamiel. Množstvo jednotlivých lamiel vo zväzku priamo závisí od hrúbky použitého materiálu, ktorá sa najčastejšie pohybuje od 0,20 mm do 0,40 mm (TLC 2023).

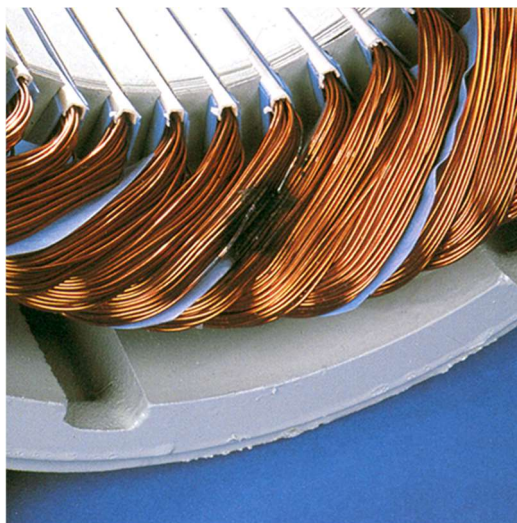


Obr. 2 Laminačný zväzok statora (KMMP 2024)

Vinutie statora

Statorové vinutie (Obr.3), tiež známe pod pojmom statorová cievka, predstavuje kľúčový článok v statore elektromotorov a generátorov. Väčšinou je vyrobená z izolovaného medeného alebo hliníkového drôtu a usporiadaná do cievok priamo vo vnútri drážok statora (AutoNation 2023). Ak je do vinutia statora privedený striedavý prúd, vytvára sa rotačné magnetické pole, ktoré je nevyhnutné pre správnu funkciu motora alebo generátora. Statorové vinutie má kľúčový význam pri premene elektrickej energie na mechanickú energiu v prípade motorov a naopak, v generátoroch (EEC 2023). Vinutie môže byť spojené

v rôznych usporiadaniach, napríklad ako hviezda (Y) alebo delta (Δ), podľa konkrétnej aplikácie a požiadaviek (Ryder et al. 2023).



Obr. 3 Vinutie statora (EASA 2024)

Izolácia

Izolácia statorov (Obr.4) sa týka procesu elektrickej izolácie komponentov statora v elektromotoroch alebo generátoroch. Táto izolácia je kritická pre zabránenie elektrických porúch, zabezpečenie bezpečnosti a udržanie účinnosti zariadenia. Vinutie statora, zvyčajne vyrobené z izolovaného medeného alebo hliníkového drôtu, je kľúčovým komponentom, ktorý vyžaduje izoláciu na prevenciu skratov a zabezpečenie správnej funkcie motora alebo generátora (JUSTIA 2023). Pre izoláciu statora sa využívajú rôzne postupy a materiály, ako napríklad tepelne vodivá izolácia tyčí a špeciálna plastová izolácia pre stohy statora (HUFNAGEL et al. 2013). Navyše, na zabezpečenie spoľahlivosti zariadenia, sa využívajú postupy na detekciu a odstránenie porúch v statorových častiach (Manuel et al. 2015).



Obr. 4 Izolácia (Elmotec Statomat 2024)

Obvody

Interpretujeme ho ako elektrický obvod súvisiaci so statorom a jeho vinutiami na základe kontextu komponentov statora a ich elektrickej funkcie. Obvody statora (Obr.5) sú základným komponentom v elektromotoroch a zohrávajú kľúčovú úlohu pri ich prevádzke. Stručne povedané, obvody statora sú neoddeliteľnou súčasťou fungovania elektrických motorov, pričom technológie ako PCB Stator ponúkajú pokročilé riešenia na zvýšenie účinnosti, udržateľnosti a kompaktnosti v dizajne motora (PCB Stator 2024).



Obr. 5 Obvody (Agra 2024)

Púzdro

Tento komponent je integrálnou súčasťou statora v elektromotoroch a generátoroch. Ide o fixnú časť motora alebo generátora, ktorá obklopuje stator a jeho vinutie (EEC 2023). Statorový kryt (Obr.6) sa obvykle vyrába z odolného materiálu, ako je hliník alebo oceľ a je koncipovaný na ochranu statora pred vonkajším poškodením a poskytovanie opory pre motor alebo generátor. Kryt môže taktiež obsahovať prvky, ako napríklad chladiace rebrá alebo ventilácia, ktoré slúžia na odvádzanie tepla produkovaného počas prevádzky (Elprocus 2013).



Obr. 6 Púzdro (Indiamart 2024)

1.3.2 Rotor

Rotor (Obr.7) je pohyblivý komponent v rôznych strojoch, ako sú elektrické stroje, generátory alebo motory. Je to pohyblivá časť v elektromotore, ktorá hrá kľúčovú úlohu pri vytváraní magnetického poľa alebo interakcii s magnetickým poľom pri vytváraní pohybu alebo elektrickej energie (Gamak 2023).

- Rotor je rotačná valcová časť elektromotora umiestnená vo vnútri statora s úzkou vzduchovou medzerou medzi nimi, čo umožňuje plynulé otáčanie,
- Pozostáva z viacpólového magnetu, ktorý pri otáčaní indukuje výstupné napätie v statore,
- Rotory sa môžu otáčať veľmi vysokou rýchlosťou, najčastejšie v rozmedzí 15 – 20 tisíc otáčok za minútu, poskytujúce vysoké výstupné napätie,
- Rotor môže byť skonštruovaný s drôtenou cievkou alebo sériou permanentných magnetov a jeho rotácia interaguje so stacionárnym statorom, aby sa uľahčila výroba energie alebo mechanický pohyb (Collins 2023).

Rotor je dôležitou súčasťou rôznych strojov, pretože generuje alebo interaguje s magnetickým poľom, aby vytvoril pohyb alebo elektrickú energiu, pričom premieňa energiu medzi elektrickými a mechanickými formami.



Obr. 7 Rotor (Carpenter Electrification 2024)

Rotor sa ďalej skladá:

Laminačný zväzok rotora

Ide o súbor jednotlivých plechových lamiel, ktoré sú spoločne sústredené do zväzku lamiel. Zväzky slúžia pri ďalšej montáži rotorov. Tieto zväzky sú navrhnuté s cieľom minimalizovať straty spôsobené vírivými prúdmi v priebehu dynamického magnetického prevádzkového režimu, čo vedie k zvýšeniu účinnosti motora alebo generátora. Laminačné zväzky (Obr.8) sa obvykle vyrábajú z plechového zvitku z materiálu s elektromagnetickými vlastnosťami. Môžu byť vyrobené rôznymi technológiami, ako napríklad strihanie či rezanie laserom (VAC 2023). Vytváranie laminačných zväzkov rotorov zahŕňa precízne lisovacie postupy, použitie pokročilých metód stohovania lamiel a ďalších technológií s vysokou presnosťou. Cieľom týchto postupov je minimalizovať elektrické straty a dosiahnuť maximálnu účinnosť, najmä pri práci vo vysokofrekvenčných rozsahoch (Feintool 2023).



Obr. 8 Laminačný zväzok rotora (R.Bourgeois 2024)

Magnety

Magnety (Obr.9) umiestnené na rotore sú kľúčovou súčasťou elektromotorov a generátorov. Rotor predstavuje rotujúcu časť elektromagnetického systému v elektrickom motore, generátore alebo alternátore. Jeho pohyb je vyvolaný vzájomným pôsobením vinutí a magnetických polí, ktoré indukujú rotáciu. Magnety na rotore môžu byť trvalé alebo elektromagnety udržiavajúce súlad s magnetickým poľom statora, čo umožňuje vznik pohybu. Rotory s trvalými magnetmi sú menšie a ľahšie, čo umožňuje motoru poskytovať rovnaký alebo dokonca väčší výkon s menšími rozmermi (PZK 2008). Veľkosť, počet a umiestnenie magnetov musia byť definované tak, aby boli dosiahnuté požiadavky na potrebný výkon. Magnety sú navrhované v úzkej spolupráci s dizajnom laminačných platní.



Obr. 9 Magnety

Vyvažovacie platne

Vyvažovacie platne rotorov sú využívané na zabezpečenie plynulého a bezpečného chodu rotorov v rôznych zariadeniach, ako sú motory a generátory. Tieto dosky sú koncipované tak, aby pomáhali vyrovnávať zaťaženie prenášané rotorom, čím predchádzajú vibráciám a možnému poškodeniu. Proces vyvažovania rotora spočíva v tom, že sa zabezpečí, že zaťaženie ktoré nesie, je rovnomerne rozložené a vyvážené tak, aby minimalizovalo potenciálnu nerovnováhu. Vyvažovacie platne sú umiestnené na oboch koncoch rotora, umiestnené priamo na hriadeli rotora. Vyvažovanie je zabezpečené frézovaním nepriechodzích otvorov priamo na platniach. Tento cieľ sa dosahuje pomocou vyvažovacích dosiek a dodržiavaním presných noriem, napríklad vyvarovaním sa používania rotorov s chýbajúcimi alebo nevyváženými zaťažzeniami (Beckman 2000).

Vyvažovanie rotorov je nevyhnutné pre zabezpečenie plynulej prevádzky, minimalizáciu vibrácií a predchádzanie poškodeniu strojového zariadenia. Existuje niekoľko spôsobov vyvažovania rotorov, medzi ktoré patria statické vyvažovanie, dynamické vyvažovanie a počítačové vyvažovanie. Každá z týchto metód je vhodná pre rôzne typy rotorov a požadované úrovne presnosti (EngineeringUPdates 2023).

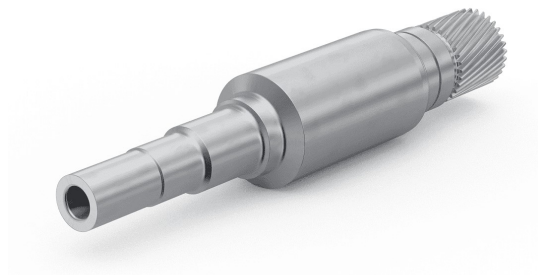
Hriadel'

Hriadel' rotora (Obr.10) predstavuje kľúčový prvok elektromotorov, ktorý má za úlohu prenášať kinetickú energiu. Tá vzniká pôsobením striedavého elektromagnetického poľa, medzi rotorom a hnacím mechanizmom (Thyssenkrupp 2023). Hriadel' rotora má niekoľko dôležitých funkcií a charakteristík:

- Plní funkciu nosného hriadel'a pre vrstvené jadro rotora, ktoré je nevyhnutné pre prenos krútiaceho momentu z elektrickej energie na kinetickú energiu,
- Spôsob konštrukcie hriadel'a rotora výrazne závisí od zvolenej koncepcie chladenia elektromotora, pretože pri vysokých otáčkach nad 20 000 otáčok za minútu a významných krútiacich momentoch môže dochádzať k zvýšeným teplotám,
- Hriadel' rotora podlieha vysokým zaťaženiám a preto je potrebné používať komponenty s vysokou pevnosťou, ktoré sú zároveň ľahké, aby boli schopné splňať nároky na energetickú účinnosť (Tekfor 2023).
- Potreba veľkého laminovaného jadra na kompletom rotore vzniká v dôsledku malého priemeru hriadel'a rotora, čo prispieva k vysokému hmotnostnému charakteru tohto celého zariadenia (Weisser 2023).

V priebehu času sa konštrukcia a výroba hriadel'ov rotorov neustále vyvíja a súčasne sa stáva bežným, využívanie rôznych materiálov a ľahkých konštrukcií, na zlepšenie efektívnosti a výkonu. Vývoj zmontovaných hriadel'ov rotorov navyše umožnil dosahovanie vyšších rýchlostí a väčších krútiacich momentov, čo ich činí vhodnými pre použitie v elektrických vozidlách a v oblasti obnoviteľnej energie (Thyssenkrupp 2023).

Vo väčšine prípadov sú laminačné zväzky spolu s vyvažovacími platňami upnuté na hriadeli s určitým presahom lisovaním.



Obr. 10 Hriadel' (WF 2024)

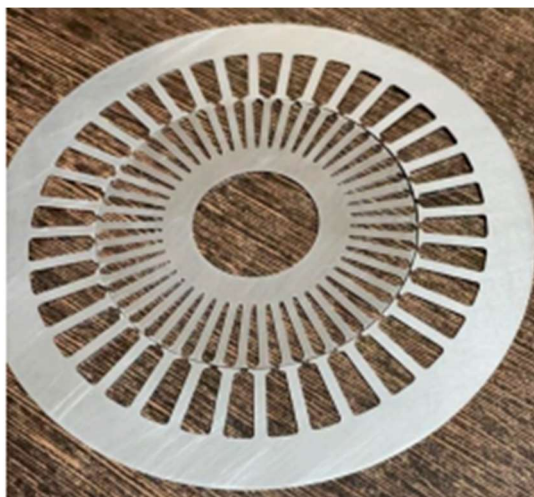
1.4 Spôsob výroby lamely statora a rotora

Výroba lamiel rotora a statora z elektromagnetického plechu vyžaduje obzvlášť presné procesy výroby, ktoré sa najčastejšie dosahujú procesom strihania a rezania laserom. Jednotlivé lamely sa následne ukladajú na seba do laminačných zväzkov nazývaných aj jadro. Zväzok sa dosahuje spájaním lamiel pomocou rôznych metód ako je lepenie, zváranie, nitovanie, či vzájomné blokovanie. Zväzok je následne taktiež spevnený osadením vinutia v statore, ale aj permanentnými magnetmi v rotore (Teprosa 2023).

1.4.1 Konvenčné metódy výroby lamiel statora a rotora

Rezanie laserom

Technológia rezania laserom je široko využívaná na presné a efektívne rezanie lamiel rotorov a statorov. Týmto spôsobom sa umožňuje vytváranie komponentov s vysokou kvalitou, s úzkymi toleranciami a komplexným dizajnom. Táto metóda ponúka výhody ako je vysoká presnosť, schopnosť vytvárať zložité tvary a rýchlejšie výrobné časy, vďaka čomu je populárnou voľbou pri výrobe plechov statora a rotora motora (Lammotor 2023). Nevýhodou rezania laserom sú vysoké teploty, ktoré spôsobujú tepelnú deformáciu lamele a tiež viditeľnosť začiatočného a koncového bodu rezania laserom. Mínusom je aj vysoká cena.



Obr. 11 Laserom vyrezaná lamela

Strihanie

Strihanie predstavuje bežný a najpoužívanější postup pri výrobe lamiel rotorov a statorov. Plechy z elektromagnetickej ocele sú strihané pomocou vhodného nástroja, ktorý vytvára geometriu v požadovanej kvalite. Strihanie však môže spôsobovať taktiež mechanické namáhanie lamiel, čo vedie k deformácii a degradácii tvaru a ich vlastností (Kedous-Lebouc 2003). Rozhodnutie o spôsobe rezania závisí na faktoroch ako je želaná presnosť, komplexnosť konštrukcie a požadovaná účinnosť výrobného procesu.

Progresívne metódy výroby statorov a rotorov:

1.4.2 Progresívne metódy výroby statorov a rotorov

Slinky design

Konštrukcia "slinky" v kontexte motorov a statorov označuje špecifickú konfiguráciu zväzku rotora a statora. Tento dizajn má tvar pripomínajúci slinky hračku, pričom lamely sú usporiadané do špirály alebo po obvode. Slinky dizajn (Obr.12) sa využíva pri výrobe motorov s permanentnými magnetmi a je zameraný na zlepšenie výkonu a účinnosti motora. Tento typ dizajnu je spomenutý v patente na motor s permanentným magnetom, kde zadná časť statora je opísaná ako "slinky" (Drew et al. 2005), navyše v diskusii výskumného dokumentu sa zvažuje možnosť alternatívnych výrobných procesov pre komponenty statora. Konkrétne sa uvádza „slinky style stator“ ako alternatívna výrobná metóda (Dodd 2021). Použitie špirálových okrajových lamiel je spojené so slinky design pri výrobe bezdrážkových bezkartáčových motorov s permanentným magnetom (Shark et al. 2009). Zatiaľ čo špecifické výhody a charakteristiky nie sú presne popísané v dostupných zdrojoch, je zrejmé, že táto konfigurácia sa preskúmava ako potenciálna alternatíva pri vytváraní

statorov pre elektrické zariadenia, predovšetkým v oblasti motorov s permanentnými magnetmi. Využitie slinkového dizajnu môže prinášať výhody v oblasti výkonu, výroby a prípadne aj nákladov.



Obr. 12 Lamela vyrobená pomocou technológie Slinky design

Segmentácia

Delenie lamely statora a rotora na viacero častí, zvaných segmenty (Obr.13), namiesto jednej celistvej konštrukcie sa nazýva segmentácia. Tento prístup bol predmetom výskumu a vývoja s potenciálnymi výhodami vrátane zlepšenia výkonu, efektívnejšieho využitia materiálu a efektivity nákladov. Segmentácia statorov a rotorov vytvára dodatočné vzduchové medzery a môže ovplyvniť materiálové vlastnosti jadra kvôli rezným hranám (Aggarwal et al. 2020). Rozdelenie na segmenty umožňuje samostatný výber materiálu pre stator a rotor, čo by mohlo poskytnúť možnosť využitia vyššej kvality ocele pre stator a materiálu s vyššou mechanickou tuhosťou pre rotor (SWD 2024). Okrem toho boli segmentované statory navrhnuté ako odpoveď na rastúce ceny surovín, s cieľom dosiahnuť vyšší výkon a efektívnejšiu výrobu (SWD 2021). Rozdeľovanie statorov a rotorov na segmenty je oblasťou s aktívnym výskumom a inováciami, ktorá má potenciál priniesť rôzne výhody v oblasti výkonu, využitia materiálu a nákladovej efektívnosti. Segmentácia taktiež zabezpečuje väčšie množstvo využitého materiálu z plechového zvitku, čo predstavuje elimináciu odpadu a tým spojenú úsporu nákladov.



Obr. 13 Rotor rozdelený na segmenty (Global Source 2024)

1.5 Spôsoby spájania laminačných zväzkov

Spojenie lamíel v laminačných zväzkoch v rámci elektrických motorov a generátorov zahŕňa aj postup, pri ktorom sa okrem vzájomného spájania, jednotlivé lamely taktiež navzájom voči sebe stáčajú na dosiahnutie lepších elektromagnetických vlastností. Jednotlivé lamely sú na dosiahnutie finálneho kompaktného zväzku spájané prostredníctvom technológie lepenia, zvarovania, lisovania, či nitovania. Proces spájania je kľúčovou etapou pri vytváraní magnetického obvodu a znižovaní energetických strát v dôsledku vírivých prúdov. Konkrétny postup spájania laminačných zväzkov sa môže líšiť v závislosti od použitých materiálov, požadovaného výkonu a výrobného procesu. Napríklad technika laserového rezania môže byť využitá na vytvorenie do seba zapadajúcich zubov na lamináciách, čo umožňuje ich vzájomné spojenie bez potreby ďalších spojovacích prvkov (Gunther 2003).

1.5.1 Blacklack

Metóda "backlack" predstavuje špecifickú metódu spájania, ktorá sa používa pri vrstvených zväzkoch v elektromotoroch a generátoroch. V tejto metóde sa nanáša povlak na laminačné plechy, ktoré sú potom vytvrdzované, aby vytvorili pevné spojenie medzi jednotlivými vrstvami. Povlak je vo väčšine prípadov už aplikovaný priamo na zvitku plechu pri dodaní. Pri výrobe lamely preto nie je potrebné následné aplikovanie tohto povlaku. Backlack sa nachádza na celom povrchu materiálu, teda aj na povrchu samotnej lamely. Backlack povlak predstavuje druh lepidla, ktoré zvyšuje viskozitu a adhéziu medzi lamináciami, čo vedie k zosilneniu a efektívnemu spojeniu vrstiev laminácií. Metóda Backlack prináša niekoľko výhod, vrátane zvýšenej tepelnej vodivosti, mechanickej stability a izolačnej odolnosti medzi lamináciami (Voestalpine 2023).

Výhody blacklack metódy:

- Voľnosť dizajnu,
- Mechanická stabilita a rozmerová presnosť,
- Zachovanie mechanických vlastností,
- Vylepšená tepelná vodivosť,
- Akustické výhody,
- Celoplošné lepenie (Voestalpine 2023).

1.5.2 Zváranie

Proces spájania zväzkov laminácií pomocou zvaracích techník zahŕňa spojenie jednotlivých lamiel pri výrobe jadier z elektromagnetickej ocele pre motory, generátory a transformátory. Zváranie môže zahŕňať rôzne metódy, vrátane laserového zvarania a bežných zvaracích postupov. Technológiu zvarania možno použiť len pri zväzkoch statora. Existuje viacero techník zvarania, ktoré možno využiť pri spojovaní laminovaných zväzkov vrátane (Tang et al. 2023).



Obr. 14 Laminačný zväzok spojený technológiou zvarania (Voestalpine 2023)

Odporové zváranie

Táto metóda sa často používa na zváranie laminovaných častí motora, kde sú plechy ohrievané na mieste kontaktu, kým neroztavia a potom sa spoja a zlisujú, vytvárajúc spoj (Tang et al. 2023).

Laserové zváranie

Laserové zváranie je ďalšou technikou používanou na spájanie laminovacích zväzkov, kde sa laserový lúč používa na roztavenie a spojenie kovových plechov dohromady (Tang et al. 2023).

Zváranie wolfrámovým interným plynom (TIG)

TIG zváranie je metóda, pri ktorej sa nespotrebuje volfrámová elektróda na vytvorenie zvaru a inertný plyn sa používa na ochranu oblasti zvaru pred atmosférickou kontamináciou (Tang et al. 2023).

Zváranie kovov aktívnym plynom (MAG)

Metóda MAG zvárania využíva tavenú drôtovú elektródu a ochranný plyn na zabránenie atmosférickej kontaminácii oblasti zvaru (Tang et al. 2023).

Zváranie elektrónovým lúčom

Zváranie elektrónovým lúčom je proces, kde sa vysokorýchlostný lúč elektrónov využíva na roztavenie a spojenie kovových plechov (Lammotor 2023).

Výhody spájania laminačných zväzkov zváraním:

- Vysoká produktivita
- Vysoká kvalita zvarov (Ashley 2022).

Nevýhody spájania laminačných zväzkov zváraním:

- Nedostatok spoľahlivých nedeštruktívnych testovacích metód
- Preplátovaný spoj, bodové a švové zváranie
- Vysoká spotreba energie (Ashley 2022)

1.5.3 Lepenie

Lepenie je častou metódou spájania laminačných platní pri výrobe zväzkov pre motory, generátory a transformátory. Tento postup zahŕňa aplikáciu lepidla na laminácie, ktoré sú následne navzájom stlačené, kým lepidlo nevytvrdne. Lepidlo je nanášané na rôzne miesta, v rôznych množstvách a rôznych rozmerov. Nie je povolené aby sa lepidlo dostalo cez hrany, priamo do magnetických vreciek alebo statorových drážok, čo môže ovplyvniť funkciu rotora a statora. Rozmiestnenie lepidla zároveň musí zabezpečiť dostatočnú tuhosť a spojenie zväzku, čo je následne testované retenčným testom. Zväzky spájané lepidlom tiež musia byť schopné dosiahnuť požadovaný faktor stohovania. Každé lepidlo musí byť otestované spolu s materiálom plechu a povrchovou úpravou plechu, či spĺňajú požadované vlastnosti. Táto technika zaisťuje pevnú a trvanlivú väzbu medzi lamináciami, čím zabezpečuje účinnosť a dlhú životnosť laminácií motora (Wirth 1983).

Výhody spájania laminačných zväzkov lepením:

- Rýchlosť,
- Všestrannosť,
- Jednoduchosť,

- Nákladova efektivita.

Nevýhody spájania laminačných zväzkov lepením:

- Obmedzená sila,
- Environmentálne faktory,
- Príprava povrchu,
- Dátum spotreby.



Obr. 15 Laminačný zväzok spojený technológiou lepenia (Voestalpine 2023)

1.5.4 Interlocking

Metóda spájania lamiel do laminačných zväzkov, kde sa na povrchu lamiel vytvorí viacero prelisov, sa nazýva metóda interlocking, známa aj ako metóda vzájomného blokovania lamiel. Tieto presne orientované lamely sú následne stohované tak, že pod pôsobením určitej sily dochádza k vzájomnému lisovaniu týchto prelisov, čo zabezpečí spojenie do uceleného zväzku. (Wirth 1983). Interlocking metóda poskytuje spojenie medzi lamináciami, ktoré je silné a odolné. Zabezpečuje efektívnosť a dlhú životnosť laminácií motora (Liu et al. 2018).

Výhody spájania laminačných zväzkov interlockom:

- Zvýšená mechanická stabilita,
- Efektívne využitie priestoru,
- Znížená závislosť od lepidiel (Neuenschwander 2006).

Nevýhody spájania laminačných zväzkov interlockingom:

- Komplexný výrobný proces pri procese strihaním,
- Potenciál zvýšeného plytvania materiálom,
- Obmedzená vhodnosť pre použitie na základe dizajnu (Neuenschwander 2006).

1.6 Spôsoby upevnenia magnetov v laminačnom zväzku

Upevnenie magnetov v laminačnom zväzku rotora je dôležitým a rozhodujúcim procesom, ktorý má vplyv na konštrukčnú stabilitu a výkonnosť rotora. Pre správne umiestnenie a upevnenie magnetov v laminačnom zväzku možno využiť nasledujúce postupy:

Upevnenie magnetov pomocou vstrekovania materiálu do magnetického vrečka

Aplikácia tekutého plastu pomocou vstrekolisu na upevnenie magnetov vo vrečku. Plast môže byť aplikovaný po bokoch magnetov, prípadne po všetkých stranách - záleží od dizajnu. Plast zároveň tvorí istý spôsob izolácie medzi magnetom a zväzkom, čo ovplyvňuje vírivé prúdy. Tento plast môže byť aplikovaný manuálne alebo automatizovanou linkou, kedy je zväzok s magnetmi zaťažený, aby sa dosiahla finálna podoba zväzku a vtedy je plast aplikovaný. Ak by zväzok nebol zaťažený, mohlo by prísť k nepravidelnému zatečeniu plastov vo vrečkách, prípadne k uniku plastu medzi jednotlivé lamely. Plast taktiež nesmie pretiecť vrchom alebo spodkom zväzku, teda nesmie byť aplikované veľké množstvo plastu. Kvalita tohto plastu je vizuálne a chemicky kontrolovaná.

Upevnenie magnetov aplikáciou lepidla v magnetických vrečkách

Magnety možno upevniť vo vrečkách aj pomocou lepidla. Toto lepidlo, obsahujúce špecifické parametre, je aplikované na steny magnetického vrečka, kde po vložení magnetov je toto lepidlo vytvrdené. Množstvo a rozloženie lepidla záleží od tvaru magnetického vrečka a magnetov.

Upevnenie magnetov v magnetických vrečkách pomocou ohýbacích prvkov

Ohýbacie prvky, nazývané aj clamping, feature/clamp feature, sú prvky priamo na lamele, ktoré sú jej súčasťou a vyrobené pri samotnom procese výroby lamely. Pri vkladaní magnetov do takto špecifickej lamely dochádza k ohýbaniu týchto prvkov. Po dosiahnutí finálnej polohy magnetov sú všetky prvky ohnuté a vytvárajú stále napätie medzi magnetom a magnetickým vrečkom, resp. prvkami, čo fixuje a zabezpečuje stálu polohu magnetu v požadovanej polohe. V takomto prípade fixovania magnetov je potrebné okrem lamely s ohýbacími prvkami aj lamelu, do ktorej sú tieto ohýbacie prvky ohnuté. Pri vkladaní magnetov nesmie prísť k rozsiahlemu poškodeniu magnetov poškrabaním. Povrchová úprava magnetu musí byť stále zabezpečená, aby boli splnené magnetické vlastnosti.



Obr. 16 Lamela s ohýbacími prvkami



Obr. 17 Lamela s vybratím na ohnutie ohýbacích prvkov

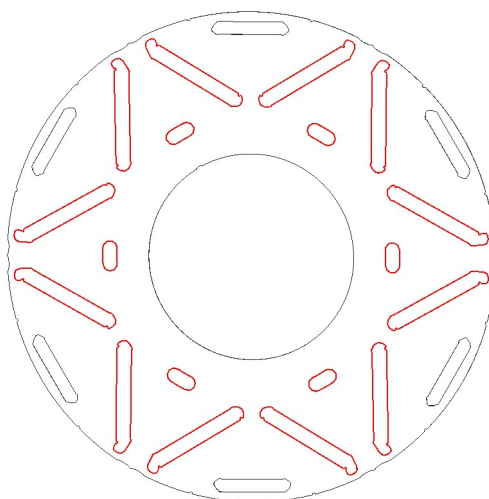
2 PROCES STRIHANIA A PODMIENKY KLADENÉ NA KVALITU LAMINAČNÉHO ZVÄZKU

Táto kapitola bude zameraná na proces strihania a na podmienky kladené na kvalitu laminačného zväzku. Bude v nej spomenutý postup strihania statora a rotora, základné parametre, merania, skúšky a ostatné dôležité aspekty, ktoré ovplyvňujú kvalitu laminačných zväzkov a ich výsledné vlastnosti.

2.1 Postup strihania lamiel rotora a statora

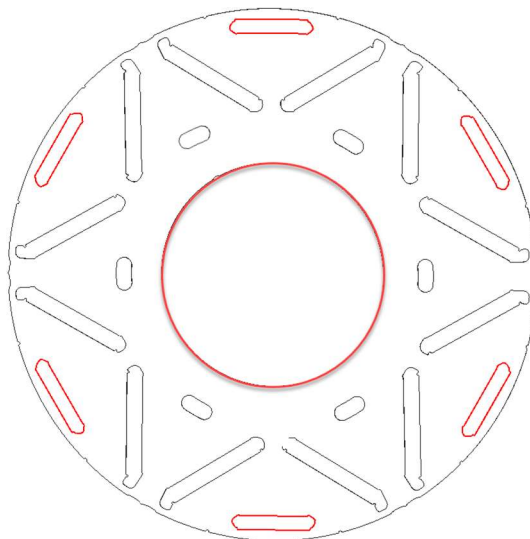
Rotor

1. Strihanie lamely rotora začína strihaním magnetických vreciek (Obr.18), ktoré môžu byť podrobené strihaniu v jednom alebo viacerých krokoch. V tomto kontexte sa strihanie vreciek rozdeľuje na viacero etáp v závislosti od preferencií dodávateľa, jeho technických kapacít a skúseností. Strihanie v jednom kroku zaručuje presnejšiu výrobnú kvalitu s úzko definovanými toleranciami. Treba však mať na zreteli, že strihanie v jednom kroku môže negatívne ovplyvniť tuhosť nástroja, čo môže viesť k jeho deformácii alebo poškodeniu.



Obr. 18 Strihanie magnetických vreciek rotora

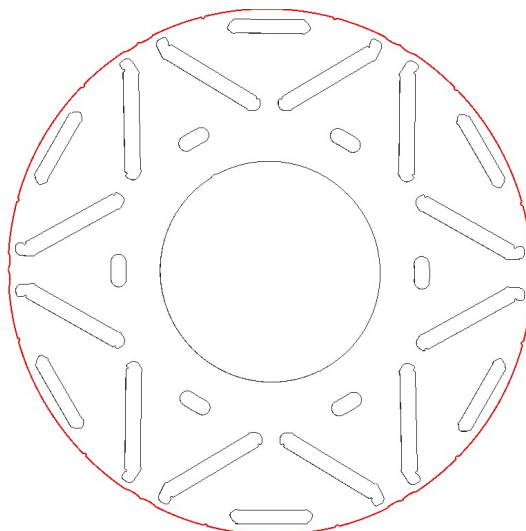
2. Strihanie druhej časti magnetických vreciek (Obr.19) v jednom kroku poskytuje vyššiu odolnosť nástroja a znížené riziko jeho deformácie vzhľadom na krehkosť. Avšak nedosahuje sa taká presnosť tolerancií ako pri strihaní vreciek v jedinom kroku. Tento nedostatok presnosti je spôsobený vzájomným ovplyvňovaním vreciek počas strihania vo viacerých etapách, čo môže viesť k naťahovaniu alebo deformácii materiálu. Vnútorňý priemer môže byť strihaný samostatne alebo súčasne s magnetickými vreckami počas jedného zdvihu. Pri strihaní vnútorného priemeru v rámci jedného zdvihu sa zohľadňujú prípadné drážky alebo iné prvky, ktoré môžu byť súčasťou vnútorného priemeru vreciek.



Obr. 19 Strihanie druhej časti magnetických vreciek rotora

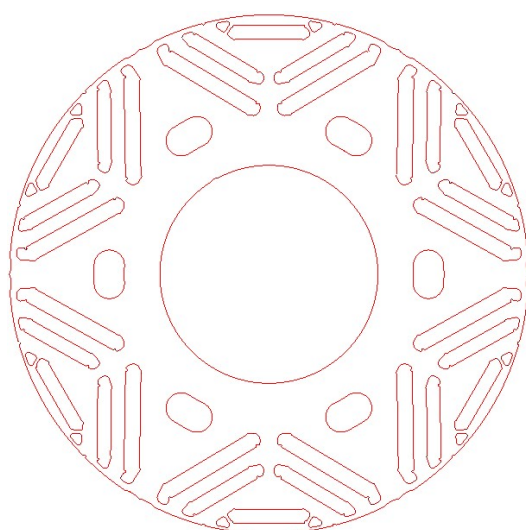
3. Strihanie vonkajšieho priemeru lamely rotora (Obr.20) je tiež možné uskutočniť v jednom kroku. Ak sú na vonkajšom priemere požadované drážky alebo iné prvky, je možné ich tiež vystrihnúť v jedinom kroku spolu s vonkajším priemerom.

Rozhodnutie o tom, či sa má strihať vonkajší priemer v jednom alebo viacerých krokoch, závisí od dizajnu vonkajšieho priemeru. V prípade, že na vonkajšom priemere sú požadované prvky s rôznymi hranami, ako napríklad kombinácia rádiusov a ostrých hrán, tieto prvky musia byť strihané vo viacerých krokoch.



Obr. 20 Strihanie vonkajšieho priemeru lamely rotora

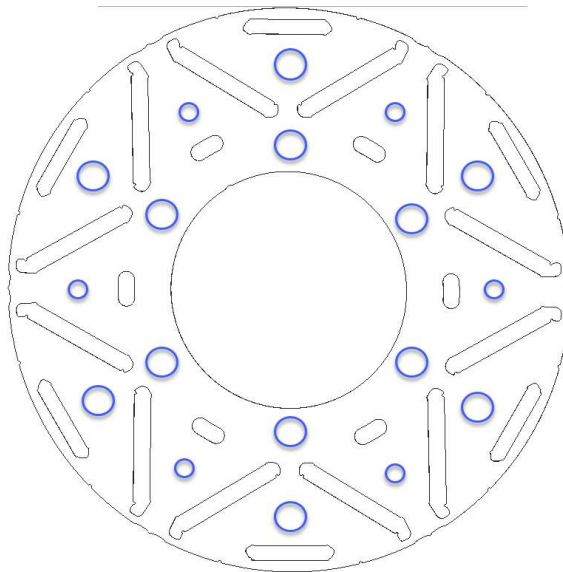
4. Kompletne vystrihnutá lamela rotora (Obr.21). V prípade použitia metódy lepenia na spojovanie lamiel, je lepidlo aplikované na povrch lamiel a následne dochádza k ich stohovaniu. Toto stohovanie môže prebiehať buď priamo v strihacom procese, alebo prostredníctvom dodatočnej operácie mimo strihacieho procesu.



Obr. 21 Kompletne vystrihnutá lamela rotora

Pri spájaní lamiel lepením môže tento proces prebehnúť priamo v strihacom prese alebo prostredníctvom dodatočnej operácie mimo neho. Lepidlo môže byť aplikované manuálne alebo automaticky. Väčšinou je potrebné pred aplikáciou lepidla na celý povrch lamely

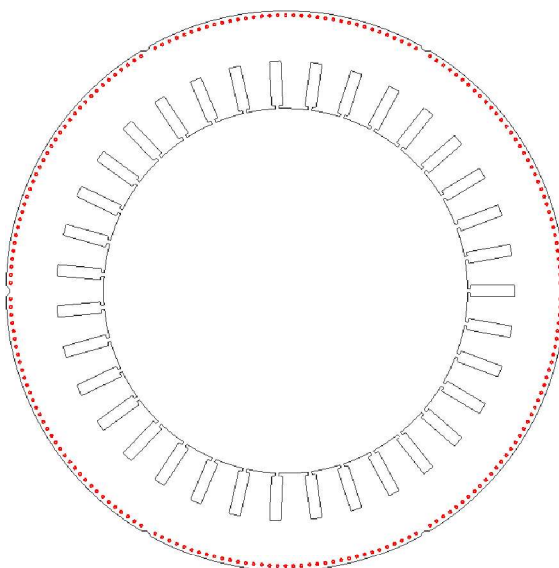
aplikovať aktivátor. Spájanie pomocou zvarovania alebo metódou vzájomného blokovania lamiel (interlocking) sa vykonáva v následných operáciách.



Obr. 22 Aplikácia lepidla na vystrihnutú lamelu rotora

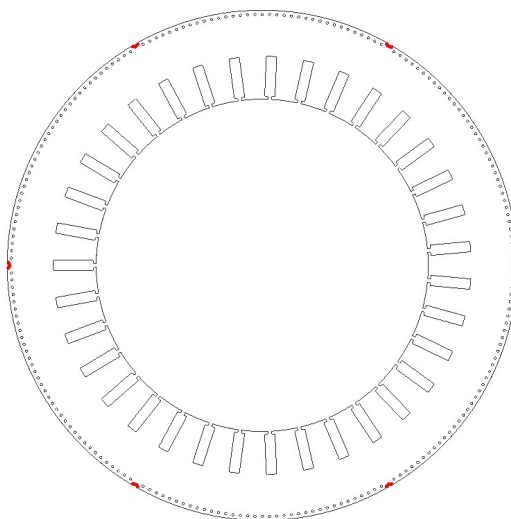
Stator

1. Stator lamely môže byť vybavený chladením (Obr.23), ale aj nemusí. Chladenie je zvyčajne realizované otvormi alebo drážkami priamo na lamele. V prípade, že lamela obsahuje chladiace kanáliky pri vonkajšom priemere, tieto kanáliky sú zvyčajne strihané vo viacerých skupinách. Napríklad, v jednom kroku sa môže strihať každá párna sada kanálikov a v ďalšom kroku nepárna sada. Alternatívne je možné strihať kanáliky samostatne, pričom sa postupne strihá jedna štvrtina kanálikov v každom kroku. Taktiež je možné strihať kanáliky s menším priemerom a neskôr zväčšovať ich priemer, aby sa minimalizovalo napätie a deformácia počas strihania.



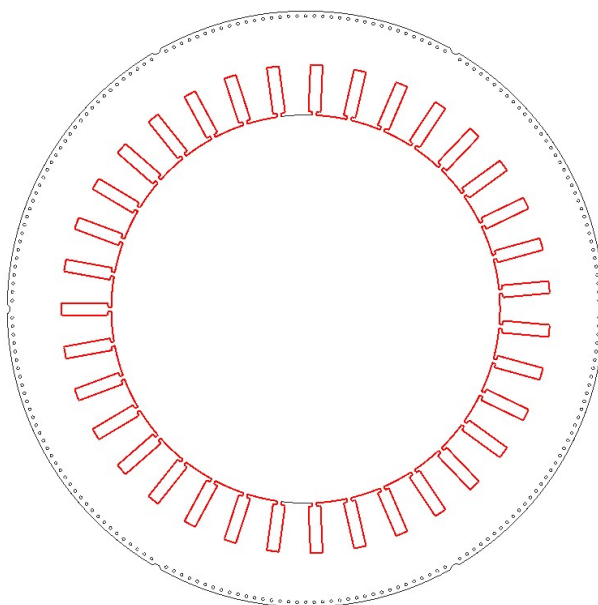
Obr. 23 Strihanie chladiaci drážok lamely statora

2. Strihanie drážok a ďalších prvkov (Obr.24) na vonkajšom priemere môže byť rozdelené do viacerých krokov v závislosti od toho, či dizajn zahŕňa kombináciu rádiusov a ostrých hrán na týchto prvkoch. V prípade takéhoto dizajnu je proces strihania rozdelený do viacerých krokov.



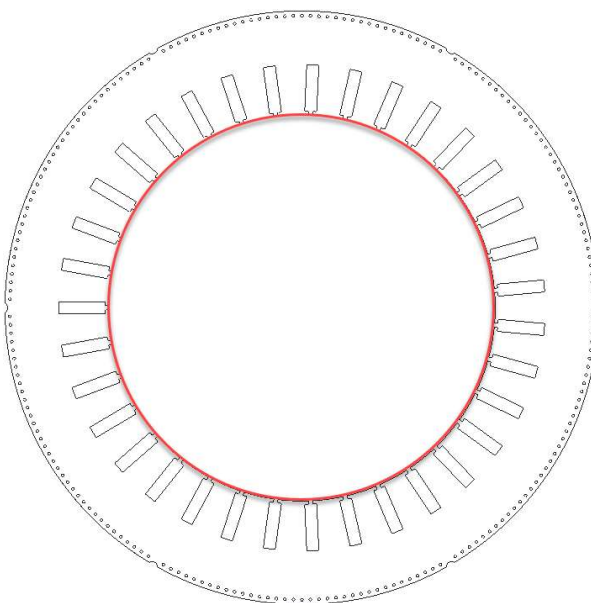
Obr. 24 Strihanie druhej časti chladiacich drážok lamely statora

3. Strihanie drážok na satorové vinutie (Obr.25) je možné uskutočniť v jednom zdvihu. Finálny vnútorný priemer je potom strihaný v samostatnom ďalšom kroku.



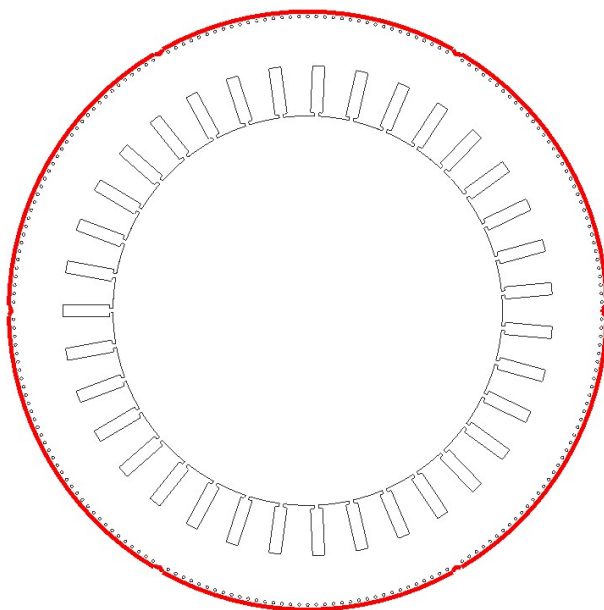
Obr. 25 Strihanie drážok na statorové vinutie

4. Strihanie presného vnútorného priemeru lamely statora (Obr.26).



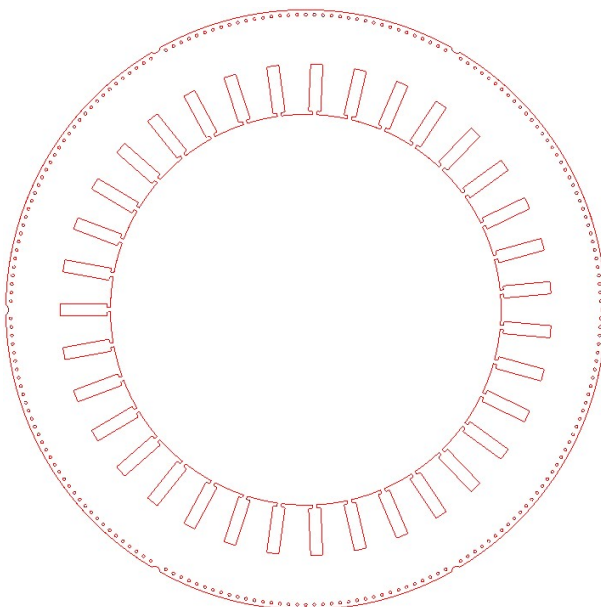
Obr. 26 Strihanie presného vnútorného priemeru lamely statora

5. Strihanie presného vonkajšieho priemeru lamely statora (Obr.27) je možné vykonať v jednom kroku. V prípade, že drážky a ďalšie prvky umiestnené na vonkajšom priemere už boli strihané v predchádzajúcich krokoch, tieto operácie sú už dokončené.



Obr. 27 Strihanie presného vonkajšieho priemeru lamely statora

Kompletne vystrihnutá lamela statora (Obr.28). V prípade použitia metódy lepenia na spojenie lamiel je lepidlo následne aplikované na povrch lamiel a dochádza k ich následnému stohovaniu. Toto stohovanie môže prebiehať buď priamo v strihacom procese, alebo prostredníctvom dodatočnej operácie mimo neho. Spájanie pomocou zvarovania alebo metódou vzájomného blokovania lamiel (interlocking) sa vykonáva v nasledujúcich operáciách.



Obr. 28 Kompletne vystrihnutá lamela statora

2.2 Základné parametre pre výber vhodného materiálu laminačných zväzkov

Pri výbere vhodného materiálu pre laminačné zväzky statora a rotora je potrebné zvážiť niekoľko kľúčových parametrov. Medzi tieto faktory patria hrúbka materiálu, magnetické vlastnosti materiálu ako sú polarizácia a straty v materiály, mechanické vlastnosti, povrchová úprava a cena. Vplyv týchto parametrov na vlastnosti laminačných zväzkov je značný, pričom magnetické vlastnosti materiálu priamo ovplyvňujú výkon statora a rotora v elektrickom motore. Elektrická vodivosť zase ovplyvňuje straty spôsobené vírivými prúdmi. Okrem toho mechanická pevnosť materiálu hrá dôležitú úlohu pri zachovaní štrukturálnej integrity laminačných zväzkov. Tieto faktory spolu s cenovou dostupnosťou ovplyvňujú celkovú ekonomickú realizovateľnosť výrobného procesu. Presný vplyv týchto parametrov na vlastnosti laminačných zväzkov môže byť komplexný a vyžadovať podrobný materiálový a inžiniersky výskum (Deng 2014).

2.2.1 Hrúbka materiálu

Význam vlastností zväzkov plechov statora a rotora môže byť ovplyvnený hrúbkou materiálu. Niektoré dôležité aspekty, ktoré je potrebné zohľadniť, zahŕňajú:

Efektivita

V oblasti "bielej techniky" a automobilového priemyslu sa obvykle dáva prednosť tenším laminačným zväzkom, kde sú rozmery a hmotnosti kľúčovými faktormi. Použitie tenších lamiel môže prispieť k zvýšenej účinnosti elektromotorov (ElectricMotorEngineering 2024).

Kontrola napätia

Menšie hrúbky lamiel môžu byť prospešné pri riadení napätia v statore a rotore, čo je kritické pre dosiahnutie optimálneho výkonu v elektromotoroch (ElectricMotorEngineering 2024).

Výroba

Výroba tenších lamiel môže byť náročnejšia, pretože vyžaduje presnejšie postupy obrábania a rezania. Toto môže mať vplyv na celkové náklady a komplikovanosť výrobného procesu (MDPI 2024).

Rozmerová presnosť

Výroba tenších lamiel môže vyžadovať väčšiu presnosť vzhľadom na rozmerovú presnosť, čo môže byť zložité dosiahnuť vo výrobnom procese (MDPI 2024).

Magnetické vlastnosti

Hrúbka lamiel môže mať vplyv na magnetické vlastnosti materiálu, ako sú permeabilita a koercivita (permeability and coercivity) a to následne ovplyvňuje výkon statora a rotora v elektrickom motore (IOP Conference Series 2024).

Vplyv hrúbky materiálu na vlastnosti zväzkov statorových a rotorových plechov je komplexný. Použitie tenších lamiel môže zvýšiť účinnosť a umožniť lepšiu kontrolu napätia, ale zároveň môže predstavovať výzvu pri výrobe a vyžadovať vyššiu presnosť. Rozhodnutie o hrúbke materiálu by malo byť dôkladne premyslené s prihliadnutím na tieto faktory a špecifické požiadavky konkrétnej aplikácie (ElectricMotorEngineering 2024).

2.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti materiálu použitého na výrobu lamely zväzku statora a rotora môžu značne ovplyvniť ich vlastnosti. Napríklad, pevnosť a tuhosť materiálu môžu mať dopad na štrukturálnu integritu laminačného zväzku, pričom hustota materiálu môže ovplyvniť hmotnosť a celkovú efektivitu elektrického motora. Významné je zohľadňovanie mechanických vlastností materiálu pri procese výberu a navrhovaní laminačných zväzkov statora a rotora (ElectricMotorEngineering 2024).

2.2.3 Magnetické vlastnosti

Fyzikálne charakteristiky materiálu, ako napríklad polarizácia a elektromagnetické straty, výrazne ovplyvňujú vlastnosti súboru plechov v statoroch a rotoroch elektrických motorov. Pri výbere materiálov, vrátane kremíkovej ocele alebo kobaltových zliatin, je hlavným cieľom dosiahnuť maximálny magnetický výkon a silu, aby sa dosiahla optimálna účinnosť motora (Teprosa 2024). Vlastnosti materiálu, ktoré sú magnetické, priamo determinujú generovanie hustoty magnetického toku, čo má následne vplyv na produkciu energie a celkový výkon motora. Z toho dôvodu majú magnetické vlastnosti materiálov, ktoré sa využívajú v plechoch statora a rotora, zásadný vplyv na stanovovanie efektívnosti, výrobu energie a celkový výkon elektrických motorov (E-Mobility Engineering 2021).

Polarizácia

Vplyv polarizácie na vlastnosti súboru statorových a rotorových plechov môže byť významný. Polarizácia sa vzťahuje k usporiadaniu magnetických domén v materiáli, čo môže mať dopad na magnetické vlastnosti a následne aj na výkon elektromotora. Preto polarizácia materiálu zohráva v statorových a rotorových plechoch kľúčovú rolu pri

stanovovaní efektívnosti, výroby energie a celkového výkonu elektrických motorov (Teprosa 2024).

Elektromagnetické straty v materiály

Vplyv elektromagnetických strát na vlastnosti zväzku statorových a rotorových plechov v elektrických motoroch je značný. Elektromagnetické straty, napríklad straty spôsobené vírivými prúdmi, majú vplyv na efektívnosť a výkon motora. Pre zníženie vírivých prúdov indukovaných magnetickým poľom sa preferujú tenšie lamely, pretože tieto prúdy vedú k tvorbe tepla a znižujú účinnosť motora. Z toho dôvodu je riadenie elektromagnetických strát kľúčové pri optimalizácii vlastností a výkonu plechov statora a rotora v elektrických motoroch prostredníctvom správneho výberu materiálov a konštrukcie lamiel (E-Mobility Engineering 2021) .

2.2.4 Povrchová úprava a jej hrúbka

Vlastnosti laminačného zväzku statora a rotora v elektrických motoroch možno ovplyvniť aj prostredníctvom povrchovej úpravy a nastavením jej hrúbky. Rôzne metódy povrchovej úpravy môžu významne ovplyvniť morfológiu povrchu, povrchovú energiu a schopnosť kovov absorbovať tekutiny (Teprosa 2024). Druh a technika povrchovej úpravy lamiel môže ovplyvniť mechanické a povrchové vlastnosti materiálu (Cunjuan 2020). Vplyv povrchovej úpravy môže ovplyvniť výkon lamiel pri záťaži v režimoch nízkokyčkovej únavy (LCF) a vysokokyčkovej únavy (HCF). Preto sú povrchová úprava a jej hrúbka kľúčovými faktormi pri optimalizácii vlastností zväzku lamiel statora a rotora a ich špecifický vplyv môže variabilne závisieť od aplikácie a konkrétnych požiadaviek elektrického motora (E-Mobility Engineering 2021).

2.3 Kontrola samostatného strihu po procese strihania

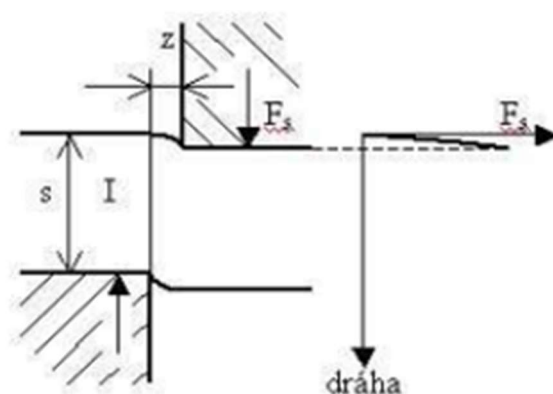
Strihanie je často považované za integrálnu súčasť procesu tvárnenia, avšak v skutočnosti ide o samostatnú základnú operáciu. Jeho cieľom je oddeliť časti materiálu pomocou strižných hrán, pričom nejde o úmyselnú plastickú deformáciu, ani o zachovanie súdržnosti materiálu. V rámci technológie tvárnenia sa strihanie kategorizuje ako základná operácia, pretože sa vykonáva pomocou špecifických tvárniacich strojov (Bílik a kol. 2010).

Definícia strihania zahŕňa proces postupného alebo súčasného oddelenia častí materiálu podľa tvaru strižnej čiary, ktorá sa môže líšiť medzi priamkou alebo otvorenou/uzatvorenou krivkou v závislosti od požadovaného tvaru výstrižku. Priebeh

strihania môžeme rozčleniť do troch základných fáz, kde začiatok strihania predstavuje umiestnenie strižníka na materiál, ktorý sa má strihať (Bílik a kol. 2010).

Prvá fáza

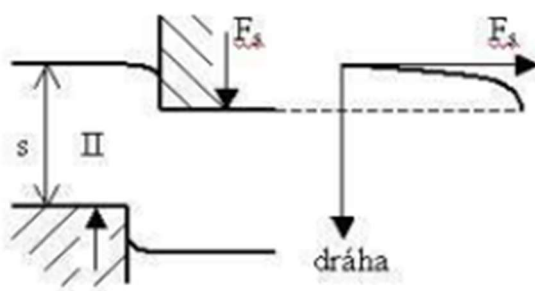
Prvý krok (Obr.29) zahŕňa flexibilné a plastické ohýbanie bez oddelenia častí materiálu. Materiál je ohnutý pružne až po prekročení hranice klzu v rovine rezu, vytvárajúc pružnú deformáciu. Po prekročení tejto hranice sa začína plastické ohýbanie. Dĺžka tejto fázy obvykle predstavuje 5 až 8 % hrúbky materiálu, pričom táto hodnota závisí od jeho mechanických vlastností (Bílik a kol. 2010).



Obr. 29 1. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)

Druhá fáza strihania

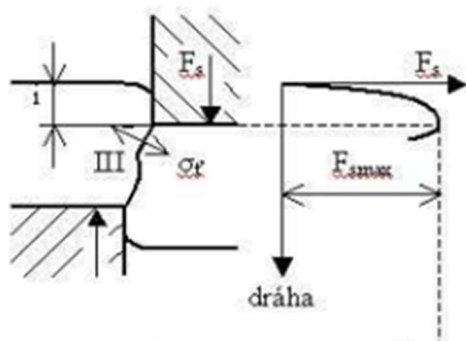
Druhý krok (Obr.30) sa venuje plastickému strihaniu (plastický strih), kde dochádza k oddeleniu materiálu šmykovým napätím. Hĺbka strižnej hrany, ktorá sa v tomto období vnára do materiálu (označená ako "i"), je závislá od pevnostných a plastických vlastností materiálu. Táto fáza zvyčajne predstavuje približne 10 až 25 % hrúbky strihaného materiálu (Bílik a kol. 2010).



Obr. 30 2. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)

Tretia fáza

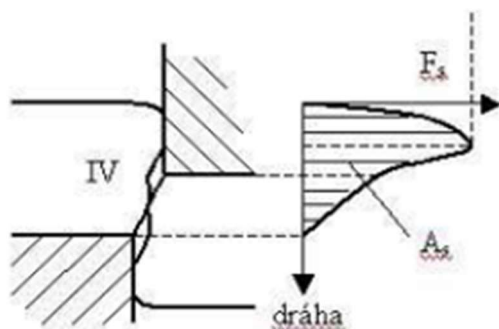
Tretí krok (Obr.31) zahŕňa oddelenie častí materiálu odtrhnutím. V tejto fáze prevládajú ťahové napätia v oddelenom priereze, ktoré spôsobujú rýchle šírenie trhlín a lomenie, čo nakoniec vedie k oddeleniu častí materiálu (Bílik a kol. 2010).



Obr. 31 3. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)

Štvrtá fáza

Štvrtý krok (Obr.32) nasleduje po úplnom oddelení materiálu. Proces strihania sa uzatvára vytlačením výstrižku (alebo odstrižku) zo základného polotovaru (Bílik a kol. 2010).



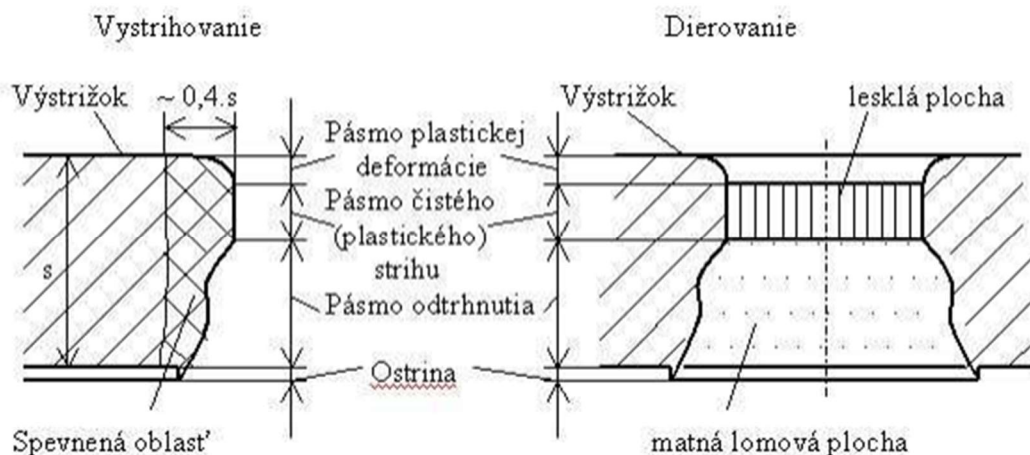
Obr. 32 4. fáza strihania (Bílik a kol. 2010)

Ďalej je dobre spomenúť pri teoretickom rozbere základné pojmy, s ktorými sa stretávame. Tieto pojmy nám pomôžu pochopiť problematiku (Bílik a kol. 2010). Medzi základné pojmy patrí:

Strižná plocha

Strižná plocha je plocha, ktorá sa vytvorí po procese strihania materiálu v dôsledku vzniku strižných hrán strižníka a strižnice do materiálu. Charakteristický tvar tejto plochy a opis jednotlivých pásiem je zobrazený na obrázku. Strižná plocha znázornená na obrázku predstavuje strižnú plochu pri optimálnej strižnej medzere. Veľkosť strižnej plochy sa

stanovuje v rámci výpočtu strižnej sily a pre každý konkrétny spôsob strihania budú podrobnosti výpočtu uvedené pri výpočte strižnej sily (Bílik a kol. 2010).



Obr. 33 Tvar strižnej plochy a jednotlivé pásma po strihaní (Bílik a kol. 2010)

Strižná medzera a strižná vôľa

Strižná medzera, označovaná ako „z“, je vzdialenosť medzi susednými strižnými hranami, meraná v rovine materiálu určeného na strihanie. Strižná vôľa, označovaná ako „v“, je súčet strižných medzier na oboch stranách strižníka, pokiaľ je čiara strihu uzavretá, čo znamená že:

$$v = 2 \cdot z$$

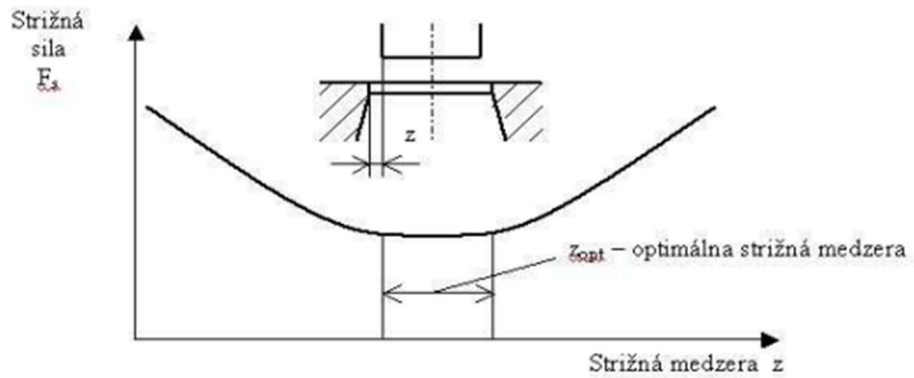
Kde:

- v – strižná vôľa,
- z – strižná medzera.

Rozmer strižnej medzery je ovplyvnený:

- pevnosťou strihaného materiálu,
- hrúbkou strihaného materiálu,
- tvarom výstrižku,
- materiálom strižných hrán.

Strižná medzera sa pohybuje v rozpätí $z = (0,02 \div 0,05) \cdot s$. Optimálna strižná medzera je taká, pri ktorej je strižná sila minimálna a zároveň je dosiahnutá vysoká kvalita strižnej plochy. Správna (optimálna) strižná medzera má tiež vplyv na tvarovú presnosť výstrižkov a trvanlivosť strižných hrán. Grafické znázornenie závislosti strižnej sily od strižnej medzery je uvedené na obrázku, pričom najnižší bod krivky predstavuje optimálnu strižnú medzeru (Bílik a kol. 2010).



Obr. 34 Závislosť strižnej sily od strižnej medzery (Bílik a kol. 2010)

Strižná medzera v mm sa pri strihaní v strihadlách určuje pomocou rozmerov strižníka a strižnice:

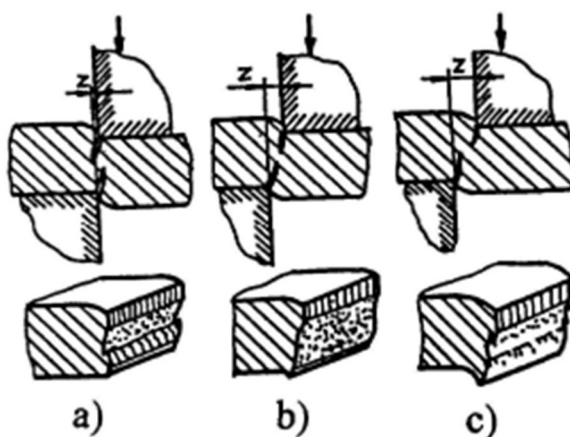
$$z = \frac{D - d}{2} = \frac{v}{2} \text{ [mm]}$$

Kde:

- D – rozmer strižnice
- v – strižná vôľ'a
- d – rozmer strižníka

Veľká strižná medzera môže spôsobiť, že v prvom kroku strihania dochádza k výraznej deformácii, pretože dochádza k čiastočnému vťahovaniu materiálu do strižnej medzery, čo má za následok zvýšenú strižnú silu. To vedie k zvýšenému namáhaniu strižných hrán bočnými silami, vytiahnutiu veľkých ostrín a vytvoreniu nízkej kvality strižnej plochy

Malá strižná medzera môže spôsobiť zvyšujúcu strižnú silu a prácu pri strihaní a vedie k tzv. dvojnásobnému alebo aj viacnásobnému strihaniu (vznik zádrhov), čím sa zhoršuje kvalita výslednej strižnej plochy. Na druhej strane, čiastočne redukuje ohyb (plastickú deformáciu) v prvom kroku strihania a veľkosť ostriny (Bílik a kol. 2010).



Obr. 35 Vplyv strižnej medzery na kvalitu strižnej plochy

a - malá strižná medzera, b - optimálna strižná medzera, c - veľká strižná medzera (Bílik a kol. 2010)

Strižná sila

Strižná sila je určená ako súčin strižného odporu a strižnej plochy podľa vzťahu:

$$F_s = \tau_s \cdot S \text{ [N]}$$

Nakoľko však dochádza pri strihaní k otupeniu nástroja, strižná sila sa zvyšuje. Toto je zohľadnené súčiniteľom „k“. Skutočná strižná sila sa teda počíta podľa vzťahu :

$$F_s = k \cdot \tau_s \cdot S \text{ [N]}$$

Kde:

- k - súčiniteľ zohľadňujúci otupenie nástroja a ďalšie vplyvy ($k = 1,1$ až $1,3$)
- τ_s - strižný odpor v MPa (oceľ $\tau_s = 110 + 0,56 \cdot R_m$, kde R_m – medza pevnosti strihaného materiálu, mosadz $\tau_s = 171 + 0,285 \cdot R_m$, dural $\tau_s = 173 + 0,236 \cdot R_m$, hliník, zinok, nikel $\tau_s = 0,75 \cdot R_m$
- S – strižná plocha

Pri strihaní na tabuľových nožniciach so sklonenými nožmi, sa strižná sila vypočíta:

$$F_s = \frac{0,5 \cdot s^2}{tg\beta} \cdot \tau_s \cdot k \text{ [N]}$$

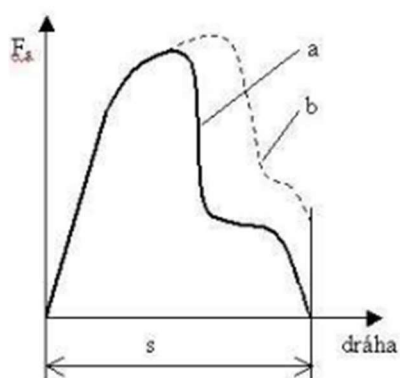
Kde:

- β – uhol sklonu noža ($1 \div 5^\circ$) (Bílik a kol. 2010).

Strižná práca

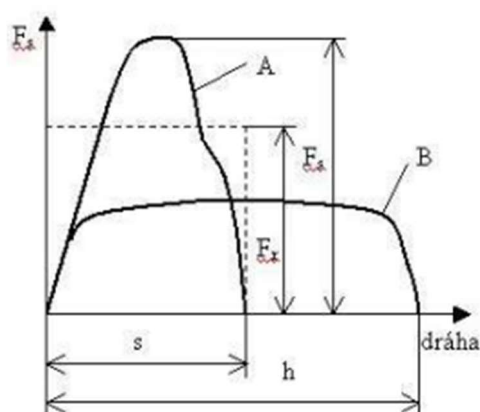
Grafický priebeh strižnej sily v závislosti od dráhy, nazývaný pracovný diagram, pri strihaní v strihadlách s rôznymi strižnými medzerami, je znázornený na Obr. 36. Podobný pracovný diagram je taktiež zobrazený na Obr. 37, pričom sa týka strihania na tabuľových nožniciach s rovnými a sklonenými nožmi. Strižná sila dosahuje svoju maximálnu hodnotu

v okamihu, keď strižná hrana vnikne do materiálu a vytvoria sa prvotné trhlinky. Následne, súčasne s rýchlym oddelením plôch od seba, strižná sila rýchlo klesá na nulu. V prípade vystrihovania a dierovania je pokles sily pomalší, pretože výstrižok ešte prechádza cez materiál a môže sa vytláčať aj predchádzajúci výstrižok cez strižnicu (Bílik a kol. 2010).



Obr. 36 Pracovný diagram pri strihaní v strihadlách

a - väčšia strižná medzera, b - menšia strižná medzera (Bílik a kol. 2010)



Obr. 37 Pracovný diagram pri strihaní na tabuľových nožniciach

A - s rovnými nožmi, B - so sklonenými nožmi (Bílik a kol. 2010)

Strižná práca sa počíta podľa vzťahu:

$$A_s = F_s \cdot h \cdot \psi \text{ [J]}$$

Kde:

- F_s – strižná sila
- ψ – súčiniteľ plnosti diagramu
- h – dráha pri strihaní plechu $h = s$
- s – hrúbka strihaného plechu
- $\psi = F_r / F_s$, F_r – redukovaná sila

Nástrihový plán

S cieľom dosiahnuť efektívnejšie využitie materiálu je možné navrhnúť plán nástrihu s postranným odpadom (strihaním po celom obvode výstrihu), ak to presnosť výstrižkov vyžaduje. Alternatívne je možné vytvoriť plán so strihaním časti obvodu alebo plán so strihaním (rozdelovaním polotovaru na súčiastky) bez odpadu (Bílik a kol. 2010).

Z hľadiska vzniknutého technologického odpadu sa v zásade rozlišujú tieto typy plánov nástrihu:

Bez mostíka a postranného odpadu

Jedná sa o nástrihové plány, ktoré prakticky nezanechávajú odpad vo forme obvodu výrezu. Odpad v tomto prípade vzniká iba pri prípadnom dierovaní, pokiaľ sú výrezy obstarané s otvormi. Pokiaľ ide o umiestnenie výrezov, môže sa jednať o priame, striedavé alebo kombinované nástrihové plány (Bílik a kol. 2010).

S postranným odpadom

S postranným odpadom znamená, že odpad v tomto prípade vzniká iba po stranách výstrihu, pričom medzi výstrihmi nie je mostík. V takomto prípade ide väčšinou o nástrihové plány naklonené alebo viacradové bez mostíkov a nástrihové plány s predstrihnutím (Bílik a kol. 2010).

Bez postranného odpadu

Jedná sa najmä o nástrihové plány s predstrihnutím (Bílik a kol. 2010).

S postranným odpadom a mostíkmi

Môžu byť nástrihové plány priame, naklonené, striedavé, kombinované alebo viacradové. Podľa nástrihového plánu sa počíta využitie materiálu, spotreba materiálu a tiež konštrukčný nástroj (Bílik a kol. 2010).

Využitie pásu:

$$\eta_p = \frac{n \cdot S_v}{S_p} \cdot 100 [\%]$$

$$n = L_p / K$$

Kde:

- n – počet výstrižkov z jedného pásu
- S_v – plocha jedného výstrižku
- L_p – dĺžka pásu
- K – dĺžka kroku
- S_p – plocha jedného pásu

Využitie tabule plechu:

$$\eta_{pl} = \frac{n_c \cdot S_v}{S_{pl}} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

- n_c – celkový počet výstrižkov $n_c = n \cdot n_p$
- n_p - počet pásov z tabule plechu
- S_{pl} – plocha tabule plechu

Využitie zvitku:

$$\eta_z = \frac{n_z \cdot S_z}{S_z} \cdot 100 [\%]$$

$$n_z = L_z / K$$

Kde:

- n_z - počet výstrižkov zo zvitku
- L_z – dĺžka zvitku, S_z – plocha zvitku (Bílik a kol. 2010).

2.4 Smer valcovania plechu

Valcovanie plechu (Obr.38) predstavuje proces formovania kovu, kde materiál prechádza cez jeden alebo viac párov valcov s cieľom zredukovať jeho hrúbku, dosiahnuť jednotnú hrúbku alebo získať požadované mechanické vlastnosti. Tento postup je podobný valčeku, kde plech v priemyselnej praxi prechádza sériou vyrovnávacích valcov, ktoré ho ohýbajú v opačných smeroch s cieľom sploštiť ho. Valce sa otáčajú konštantnou rýchlosťou a materiál sa deformuje počas prechodu cez zónu valcovania. Používa sa na výrobu zakrivených plechových častí, zmenšenie hrúbky kovu a vytvorenie rovnomerných plechov s požadovanými mechanickými vlastnosťami. Valcovanie môže prebiehať pri rôznych teplotách a existujú rôzne typy valcovacích zariadení, vrátane ručných a motorizovaných valcov na plechy, schopných tvarovať širokú škálu oblúkov, ohybov, valcov a kruhových objektov (The Library of Manufacturing 2024).



Obr. 38 Valcovanie plechu (Fimosteel 2024)

2.4.1 Mechanické vlastnosti a vplyv smeru valcovania pri procese strihania

Smer valcovania plechu je smer, v ktorom sa valce pohybujú počas valcovacieho procesu. Tento smer má význam z niekoľkých dôvodov:

Mechanické vlastnosti

Orientácia valcovania má významný vplyv na mechanické vlastnosti a výkon materiálu. Pri pozdĺžnom valcovaní doska prejavuje zvýšenú anizotropiu pozdĺž svojej dĺžky, pričom zrná kovu môžu byť pretiahnuté a zarovnané v smere valcovania. Tým vzniká preferovaná orientácia, ktorá má potenciál ovplyvniť mechanické charakteristiky materiálu (AngelRoller 2024). Orientácia valcovania významne ovplyvňuje mechanické charakteristiky materiálu počas procesu strihania. Tieto vlastnosti zahŕňajú anizotropiu, preferovanú orientáciu, pevnosť, tuhosť a odolnosť voči ohybu. Pri pozdĺžnom valcovaní doska prejavuje zvýšenú anizotropiu pozdĺž svojej dĺžky, pričom zrná kovu môžu byť pretiahnuté a zarovnané v smere valcovania, čo vytvára výhodnú orientáciu s potenciálom ovplyvniť mechanické vlastnosti. Orientácia valcovania môže tiež významne ovplyvniť pevnosť a tuhosť materiálu, čím sa stáva vhodnejším pre aplikácie, kde sa vyžaduje pozdĺžna pevnosť a odolnosť voči ohybu. Okrem toho môže smer valcovania ovplyvniť mikroštruktúru a mechanické vlastnosti materiálu počas procesu strihania, pretože asymetrické valcovanie a vytváranie priečnych šmykových pásov môže viesť k zmenám v mikroštruktúre a mechanických vlastnostiach materiálu. Preto je dôležité zvážiť smer valcovania na dosiahnutie požadovaného výkonu a vlastností strihaného materiálu (IOPScience 2024).

Estetický vzhľad

Smer valcovania vytvára na povrchu kovu štrukturálne znaky, ktoré môžu mať vplyv na estetický dojem konečného výrobku. Pre dosiahnutie jednotného vzhľadu je nevyhnutné umiestniť valcované plechy tak, aby smer valcovania bol jednotný (Alumeco 2024).

2.4.2 Druhy valcovania

V procese výroby platní prechádzajú kovové ingoty alebo dosky cez sériu valcovacích mlynov, aby sa zmenšila ich hrúbka a vytvoril sa požadovaný tvar dosky. Valcovanie sa môže vykonávať v dvoch hlavných smeroch:

Pozdĺžne valcovanie

Tiež známe ako smer valcovania „po dĺžke“ (Obr.39), kovová platňa sa valcuje v smere rovnobežnom s jej dĺžkou. To znamená, že dlhšie okraje dosky sa počas procesu valcovania predlžia. Pozdĺžne valcovanie a jeho vlastnosti:

- **Pevnosť a tuhosť**

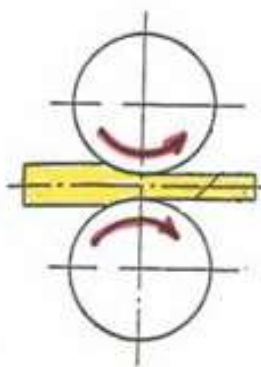
Dosky valcované v pozdĺžnom smere majú tendenciu mať vyššiu pevnosť a tuhosť pozdĺž svojej dĺžky. Vďaka tomu sú vhodnejšie pre aplikácie, kde je kritická pozdĺžna pevnosť a odolnosť proti ohybu (AngelRoller 2024).

- **Anizotropia**

Mechanické vlastnosti dosky môžu byť anizotropné, čo znamená, že sa líšia v závislosti od smeru. Pri pozdĺžnom valcovaní doska vykazuje vyššiu anizotropiu po dĺžke (AngelRoller 2024).

- **Orientácia**

Zrná kovu sa môžu pretiahnuť a zarovnať v smere valcovania, čím sa vytvorí preferovaná orientácia, ktorá môže ovplyvniť mechanické vlastnosti (AngelRoller 2024).



Obr. 39 Pozdĺžne valcovanie (Daily Automation 2024)

Priečne valcovanie

Tiež označované ako smer valcovania „naprieč“ alebo „naprieč šírkou“ (Obr.40), kovová platňa sa valcuje kolmo na svoju dĺžku. To má za následok, že kratšie okraje dosky sa počas valcovania predlžujú. Priečne valcovanie a jeho vlastnosti:

- Pevnosť a tuhosť

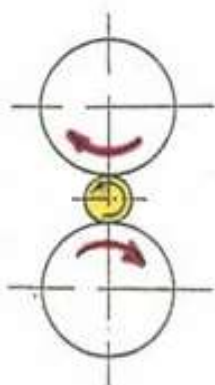
Dosky valcované v priečnom smere majú vyššiu pevnosť a tuhosť pozdĺž svojej šírky. Uprednostňujú sa v aplikáciách, kde je nevyhnutná pevnosť na šírku a odolnosť proti ohybu (AngelRoller 2024).

- Anizotropia

Priečne valcovanie môže tiež viesť k anizotropným vlastnostiam, ale stupeň anizotropie je vo všeobecnosti menej výrazný v porovnaní s pozdĺžnym valcovaním (AngelRoller 2024).

- Orientácia

Zrná sa môžu zarovnať pozdĺž šírky dosky, čím sa vytvorí odlišná preferovaná orientácia v porovnaní s pozdĺžnym valcovaním (AngelRoller 2024).



Obr. 40 Priečne valcovanie (Daily Automation 2024)

2.4.3 Vzájomné natáčanie laminačných zväzkov na elimináciu vplyvu smeru valcovania

Pri návrhu strihania plechu je potrebné vziať do úvahy smer valcovania. Zo skúsenosti je známe, že smer valcovania prechádzajúci cez kritické miesta alebo tenké steny plechu, môže spôsobiť zvýšené napätie a tým spojenú deformáciu na týchto plochách. Cieľom je definovanie smeru valcovania tak, aby tieto kritické plochy boli obídene. Vzájomné natáčanie plechov vo zväzku spočíva v eliminácii vplyvu smeru valcovania. Plech po valcovaní má na rôznych miestach rôznu hrúbku. Strihanie a ukladanie lamiel v rovnakej pozícii by mohlo spôsobiť, že zväzok bude mať na jednej strane väčšiu výšku a na opačnej

strane nižšiu hrúbku. Na elimináciu slúži natáčanie lamiel alebo skupín lamiel o rôzne stupne, napr. 45° / 60° alebo 120° atď.

2.5 Skúšky vykonávané na laminačnom zväzku

Skúšky vykonávané na laminačnom zväzku zahŕňajú Axiálny retenčný test (Axial retention test), skúšku pevnosti v ťahu, odtrhávací test (Peeling test), Epsteinov test (Epstein frame test). Samozrejme je veľké množstvo ďalších skúšok, ktoré môžu byť vykonané na laminačnom zväzku - v diplomovej práci sú spomenuté tie najdôležitejšie.

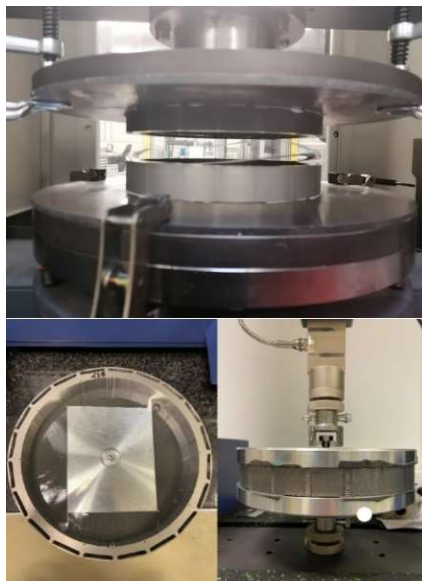
2.5.1 Axiálny retenčný test (Axial retention test)

Axiálny retenčný test (Axial retention test) (Obr.41) je metóda určená na stanovenie sily nevyhnutnej k pohybu objektu v smere jeho osi. V oblasti strojárstva sa tento test môže využívať na hodnotenie prídržných síl medzi rôznymi komponentmi, napríklad medzi teleskopickými korunkami alebo nosičmi ložísk alebo ako v prípade práce na hodnotenie prídržných síl medzi jednotlivými lamelami. Axiálny retenčný test sa obvykle využíva na meranie sily nevyhnutnej na pohyb objektu v smere jeho osi. V rámci laminačných zväzkov sa táto skúška využíva na posúdenie zadržania alebo odolnosti laminačných vrstiev voči axiálnym silám (Arnold et al. 2020). Testovanie zahŕňa aplikáciu presne definovanej sily v smere osi objektu a meranie potrebnej sily na jeho posunutie. Týmto spôsobom poskytuje dôležité informácie o stabilite a účinnosti držiavania testovaných komponentov (Lectromec 2016).

Priebeh axiálneho retenčného testu:

- Príprava vzorky
- Stlačenie stohu vzorky silou N po dobu niekoľko sekúnd
- Test sa spustí a začne sa na vzorku aplikovať sila N . Táto sila môže byť postupne zvyšovaná alebo udržiavaná na konštantnej úrovni podľa potrieb testu.
- V priebehu testu sa sleduje deformácia vzorky pomocou senzorov alebo meračov integrovaných do testovacieho zariadenia. Tieto získané údaje sa využívajú na výpočet rôznych charakteristík, ako je napríklad pevnosť materiálu.
- Test pokračuje až do momentu, kedy dochádza k porušeniu vzorky. Tento stav môže byť vyjadrený trvalým posunom, plastickou deformáciou alebo úplným zlyhaním materiálu.

- Po skončení testu sa vyhodnotia získané dáta, ktoré môžu zahŕňať maximálnu zaťažovaciu hodnotu, pevnosť, modul pružnosti a ďalšie parametre relevantné pre testovaný materiál.



Obr. 41 Axialný retenčný test

2.5.2 Skúška pevnosti v ťahu

Skúška pevnosti v ťahu (Obr.42) je základná mechanická metóda používaná na materiáloch, výrobkoch alebo komponentoch na posúdenie ich statických pevnostných charakteristík v ťahu. Pri tejto skúške je aplikovaná ťahová sila na testovanú vzorku, ktorá je protiľahlými silami fixovaná na protiľahlé plochy. Tento test umožňuje zistiť rôzne vlastnosti materiálu ako je jeho maximálna pevnosť v ťahu, pevnosť pri porušení, maximálne predĺženie a zmenšenie plochy.

Primárnym cieľom skúšky ťahom je získanie mechanických vlastností izotropných materiálov, ktoré sa používajú v rôznych inžinierskych aplikáciách a špecifikáciách materiálov. Tento test je často využívaný na porovnávanie rôznych materiálov alebo procesov a na výber materiálov vhodných pre konkrétne použitie. Skúšanie ťahom umožňuje vyhodnotiť reakciu materiálu na napätie, čo je kľúčové pri návrhu štruktúr a produktov, ktoré sú vystavené záťaži. Maximálna pevnosť v ťahu predstavuje najväčšiu záťaž, ktorej materiál dokáže odolávať pred pretrhnutím alebo porušením pri ťahaní. Táto sila je meraná pomocou silomeru testovacieho prístroja a softvér riadiaci testovací prístroj konvertuje túto silu na napätie. Skúšanie ťahom sa uskutočňuje prostredníctvom stroja na ťahové skúšky, ktorý aplikuje riadenú silu na testovanú vzorku a meria zmeny jej dĺžky. Údaje získané z týchto skúšok sa používajú na výpočet napätia, ktoré je definované ako aplikovaná sila delená

pôvodnou plochou prierezu vzorky. Stroj počíta napätie v priebehu zvyšovania sily, čo umožňuje zostavenie krivky napätia-deformácia z grafu bodov. Deformácia je určená ako zmena dĺžky vzorky v pomere k jej pôvodnej dĺžke. Kmeň, ktorý sa meria, je bezrozmerná veličina (TestResources 2023).



Obr. 42 Skúška pevnosti v ťahu

2.5.3 Odtrhávací test (Peeling test)

Odtrhávací test (Obr.43) je technika využívaná na posúdenie spojovacej sily materiálov, obzvlášť v prípade lamiel. Je využívaná na stanovenie pevnosti spojenia medzi jednotlivými vrstvami materiálu (Satra 2024). Test odlupovania môže byť uskutočnený pomocou univerzálneho testovacieho prístroja, ktorý disponuje testovacím rámom, snímačom zaťaženia, testovacím softvérom, upínacími zariadeniami a v niektorých prípadoch ďalším príslušenstvom špecificky prispôbeným pre konkrétne aplikácie. Tento test zahŕňa mechanické oddelenie jedného lepeného materiálu od druhého, s cieľom vyhodnotiť pevnosť spojovacieho materiálu. Počas skúšky je jeden materiál stabilne upevnený, zatiaľ čo druhý je spojený s rukoväťou, ktorá sa pohybuje, čím sa flexibilný materiál oddeľuje od svojho spájaného partnera pri definovanej rýchlosti a uhle. Súčasne sa presne zaznamenáva sila potrebná na ich oddelenie. Testovanie odlepenia sa často využíva v rôznych odvetviach výroby s cieľom zabezpečiť kvalitu produktov, ich spoľahlivosť a dodržiavanie priemyselných noriem. Medzi hlavné odvetvia patria obalový priemysel,

elektronika, automobilový priemysel, letecký priemysel, medicínske zariadenia a farmaceutický priemysel, stavebníctvo a spotrebný tovar (Xometry 2024).



Obr. 43 eXpert 7601 Adhesive and Peel Testovací systém (Admet 2024)

2.5.4 Epsteinov test

Epsteinov test je štandardizovaným testom určeným na meranie magnetických charakteristík mäkkých magnetických materiálov, s hlavným dôrazom na elektrotechnické ocele. Test sa realizuje s využitím Epsteinovho rámu, ktorý zahŕňa primárne a sekundárne vinutie. Skúšaná vzorka by mala byť pripravená v podobe niekoľkých prúžkov a každá vrstva vzorky je na rohoch zdvojená a zaťažená silou 1 N. Straty energie sa merajú pomocou wattmetrovej metódy a špecifická strata energie sa vypočíta na základe dĺžky vzorky, priemernej dĺžky magnetickej dráhy a hmotnosti vzorky. Epsteinov test, podľa noriem ASTM A343, slúži na meranie strát jadra a priepustnosti elektrických ocelí (Laser technologies 2024). Skúška je dôležitá pre zlepšenie účinnosti jadra transformátora a pre poskytovanie kompletného testovania materiálu elektrotechnickej ocele zákazníkom (Corefficient 2024).

3 PROGRESÍVNE UPEVNŇOVANIE MAGNETOV V ROTOROVÝCH ZVÄZKOCH

Experimentálna časť diplomovej práce je zameraná na experiment, ktorého cieľom bolo progresívne upevňovanie magnetov v rotorových zväzkoch.

Spoločnosť ZF je globálny technologický podnik so svetovým dosahom. Poskytuje výrobky a systémy pre osobnú a komerčnú mobilitu, ako aj priemyselné aplikácie. Ich široký sortiment produktov je určený pre automobilový priemysel, spoločnosti zaoberajúce sa mobilitou a nové podniky v oblasti dopravy a mobility. ZF sa angažuje v elektrifikácii vozidiel rôznych typov a významne prispieva k redukcii emisií, ochrane klímy a zlepšovaniu bezpečnosti v oblasti mobility. Okrem automobilového sektora sa ZF angažuje aj v iných odvetviach, vrátane stavebných a poľnohospodárskych strojov, veterných energetických riešení, námorníckej dopravy, železničných technológií a systémov pre testovanie.

Diplomová práca sa zaoberá progresívnou metódou upevnenia magnetov v rotorových zväzkoch pomocou vstrekovania plastického materiálu do magnetických vreciek. Z rotorov bola navrhnutá a vytlačená vzorka, ktorá predstavuje iba časť rotoru, v ktorej sa nachádzajú vrecká na magnety. Magnety boli taktiež navrhnuté a vyrobené pre potreby experimentu a ich úlohou je simulácia, to znamená, že tento experiment sa nevykonával so skutočnými súčiastkami, ale ide o simuláciu tejto progresívnej metódy, ktorá sa dostáva do popredia pri upevňovaní magnetov v rotorových zväzkoch.

Výsledky experimentu budú využívané spoločnosťou ZF pri ich budúcom výrobnom procese a v pochopení správania sa plastického materiálu, magnetov a rotorových zväzkov. V experimentálnej časti sú vstrekové 2 rôzne druhy materiálov do 2 rôznych vzoriek, kde pri jednej sú magnety uložené s vôľou a pri druhej sú uložené natesno. Materiály vzoriek sú vysokohustotný polyetylén HDPE a polypropylén PP. Experiment pokračoval nameraním hodnôt sily potrebnej na uvoľnenie magnetu z magnetického vrecka. Tieto výsledky sú vyhodnotené a porovnané v druhej fáze experimentálnej časti.

3.1 Zariadenia, stroje a prípravky použité pri realizovaní experimentálnej časti

3D tlačiareň Formlabs Form 2

3D tlačiareň Formlabs Form 2 (Obr.44), použitá na tlačenie vzoriek z plastického materiálu, ktoré simulujú tvar, rozmery a materiál reálnych rotorov. Vzorky rotorov boli vytvorené v programe Creo Parametric, následne bol program odoslaný do 3D tlačiarne, kde boli vzorky vytlačené. Srdcom stroja je výkonný optický motor - presný laser s výkonom 250 mW. Je navádzaný na mieru vyrobenými galvanometrami, ktoré poskytujú veľké výtlaky s veľkolepými detailmi. Nový mechanizmus odlupovania a vyhrievaná nádrž na živicu vytvárajú spoľahlivý proces tlače veľkých, pevných častí, aj malých zložitých detailov (Treatstock 2024).



Obr. 44 3D tlačiareň Formlabs Form 2 (Treatstock 2024)

Svetelná polymerizačná lampa Formlabs Form 2 Curing

Svetelná polymerizačná lampa Formlabs Form 2 Curing (Obr.44) bola použitá na vytvrdzovanie 3D vytlačených vzoriek rotora. Curing alebo vytvrdzovanie je nevyhnutný proces pre dosiahnutie konečnej pevnosti a stability tlačeného objektu. Po vytlačení pomocou tlačiarne Form 2 je materiál zvyčajne vo forme tekutiny alebo polotekutiny a nie je dostatočne tuhý na použitie. Curing alebo vytvrdzovanie je proces, pri ktorom sa materiál vystavuje určitým podmienkam, ako napríklad svetlu, s cieľom spustiť chemické reakcie, ktoré ho premieňajú z tekutého alebo polotekutého stavu, na pevný plastový materiál. Formlabs Form 2 curing sa obvykle vykonáva pomocou UV svetla, ktoré aktivuje fotopolyméry v tlačenom materiáli a spúšťa proces vytvrdzovania (Mikran 2024).



Obr. 45 Svetelná polymerizačná lampa Formlabs Form 2 Curing (Mikran 2024)

Čistička Formlabs Form 2 Washing

Automatický čistič modelov odstraňuje zvyšky nevyschnutej živice. Rotor spôsobuje cirkuláciu izopropylalkoholu (IPA), čo umožňuje účinné a efektívne odplavovanie nadbytočného materiálu z každého detailu. Modely sa môžu ľahko umiestniť na čistenie pomocou špeciálneho držiaka, čo znamená, že ich nie je potrebné odstraňovať z pracovného stola. Stačí len umiestniť pracovný stôl s tlačou alebo model priamo do koša. Nie je potrebné používať rukavice, a tým sa minimalizuje riziko znečistenia tekutou živcou. Prístroj automaticky vyberie očistený model z IPA po nastavenom čase pomocou časovača, čím sa znižuje riziko poškodenia tlače dlhým pobytom v IPA (Support Formlabs 2024)



Obr. 46 Čistička Formlabs Form 2 Washing (Support Formlabs 2024)

Vstrekovací lis BABYPLAST horizontální

Na vstrekovanie plastického materiálu do vreciek pre magnety bol použitý kompaktný lis BABYPLAST (Obr.47). Najmenší plne hydraulický vstrekovací stroj, ktorý preverili tisíce aplikácií v lekárskom, elektronickom a mikromechanickom sektore. Je výsledkom výskumu a vývoja v oblasti mikrovstrekovania termoplastických materiálov. V experimentálnej časti je použitý na vstrekovanie plastických materiálov do vreciek pre magnety. Výhodou zariadenia je jeho nízka cena a náklady na výrobu foriem a minimálne straty pri zmenách farby a výmene materiálu (Cecho 2024).



Obr. 47 Vstrekovací lis BABYPLAST horizontální

Tab. 1 Parametre vstrekovacieho lisu BABYPLAST horizontální (Cecho 2024)

Parametre	Hodnoty				
Priemer piestu (mm)	10	12	14	16	18
Objem vstreku (cm ³)	4,7	6,8	9,2	12	15
Tlak vstreku (bar)	2035	1830	1340	1030	815
Objemový prietok (cm ³ /s)	3,9	5,7	7,7	10	12,7
Vstrekovací zdvih (mm)	60				
Vstrekovacia rýchlosť (mm/s)	50				
Plastifikačná rýchlosť (g/s)	1,8				
Príkon topenia (kW)	1/0,46/0,15				

Vstrekovacia forma

Forma na vstrekovanie plastu, tiež nazývaná nástroj na vstrekovanie alebo vstrekovacia forma (Obr.49), je základným komponentom vstrekovacieho lisu. Táto forma slúži na tvorbu plastových dielov pomocou procesu vstrekovania plastu. Forma použitá pri experimente je od firmy TRUSTACOM s.r.o.. Forma sa skladá z dvoch častí, pričom do prvej časti bol vyfrézovaný tvar vzorky rotora a v druhej časti formy bolo vyfrézované zahĺbenie a rozvádzacie kanály, ktoré slúžia na prepravu roztaveného plastického materiálu. Frézovanie formy prebiehalo v externej firme kvôli urýchleniu procesu a potreby veľmi malého priemeru nástroja pri tvorbe rozvádzacích kanáloch.



Obr. 48 Prvá a druhá časť formy

3.2 Materiály použité pri experimente

Materiál vzoriek rotora

High Temp Resin V2 Formlabs - Na výrobu vzoriek bol použitý materiál High Temp Resin V2 Formlabs. Formlabs High Temp Resin V2 je špecializovaná fotopolymérová živica navrhnutá pre 3D tlačové aplikácie, ktoré vyžadujú odolnosť voči vysokým teplotám. Táto živica odolá teplotám 238-289 °C bez deformácie, vďaka čomu je ideálna na vytváranie statických častí vystavených vysokým teplotám, foriem, odlievania šperkov a iných aplikácií, kde je tepelná odolnosť rozhodujúca. Ponúka výnimočnú silu a presnosť, čo umožňuje výrobu detailných prototypov s rozlíšením tlače 25, 50 a 100 mikrónov (Formlabs 2024).

Vstrekovaný materiál

Vysokohustotný polyetylén HDPE - Polyetylén s vysokou hustotou (HDPE) je termoplastický polymér vyrobený z ropy. Ako jeden z najuniverzálnejších plastových materiálov v okolí, sa HDPE plast používa v širokej škále aplikácií, vrátane plastových fliaš,

fľaš na šampóny, bieliacich fľaš, dosiek na krájanie a potrubia. Plast HDPE, známy pre svoju vynikajúcu pevnosť v ťahu a veľký pomer pevnosti k hustote, má vysokú odolnosť proti nárazu a bod topenia.

Tab. 2 Parametre materiálu Vysoko - hustotný polyetylén HDPE

Parametre	Hodnoty
Teplota spracovania	190 – 230 °C
Hustota	0,94 – 0,96 g/cm ³
Pevnosť v ťahu	310 kg/cm ²
Veľkosť granúl	2 – 5 mm

Polypropylén PP - Polypropylén, typ termoplastického polyméru, nachádza široké uplatnenie v rôznych oblastiach kvôli svojim flexibilným vlastnostiam. Vyrába sa z propylénového plynu polymerizáciou a vyniká vysokou odolnosťou voči chemikáliám, dlhou životnosťou a relatívne nízkou cenou. Svojou vysokou teplotnou stabilitou je ideálny pre použitie v predmetoch, ktoré sú vystavené tepelným vplyvom. Časté aplikácie zahŕňajú obaly, textilné výrobky, súčasti v automobiloch, zdravotnícke prístroje a ďalšie.

Tab. 3 Parametre materiálu Polypropylén PP

Parametre	Hodnoty
Teplota spracovania	210 - 250 °C
Hustota	<1 g/cm ³
Pevnosť v ťahu	224 - 244 kg/cm ²
Veľkosť granúl	2 – 5 mm

3.3 Postup výroby 3D vzoriek rotora pomocou technológie SLA

Pri výrobe vzoriek rotora bola použitá 3D tlačiareň Formlabs Form 2. Táto 3D tlačiareň využíva technológiu SLA (Stereolitografia), čo v praxi znamená, že k vytváraniu objektov využíva UV lúč, ktorý stvrdzuje polymérovú živicu do požadovaného tvaru. Na rozdiel od FDM 3D tlače, sa na tvorbu nevyužíva termoplas, čiže tuhý materiál, ale tekuté polymérne živice. Zameraním lasera na určité miesto vznikne vrstva čiastočne vytvrdeného polyméru. Na túto vrstvu sa nanášajú ďalšie vrstvy. V praxi to vyzerá ako keby sa samotný objekt „vyťahoval“ z tekutiny. Po dokončení tlače sa tekutý materiál odstráni a výsledný produkt je veľmi hladký a presný. Tento spôsob 3D tlače sa využíva hlavne na veľmi malé objekty, kde požadujeme vysokú presnosť, resp. vysoké detaily modelu, napr. miniatúry sôch alebo modelov.

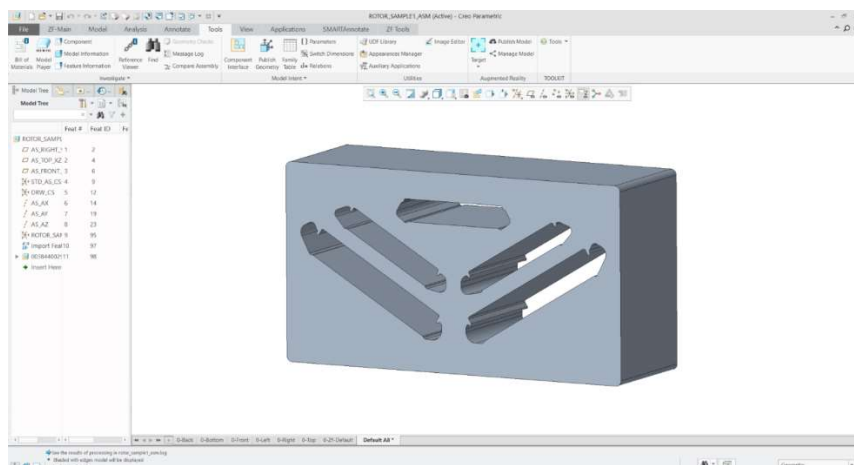
Nevýhodou je ale pomalá rýchlosť tlače a problematická tlač vertikálnych štruktúr. Pomalá rýchlosť tlače priamo negatívne vplyva na výslednú cenu modelu. Preto sa využíva len v špecifických prípadoch.

Postup výroby spočíva v štyroch hlavných bodoch:

- Návrh a tlač 3D vzoriek rotora,
- Oplachovanie 3D vzoriek rotora,
- Vytvrdzovanie 3D vzoriek rotora,
- Čistenie 3D vzoriek rotora.

Návrh 3D vzoriek rotora

Prvá časť experimentu bola zameraná na výrobu vzorky rotora. Pre potreby experimentu sa nezvolili vzorky v tvare celého rotora, ale iba časť, v ktorej máme upevnené magnety. Tento postup bol zvolený kvôli pracovanej ploche formy vstrekovacieho lisu BABYPLAST. Pracovná plocha formy lisu predstavuje plochu 75x75x35 mm. V rámci formy sa však musel zohľadniť fakt, že po okrajoch formy sa nachádzajú diery pre vodiace kolíky formy, čo znamená, že reálna plocha je menšia a predstavuje rozmery 54x75x35 mm. Návrh vzoriek prebiehal v programe Creo Parametric. Pre experiment nemohol byť použitý reálny tvar rotora kvôli know-how firmy, preto sa výsledná vzorka v programe upravila, odstránili sa vybrania a upravil sa jej tvar. Ďalej bol rotor rozdelený na časti v tvare vzorky, ktoré predstavujú hranoly s rozmermi 65x35x21 mm. Na obr.50 možno vidieť tvar vzorky v prostredí programu Creo Parametric. Pri experimente boli použité 2 druhy vzoriek. Jeden typ vzoriek má väčšie rozmery vreciek pre magnety, kde budú magnety upnuté s vôľou a plastický materiál bude vstrekovaný nielen do okrajových častí, ale zatečie aj do miest, kde je vôľa. Druhý typ vzoriek je s upevnením natesno. Pri týchto vzorkách sa magnety nalisovali do vreciek na magnety a v tomto prípade budú fixované plastickým materiálom iba po okrajoch.



Obr. 49 Vzorka rotora v prostredí programu Creo Parametric

Tlač 3D vzoriek rotora

Ďalej bol rotor rozdelený na časti v tvare vzorky, ktoré predstavujú hranoly s rozmermi 65x35x21 mm. Priebeh tlače je možné vidieť na Obr. 51. Po rozdelení nasledovala 3D tlač vzoriek, na ktoré bol použitý materiál High Temp Resin V2 Formlabs . Tento materiál bol zvolený pre jeho výhodné vlastnosti a farbu, ktorá procesom vytvrdzovania získava priesvitný tvar. To zabezpečilo, že po vstreknutí plastického materiálu bolo možné pozorovať, akým spôsobom materiál zatekal do magnetických vreciek rotora.



Obr. 50 Proces 3D tlače vzoriek rotora

Oplachovanie 3D vzoriek rotora

Oplachovanie 3D vytlačených predmetov (Obr.52) pomocou technológie SLA (stereolitografie) je proces, ktorý sa používa na odstránenie zvyškov nepoužitého fotopolyméru z povrchu vytlačených predmetov. Keďže pri tlači pomocou technológie SLA,

fotopolymérový materiál tuhne pomocou UV svetla vrstva po vrstve, môže na povrchu vytlačených predmetov zostať malé množstvá nestvrdnutého fotopolyméru.

Oplachovanie sa vykonáva ponorením vytlačených predmetov do kvapaliny, ktorá môže byť vhodným rozpúšťadlom alebo čističom. Tento proces umožňuje odstránenie nepoužitého fotopolyméru z povrchu predmetov a zároveň môže zlepšiť ich povrchovú kvalitu a detaily. Po opláchnutí sa predmety často vystavujú ďalším procesom, ako je napríklad vytvrdenie UV svetlom alebo ďalšie úpravy povrchu, aby sa dosiahol požadovaný výsledok.

Oplachovanie je dôležitou súčasťou procesu tlače 3D pomocou technológie SLA, keďže zabezpečuje, že vytlačené predmety majú požadovanú čistotu a kvalitu povrchu.



Obr. 51 Proces oplachovania 3D vzoriek rotora

Vytvrdzovanie 3D vzoriek rotora

Vytvrdzovanie 3D vytlačených predmetov (Obr.53) pomocou technológie SLA (Stereolitografia) je proces, pri ktorom sa fotopolymérový materiál používaný pri tlači, vytvrdzuje alebo tuhne, aby sa vytvoril pevný a stabilný predmet. Počas tlače pomocou technológie SLA sa na povrchu tlačeneho predmetu vytvára tenká vrstva tekutého fotopolyméru. Tento fotopolymér sa potom vystavuje presne cielenému UV svetlu, čo spôsobuje jeho tuhnutie alebo vytvrdzovanie.

UV svetlo spúšťa reakciu polymerizácie vo fotopolymérovom materiáli, čo vedie k spojeniu jednotlivých molekúl do polymérovej siete a vytvoreniu pevnej štruktúry. Tento postup sa opakuje vrstva po vrstve, kým sa nevytvorí celý 3D model.

Po ukončení tlače je potrebné vykonať ďalšie kroky, ako je aplikácia povrchových úprav alebo iných úprav podľa potreby. Vytvrdzovanie je však kľúčovým procesom, ktorý umožňuje transformáciu fotopolymérového materiálu na skutočný fyzický objekt.



Obr. 52 Proces vytvrdzovania 3D vzoriek rotora

Čistenie 3D vzoriek rotora

Čistenie 3D vytlačených predmetov (Obr.54) pomocou technológie SLA (Stereolitografia) je proces, ktorý sa vykonáva na odstránenie zvyškov nepoužitého fotopolyméru a ďalších nečistôt z vytlačených predmetov. Tento krok pomáha odstrániť nezreagovaný fotopolymér, ktorý môže zostať na povrchu predmetu. Čistenie je dôležitým krokom v procese tlače 3D pomocou technológie SLA, ktorý zabezpečuje čistotu a kvalitu povrchu vytlačených predmetov.

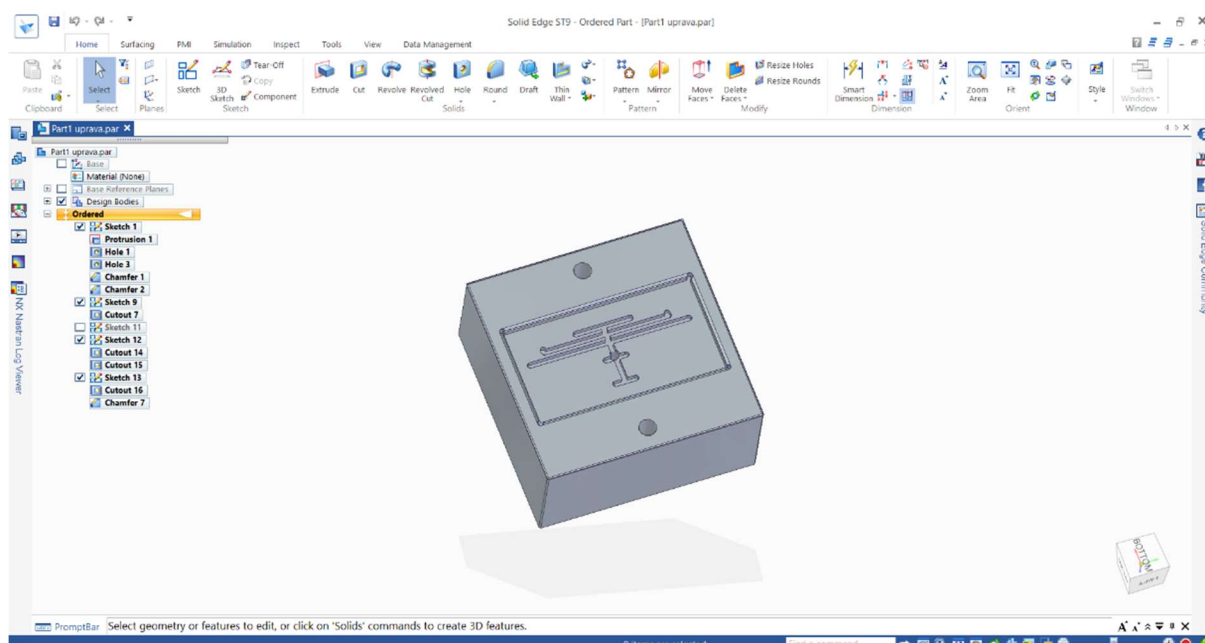


Obr. 53 Proces čistenia 3D vzoriek rotora

3.4 Návrh a výroba formy

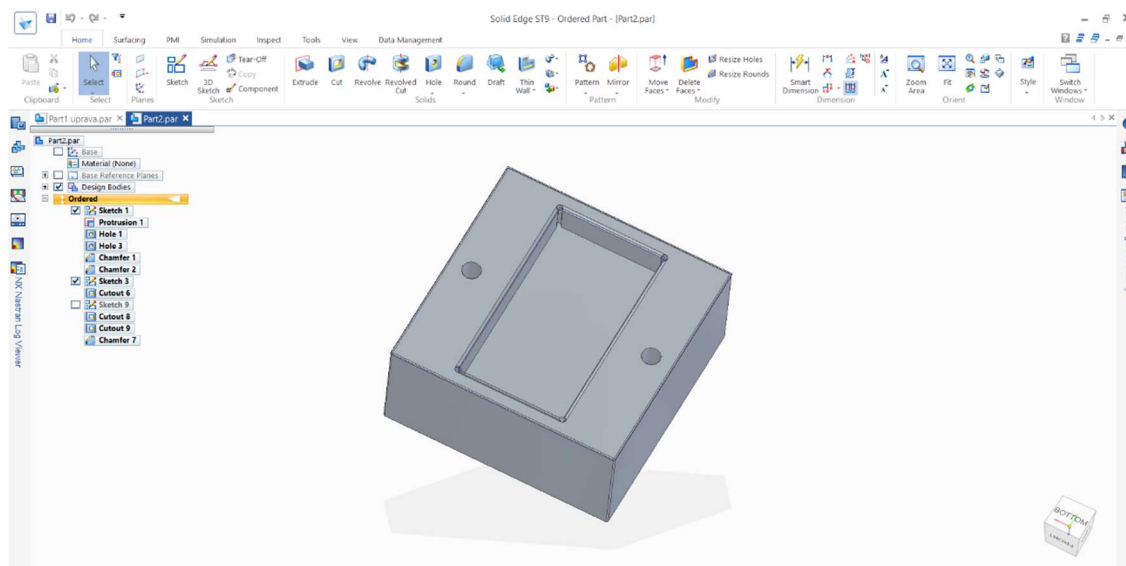
Pre potreby experimentu bola navrhnutá forma s presným tvarom pre upnutie vzorky. Forma je vyrobená z materiálu nástrojová oceľ 1.2312/40CrMnMoS8.6. Materiál formy má veľmi dobrú obrobiteľnosť a používa sa na výrobu foriem pre vstrekovanie plastov. Forma

je vyrobená vo firme TRUSTACOM s.r.o.. Navrhovanie formy prebiehalo v programe Solid Edge ST9 a celý tvar a rozmery sa konzultovali s doc. Ing. Jozefom Bílikom, PhD.. Forma sa skladá z dvoch častí, pričom do každej časti bol frézovaný iný tvar, čo znamená, že sa museli modelovať aj dva modely s rôznym tvarom. Do prvej časti formy (Obr. 55) bolo vymodelované zahĺbenie s rozmerom 65x35x3 mm a nasledovalo vymodelovanie rozvádzacích kanálov, ktoré slúžia na rozvádzanie roztaveného plastu do magnetických vreciek. Hĺbka rozvádzacieho kanálu predstavuje rozmer 2 mm, čo zabezpečilo, aby požadovaný tlak pre vstreknutie materiálu neklesal a nenastali problémy. Pre zabezpečenie vstrekovania musela byť do formy vyvŕtaná diera o priemere 3mm, ktorá bude slúžiť ako vstrekovací kanál, cez ktorú bude vstrekován roztavený plast.



Obr. 54 Návrh prvej časti formy v programe Solid Edge ST9

Tvar a rozmery druhej časti formy (Obr. 56) sú jednoduchšie a jej účel je predovšetkým kvôli tomu, aby sa zabezpečilo upnutie a stabilita vzorky. V tomto návrhu bolo vyfrézované jednoduché zahĺbenie v tvare vzorky s rozmermi 65x35x10 mm a zrazenie 1x45° pre zjednodušenie vkladania.



Obr. 55 Návrh druhej časti formy v programe Solid Edge ST9

Výroba formy prebiehala v externej firme FIMAD, s.r.o.. Po konzultácii ohľadom výrobitelnosti a úprave navrhnutej formy, sa formy vyrobili a boli na nich vykonané dokončovacie operácie. Výroba bola možná aj v rámci univerzity, ale kvôli časovej náročnosti a vyťaženosti strojov na univerzite, bola zvolená alternatíva výroby v externej firme.

3.5 Upevňovanie magnetov do vreciek na magnety pomocou vstrekovania roztaveného plastického materiálu

Proces upevňovania magnetov pomocou vstrekovania plastu sprevádzalo množstvo doplnkových operácií, ktoré sa museli vykonať pred samostatným vstrekovaním plastického materiálu. Pri procese vstrekovania boli použité dve rôzne vzorky a dva rôzne materiály. Rozdiel medzi vzorkami bol v tom, že pri prvom druhu boli magnety vložené s vôľou a druhý pár vzoriek bol vložený natesno, resp. magnety boli do vreciek na magnety nalisované. Materiály použité pri experimente boli vysokohustotný polyetylén HDPE a polypropylén PP.

Proces vstrekovania plastického materiálu:

1. V prvom kroku experimentu bolo potrebné vyčistenie mechanizmu na vstrekovanie plastu. Pri čistení sa používa čistiaci granulát, ktorý sa nasype do násypky. Nasleduje zapnutie vstrekovacieho lisu a jeho rozohriatie na požadovanú teplotu. Pri tejto teplote je čistiaci granulát roztavený a spustí sa cyklus vstrekovania naprázdno. Proces čistenia vstrekovacieho lisu je zobrazený na Obr. 57. Vstrekovanie naprázdno zabezpečí vyčistenie zásobníka, v ktorom sa môže nachádzať materiál z predošlého

procesu. Čistenie sa vykonáva kvôli tomu, aby materiál, ktorý bol vstrekaný v predošlom procese, neovplyvnil výsledné vlastnosti materiálu, ktorý bude vstrekaný v experimentálnej časti diplomovej práce.



Obr. 56 Proces čistenia vstrekovacieho lisu BABYPLAST

2. V druhom kroku experimentu, ktorý nasledoval po vyčistení vstrekovacieho mechanizmu sa do násypky nasypal požadovaný vstrekovací materiál (vysokohustotný polyetylén HDPE, polypropylén PP) na upevňovanie magnetov. Podobne ako pri čistení, sa musel vstrekovací mechanizmus zbaviť roztaveného čistiacieho granulátu a nahradiť ho požadovaným vstrekovacím materiálom. Tento proces prebiehal vo viacerých cykloch podobne ako proces čistenia, až pokiaľ nebol čistiaci granulát kompletne vytlačený a v zásobníku sa nachádzal len materiál na vstrekovanie.
3. V treťom kroku nasledovalo upnutie formy (Obr. 58) vyrobenej na vstrekovanie plastu. Forma sa skladá z dvoch častí a do vstrekovacieho lisu sa upevňuje každá časť pomocou štyroch skrutiek. Forma sa vložila do upínacieho mechanizmu a pritiahla skrutkami. Nasledovala kontrola upnutia a finálne dotiahnutie skrutiek.



Obr. 57 Upnutie prvej a druhej časti vstrekovacej formy

4. Vo štvrtom kroku nasledovalo nastavovanie parametrov pre vstrekaný materiál. Pri vykonaní samostatného experimentu sa parametre upravovali podľa potreby vstrekovania, pretože v procese sa vychádzalo zo všeobecných parametrov (Tab.4), ktoré museli byť skúšané a upravované pre daný typ materiálu. Zistilo sa, že zvolené parametre vyhovujú pre oba vstrekané materiály a pri týchto parametroch nedochádza k žiadnym problémom a materiál zateká do všetkých miest. Pri nastavovaní vstrekaného objemu sa zvolili maximálne hodnoty aké dokáže vstrekovací lis dosiahnuť. Pre potreby experimentu nebolo potrebné počítať vstrekovaciu dávku, pretože šlo o malé množstvo vzoriek - konkrétne päť a plytvanie materiálom bolo minimálne.

Tab. 4 Hodnoty teploty pre oblasti lisu nastavené na lise BABYPLAST

Oblasť lisu	Teplota [°C]
H1 Plastifikácia	235
H2 Vstrekovacia komora	235
H3 Tryska	235
H4 Forma	235

Tab. 5 Vstrekovacie časy a nastavenia lisu BABYPLAST

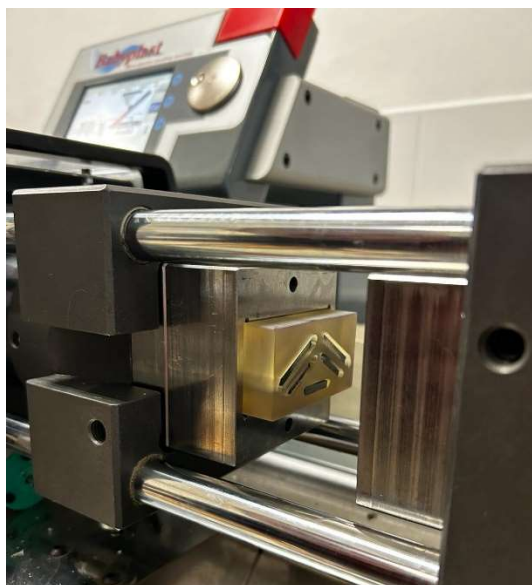
Vstrekovacie časy a nastavenie	Hodnoty
Veľkosť vstreku	50 mm
Čas chladnutia	30 s
Prvý vstrekovací tlak	90 bar
Prvý vstrekovací čas	1,5 s
Druhý vstrekovací tlak	70 bar
Druhý vstrekovací čas	2 s
Dekompresia	9 mm
Vstrekovacia rýchlosť	100%
Druhá vstrekovacia rýchlosť	100%

5. V piatom bode nasledovala úprava vzoriek rotora (Obr.59) pre ich pohodlné upnutie do vyfrézovanej formy na vstrekovanie plastu. Vzorky rotora boli vyrobené pomocou 3D tlače, čo v praxi znamenalo, že ich rozmery neboli také presné, ako pri navrhovaní v programe Creo Parametric. Úprava vzoriek prebiehala veľmi jednoduchým spôsobom. Na úpravu sa použil jemný brúsny papier, na ktorom sa vzorky obrúsili zo všetkých štyroch obvodových strán pre jednoduchšie vloženie do formy.



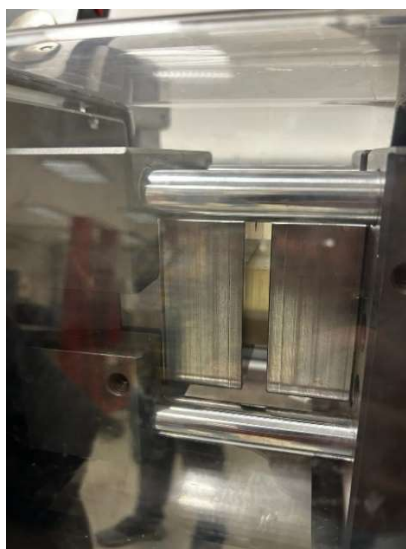
Obr. 58 Úprava vzoriek pred vložením do formy

6. V nasledujúcom kroku sme upravené vzorky vložili do vyfrézovanej formy (Obr.60). Pri vkladaní vzoriek sa muselo dbať na správnu orientáciu vzorky vo forme. Ak by sa vzorka rotora vložila opačným smerom, proces vstrekovania by neprebehol správne a rozvádzacie kanály by sa nachádzali na odlišných miestach, čo by viedlo k tomu, že plastický materiál by nezatiekol na miesta, kde má. Následne boli do vzoriek rotora vložené magnety a pracovný priestor vstrekovacieho lisu bol uzavretý.



Obr. 59 Upnutá vzorka vo forme

7. Nasledoval samostatný proces vstrekovania plastického materiálu (Obr.61). Forma sa spustením cyklu uzavrela, piest začal vstrekovat' roztavený plastický materiál do vstrekovacieho kanálu. Zo vstrekovacieho kanálu sa dostal do rozvádzacích kanálov a postupne vyplnil vrecká na magnety. Po skončení procesu vstrekovania ostala forma uzavretá ďalších 30 sekúnd, čo zabezpečilo tuhnutie vstreknutého plastického materiálu.



Obr. 60 Proces vstrekovania plastického materiálu

8. Po skončení cyklu vstrekovania sa vstrekovací lis otvoril a vzorky sa vybrali. Následne sa vzorky zbavili vstrekovacieho kanálu a rozvádzacích kanálov pomocou vysúvacieho nožika (Obr.62). Nasledovala ich kontrola a týmto krokom sa proces vstrekovania skončil.



Obr. 61 Orezané a upravené vzorky

Po dokončení prvej časti experimentu je viditeľné, že proces vstrekovania plastického materiálu prebehol podľa plánu. Ako je možné vidieť na vzorkách, roztavený materiál sa dostal na všetky miesta a vyplnil ich objem. Z tejto skutočnosti vyplýva, že forma vyrobená pre potreby experimentu splnila svoj účel a vzorky neboli pri experimente poškodené a deformované vznikom upínacích síl alebo teplom. Plastický materiál vstreknutý do plastických vreciek zabezpečuje fixáciu magnetov, čo vedie k tomu, že magnety z magnetických vreciek nevypadnú a sú zapoložované podľa potreby.

4 MERANIE SÍL POTREBNÝCH NA ODOBRATIE MAGNETOV

V druhej časti experimentu sa venovalo meraniu síl potrebných na odobratie magnetov, ktoré boli upevnené pomocou vstrekovania plastického materiálu do magnetických vreciek. Tento proces bol vykonaný na trhacom stroji Tinius Olsen MODEL 300ST pomocou vyvodenia tlaku na zalisované magnety. Toto meranie sa vyhodnocovalo v softvéri Horizon od spoločnosti Tinius Olsen, ktorý sledoval priebeh sily a posunutie telieska, ktoré vyvíjalo tlak na zalisovaný magnet až do povolenia magnetu. Program vyhotovil graf so zaznamenaným priebehom a vypísal parametre. Následne boli hodnoty grafov vyhodnotené a porovnané v tabuľke a grafe.

4.1 Zariadenia a prípravky použité pri meraní síl potrebných na odobratie magnetov

Tinius Olsen MODEL 300ST - pri realizovaní druhej časti experimentu sa použilo trhacie zariadenie Tinius Olsen MODEL 300ST (Obr.63). Model 300ST je vyvinutý na testovanie pevnosti v ťahu, tlaku, ohybu a šmyku u materiálov a konštrukcií. Robustný dizajn zahŕňa kvalitné materiály a komponenty. Na výber sú rôzne prípravky na zaťaženie s rôznymi kapacitami, ktoré umožňujú presné meranie aplikovaného zaťaženia - od najmenších testovaných vzoriek až po tie, ktoré dosahujú maximálnu kapacitu zariadenia (TiniusOlsen 2024).



Obr. 62 Trhacie zariadenie Tinius Olsen MODEL 300ST

Prípravok na upevnenie

Pri procese merania síl sa nepoužil konkrétny prípravok. Na lis boli upnuté kruhové čeľuste s rovinnými dotykmi. Vzorka bola položená na dva hranoly, medzi ktorými sa nachádzala medzera. Vrecká na magnety boli umiestnené tak, aby sa ich poloha nachádzala presne v medzere medzi hranolmi. Prípravok použitý na testovanie je zobrazený na Obr. 64. Tým sa zabezpečilo, že po zapnutí procesu mali magnety priestor, kam mohli byť vytláčané.



Obr. 63 Prípravok na testovanie

4.2 Proces merania síl

Proces merania síl potrebných na vytlačenie magnetov začal vložением prípravku na spodnú časť kruhových čeľustí s rovinnými dotykmi. Následne bol na zalisovaný magnet obojstrannou páskou prichytený kovový hranolček s rozmermi magnetu. Ďalší krok bol vycentrovanie vzorky na stred prítlačných čeľustí a spustenie procesu merania. V programe Horizon sa sledoval priebeh sily v Newtonoch potrebnej na prvotné uvoľnenie zalisovaného magnetu z magnetického vrečka. Ďalší priebeh sily bol pre meranie irelevantný, pretože vzorka už bola uvoľnená a mohla sa v magnetickom vrecku hýbať v jednom alebo druhom smere. Vzorky sa označili skratkami:

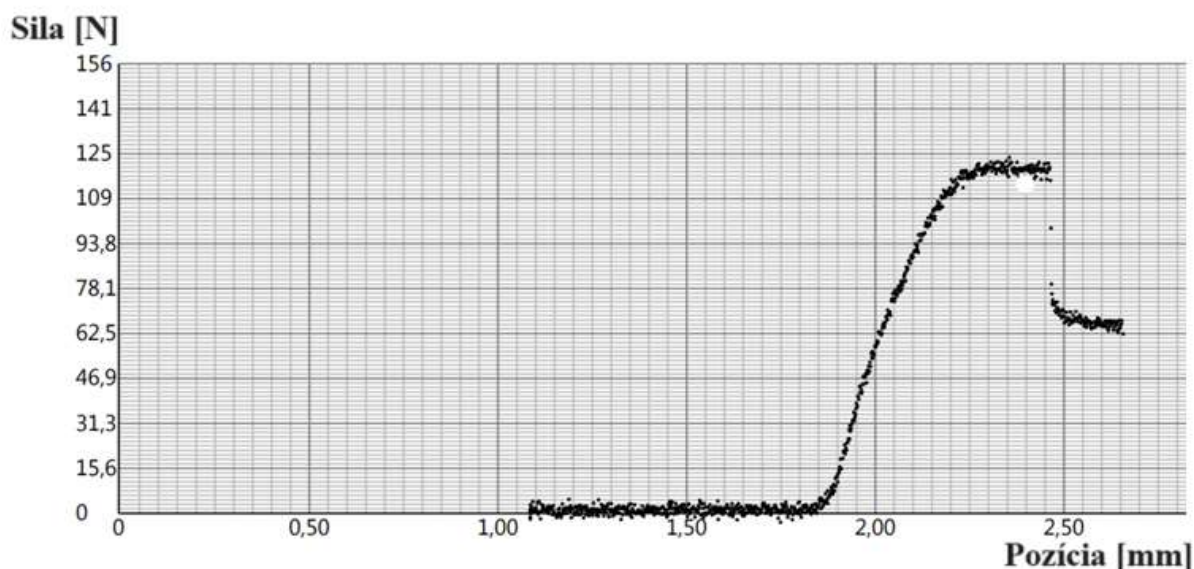
- **VHDPE** – voľné uloženie magnetov, vysokohustotný polyetylén,
- **VPP**- voľné uloženie magnetov, polypropylén,
- **THDPE** – tesné uloženie magnetov, vysokohustotný polyetylén,
- **TPP** - tesné uloženie magnetov, polypropylén.

Pri meraniach sa samostatne vyhodnocovala sila potrebná na odobratie malých zalisovaných magnetov a veľkých zalisovaných magnetov. Malé zalisované magnety sa vo vzorke nachádzali tri a veľké dva. Meranie sa realizovalo na jednom malom zalisovanom magnetu a na jednom veľkom zalisovanom magnetu na každej vzorke.

4.2.1 VHDPE – voľné uloženie magnetov, vysokohustotný polyetylén

Malý magnet

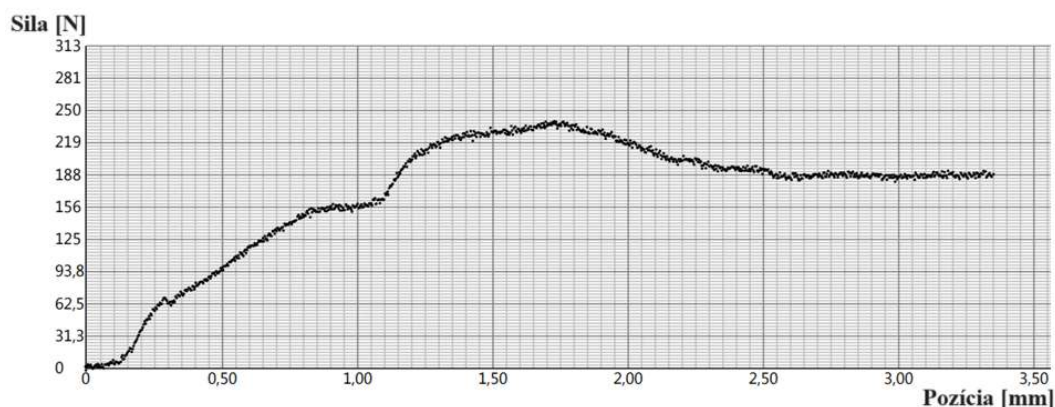
Pri zaťažení vzorky VHDPE, kde sa vytlačal zo vzorky malý zalisovaný magnet, je na grafe (Obr. 65) možné vidieť, že sila začala rásť a dostala sa na hodnotu cca. 122N. Pri tejto hodnote narazila na odpor zalisovaného magnetu, až narástla na hodnotu 123,40N. Pri tejto hodnote nasledovalo uvoľnenie magnetov a sila ďalej klesala.



Obr. 64 Graf pre malý magnet vzorky VHDPE vygenerovaný v programe Horizon

Veľký magnet

Pri zaťažení vzorky VHDPE, kde sa vytlačal zo vzorky veľký magnet, je možné na grafe (Obr. 66) sledovať priebeh sily, ktorá postupne rástla, až dosiahla hodnotu 70,32N. Pri tejto sile došlo k instantnému uvoľneniu magnetov a poklesu sily. Ako je možné vidieť, v grafe sila začala opäť rásť, ale to je dôsledok toho, že nastalo pohnutie alebo pootočenie magnetu a narazenie na materiál vzorky vytlačenej pomocou 3D tlače a preto sa táto sila pri meraní nebrala do úvahy.



Obr. 65 Graf pre veľký magnet vzorky VHDPE vygenerovaný v programe Horizon

Na vzorke, na ktorej sa vykonávalo meranie (Obr.67) je možné vidieť vytlačené magnety do určitej polohy. Pri meraní bol rozhodujúci parameter sila potrebná na prvé uvoľnenie, z čoho vyplýva, že nebolo potrebné úplné vytlačenie magnetu. Na magnetoch, ktoré boli obtečené plastickým materiálom, sú kúsky vtláčaného plastu odlomené, čo bolo spôsobené pri procese merania.

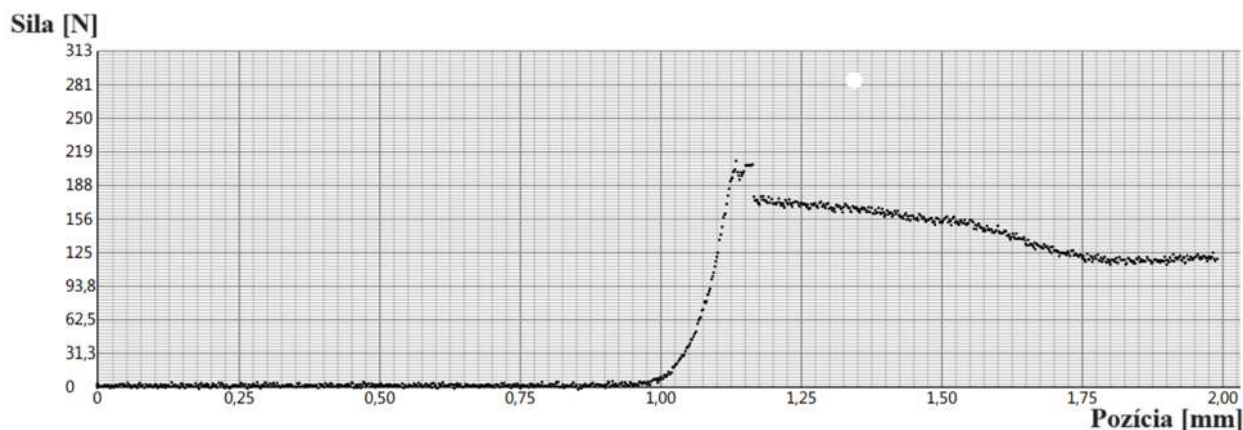


Obr. 66 Vzorka VHDPE s vytlačenými magnetmi

4.2.2 VPP- voľné uloženie magnetov, polypropylén

Malý magnet

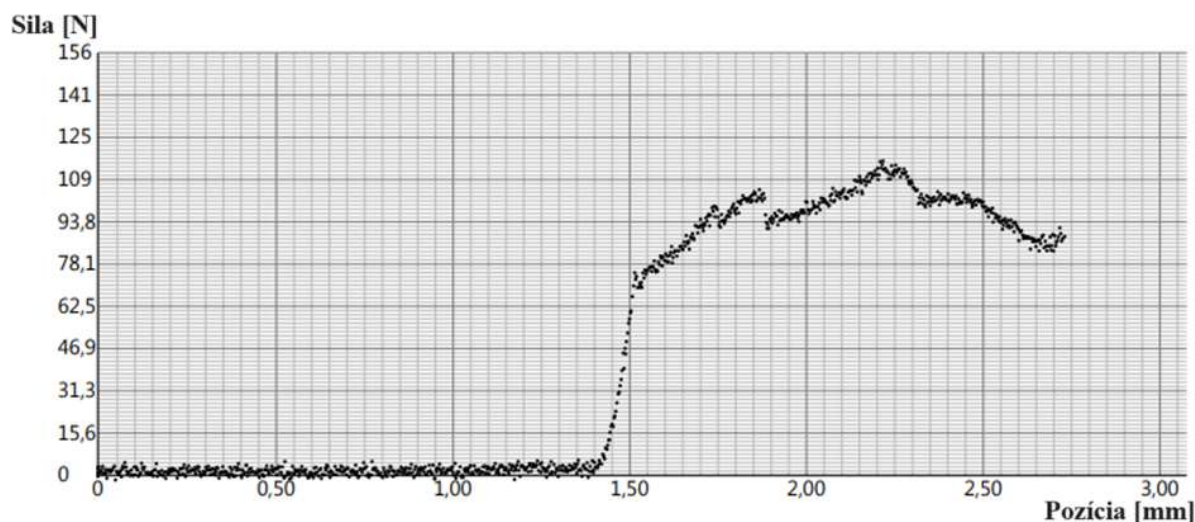
Pri zaťažení vzorky VPP, kde sa vytlačal zo vzorky malý zalisovaný magnet, sledujeme na grafe (Obr.68), nárast sily až na hodnotu 212,80N. Po dosiahnutí tejto hodnoty nasledovalo povolenie zalisovaného magnetu z magnetického vrečka a následný pokles sily. Hodnota sily pri zaťažení tejto vzorky predstavovala najvyššiu hodnotu sily pre malý magnet z celého merania.



Obr. 67 Graf pre malý magnet vzorky VPP vygenerovaný v programe Horizon

Veľký magnet

Pri zaťažení vzorky VPP, kde sa vytlačal zo vzorky veľký zalisovaný magnet, je možné na grafe (Obr.69), sledovať priebeh sily, ktorá rástla vyššou rýchlosťou. Nasledoval pokles rýchlosti a dosiahnutie sily 105,96N. Pri tejto sile je možné sledovať uvoľnenie zalisovaného magnetu a pokles sily. Tak, ako v predošlom prípade, je možné vidieť opätovný nárast sily, čo má za následok zmena polohy alebo pootočenie magnetu, preto sa táto hodnota v meraní nebrala do úvahy.



Obr. 68 Graf pre veľký magnet vzorky VPP vygenerovaný v programe Horizon

Z Obr.70 môžeme sledovať, že aj v tomto prípade boli magnety pekne obtečené vstrekaným materiálom. Toto meranie spôsobilo isté praskliny na vzorke, ktoré ale mohli byť spôsobené vytlačaním materiálom okolo magnetov. V prípade výroby vzorky z iného materiálu by sa dalo týmto nepríjemnostiam predchádzať.

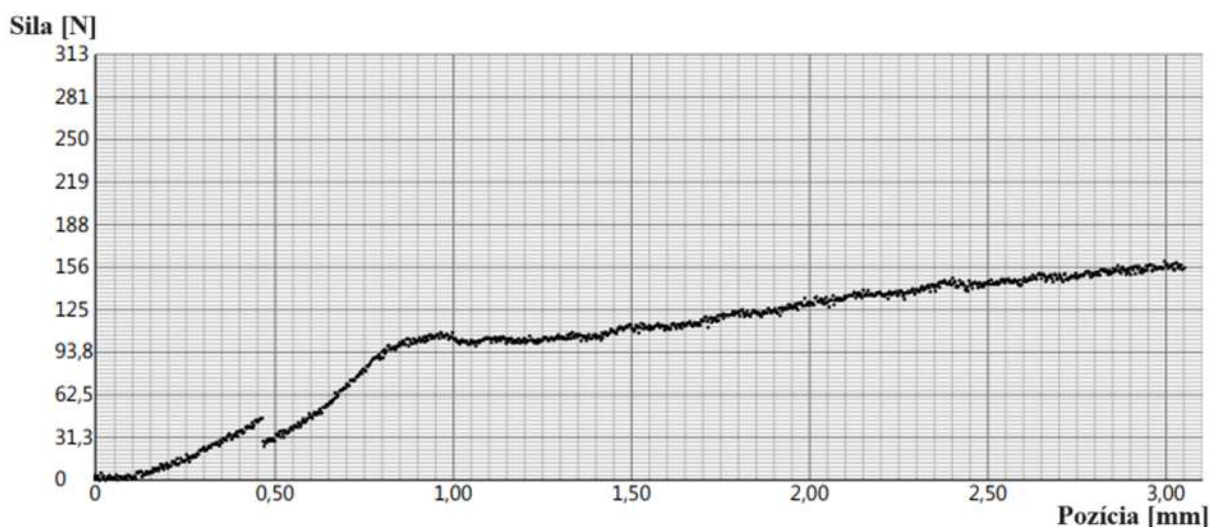


Obr. 69 Vzorka VPP s vytlačenými magnetmi

4.2.3 THDPE – tesné uloženie magnetov, vysoko – hustotný polyetylén

Malý magnet

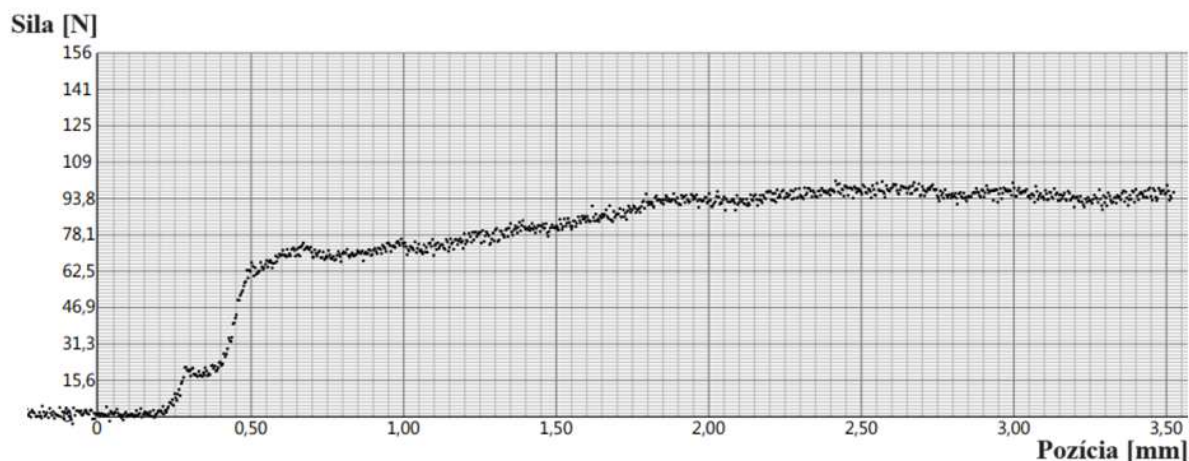
Pri zaťažení vzorky THDPE, kde sa vytláčal zo vzorky malý zalisovaný magnet, sa eviduje menšia sila ako pri predošlých prípadoch, čo je spôsobené zmenou uloženia, ktoré je v tomto prípade natesno. Nárast sily F je pomalý, až dosiahne hodnotu 46,90N. Pri tejto sile je zalisovaný magnet uvoľnený a ako je možné sledovať na Obr. 71, istú dobu na zalisovaný magnet nepôsobí žiadna sila a nárast začína opätovne až pri zmene otočenia alebo polohy zalisovaného magnetu.



Obr. 70 Graf pre malý magnet vzorky THDPE vygenerovaný v programe Horizon

Veľký magnet

Pri zaťažení vzorky THDPE, kde sa vytláčal zo vzorky veľký zalisovaný magnet, je možné na grafe (Obr.72) pozorovať menšiu silu, ako pri uloženiach s vôľou. Na obrázku je možné vidieť pomalší nárast sily F a dosiahnutie hodnoty 21,88N. Pri tejto hodnote došlo k uvoľneniu magnetu a následnému poklesu sily. Opätovný nárast, tak ako v predošlých prípadoch, je následok zmeny polohy alebo narazenia o materiál vzorky a jeho odpor.



Obr. 71 Graf pre veľký magnet vzorky THDPE vygenerovaný v programe Horizon

Z Obr.73, kde je zobrazená vzorka s vytlačenými zalisovanými magnetmi, je možné zreteľne vidieť zalisovanie magnetu po stranách. Pri procese merania malo zväčšovanie sily a postupné vytlačanie magnetov za následok odlamovanie vstreknutého materiálu, ako je možné vidieť na obrázku.

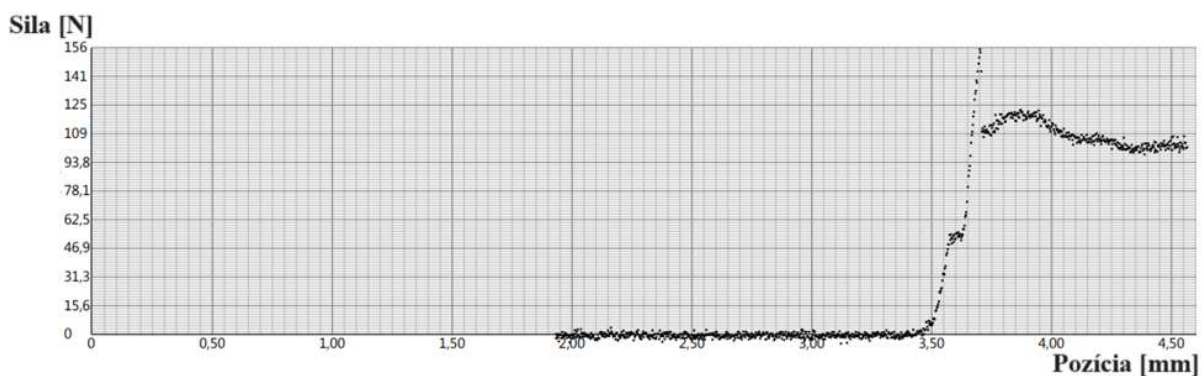


Obr. 72 Vzorka THDPE s vytlačenými magnetmi

4.2.4 TPP - tesné uloženie magnetov, polypropylén

Malý magnet

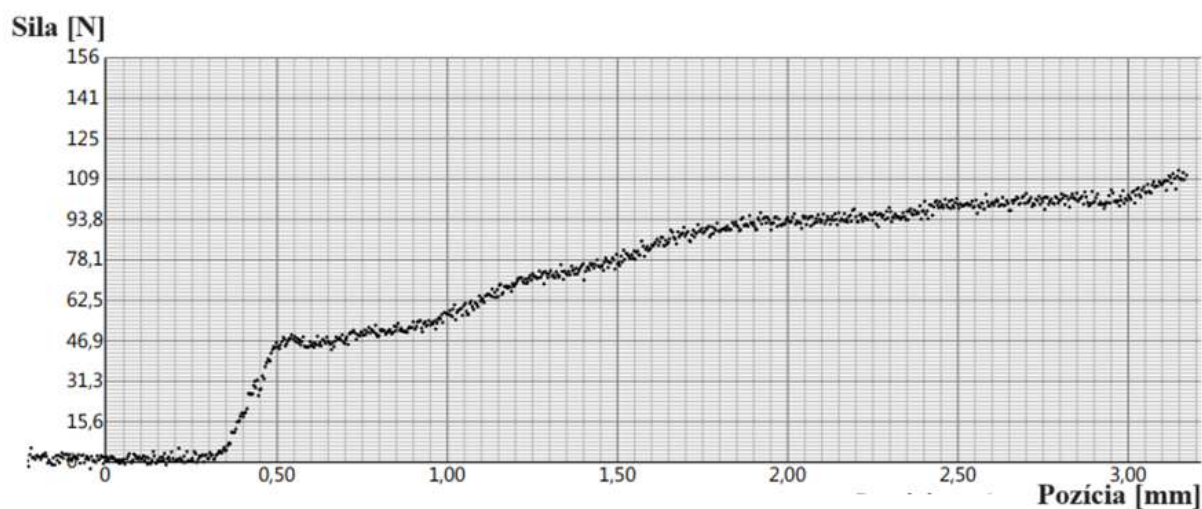
Pri zaťažení vzorky TPP, kde sa vytláčal zo vzorky malý zalisovaný magnet, je na grafe (Obr.74) vidieť rýchly nárast sily F , až po dosiahnutie hodnoty 56,26N. Pri tejto hodnote je chvíľkový pokles sily zapríčinený uvoľnením zalisovaného magnetu vo vrecku na magnety. Po uvoľnení sila začne opäť rásť, ale tento jav je nepodstatný, pretože je zapríčinený zmenou polohy magnetu a táto informácia je pre nás irelevantná.



Obr. 73 Graf pre malý magnet vzorky TPP vygenerovaný v programe Horizon

Veľký magnet

Pri zaťažení vzorky TPP, kde sa vytlačal zo vzorky veľký zalisovaný magnet (Obr.75) narastá sila na hodnotu 50,02N. Pri tejto sile došlo k uvoľneniu magnetov, ale veľmi rýchlo sa sila začala opäť zvyšovať menšou rýchlosťou. Za následok to má (ako v predošlých prípadoch) zmena orientácie zalisovaného magnetu spôsobená pôsobením sily F .



Obr. 74 Graf pre veľký magnet vzorky TPP vygenerovaný v programe Horizon

Z Obr.76 je možné vyvodiť, že pri tomto materiáli a uložení, sila nedosiahla také vysoké hodnoty. Pri procese merania, kde bol magnet vytlačený, spôsobil lámanie a pukanie plastického materiálu vstreknutého po bokoch magnetu.



Obr. 75 Vzorka TPP s vytlačenými magnetmi

4.3 Vyhodnotenie merania

Tab. 6 Hodnoty sily F potrebnej na vytlačenie magnetov

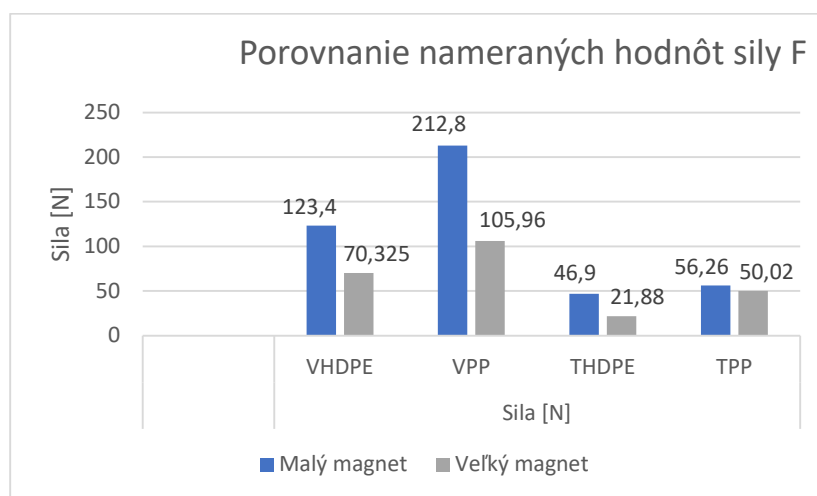
Magnet	Sila F [N]			
	VHDPE	VPP	THDPE	TPP
Malý magnet	123,40	212,80	46,90	56,26
Veľký magnet	70,32	105,96	21,88	50,02

Po nameraní všetkých hodnôt síl F , potrebných na vytlačenie zalisovaného magnetu z magnetického vrečka, sa hodnoty zapísali do tabuľky. Ako je možné vidieť v tabuľke č.6, najvyššie hodnoty dosahovali vzorky, kde bol magnet upnutý s vôľou. Pri tomto procese vstrekovací lis vstrekol roztavený materiál aj do miest kde je vôľa, čo viedlo k tomu, že stuhnutie materiálu spôsobilo zväčšenie objemu a tým aj vyššie trenie pri uchytení zalisovaného magnetu. Pri nameraných hodnotách sily je možné vidieť, že vyššie hodnoty boli dosahované pri malých magnetoch. Pri vzorkách malého magnetu s uložením s vôľou (VHDPE, VPP) je možné sledovať, že hodnota síl je podstatne vyššia ako hodnoty síl veľkých magnetov. Taktiež je možné konštatovať, že pri tomto uložení má materiál polypropylén lepšie fixačné vlastnosti ako vysokohustotný polyetylén. Z tab.6 je možné vyhodnotiť, že pri uložení magnetov natesno, neboli dosiahnuté také vysoké hodnoty ani pri jednom z dvoch materiálov. Z údajov je možné pozorovať, že vzorky THDPE a TPP dosiahli veľmi malé hodnoty v porovnaní so vzorkami VHDPE a VPP, či už sa jedná o vzorky, kde sa vytláčal malý alebo veľký magnet.

Z meraní a výsledkov vyplýva, že vzorky, kde boli magnety uložené s vôľou, sú vhodnejšie pre použitie v praxi, pretože dosahujú podstatne vyššie hodnoty ako vzorky, kde bol magnet uložený natesno. Taktiež je zrejmé, že materiál polypropylén PP je vhodnejší pre fixáciu magnetov a jeho vlastnosti sú podstatne lepšie pri uchytení s vôľou ako pri tesnom uchytení. Tesné uloženie magnetov neponúka dobrú fixáciu ani v jednom z použitých materiálov na fixovanie vzoriek. Z tab. 6 sa môže konštatovať, že materiál vysokohustotný polyetylén by mohol byť taktiež vhodný pri procese fixovania magnetov. V tomto prípade by sa taktiež muselo použiť uloženie magnetov s vôľou.

V závere sa dá konštatovať, že najlepšou alternatívou pre uchytenie magnetov je uloženie s vôľou a použitie materiálu polypropylén PP. Druhá z alternatív, o ktorej sa pri procese vstrekovania materiálu dá uvažovať, je pri voľnom uložení magnetov použitie materiálu vysokohustotný polyetylén VHDPE, ktorý dosahuje menšie hodnoty, ale stále by tieto hodnoty boli dostačujúce pre účely fixovania magnetov v procese výroby.

Graf porovnávajúci sily pôsobiace na jednotlivé magnety na všetkých testovaných vzorkách



ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo progresívne upevňovanie magnetov v rotorových zväzkoch pomocou vstrekovania plastického materiálu do magnetických vreciek a následné vyhodnotenie síl potrebných na prvotné uvoľnenie magnetu v magnetickom vrecku. Proces vstrekovania sa realizoval na vstrekolise BABYPLAST, do ktorého bola upnutá forma na rozvádzanie plastického materiálu. Nasledovalo marenie síl potrebných na vytlačenie magnetov z magnetických vreciek. Výsledok diplomovej práce je spísanie procesu vstrekovania, porovnanie hodnôt síly potrebnej na vytlačenie magnetov z magnetických vreciek a následné vyhodnotenie najvhodnejších alternatív, ktoré budú použité v procese výroby.

V diplomovej práci sa zameralo na súčasný stav v oblasti elektromotorov a podrobnú analýzu konvenčných spôsobov výroby statorových a rotorových zväzkov. Táto kapitola obsahovala úvod do problematiky výroby laminačných zväzkov statorov a rotorov. Ďalej v nej boli rozobraté typy elektromotorov a časti ich konštrukcie, ktoré boli podrobne opísané a znázornené pre lepšie pochopenie. Nasledoval rozbor spôsobov výroby lamiel statora a rotora a spôsoby ich spájania do laminačného zväzku ako sú hrúbka materiálu, mechanické a magnetické vlastnosti a povrchová úprava a jej hrúbka. Táto kapitola bola zakončená rozborom spôsobov upevnenia magnetov v laminačnom zväzku. Druhá kapitola bola zameraná na proces strihania a podmienky, ktoré sú kladené na laminačný zväzok statora a rotora. Popísaný je postup strihania lamiel statora a rotora a základné parametre pre výber vhodného materiálu laminačných zväzkov. Nasleduje kontrola strihu a vplyv smeru valcovania na vlastnosti laminačného zväzku. Kapitola je zakončená prehľadom testov, ktoré sú vykonávané na laminačnom zväzku a patria sem axiálny retenčný test, skúška pevnosti v ťahu odtrhávací test a epsteinov test. Tretia experimentálna časť je venovaná progresívnemu upevňovaniu magnetov v rotorových zväzkoch pomocou vstrekovania plastického materiálu. V tejto časti sa práca venuje predstaveniu strojov, ktoré tento proces sprevádzali. Materiály použité pri tomto procese boli vysokohustotný polyetylén HDPE a polypropylén PP. Pokračuje sa postupom výroby 3D vzoriek, kde budú zalísované magnety s návrhom a výrobou formy na vstrekovanie plastického materiálu. Forma bola vyrobená v externej firme Fimad, s.r.o. pre skrátenie času výroby a potreby veľmi malého priemeru nástroja na vyfrézovanie rozvádzacích kanálov, ktorý nebol na fakulte k dispozícii. Vzorky vytlačené pre potreby experimentu majú dva rozmery vreciek pre magnety. V prvom prípade sú magnety vkladané s vôľou a v druhom prípade sú magnety zalísované do vzorky

a sú vložené natesno. Dôvod tohto uloženia slúži na rozpoznanie toho, či je v tomto procese vhodnejšie jedno alebo druhé uloženie a ich vzájomné porovnanie. Na záver je popísaný proces upevňovania magnetov do vreciek na magnety pomocou vstrekovania plastického materiálu a hodnoty nastavených parametrov, pri ktorých sa tento proces uskutočnil. Výsledkom merania sú hodnoty sily F potrebnej na prvotné uvoľnenie fixovaného magnetu a jeho vytlačenie z magnetického vrečka. Tento proces prebiehal na trhacom zariadení Tinius Olsen MODEL 300ST. Vzorka sa vložila do prípravku a na magnet sa začala pôsobiť sila F . Pri každej vzorke bol vytláčaný silou F jeden malý a jeden veľký magnet. Sledoval sa grafický priebeh merania v programe Horizon a grafy boli uložené a vyhodnotené v tab. 6 a nasledovalo popísanie priebehu skúšky. Z výsledkov meraní sa dá konštatovať, že najvhodnejšie vyhotovenie magnetických vreciek je vyhotovenie, kde sú magnety uložené s vôľou. Toto uloženie poskytuje, že materiál je v magnetickom vrecku obklopený vstreknutým materiálom a spolu so zväčšujúcim objemom pri tuhnutí vstreknutého materiálu vzniká veľmi silné spojenie medzi vzorkou a fixovaným magnetom. Pri vstrekaní boli použité dva materiály a to vysokohustotný polyetylén HDPE a polypropylén PP. Pri vyhodnocovaní grafov sa ukázalo to, že materiál polypropylén PP je pre upevňovanie magnetov vhodnejší a preukazuje vyššie hodnoty sily potrebnej na prvotné uvoľnenie zafixovaného magnetu. Z týchto meraní je zrejmé, že pre proces upevňovania materiálov je najvhodnejšia alternatíva uloženie s vôľou a použitie polypropylénu ako materiálu na vstrekovanie a fixáciu vzoriek. Taktiež je možné pri upevňovaní magnetov použiť aj uloženie s vôľou a použitie materiálu vysokohustotný polyetylén HDPE, ktorého výsledky sily potrebnej na uvoľnenie magnetov by mali byť pre tento proces dostačujúce, ale stále sú podstatne menšie, ako pri materiály polypropylén PP.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

ADMET. *eXpert 7601 Adhesive and Peel Testing System*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.admet.com/testing-applications/materials/adhesives-testing-adhesion-testing/expert-7601-adhesive-and-peel-testing-system/>

AGGARWAL, A., STRANGAS, E., KARLIS, A. 2020, *Review of Segmented Stator and Rotor Design for AC Electrical Machines*, 2021. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/347294224_Review_of_Segmented_Stator_and_Rotor_Designs_for_AC_Electric_Machines

AGROAD. *Stator alternátora*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://eshop.agroad.sk/eshop-tz55280-b-stator-alternatoru.html>

ALUMECO. *Rolling direction*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.alumeco.com/knowledge-technique/general/rolling-direction/>

ANGELROLLER. *Unraveling the Importance of the 2 Types Rolling Directions of Steel Plate*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.angleroller.com/bending-of-plates/unraveling-the-importance-of-the-2-types-rolling-direction-of-steel-plate.html>

ARNOLD, CH., SCHWEYEN, R., BOECKLER, A., HEY, J. 2020. *Retention Force of Removable Partial Dentures with CAD-CAM-Fabricated Telescopic Crowns* ISBN: 13143228 Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/343092122_Retention_Force_of_Removable_Partial_Dentures_with_CAD-CAM-Fabricated_Telescopic_Crowns

ASE. *What is Stator*, [cit. 2023-11-25]. Dostupné na internete: <https://www.asemake.com/en/blog-detail/what-is-stator>

ASHLEY, C. 2022, *Advantages and disadvantages of resistance welding process*, [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://www.linkedin.com/pulse/advantages-disadvantages-resistance-welding-process-athena-chen>

AUMANN. *Hairpin stators*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.aumann.com/en/services/industry-solutions/e-mobility-automotive/electric-drive/hairpin-stators/>

AUTONATION. *What Is A Stator*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.autonationmobileservice.com/blog/what-is-a-stator/>

BECKMAN. *Blancing your rotor*, ©2000 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.beckman.com/resources/technologies/centrifugation/principles/rotor-balancing>

BILÍK, J., BAČA, J., TITTEL, V. 2010, *Technológia tvárnenia*. Bratislava: STU. ISBN 978-80-227-3242-0

CARPENTER ELECTRIFICATION. *From prototype to serial production*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.carpenterelectrification.com/stator-rotor-stacks>

CECHO. *Miniaturní vstřikovací lisy BABYPLAST*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete:

<https://www.cecho.cz/cs/babyplast#:~:text=Babyplast%206%2F12%20a%2010%2F12&text=Nejmen%C5%A1%C3%AD%20pln%C4%9B%20hydraulick%C3%BD%20vst%C5%99ikovac%C3%AD%20stroj,N%C3%ADzk%C3%A9%20po%C5%99izovac%C3%AD%20n%C3%A1klady.>

CIRCUIT DIGEST. *Types of Motors used in Electric Cars*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>

CIRCUIT GLOBE. *Differnce Between Stator and Rotor*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://circuitglobe.com/difference-between-stator-and-rotor.html>

COLLINS. *Rotor*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.collinsdictionary.com/us/dictionary/english/rotor>

COREFFICIENT. *Electrical Steel Core Testing*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://corefficientsrl.com/electrical-steel-core-testing/>

CUNJUAN, X., WANG, H., WU, Y., WANG, H. 2020. *Joining of the Laminated Electrical Steels in Motor Manufacturing: A Review* ISBN: 13204583 Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/344664111_Joining_of_the_Laminated_Electrical_Steels_in_Motor_Manufacturing_A_Review

DAILY AUTOMATION. *Valcovanie*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.dailyautomation.sk/valcovanie-uvod>

DENG, J., LI, H., ZHANG, D., CHEN, F., WANG, G., CHENG, H. 2014. *The effect of joint form and parameter values on mechanical properties of bamboo-bundle laminated veneer lumber (BLVL)*, BioRes. ISBN 6765-6777. Dostupné na internete: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-effect-of-joint-form-and-parameter-values-on-mechanical-properties-of-bamboo-bundle-laminated-veneer-lumber-blvl/>

DODD, N. 2021. *Feasility of alternative manufacturing processes for winding and stator components of electric machines*, Dostupné na internete: [https://theses.whiterose.ac.uk/29950/1/FINAL%20THESIS-%20DODD,%20NATHAN,%20160123300%20\(V.C22\).pdf](https://theses.whiterose.ac.uk/29950/1/FINAL%20THESIS-%20DODD,%20NATHAN,%20160123300%20(V.C22).pdf)

DREW, R., O'CONNOR, J., MARVIN, R., CHADWICK, E., THIBODEAU, P., WON, B. 2005. *Permanent magnet motor*. US 2005/0073210 A1, [cit. 2023-11-25] Dostupné na internete: <https://patentimages.storage.googleapis.com/2e/15/e7/c062b6a5748b79/US20050073210A1.pdf>

EASA. *Failures in Three-Phase Stator Winding*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://easa.com/resources/failures-in-three-phase-stator-windings>

EEC. *Stators*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.electronenergy.com/stators>

ELECTRICMOTORENGINEERING. *Impact on efficiency of core materials*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.electricmotorengineering.com/impact-on-efficiency-of-core-materials/>

ELMOTEC STATOMAT. *Slot Insulation production process*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.elmotec-statomat.eu/en/manufacturing-process/slot-insulation/>

ELPROCUS. *What is a Stator: Construction, Working and Its Uses*, ©2013 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.elprocus.com/what-is-a-stator-construction-working-and-its-uses/>

ELPROCUS. *What is a Stator: Construction, Working and its Uses*, ©2013 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.elprocus.com/what-is-a-stator-construction-working-and-its-uses/>

E-MOBILITY ENGINEERING. *E-motor materials*, ©2021 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.emobility-engineering.com/emotor-materials/>

ENERGY5. *An Overview on the Types of Electric Motors Used in Electric Cars*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://energy5.com/an-overview-on-the-types-of-electric-motors-used-in-electric-cars>

ENGINEERINGUPDATES. *Different Methods for Balancing Rotors*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.linkedin.com/pulse/different-methods-balancing-rotors-engineering-updates>

FEINTOOL. *Electrolamination stamping*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.feintool.com/technologies/electrolamination-stamping/>

FIMOSTEEL. *Ohýbaní plechu*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://fimosteel.cz/service/ohybani-plechu/>

FORMLABS. *High Temp Resin*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://formlabs.com/eu/store/materials/high-temp-resin/>

GAMAK: *Power to ENERGIZE Life. What Is a Rotor?*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.gamak.com/en/what-is-a-rotor>

GLOBAL SOURCES. *Customized Stamping or Linear Cutting Lamination Si Steel Motor Stator Segment*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.globalsources.com/Motor-stator/motor-stator-1190991413p.htm>

GUNTHER, B. 2003. *Process for producing bundles of laminated sheet metal for magnet cores*. US 2003/0172783 A1, [cit. 2023-11-25] Dostupné na internete: <https://patentimages.storage.googleapis.com/03/c5/6a/04edbb919c0056/US20030172783A1.pdf>

HUFNAGEL. P, SHAEFER. T. *Two - components isolation of BL Stators*. Prihl.: 26.4.2014. Udel.: 17.12.2013. Dostupné na internete: <https://patentimages.storage.googleapis.com/d1/3e/d9/3fb4bbc0675eaf/WO2014095819A2.pdf> . [cit. 28.12.2023].

HV WOODING. *Motor Lamination and Core Packs*, ©2021 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://www.hvwooding.co.uk/design-manufacturing-of-motor-laminations-core-packs/>

INDIAMART. *Iron Electrical Motor Stator Housing*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://m.indiamart.com/proddetail/electrical-motor-stator-housing-7484563230.html>

IOP CONFERENCE SERIES. *Non-Oriented Electrical Steel Sheet: The Magnetic Properties Losses on Thickness Lamination Using Epstein Tester Frame*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/864/1/012205/pdf>

IOPSCIENCE. *Investigation of microstructure and mechanical properties of copper shell produced by shear spinning in different rotation directions*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ac0923>

JUSTIA. *Electrical Isolation Mounting Of Electrical Machine Stator*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://patents.justia.com/patent/20190356191>

KEDOUS-LEBOUC, A. 2003. *Punching influence on magnetic propreties of the stator teethof an induction motor*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/243289603_Punching_influence_on_magnetic_p_properties_of_the_stator_teeth_of_an_induction_motor

KMMP. *Components for electric motors*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.kmmp.de/en/components-for-electric-motors/stator-packs/%20Vinutie%20statora>

LAMMOTOR. *Motor Laminations Welding: A Comprehensive Guide To You*, 2023 [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://lammotor.com/motor-laminations-welding/>

LAMMOTORS. *Laser Cut Electric Motor Stator Lamination In Prototype: What You Need To Know*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://lammotor.com/laser-cutting-motor-stator-lamination/>

LASERTECHNOLOGIES. *Electrical testing*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.lasertechnologiesinc.com/electrical-testing-and-inspection>

ELECTROMECH. *Contact retention*, ©2016 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://lectromec.com/test/contact-retention/>

LIU, L., LIU, L. 2018, *Analysis of interlocking performances on non-oriented electrical steels*, [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/321664027_Analysis_of_interlocking_performances_on_non-oriented_electrical_steels

- MANUEL, A. M., GUILERMO, B., DE ANGELO, CH., ESPINOZA-TREJO, D. 2015 *A new strategy for detection and isolation of stator faults in PMSM*, ©2008 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/305304942_A_new_strategy_for_detection_and_isolation_of_stator_faults_in_PMSM
- MDPI, *Research Regarding the Dimensional Precision of Electrical Steel Strips Machined by Waterjet Cutting in Multilayer Packages*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/9/2788>
- MIKRAN. *Formlabs Form Cure*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://mikran.sk/sk/id13529/Formlabs-Form-Cure-zariadenie-na-polymerizaciu-svetla>
- MUHAMAD, A. 2023. *Types of Electric Motors used in EVs* [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://www.linkedin.com/pulse/types-electric-motors-used-evs-muhammad-ahmad>
- NEUENSCHWANDER, T., WAYNE, F. 2006. *Lamination stack with center interlock*, US 6,984,913 B2, [cit. 2023-11-25] Dostupné na internete: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a6/b5/c6/02083bbbeb2231c/US6984913.pdf>
- OSWOS. *Motor Introduction*, ©2023 [cit. 2023-10-2]. Dostupné na internete: <https://oswos.com/induction-motor/%C5%88>
- PCB Stator. *PCB Stator Technology*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://pcbstator.com/pcb-stator-technology/>
- PZK. *Rotory s permanentními magnety*, ©2008 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.pzk.cz/rotory-s-permanentnimi-magnety>
- R.BOURGEOIS. *Rotor and Stator lamination assemblies*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.rbourgeois.com/products-services/rotor-and-stator-lamination-assemblies/>
- RÖSEL, U., DRUMMER, D., 2021, *Injection moulding of multipolar polymer-bonded magnets into soft magnetic inserts for rotor in reluctance motors*, [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://www.mdpi.com/2673-8724/1/1/2>
- RYDER, J., FINK, D. *Electrical and electronics engineering*, 2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.britannica.com/technology/electrical-and-electronics-engineering>
- SATRA. *Peel strength of laminated fabrics*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: https://www.satra.com/test_methods/detail.php?id=302
- SERVAX. *ASM – Asynchronous Motors*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://www.servax.com/en/15/technology/asm-asynchronous-motors.html>
- SHARKH, S.M., LAI, S.H. 2009 *Design Optimization of a Slotless PM Brushless Motor with Helical Edge Wound Laminations for Rim Driven Thrusters*. In: *Thruster High Technology*. S. 1 – 10. Dostupné na internete: <https://core.ac.uk/download/pdf/25791.pdf>

SUPPORTFORMLABS. *Cleaning and maintaining the Form Wash*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: https://support.formlabs.com/s/article/Cleaning-and-maintaining-the-Form-Wash?language=en_US

SWD. *Segmentation of asynchronous motor*, 2021 [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://www.swd-technology.com/en/asyn-motor/>

SWD. *Segmentation*, ©2024 [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://www.swd-technology.com/en/produkte/segmentierung/>

TANG, Z., ZHANG, X., WAN, L., OUYANG, Y. 2023, *Blue laser welding of laminated electrical steels: Dynamic process, weld bead characteristics, mechanical and magnetic properties*, Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/366851652_Blue_laser_welding_of_laminated_electrical_steels_dynamic_process_weld_bead_characteristics_mechanical_and_magnetic_properties

TEKFOR. *Rotor Shaft*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://tekfor.com/rotor-shaft/>

TEPROSA. *Functionality, structure and differences of rotors and stators*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.teprosa.de/en/rotor-stator-electric-motor/>

TEPROSA. *Rotor and stator in electric moto*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.teprosa.de/en/rotor-stator-electric-motor/>

TESTRESOURCES. *Tensile Testing*, ©2023 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.testresources.net/applications/test-types/tensile-test>

THE LIBRARY OF MANUFACTURING. *Metal Rolling*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://thelibraryofmanufacturing.com/index.html>

THYSSENKRUPP. *The perfect (rotor) shaft*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.thyssenkrupp.com/en/stories/automotive-and-new-mobility/the-perfect-rotor-shaft>

TINIUSOLSEN. *Tinius Olsen MODEL 300ST*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.tiniusolsen.com/product/model-300st/>

TLC. *What Are Stator Core Laminations*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.tlclam.net/what-are-stator-core-laminations/>

TREATSTOCK. *Formlabs Form 2*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.treatstock.com/machines/item/120-form-2>

VAC. *Lamination Stacks*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://vacuumschmelze.com/products/soft-magnetic-materials-and-stamped-parts/lamination-stacks>

VOESTALPINE. *Backlack – the joining technology for perfect lamination stacks*, ©2023 [cit. 2024-3-1]. Dostupné na internete: <https://www.voestalpine.com/isovac/en/Media-center/News/Backlack-the-joining-technology-for-perfect-lamination-stacks>

VYBO INDUSTRIAL GEARS. *Elektromotory popis*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://www.elektromotory-prevodovky.sk/elektromotory-popis/>

WEISS. *Stacking of Sheet Bundles*, ©2023 [cit. 2023-12-28]. Dostupné na internete: <https://www.weiss-world.com/de-en/application/stacking-of-sheet-bundles-10584>

WEISSER. *Rotor Shafts*, ©2023 [cit. 2023-25-11]. Dostupné na internete: <https://www.weisser-web.com/en/rotor-shafts/>

WF. *Rotor shafts – one-piece type*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://wf-maschinenbau.com/en/end-products-overview/components-for-e-drive-systems/rotor-shafts/>

WIRTH, H. 1986. *Method of making a stack of electrical sheet-metal lamellae with aligned winding slots, particularly armatures for dynamo electric machines*. US 4,578,853, [cit. 2023-11-25] Dostupné na internete: <https://patentimages.storage.googleapis.com/3e/9e/83/4ab6b1cb03ba22/US4578853.pdf>

XOMETRY. *Peel Tester: How Does It Work, How To Test, and Technical Requirements*, ©2024 [cit. 2023-04-17]. Dostupné na internete: <https://www.xometry.com/resources/materials/peel-tester/>

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Čestne vyhlasujem, že predložená diplomová práca s názvom Progresívne metódy výroby statorových a rotorových zväzkov laminačných platní v elektromotoroch so zameraním na upevnenie magnetov, je výlučne mojím vlastným dielom. Všetky použité zdroje, informácie a názory iných autorov, ktoré boli v práci využité sú riadne citované a odkázané v zozname literatúry.

V Trnave 19.4.2024

.....

Bc. František Beňo

PRÍLOHY