



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KLUZNÉ POVLAKY VE VESMÍRNÝCH APLIKACÍCH

SLIDING COATINGS FOR SPACE APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Homola

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. David Homola**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kluzné povlaky ve vesmírných aplikacích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Materiály používané v satelitech a sondách mají přirozeně velmi špatné tribologické vlastnosti a pro správnou funkci v mechanismech je třeba je ošetřit kluznými povlaky. Chování povlaků v prostředí vesmíru, stejně jako jejich správná aplikace je ovšem velmi komplikované. Pokud povlak při provozu zařízení ve vesmíru selže, může to mít fatální vliv na osud mise či satelitu.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vytvořit metodiku nanášení maziv na strojní díly v definovaných parametrech.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout a sestavit koncepční zařízení pro nanášení maziv,
- testování procesu nanášení na rovinném vzorku,
- tribologické testy nanášené vrstvy, optimalizace vlastností,
- tvorba metodiky nanášení na reálné díly nástřikem v rotujícím bubnu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

ZARETSKY, E. V. Liquid lubrication in space. Tribology International [online]. 1990, 75-93.

JONES, W. R. a M. J. JANSEN. Tribology for space applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2008, 222(8), 997-1004. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET305.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh metodiky a vývoj zařízení pro automatizovanou aplikaci kluzných laků na bázi disulfidu molybdeničitého (MoS_2) na titanové šrouby určené pro použití v kosmickém prostředí. V rámci řešení byly provedeny experimenty zaměřené na testování procesu nanášení povlaku na rovinné vzorky a tribologické zkoušky za účelem stanovení optimální tloušťky povlaku. Byla identifikována kritická mezní tloušťka $20\ \mu\text{m}$, jejímž překročením dochází k výraznému nárůstu součinitele tření. Získané poznatky byly využity k návrhu koncepčního zařízení využívajícího technologii rotačního bubnu. Optimalizací koncepčního zařízení a parametrů aplikace se podařilo dosáhnout přesnosti tloušťky povlaku 20 % a chyby opakovatelnosti procesu 5 %. Zároveň bylo dosaženo minimální tloušťky $2\ \mu\text{m}$ při zachování požadavků na homogenní pokrytí a adhezi. V práci jsou dále diskutovány klíčové technologické parametry ovlivňující přesnost a opakovatelnost aplikace, čímž práce přispívá k efektivnímu návrhu budoucího průmyslového zařízení pro aplikaci těchto povlaků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Disulfid Molybdenu, kluzný lak, tloušťka povlaku, nástřik v bubnu, nanášení povlaku na malé součásti

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the development of a methodology and the design of a device for the automated application of molybdenum disulfide (MoS_2)-based dry lubricants onto titanium screws intended for use in space environments. The research involved experiments aimed at testing the coating process on flat samples and conducting tribological tests to determine the optimal coating thickness. A critical threshold thickness of $20\ \mu\text{m}$ was identified, beyond which a significant increase in the coefficient of friction occurs. The findings were used to design a conceptual device based on rotary drum technology. Through optimization of the device concept and application parameters, a coating thickness accuracy of 20 % and process repeatability error of 5 % were achieved. Additionally, a minimum coating thickness of $2\ \mu\text{m}$ was reached while maintaining requirements for homogeneous coverage and adhesion. The thesis further discusses key technological parameters influencing the accuracy and repeatability of the application process, thereby contributing to the effective design of future industrial equipment for the application of these coatings.

KEYWORDS

Molybdenum disulfide, resin-bonded coatings, coating thickness, pan coating, small parts coating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOMOLA, David. *Kluzné povlaky ve vesmírných aplikacích*. Online, diplomová práce. David KOŠTÁL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165643>. [cit. 2025-05-10].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D., za jeho cenné rady a podnětné připomínky. Poděkování patří také Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., za zpřístupnění laboratoře, ve které probíhalo často náročné testování procesu nanášení. Velké díky náleží rovněž všem spolužákům a pracovníkům Ústavu konstruování, kteří byli vždy ochotní pomoci a poradit při překonávání mnoha úskalí spojených s řešením této diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří mé ženě Elišce za její víru ve mne a neochvějnou podporu po celou dobu mého studia na VUT.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1	Rešeršní metody	13
2.2	Kritická rešerše	15
2.2.1	Tuhá maziva na bázi MoS ₂	15
2.2.2	Kluzné laky	16
2.2.3	Chování povlaků vázaných pryskyřicí	18
2.2.4	Tloušťka povlaku	21
2.3	Specifikace zákazníka, produktu a požadavků.	23
2.3.1	Požadavky zákazníka	23
2.3.2	Specifikace kluzného laku	24
2.3.3	Normativní požadavky na aplikaci povlaku	25
2.4	Rešerše na stav techniky	26
2.4.1	Nástřik v bubnu	26
2.4.2	Povlakované díly a vlastnosti povlaku	28
2.4.3	Povlakovací zařízení	30
2.4.4	Aplikace povlaku a termodynamické faktory	32
2.4.5	Komerční zařízení	35
2.5	Shrnutí hlavních zjištění	38
2.6	Identifikace novosti a příležitostí	40
3	CÍL PRÁCE	41
3.1	Analýza problému	41
3.2	Cíl práce	42
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	43
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	43
4.2	Technická funkční analýza	45
4.3	Návrh alternativních přístupů k řešení	46
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	48
5.1	Testování procesu nanášení	48
5.1.1	Zařízení a metody	48
5.1.2	Matematický model depozice povlaku	50

5.1.3	Výsledky	52
5.2	Testování povlaku	53
5.2.1	Testování v atmosférických podmínkách	53
5.3	Předběžný návrh metodiky aplikace	57
5.3.1	Předběžný návrh povlakovacího bubnu	58
6	DETAILNÍ NÁVRH	60
6.1	Konstrukční návrh prototypového zařízení	60
6.1.1	Povlakovací buben	60
6.1.2	Aplikační zařízení	63
6.2	Testování procesu míchání	64
6.2.1	Úhel náklonu bubnu	65
6.2.2	Konfigurace povlakovacího bubnu	66
6.3	Testování procesu nanášení	69
6.3.1	Metody	69
6.3.2	Výsledky	73
6.4	Diskuse	77
6.4.1	Proces povlakování v bubnu	77
6.4.2	Hodnocení klíčových parametrů	80
7	ZÁVĚR	82
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU DLE RIV	84
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	88
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	92
10.1	Seznam použitých zkratk	92
10.2	Seznam použitých symbolů a veličin	92
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	94
12	SEZNAM TABULEK	97
13	SEZNAM PŘÍLOH	98

1 ÚVOD

Materiály používané v satelitech a sondách mají přirozeně velmi špatné tribologické vlastnosti a je třeba je ošetřit kluznými povlaky. To platí nejen pro kontaktní plochy uložení, ale také například pro šroubové spoje. Zde může dojít k vyčerpání předepsaného utahovacího momentu na překonání tření v závitech. Takovýto spoj je pak nefunkční a může vést ke snížení životnosti nebo dokonce k poškození dalších strojních součástí. To může mít fatální vliv na osud mise či satelitu. Z těchto důvodů jsou na testování kluzných povlaků kladeny vysoké nároky a je nezbytné zajistit, aby splňovaly požadované parametry. Pokud nedojde k jejich dosažení, nelze navíc často tento postup na vybranou součást opakovat a dojde tak k jejímu znehodnocení.

Možným řešením je využití kluzných laků na bázi disulfidu molybdenu. Ty dosahují výborných třecích vlastností v oblasti velice nízkých tlaků a extrémních teplot, které jsou charakteristické pro prostředí vesmíru. Chování těchto povlaků je však silně závislé na tloušťce povlaku a správné aplikaci. Tato schopnost dosud v České republice není k dispozici, přestože se jedná o klíčové procesy, které je nutné nyní zabezpečovat nákupem v zahraničí. Vyvinutí metodiky a zařízení pro správnou aplikaci těchto povlaků by dokázalo výrazně snížit celkové náklady a zvýšit spolehlivost jednotlivých komponent.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metodiky a koncepčního zařízení pro aplikaci kluzných laků na bázi disulfidu molybdenu na titanové šrouby. Za tímto účelem je v práci provedena systematická rešerše zaměřená na chování těchto povlaků, možnosti jejich zpracování a komerčně dostupná zařízení. Na základě zjištěných informací je následně provedeno testování těchto povlaků, navržena metodika jejich aplikace a zkonstruováno koncepční zařízení pro jejich nanášení. To je dále testováno a optimalizováno s cílem dosáhnout co nejlepších výsledných vlastností povlakovaných dílů. Výsledky této práce slouží jako podklad pro návrh technologie, kterou bude možné dále rozvíjet a implementovat do průmyslového prostředí.

Zákazníkem vyvíjené technologie je firma Frentech aerospace s.r.o., která se specializuje na vývoj a výrobu vesmírných mechanismů. Zařízení je vyvíjeno ve spolupráci s výzkumnou skupinou odboru tribologie Ústavu konstruování v rámci projektu TAČR.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Pro získání dostatečného počtu validních informací pro návrh metodiky, která by umožnila správnou aplikaci kluzných povlaků MoS₂ bylo nutné nejprve provést systematickou rešerši. Cílem této rešerše bylo nalézt optimální tloušťku kluzného povlaku a především metody, jak jí lze dosáhnout. Na základě výsledků z této rešerše pak budeme schopni návrhu metodiky pro přesnou, říditelnou a opakovatelnou aplikaci povlaků, které budou dosahovat nejlepších tribologických vlastností.

Pro zjištění požadovaných informací bylo nejprve nutné sestavit vhodné výzkumné otázky. Zpřesnění a správná formulace dotazů nám pomůže získat nejdůležitější informace k určení potřebných parametrů a možností námi navrhovaného koncepčního zařízení. Výsledné otázky, spolu se stručným komentářem, byly formulovány takto:

a) *Jaký bude vliv tloušťky kluzného povlaku na výsledné tribologické vlastnosti?*

Tloušťka filmu má značný vliv na životnost, koeficient tření a antikorozi vlastnosti. Stanovení rozmezí pro optimální tloušťku vrstvy povede ke snížení potřebných testů k jejímu určení.

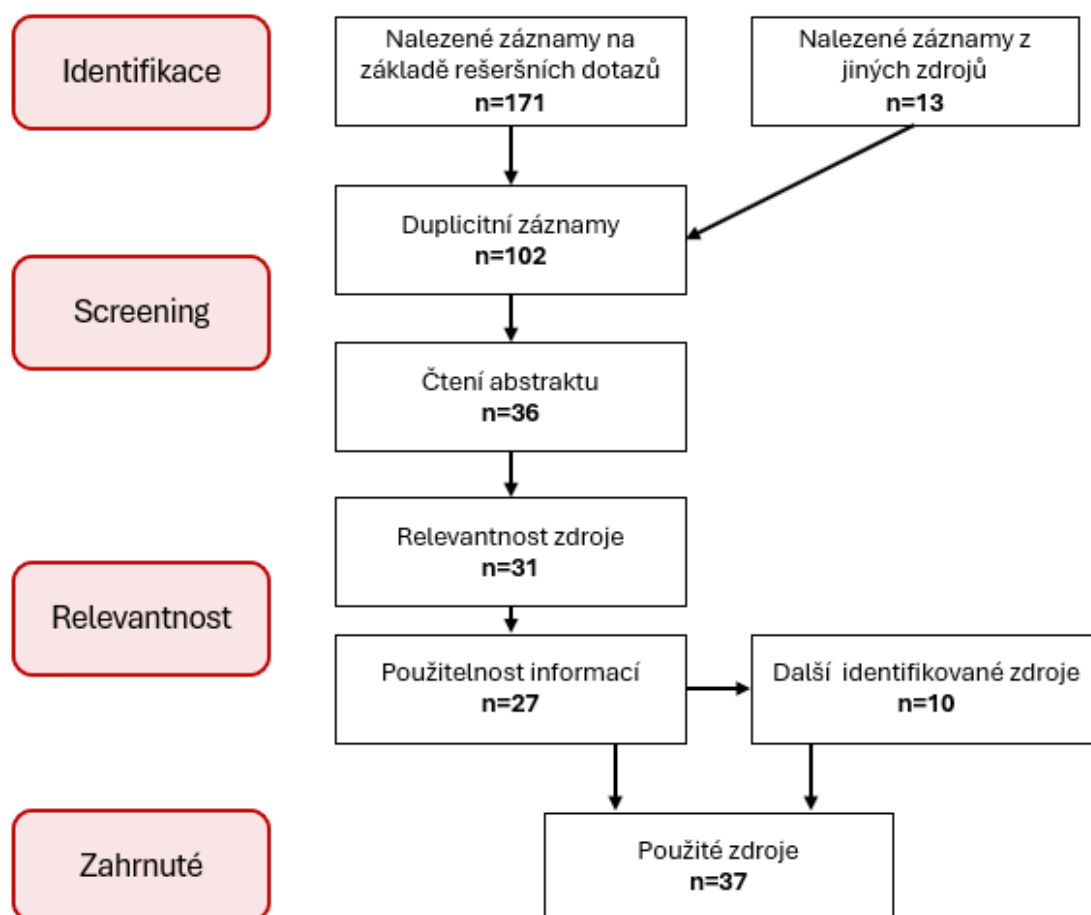
b) *Jaké jsou dosavadní způsoby aplikace kluzných povlaků na bázi MoS₂ metodou resin bonded coating?*

Aplikaci kluzných laků lze rozdělit do tří základních skupin, a to máčení, nátěru a nástřiku. Určením a porovnáním specifických způsobů aplikace se blíže přiblížíme možnému koncepčnímu řešení.

c) *Jaký je vliv procesních parametrů a vlastností laku na výslednou tloušťku povlaku?*

Vlastnosti laků, jako například jejich viskozita nebo hustota, budou ovlivňovat maximální a minimální možnou dosažitelnou tloušťku povlaku. Určením vlivu těchto vlastností a vlivu jednotlivých parametrů pro specifické procesy, tak budeme schopni návrhu metodiky pro dosažení požadované tloušťky kluzného povlaku.

Z položených otázek byla vybrána klíčová slova, která posloužila k vytvoření rešeršních dotazů pomocí Booleovských operátorů. Tyto dotazy sloužili pro vyhledání článku s danou tématikou na webových stránkách Web of Science, Scopus a Scholar. Dotazy byly následně iteračně přepracovány pro dosažení přijatelného počtu publikací, které byly následně rozříděny na základě spojitosti s danou problematikou a relevantnosti. Dále byly tyto zdroje rozšířeny o navazující články, patentovou rešerši a průzkumem trhu. Tento postup je zobrazen v PRISMA diagramu.

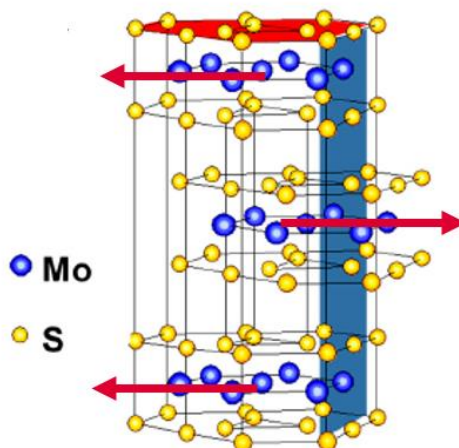


Obr. 2-1 PRISMA diagram

2.2 Kritická rešerše

2.2.1 Tuhá maziva na bázi MoS₂

Tuhá maziva na bázi MoS₂ predstavujú spolu s grafitom neznámější pevná maziva. Obdobně jako u grafitu, i zde dochází k snížení tření pomocí slabé Van der Walsovy vazby mezi jednotlivými rovina, jak můžeme vidět na Obr. 2-2.


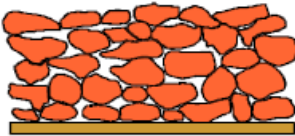
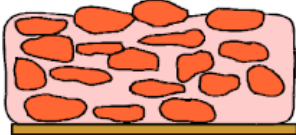


Obr. 2-2 Schématické znázornění skluzu rovin MoS₂. ([2], upraveno)

Narozdíl od něj však dosahuje vyšší zatížitelnosti a lepších třecích vlastností v prostředí vakua, protože není závislý na absorpci vlhkosti. [1] Ta zde naopak vede k mírnému zvýšení tření. Kondenzace vlhkosti se fyzicky váže na povrch a brání mezilamelárnímu smyku.[2] Významnou roli také hraje oxidace povlaku, které bude věnována pozornost dále v textu. V okolní atmosféře je tak MoS₂ díky ní tepelně stabilní pouze do teplot okolo 400 °C. V neoxidačním prostředí dosahuje tepelné stability až okolo 1100 °C. [1]

Nejběžnější způsoby pro povlakování součástí tuhými mazivy MoS₂ a jejich použití můžeme vidět v Tab. 2-1. Naprašovaná povlaky (PVD) a kluzné laky jsou taktéž doporučenými a nejběžnějšími metodami pro mazání šroubových spojů pro vesmírné aplikace.[3] V rámci řešení zadané problematiky se však budeme zabývat pouze metodou kluzných laků neboli metodou resin-bonded coatings.

Tab. 2-1 Typy povlaků MoS₂.([3], upraveno)

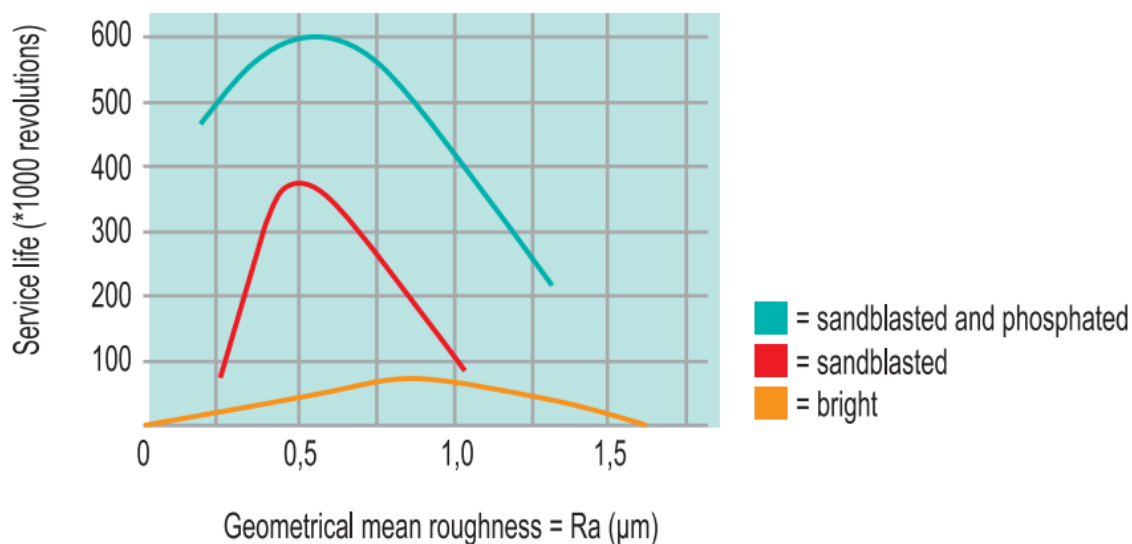
Typ povlaku	Tloušťka filmu	Schématické zobrazení	Oblast použití
Sputtered (PVD)	1 ± 0,1 μm		Přesné součásti
Burnished	10 ± 5 μm		Velice nízké zatížení
Resin-bonded	15 ± 10 μm		Součásti s nižšími nároky na přesnost

2.2.2 Kluzné laky

Jedná se o povlaky, ve kterých jsou částice MoS₂ připojeny k substrátu pomocí pojivových materiálů. Tyto částice se obecně s pojivem suspendují v rozpouštědle a výsledná disperze se následně nanáší na povrch substrátu nástřikem, máčením nebo natíráním.[3] Lze ale také požit metody sítotisku, rotačního povlakování (Coil-Coating) nebo kombinaci máčení a odstředění.[4] Optimální poměr maziva k pojivu se pohybuje v rozmezí 1:1 až 4:1, protože většina pojiv obvykle vykazuje horší třecí vlastnosti. Vyšší poměr maziva tedy dosahuje lepších třecích vlastností, zatímco nižší poměry zvyšují životnost mazacího filmu. Pro tyto účely však mohou být součástí kluzných laků aditivní přísady, které navíc často slouží k antikorozi ochraně substrátu.[1]

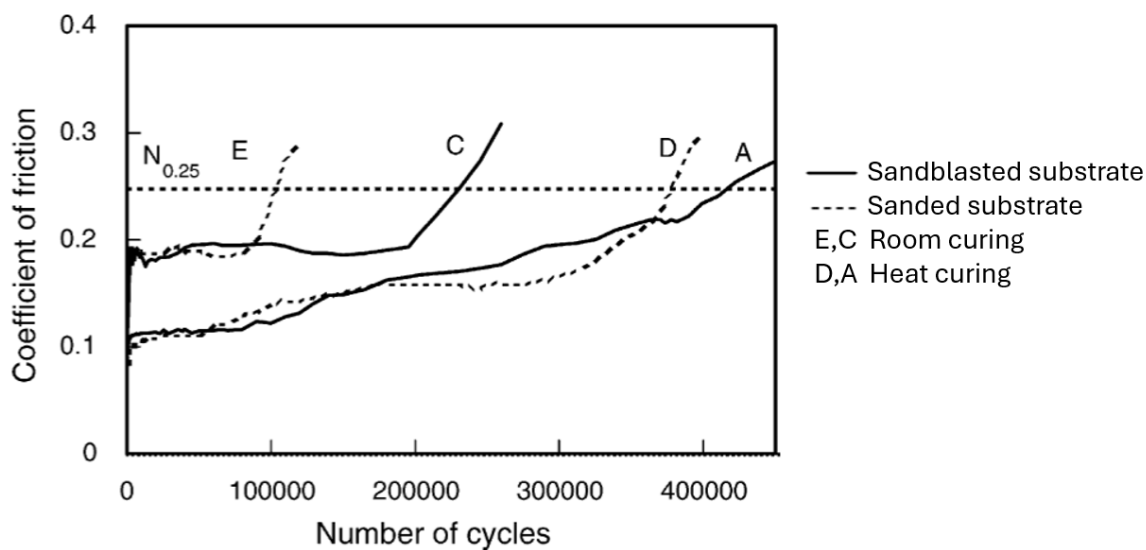
Povlaky využívající celulózové a akrylové pryskyřice jako pojivový materiál lze aplikovat bez nutnosti dalších operací, protože jsou vytvrditelné již za pokojové teploty [3]. Ty však obecně vykazují nižší životnost než pojiva termosetových pryskyřic, které je nutné vytvrdit za vyšších teplot [1][2]. Správná teplota a doba vytvrzování bude mít zásadní vliv na životnost a adhezi povlaku. Navíc je nutné dbát na to, aby tato teplota neměla negativní vliv na vlastnosti substrátu.[2]

Přestože využití kluzných laků představuje relativně nenáročnou metodu aplikace, v některých případech může vyžadovat rozsáhlé předběžné úpravy povrchu, jako je například tryskání nebo fosfátování, pro zajištění přilnavosti kluzného povlaku [1][3][2]. Právě drsnost povrchu substrátu a jeho chemická úprava může mít zásadní vliv na výsledné vlastnosti [2].



Obr. 2-3 Závislost životnosti povlaku na drsnosti a úpravě povrchu.[4]

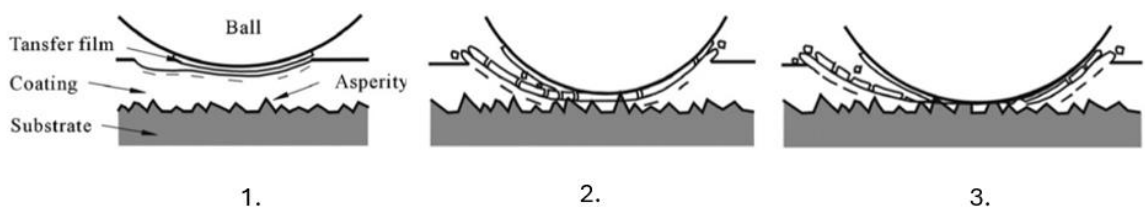
Vliv úpravy povrchu na životnost povlaku můžeme vidět na Obr. 2-3. Na Obr. 2-4 pak můžeme vidět výsledky testů na frettingové opotřebení, a to pro pískovaný povrch s drsností povrchu $R_a 2 \pm 0,2$ a broušený povrch s drsností povrchu $R_a 0,5$. I v tomto případě dosahují pískované povrchy lepších vlastností. Ty jsou ale připisovány drsnosti povrchu, která zvýšila adhezi povlaku a současně sloužila jako zásobník tuhého maziva. Při opotřebení povlaku tak stále docházelo ke snížení součinitele tření.[5]



Obr. 2-4 Závislost součinitele tření na počtu cyklů. [5]

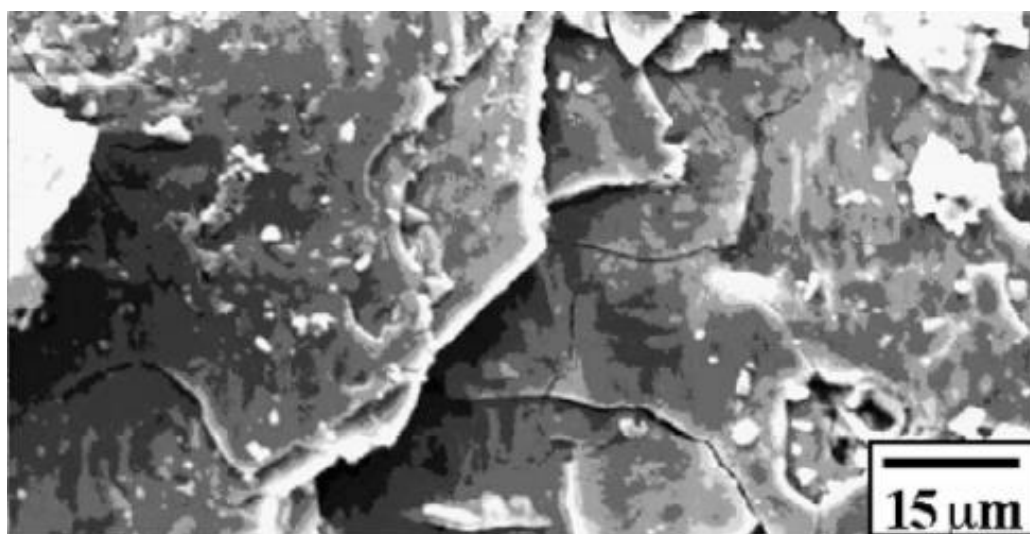
2.2.3 Chování povlaků vázaných pryskyřicí

Nezávisle na složení povlaku lze jejich opotřebení rozdělit do tří fází. V první fázi jsou povlaky dostatečně tlusté a dochází k jejich plastické deformaci. Dochází zde k redistribuci částic maziva a vytvoření kontinuální vrstvy. Vyhlazují se nerovnosti povlaku a snižuje se součinitel tření, až dosáhne konstantní hodnoty. Tato fáze bývá také nazývána fází záběhu povlaku.[6]



Obr. 2-5 Schématické znázornění jednotlivých fází opotřebení povlaku. ([6], upraveno)

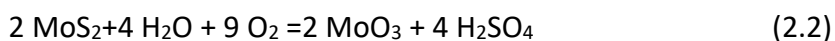
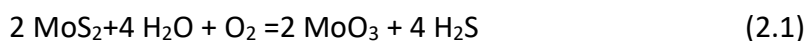
Při vyčerpání této vrstvy nastává fáze druhá. Ve druhé fázi může dojít ke značným změnám ve složení a struktuře maziv v důsledku mechanického působení a třecího ohřevu, jako je oxidace MoS_2 na MoO_3 . To vede k dalšímu nárůstu teploty a součinitele tření, doprovázené vznikem trhlin v povlaku.[6]



Obr. 2-6 SEM snímek poškozeného povlaku. [6]

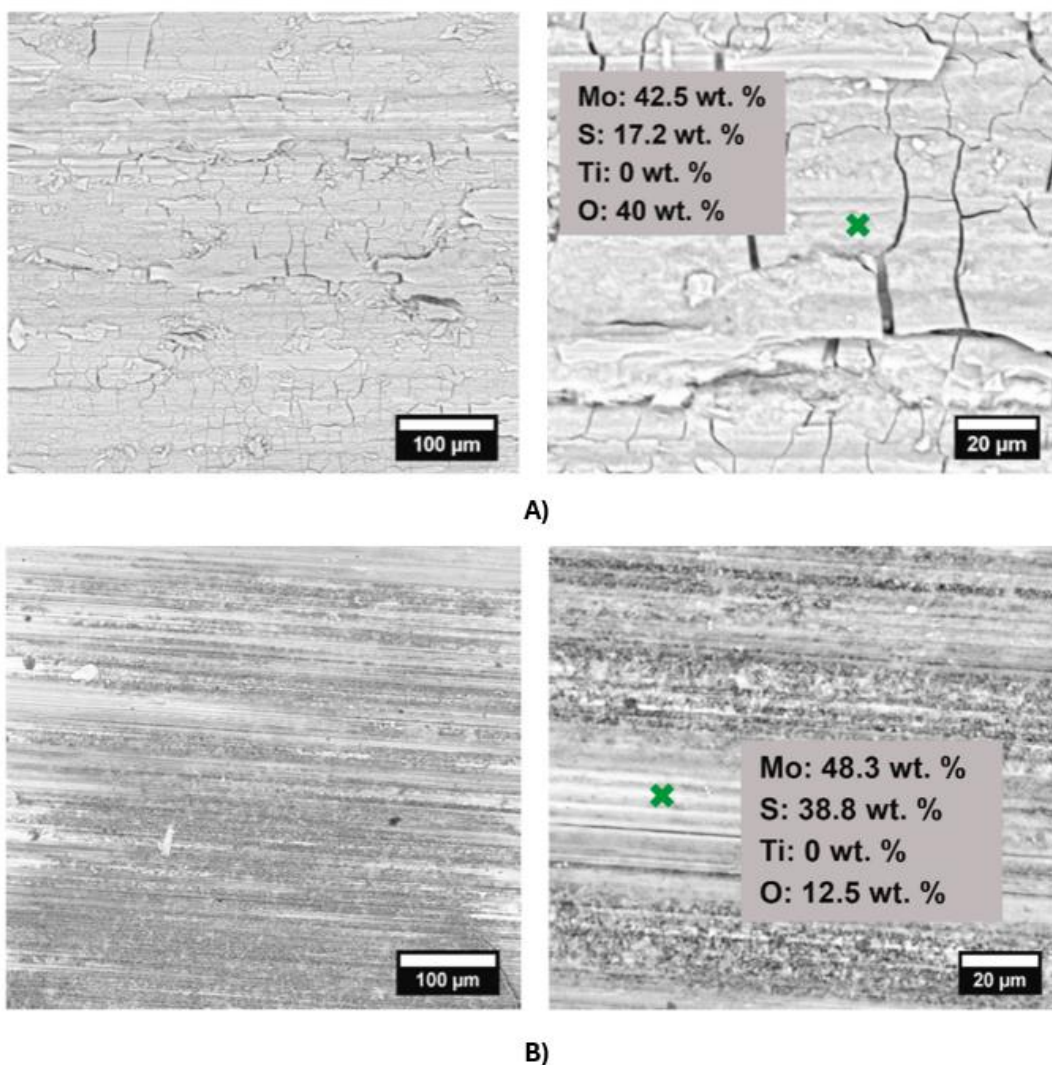
Význam třecího ohřevu byl řešen v práci *Evaluation of the wear life of MoS₂-bonded-films in tribo-testers with different contact configuration*. Zde byla životnost povlaku hodnocena v konfiguracích block-on-ring (ASTM D 2714) a pin-and-V-block (ASTM D 2625). Zatímco v testu ring-on-block docházelo k opotřebení vrstev převážně vlivem únavy materiálu, v testu pin-and-V-block selhaly vrstvy především vlivem oxidace způsobené vyšší povrchovou teplotou. Je však nutné poznamenat, že i přestože byly v testu ring-on-block upraveny podmínky, aby se povrchová teplota a kontaktní tlak co nejvíce podobaly testu pin-and-V-block, životnost vrstev maziv s MoS₂ se mezi těmito dvěma metodami stále lišila. Z toho vyplývá, že pouze samotná degradace povlaku nehraje primární roli v určování životnosti povlaku.[7]

Produkce MoO₃, jak můžeme vidět v rov. 2.1 a rov. 2.2, nezpůsobuje pouze degradaci povlaku, ale snižuje jeho tribologickou výkonnost kvůli své abrazivní povaze[8]. Nicméně často bývá jeho vliv označován za bezvýznamný, především oproti možné přítomnosti jiných nečistot [1]. Současně při vyšších teplotách, obvykle nad 500 °C, dosahuje MoO₃ výborných třecích vlastností díky přechodu z křehkého do tažného stavu. To umožňuje využití MoO₃ jako maziva pro vysokoteplotní aplikace.[8]



Dalšími vedlejšími produkty reakce je H₂S (rov. 2.1) nebo H₂SO₄ (rov. 2.2). Produkce H₂S nemá přímý vliv na kluzné vlastnosti povlaku. V přítomnosti se stříbrem však může vést ke vzniku Ag₂S, které způsobuje při provozu elektrický šum. Produkce H₂SO₄ je problematictější, protože přímo přispívá k další oxidaci povlaku a je odpovědná za nadměrnou korozi ocelových substrátů.[8]

Je však nutné připomenout, že degradace maziva a s ním spojený mechanismus opotřebení ve formě prasklin a puchýřů, je výsledkem provozu povlaku v atmosférických podmínkách. K tomuto mechanismu opotřebení nastává i v případě nízké vlhkosti vzduchu, zatímco při provozování povlaku v prostředí argonu dochází k zcela jinému mechanismu opotřebení, jak můžeme vidět na Obr. 2-7. Jiný mechanismus opotřebení byl pozorován také v případě provozu povlaku v atmosférických podmínkách s vysokým obsahem vlhkosti vzduchu. [9] Nicméně s ohledem na analýzu složení opotřebovaného povlaku lze předpokládat, že zde již došlo úplnému opotřebování povlaku a tím k odstranění charakteristické struktury opotřebování. Poslední, tedy třetí fáze nastává při dosažení kritické hodnoty součinitele tření. Během této fáze povlak již zcela ztrácí svůj mazací účinek [6].

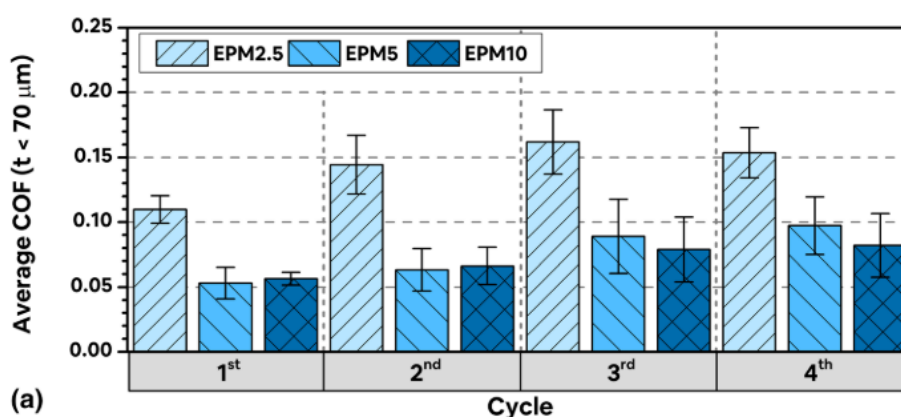


Obr. 2-7 SEM snímek opotřebovaného povrchu povlaku po provozu v různých prostředích: A) vzduch, B) argon. Relativní vlhkost prostředí 0,5–3 ±3 % RH. ([9], upraveno)

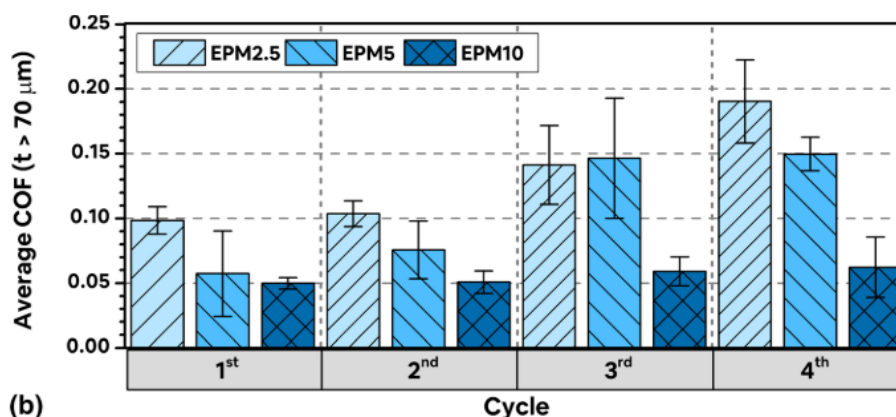
2.2.4 Tloušťka povlaku

Tloušťka vrstvy kluzného povlaku má značný vliv na životnost, součinitel tření a antikorozi vlastnosti povlaků. Doporučená tloušťka povlaku se pohybuje okolo 5 μm až 20 μm . Současně by měl být splněn předpoklad, že tloušťka vrstvy je vyšší než drsnost povrchu ošetřené plochy. Nejvhodnějším přístupem je aplikace co nejtenčí možné vrstvy pro oba kontaktní povrchy než silnější vrstvy pouze na jedné z ploch. Takovéto povlaky mají vyšší mechanickou zatížitelnost.[4] Tato doporučení přímo uvádí jeden z předních výrobců kluzných povlaků.

Vliv tloušťky kluzného povlaku na součinitel tření můžeme vidět na Obr. 2-8 a Obr. 2-9. V tomto případě byla povlakem ošetřena pouze jedna z kontaktních ploch, a to deska při testování opotřebení v konfiguraci block-on-ring. Výsledky byly rozděleny do dvou intervalů pro tloušťky kluzného povlaku 20 μm až 70 μm (Obr. 2-8) a 70 μm až 120 μm (Obr. 2-9). Současně jsou výsledky rozděleny dle hmotnostního podílu MoS_2 v povlaku a zátěžného cyklu.[10]



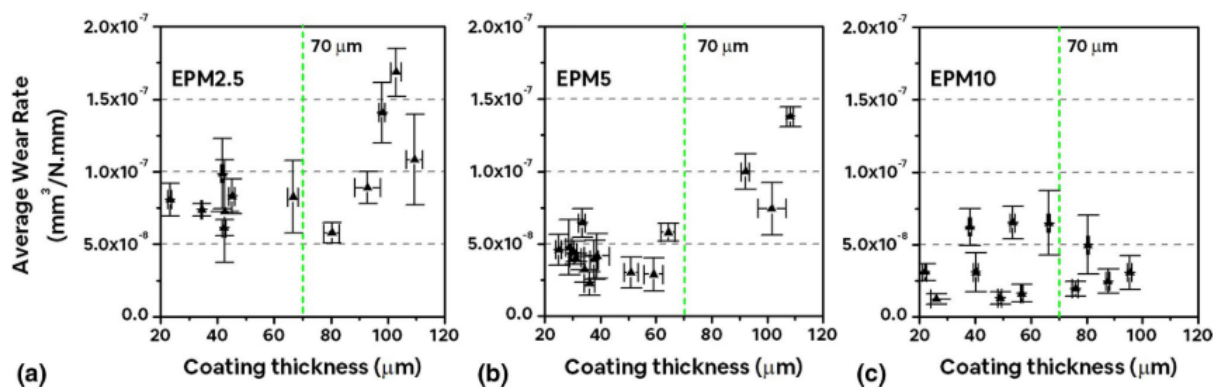
Obr. 2-8 Vývoj součinitele tření u povlaků s tloušťkou <70 μm .



Obr. 2-9 Vývoj součinitele tření u povlaků s tloušťkou >70 μm .

Pro povlaky spadající do druhého intervalu, tedy s tloušťkou vyšší než 70 μm je průměrná hodnota součinitele tření nižší a stabilnější pro všechna testovaná složení. I zde však docházelo stejně jako u tloušťky povlaku nižší než 70 μm k nárůstu součinitele tření pro každý následující cyklus zatěžování. To je vysvětleno relativně rychlým opotřebením povlaku, především pro povlaky s nižším podílem MoS_2 . Vyšší tloušťky tedy samy o sobě nezaručují nižší součinitel tření. Naopak, povlaky obsahující 10 % hmotnostního podílu MoS_2 (EPM10) byly účinnější při snižování tření a vykazovaly menší závislost na tloušťce.[10]

Současně byl v této práci řešen vliv tloušťky kluzného povlaku na jeho opotřebení. Obr. 2-10 znázorňuje míru opotřebení jako funkci tloušťky povlaku. Povlaky obsahující 2,5 a 5 hmotnostních procent MoS_2 (EPM 2.5 a EPM5) vykazovaly jistou závislost opotřebení na tloušťce povlaku. V případě, že tloušťka povlaku překročila 70 μm , průměrná rychlost opotřebení lineárně narůstala s tloušťkou povlaku. Povlaky obsahující 10 hmotnostních procent MoS_2 vykazovali nejnížší míru opotřebení a současně nevykazovali žádnou závislost na tloušťce vrstvy.[10]



Obr. 2-10 Závislost průměrné míry opotřebení na tloušťce povlaku pro povlaky obsahující: a) 2,5 hm.% MoS_2 , b) 5 hm.% MoS_2 , c) 10 hm.% MoS_2 .

Toto chování odpovídá poznatkům dle Rabinowitze. Ten zkoumal vliv tloušťky povlaku na součinitel tření a míru opotřebení v konfiguraci pin on plate. Zjistil, že tyto povlaky vykazují konstantní tření a opotřebení až do dosažení kritické tloušťky povlaku, kterou definuje jako 1/3 průměrné velikosti opotřebovaných částic.[11] Tuto hodnotu lze určit experimentálně nebo výpočtem podle vztahu:

$$h_c = \frac{d_L}{3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{60\,000 \cdot W_{ab}}{p} \quad (2.3)$$

Kde d_L je průměrná velikost částice opotřebení, W_{ab} je adhezní energie a p je velikost zatížení.

Při překonání této hodnoty dochází k nestabilnímu nárůstu součinitele tření a opotřebení. Podobný jev můžeme vidět na Obr. 2-10 pro povlaky obsahující méně než 10 hmotnostních procent MoS₂. Podle Rabinowicze je tento jev vysvětlen tím, že pokud tloušťka vrstvy přesáhne 1/3 velikosti opotřebovaných částic, dochází k jejich snazší tvorbě přímo v povlaku namísto na jeho rozhraní. Tyto větší částice opotřebení se následně dostávají mezi kontaktní plochy a přispívají ke zvýšení součinitele tření.[11]

Jiný jev pozoroval Finken, který se zabýval tvorbou a ověřením výpočtového modelu chování povlaků. Podle jeho modelu je součinitel tření přímo úměrný druhé odmocnině tloušťky vrstvy, což potvrzují experimentální data. Dále jeho teorie uvádí, že součinitel tření je nepřímo úměrný druhé odmocnině zatížení.[12] Na základě vstupních materiálových vlastností povlaku a substrátu by tak bylo možné optimalizovat tloušťku povlaku na základě zatížení povlaku. To by mohlo vést k lepší regulaci tření a opotřebení v daných provozních podmínkách.

2.3 Specifikace zákazníka, produktu a požadavků.

Zákazníkem vyvíjené technologie je firma Frentech aerospace s.r.o. Ta se zaměřuje zejména na dodávky space mechanismů, u kterých zajišťuje výrobu dílů, montáž a testování. Zařízení je vyvíjeno ve spolupráci s výzkumnou skupinou odboru tribologie Ústavu konstruování v rámci projektu TAČR (Identifikační kód: FW06010110) s názvem *Automatické nanášení speciálních maziv na tribologické komponenty vesmírných mechanismů*.

2.3.1 Požadavky zákazníka

Hlavním požadavkem zákazníka je vývoj procesu pro aplikaci kluzného povlaku metodou resin-bonded coatings na specifikované součásti pomocí nástřiku. Dalším požadavkem je automatizace tohoto procesu tak, aby byla zajištěna jeho opakovatelnost a byla zvýšena produktivita práce.

Zákazníkem specifikovaný kluzný lak bude aplikován na titanové šrouby v definovaných rozměrech. Podmínkou je aplikace kluzného povlaku na celou plochu šroubu. Absence povlaku je povolena pouze v hlavě šroubu. Minimální kapacita procesu je definována jako 50 kusů. Maximální předpokládaná kapacita je 200 kusů. Výsledný produkt poté musí splňovat požadavky na homogenní pokrytí, adhezi povlaku a snížení součinitele tření v požadovaném intervalu hodnot. ¹

¹ Konkrétní hodnoty nejsou součástí této práce. Předmět obchodního tajemství podle par.17-20 obch. Zákoníku.

2.3.2 Specifikace kluzného laku

Zákazníkem specifikovaný kluzný lak je komerční kluzný povlak Molykote. Pro tento kluzný povlak výrobce přímo doporučuje způsoby aplikace. Nejvýhodnějším způsobem aplikace je využití automatického nástřiku. Lak je ale také dobře zpracovatelný například natíráním, máčením, nebo kombinací máčení a odstředění.[4]

Aplikace kluzných povlaků nástřikem zahrnuje několik možných použitelných procesů, a to automatický nástřik, nástřik v bubnu nebo elektrostatický nástřik. Při aplikaci je však nutné pracovat s vyšší opatrností než při aplikaci běžných nátěrových laků, protože je nutné vytvořit co nejvíce jednotný a tenký film. Tlak atomizačního vzduchu při aplikaci by se měl pohybovat mezi 0,2MPa až 0,5MPa. Současně je nutné zajistit jeho čistotu od vody a oleje. Vzdálenost mezi povlakovanou součástí a tryskou aplikačního zařízení není přesně definována. Vzdálenost by měla však být taková, aby nedošlo k zaschnutí laku před dosažením cílového povrchu. Pokud k tomu dojde, povlak nebude jednotný a zároveň bude hrubý. Pro dosažení vyšší tloušťky vrstvy je možné aplikovat více tenkých vrstev.[4]

Konkrétní složení kluzného povlaku můžeme vidět v Tab. 2-2. Kluzné částice MoS₂ jsou vázány pomocí epoxidové pryskyřice. Lak obsahuje také aditivní přísadu grafitu.[13] Ten by mohl mít pozitivní účinek pro snižování mezivrstvových interakcí vlhkosti s MoS₂ a snížit tak součinitel tření[14]. V neposlední řadě daný lak obsahuje také rozpouštědla, jakými je butanol, xylen a etylbenzen. Protože se jedná o zdravý nebezpečné a výbušné látky, při manipulaci s lakem a jeho aplikaci musí být splněny bezpečnostní podmínky.

Tab. 2-2 Složení kluzného povlaku Molykote. [13]

Složka	CAS registrační číslo	Koncentrace [%]
Butanol	71-36-3	17-23
Disulfid molybdeničitý	1317-33-5	17-21
Xylen	1330-20-7	14-19
Bisfenol A: epoxidová pryskyřice	25068-38-6	8-10
Grafit	7782-42-5	5-7
Ethylbenzen	100-41-4	4-6
Methanol	67-56-1	0,08-0,18

2.3.3 Normativní požadavky na aplikaci povlaku

Metody aplikace povlaků disulfidu molybdeničitého pro letectví a kosmonautiku se řídí normou ČSN EN 2491. Ta specifikuje požadovanou úpravu povrchu, použité vybavení, podmínky aplikace, další zpracování, odstranění povlaku a přijímací testy výsledného produktu.

U titanových substrátů by měl být povrch eloxován v souladu s normou ISO 8080, pokud není uveden zákazníkem jiný požadavek. Ačkoli samotná norma zdůrazňuje vliv drsnosti povrchu substrátu na výslednou výkonnost povlaku jako významný faktor, neuvádí žádné doporučené hodnoty. Do 24 hodin od úpravy povrchu povlakovaného dílu musí být zabezpečeno zabránění kontaminace nebo koroze povrchu, který má být povlakován.[15]

K aplikaci povlaků mohou být využité jakékoliv procesy, které budou splňovat kvalitativní požadavky na výsledný povlak [15]. Podmínky a doporučení na aplikaci lze shrnout následujícím způsobem:

- Aplikace musí probíhat v čistém a suchém prostředí s relativní vlhkostí vzduchu mezi 40 % a 75 % a teplotou (20 ± 5) °C. Je nutné zajistit, aby při aplikaci nedošlo ke kontaminaci povlakovaných povrchů.
- Je povoleno povlakované díly předežhřát až na 50 °C.
- Procesní parametry aplikace musí být stanoveny na základě testování na reálných součástech.
- Pokud je vyžadována vyšší přesnost povlaku, lze využít dodatečné technologie, jako například honování, leštění nebo omílání. Výběr technologie by měl být zvolen na základě povlakovaného dílu a jeho počtu.

Vlastnosti výsledného produktu povlakování by měli být hodnoceny na základě vlastností uvedených v Tab. 2-3. Tabulka dále uvádí požadavky a metody testování, které by měli být dodrženy v případě, že nejsou stanoveny zákazníkem jinak. [15]

Tab. 2-3 Charakteristické vlastnosti, požadavky a zkušební metody.[16]

Charakteristika	Požadavek	Zkušební metoda
Vzhled	Bez vad jako jsou škrábance, důlky, puchýře, nerovnoměrnost nebo jiná povrchová poškození.	vizuální kontrola
Tloušťka	($0,01 \pm 0,003$) mm Po mechanickém opracování: ($0,005 \pm 0,002$) mm	vhodná metoda nebo EN ISO 1463
Adheze	Bez odlupování, puchýřů, prasklin	ASTM D 2510
Vytvrzení	Vrstvu nesmí poškodit krátký kontakt s rozpouštědlem	Maximálně po dobu 1 minuty jemně třít tamponem napuštěným rozpouštědlem.

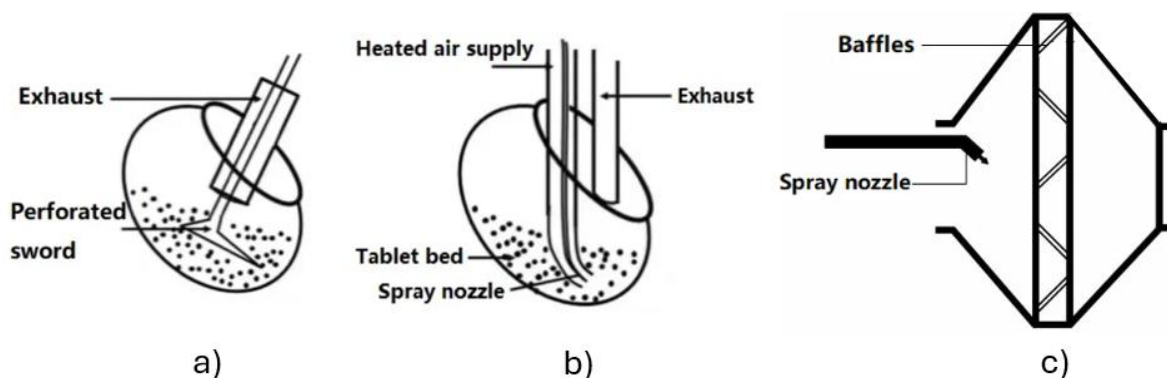
Testování povlaku by mělo být provedeno pro každou šarži s aplikovaným povlakem. Ta je definována jako soubor dílů, které byly vystaveny aplikaci povlaku ve stejný čas a za stejných podmínek.[15]

2.4 Rešerše na stav techniky

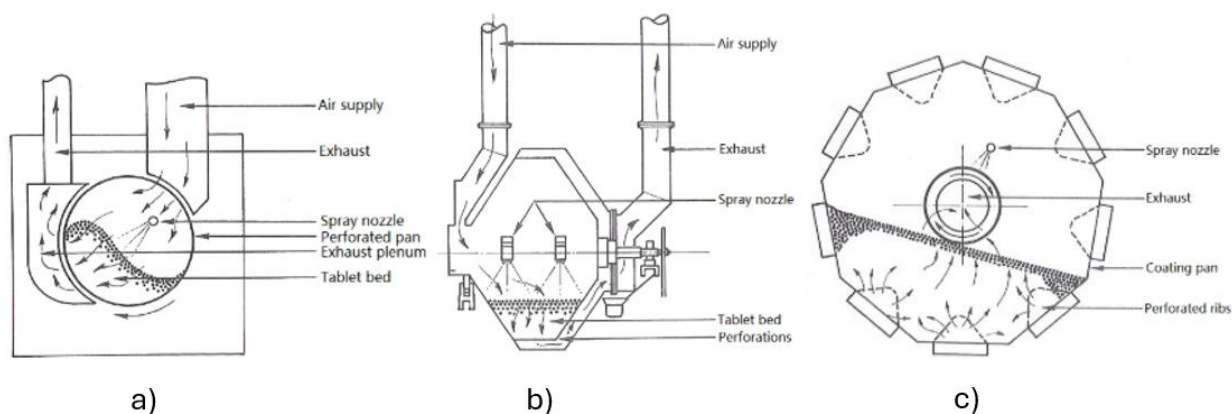
2.4.1 Nástřik v bubnu

Ačkoli lze kluzné povlaky aplikovat širokou škálou průmyslových technologií, na základě požadavků zákazníka byl výběr omezen pouze na technologii nástřiku v bubnu. V této technologii jsou povlakované díly umístěny do rotačního bubnu, kde se jejich rovnoměrným pohybem zajišťuje jednotné pokrytí povrchu. Povlak je nanášen na pohybující se částice pomocí spreje, přičemž proces sušení povlaku bývá často podpořen přívodem horkého vzduchu. Konstrukce bubnů se v tomto ohledu liší především podle způsobu distribuce sušícího vzduchu [17]. Z hlediska konstrukce lze bubny rozdělit do dvou základních kategorií – standardní a perforované.

U standardních bubnů je zvýšení účinnosti sušení dosaženo především cíleným přívodem horkého vzduchu přímo do lože povlakovaných dílů. K tomuto účelu se využívá perforovaného nože (tzv. *immersion sword system*) nebo ponorné trubice (*immersion tube system*), která je vybavena aplikační tryskou umožňující současné dodávání horkého vzduchu i aplikovaného roztoku. [17]



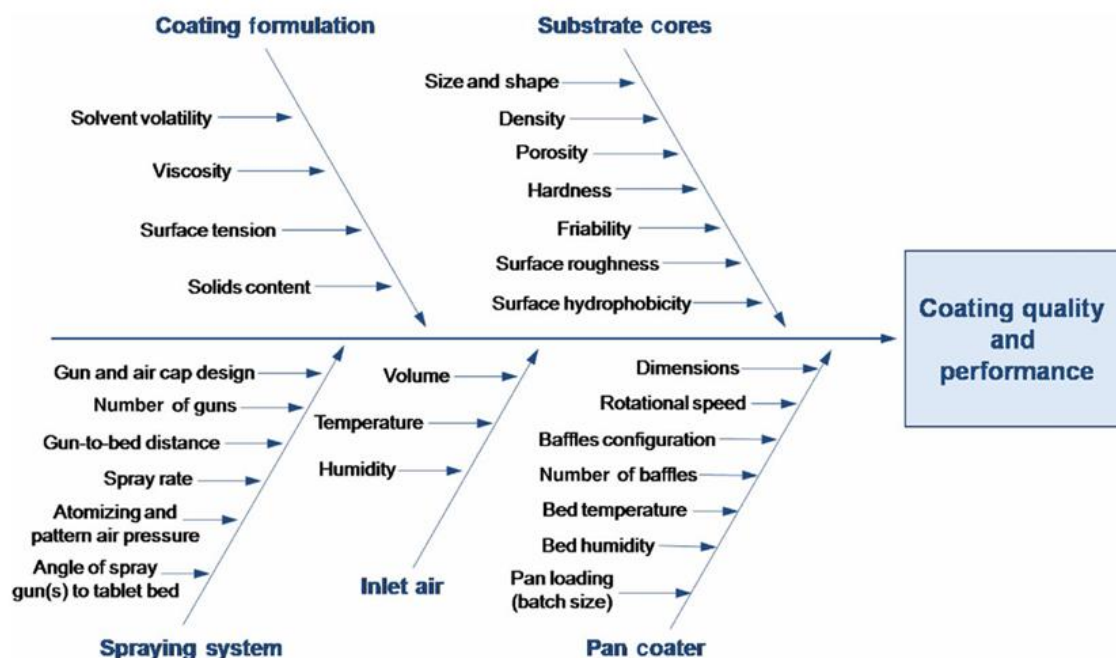
Obr. 2-11 Standardní bubnové systémy: a) immersion sword system, b) immersion tube system, c) Pellegrini pan system. ([41], upraveno)



Obr. 2-12 Systémy s perforovanými bubny: a) Accela-Cota, b) Hi-Coater, c) Driacoater. ([41], upraveno)

Systémy s perforovanými bubny patří mezi nejefektivnější zařízení pro nanášení povlaků. Nabízejí vyšší kapacitu, efektivnější sušení a umožňují použití většího počtu stříkacích trysek. Také v tomto případě existuje několik konstrukčních variant. Systémy typu Accela-Cota a Hi-Coater využívají perforace v bubnu k odvádění horkého vzduchu. Naproti tomu systémy Driacoater využívají perforovaná dutá žebra umístěná uvnitř bubnu pro přímý přívod horkého vzduchu do lože povlakovaných součástí.[17]

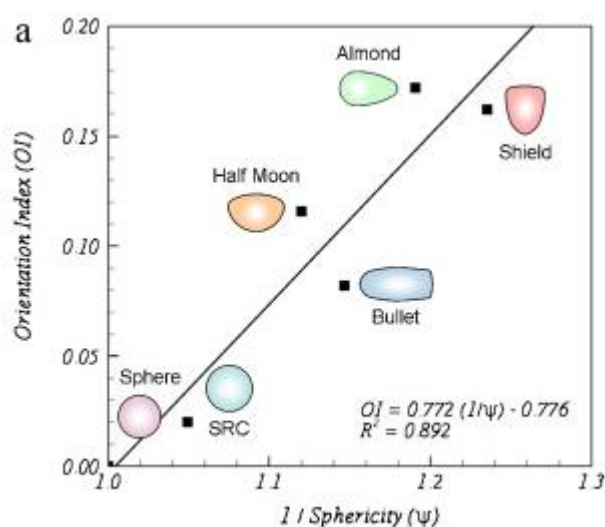
Povlakování součástí v bubnu je velice komplexní proces. Při návrhu procesu je nutné zohlednit mnoho parametrů, které se navíc často vzájemně ovlivňují. Díky tomu není proces zcela lineárně škálovatelný. Existují však určité postupy, které umožňují škálování procesu a snížení prvotních experimentů při rozšiřování nebo snižování kapacity technologie.[18]



Obr. 2-13 Fish-bone diagram procesu povlakování v bubnu.[18]

2.4.2 Povlakované díly a vlastnosti povlaku

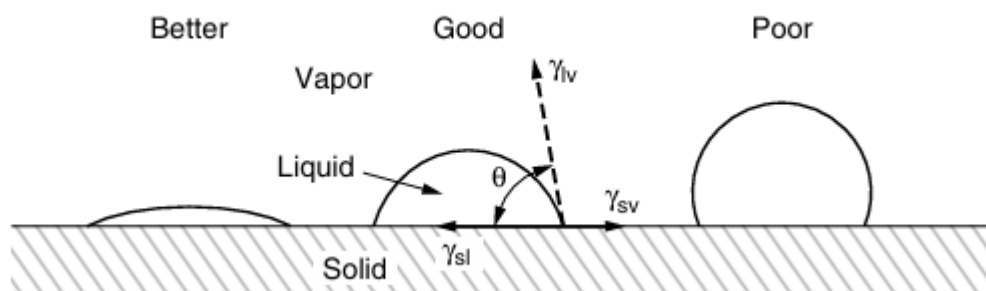
Faktory, jako jsou velikost, tvar, hustota, drsnost povrchu, mechanické vlastnosti a smáčivost povrchu, významně ovlivňují proces povlakování. Velikost a tvar dílů mají zásadní vliv na kinematiku pohybu v bubnu. Nejlepších výsledků je dosahováno při povlakování malých sférických dílů. [18] Čím více se tvar součásti odlišuje od sférického tvaru, tím spíše dochází při jejím pohybu v bubnu k preferenční orientaci. To má negativní dopad na rovnoměrnost naneseného povlaku. Tato skutečnost však nemá zásadní vliv na přesnost aplikace mezi jednotlivými díly. Vyšší rovnoměrnosti povlaku na jednotlivých dílech lze dosáhnout snížením objemu dílů, nebo zvýšením rychlosti otáčení bubnu. Nicméně úpravou těchto parametrů nelze dosáhnout stejné přesnosti, jako v případě vhodného tvaru součásti.[19]



Obr. 2-14 Závislost indexu orientace na kulovitosti dílu. Index orientace vyjadřuje, jak moc se orientace dílu liší od ideální orientace.[19]

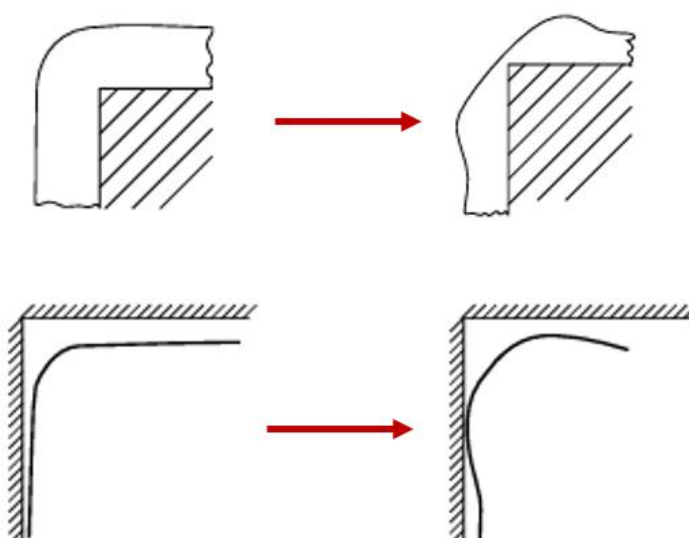
Mechanické vlastnosti dílu, jako jsou houževnatost a tvrdost, mají vliv na provozní parametry a možnosti samotného procesu. Se zvyšujícím se počtem povlakovaných dílů roste i mechanické namáhání. [18] Tento jev platí i při zvyšování otáček bubnu. Zvýšení přesnosti aplikace prostřednictvím vyšší rychlosti otáčení bubnu je tedy omezeno samotnými mechanickými vlastnostmi povlakované součásti [20].

Vlastnosti jako drsnost povrchu a smáčivost budou ovlivňovat schopnost připojení povlaku k povrchu součásti[18]. Smáčivost, respektive povrchové napětí, představuje klíčový faktor určující, do jaké míry je povlak schopen přilnout k podkladu. Je výsledkem interakce mezi povrchovým napětím povlakovaného substrátu a povrchovým napětím aplikovaného nátěru. Smáčivost lze kvantifikovat pomocí kontaktního úhlu, jak je znázorněno na Obr. 2-15. Platí, že čím menší je kontaktní úhel, tím lepší je smáčivost povlaku na daném povrchu. [21]



Obr. 2-15 Schematické znázornění dobrého a špatného smáčení.[21]

Smáčivost laku lze zlepšit použitím rozpouštědel s nižším povrchovým napětím. Je však důležité si uvědomit, že tato rozpouštědla snižují nejen povrchové napětí, ale také viskozitu laku, a to v závislosti na množství rozpouštěné látky a pigmentů. Při ředění povlaku je navíc nutné zohlednit i geometrii povlakované součásti. V oblasti hran může v důsledku povrchového napětí docházet ke změnám tloušťky vrstvy. Na okrajích filmu se rozpouštědlo odpařuje rychleji, protože zde dochází k vyššímu poměru povrchové plochy k objemu. To vede ke zvýšení lokálního povrchového napětí a následně k toku materiálu. Výsledkem může být buď ztenčení, nebo naopak zesílení vrstvy v těchto místech.[21]

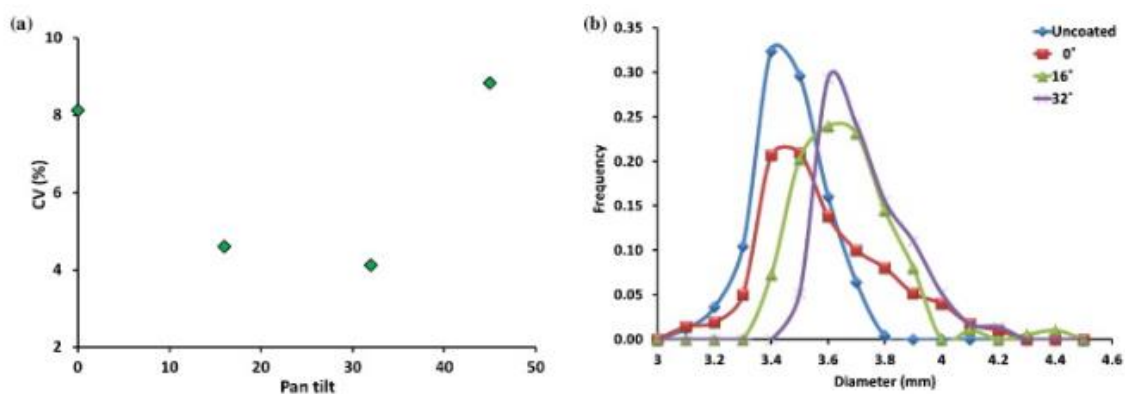


Obr. 2-16 Změna tloušťky vrstvy povlaku způsobená tokem materiálu. ([21], upraveno)

2.4.3 Povlakovací zařízení

Konstrukční faktory potahovací pánve, jako jsou její rozměry, tvar či přídavné přepážky (včetně jejich počtu a velikosti), výrazně ovlivňují kinematiku procesu míchání součástí. Při škálování procesu by proto měly být geometrické parametry pánve proporcionálně upraveny, aby byla zachována maximální podobnost kinematiky procesu. Zároveň je nezbytné udržovat konstantní poměr naplnění bubnu vzhledem k jeho celkovému objemu.[18]

Pokles přesnosti aplikace povlaku při snižování úrovně naplnění bubnu pozoroval ve své práci Dubey [22]. Naproti tomu Sahní uvádí, že samotná úroveň plnění nemá významný vliv na efektivitu míchání částic. Jeho studie však poukazuje na pozitivní vliv zvyšování úhlu náklonu bubnu na přesnost nanášení povlaku. Se zvyšujícím se úhlem náklonu docházelo ke snižování variačního koeficientu tloušťky povlaku až do hodnoty 32° , což bylo připisováno nárůstu axiální složky míchání. Při dalším zvýšení úhlu náklonu na 45° se tato složka stává méně významnou a došlo opět k zvýšení variability tloušťky povlaku. [20]



Obr. 2-17 a) Vliv úhlu náklonu bubnu na variační koeficient tloušťky povlaku. b) Distribuce tloušťky povlaku v závislosti na průměru změně průměru částic pro různé úhly náklonu bubnu.[20]

Pohybem částic v bubnu se ve své práci zabýval Pandey. a základě výsledků jeho výzkumu bylo zjištěno, že se zvyšováním úrovně naplnění bubnu roste průměrná rychlost částic přibližně s 1,8. mocninou procentuálního naplnění bubnu. Současně byly pozorovány symetričtější rychlostní profily částic při vyšších úrovních plnění.[23] Z toho lze usuzovat, že vyšší naplnění bubnu přispívá k rovnoměrnějším podmínkám, což by mohlo vést ke zvýšení přesnosti aplikace povlaku, jak bylo pozorováno v práci Dubey [22] a Ketterhagena [19].

Výsledná rychlost pohybu povlakovaných dílů v bubnu závisí především na rychlosti jeho otáčení a konstrukčním uspořádání přepážek. Obecně neexistují žádné konkrétní doporučené hodnoty rychlosti bubnů, protože je nutné také zohlednit velikost, tvar a zatížitelnost dílů. [18] Za doporučenou výchozí hodnotu při návrhu provozních otáček bubnu bývá považována polovina tzv. kritické rychlosti – tedy rychlosti, při níž odstředivá síla překoná gravitační sílu. K predikci chování částic a hodnocení poměru mezi setrvačnými a gravitačními silami se využívá bezrozměrné Froudovo číslo, které určuje poměr setrvačných sil ke gravitačním silám.[24] Toto podobnostní číslo se využívá při škálování procesu, kdy pomáhá zajistit zachování dynamických podmínek míchání. [18, 24] Froudovo číslo lze určit dle následující rovnice:

$$F_r = \frac{\omega^2 \cdot D_b}{g} \quad (2.4)$$

Kde ω je rychlost otáčení bubnu, D_b je průměr bubnu a g gravitační zrychlení. Je však nutné si uvědomit, že Froudovo číslo nebere v úvahu vlastnosti povrchu bubnu a povlakovaných součástí [24]. Současně je nutnou podmínkou při škálování rychlosti otáčení bubnu dodržet jeho geometrickou podobnost[18]. Proto se častěji využívá zachování lineární rychlosti částic dle rovnice 2.5[18, 24].

$$\omega \cdot D_b = \textit{kons.} \quad (2.5)$$

Užitečným nástrojem pro predikci pohybu součástí v bubnu je metoda diskrétních prvků (DEM). Ta umožňuje zhodnocení kvality promíchání částic uvnitř bubnu, která je rozhodující pro výslednou kvalitu povlaku.[18] Hlavní nevýhodou je však časová náročnost těchto simulací [18, 23]. Další nevýhodou je náročnost samotného materiálového modelu. Pohyb částic v bubnu je řízen především interakcí jednotlivých částic a částic se stěnami bubnu, které často nevykazují zcela lineární chování a je nutné použití více modelovacích přístupů.[23] To logicky přináší ještě vyšší časovou náročnost a nutnost experimentálního ověření pro získání věrohodných výsledků simulace.

DEM simulace poskytují navíc pouze omezená data o procesu. Více důležitých informací o procesu lze získat kombinací DEM analýzy s CFD analýzou. Ta umožňuje efektivně zhodnotit další faktory, kterými jsou termodynamické jevy a faktory spojené s aplikací povlaku.[18]

2.4.4 Aplikace povlaku a termodynamické faktory

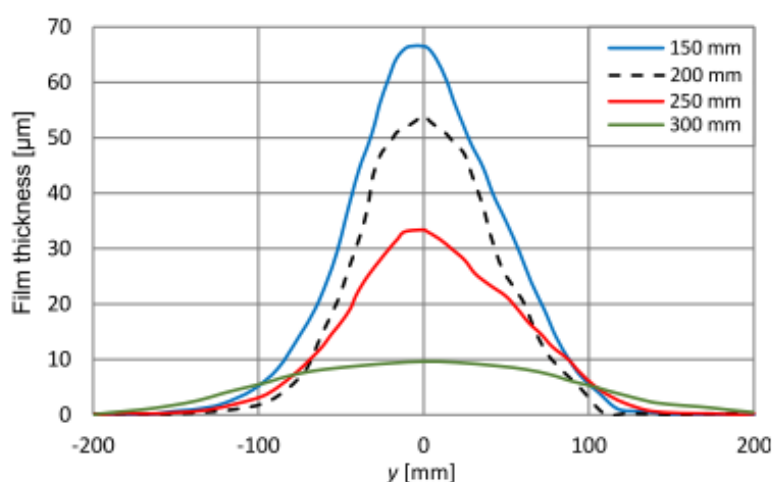
Aplikace povlaku

Vlastnosti laků, jako je například jejich viskozita nebo hustota, budou významně ovlivňovat parametry procesu nástřiku. Společným jmenovatelem jednotlivých parametrů je samotný princip procesu nástřiku, a to atomizace neboli rozprašování barvy do jemných částic či kapek. K určení, zda k ní dojde lze využít kritické Weberovo číslo.

$$w_{e_{cr}} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot D}{\sigma} \quad (2.6)$$

Kde ρ je hustota kapaliny, v je rychlost proudění, D je charakteristický rozměr (typický kapky) a σ je povrchové napětí kapaliny. Pokud je Weberovo číslo větší než kritické Weberovo číslo, dojde k rozprašování kapaliny. Čím vyšší je hodnota kritického Weberova čísla, tím vyšší musí být rychlost částic, aby došlo k efektivní atomizaci. Tedy čím vyšší je kritické číslo, tím obtížnější je kapalinu rozprašovat.

S rostoucí vzdáleností atomizačního zařízení od povlakovaného povrchu pak tyto větší kapky rychleji ztrácí svoji hybnost vlivem odporu prostředí a jejich rychlost klesá. Dochází tak sice k plynulejší distribuci nátěru, jak můžeme vidět na Obr. 2-18, ale velká část atomizované barvy nedosáhne povrchu cíle a klesá tak účinnost procesu.[25] Pokud je vzdálenost mezi povrchem a atomizačním zařízením příliš velká, může dojít k zaschnutí kapek před dosažením povrchu. To má za následek hrubý nehomogenní povrch a snížení adheze.[18] Naopak se snižující vzdáleností dochází k soustředění nátěru do středu povrchu a dochází zde k významnému nárůstu rozdílu v tloušťce vrstvy mezi středem a okraji povlakovaného dílu.[25]



Obr. 2-18 Závislost distribuce povlaku na změně ústové vzdálenosti.[25]

Jedním z klíčových provozních parametrů ovlivňujících proces atomizace je tlak média, nejčastěji atomizačního vzduchu. Se zvyšujícím se tlakem dochází k nárůstu rychlosti proudění a současně k zmenšování průměru kapek atomizovaného laku. To má podobný účinek, jako snižování vzdálenosti mezi povrchem a atomizačním zařízením. Zvyšováním tlaku tedy lze do určité míry zvýšit efektivitu aplikace nátěru.[25] Protože s rostoucí rychlostí roste také kinetická energie dopadu kapek laku, může dojít k jeho rozptýlení (rozstříku), čímž se opět snižuje míra depozice [25, 26]. Zda dojde k depozici povlaku nebo k jeho rozstříku lze predikovat na základě výpočtu Ohnesorgova a Reynoldsova čísla z rovnice (2.6) a (2.7). Kritickou hodnotu poté z rovnice (2.8). [18]

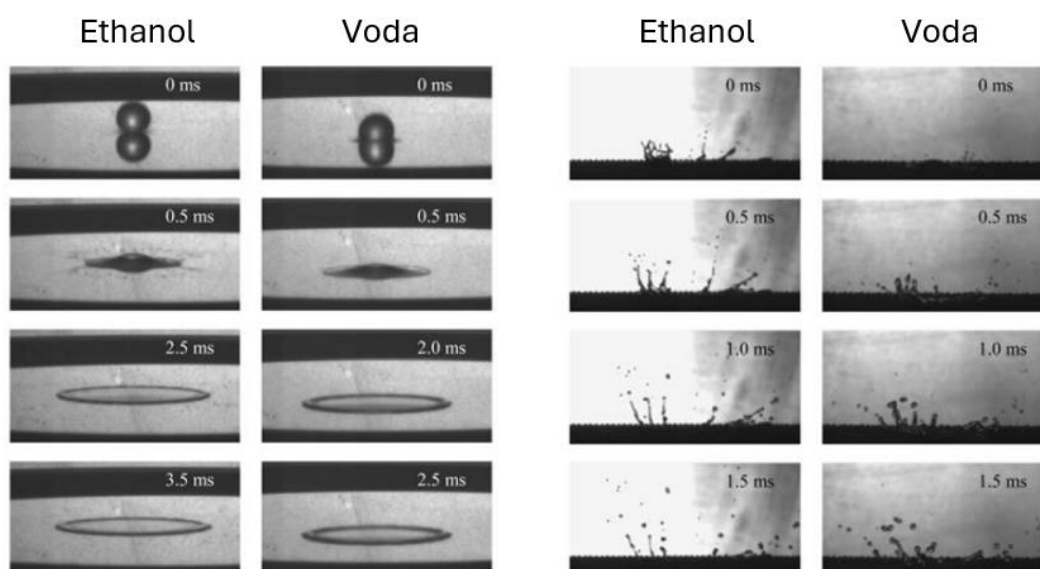
$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.6)$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot D}} \quad (2.7)$$

Kde ρ je hustota kapaliny, v je rychlost proudění, D je charakteristický rozměr (typicky kapky), μ je viskozita kapaliny a σ je její povrchové napětí.

$$Oh = 57,7 \cdot Re^{-1,25} \quad (2.8)$$

Při překročení této kritické hodnoty dochází k překonání viskózních sil setrvačnými, což vede k rozpadu kapky a jejímu rozstříku. [18] Vliv reologických vlastností laku na mechanismus depozice povlaku se však snižuje s rostoucí drsností povrchu, protože v těchto případech je řízen především topografií povrchu [26]. Z tohoto důvodu je vhodné využít výpočet pouze pro základní predikci depozice povlaku.



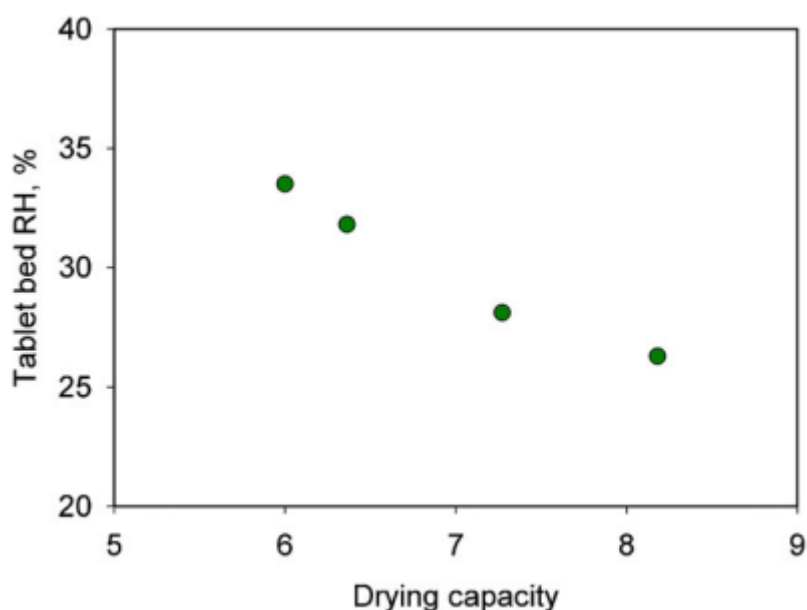
Obr. 2-19 Kapka o průměru 2 mm dopadající rychlostí 3,15 m/s na: a) leštěný povrch; b) povrch s drsností Ra 200. (Upraveno,[26])

Vliv tlaku atomizačního vzduchu na adhezi povlaku byl experimentálně sledován ve studii Qui et al. Povlaky aplikované při tlaku 0,2 MPa vykazovaly nejvyšší hodnoty adheze a zároveň dosahovaly nejnižších hodnot součinitele tření, míry opotřebení a třecího ohřevu.[27] Tyto výsledky potvrzují, že optimalizace procesních parametrů, může významně zlepšit tribologické vlastnosti finálního povlaku.

Termodynamické faktory

Konečná velikost atomizovaných kapek, které dosáhnou povrchu povlakovaných součástí, bude záviset na celkové termodynamice systému. Množství přiváděného vzduchu, jeho teplota a vlhkost budou určovat sušící kapacitu systému. Příliš vysoká kapacita sušícího vzduchu může mít stejný důsledek, jako snižování vzdálenosti nástřiku, nebo kinetické energie kapek. Příliš nízká kapacita pak může vést k aglomeraci dílů, způsobené slepením součástí nevysušeným lakem.[18]

Sušící kapacita přiváděného vzduchu je významně ovlivněna jeho vlhkostí. V práci Pandeye byl pozorován významný vliv mezi vlhkostí přiváděného vzduchu a jeho sušící kapacitou, která je definována dle rovnice (2.9). Dále zde byla pozorováno, že zvýšení vlhkosti přiváděného vzduchu, a s tím spojené snížení sušící kapacity mělo za následek defekty spojené se zalepováním kontur.[28] To je zapříčiněno roztékáním povlaku před jeho zaschnutím [21]. Nízká sušící kapacita procesu by tak mohla významně ovlivnit přesnost procesu nanášení kluzného laku na závitech šroubů.



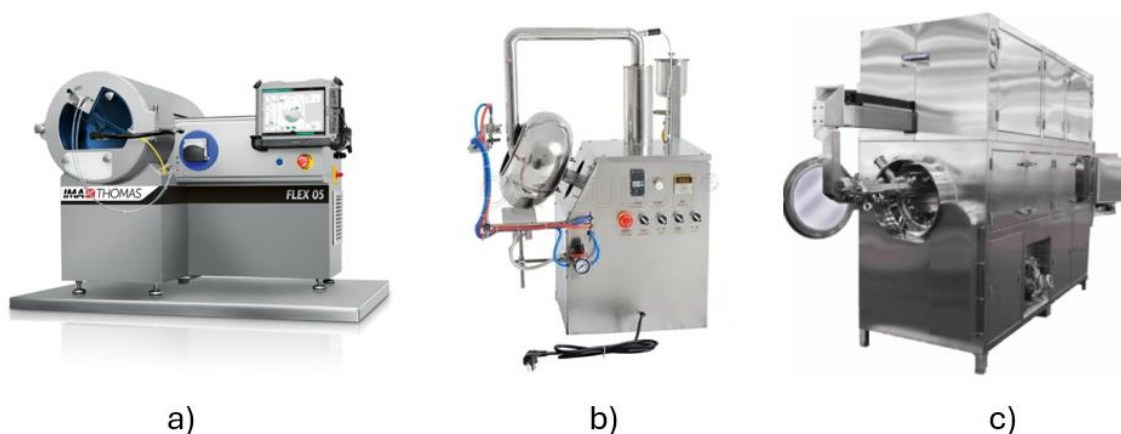
Obr. 2-20 Vztah mezi sušící kapacitou a relativní vlhkostí v loži tablet [28]

$$\text{Sušící kapacita} = \frac{\text{Průtok sušícího vzduchu}}{\text{Průtok laku}} \quad (2.9)$$

Obecně platí, že jakmile je nalezeno optimální nastavení průtoku laku a sušícího vzduchu, je při škálování procesu nezbytné zachovat jejich vzájemný poměr konstantní. Tím se zajistí udržení sušící kapacity procesu. Současně je nutné kontrolovat i okolní podmínky, jako je teplota a vlhkost přiváděného vzduchu.[18]

2.4.5 Komerční zařízení

V rámci systematické rešerše byla provedena analýza dostupných komerčních zařízení. Byla nalezena různá zařízení, ať už se jednalo o konstrukce typu acella-cota, jako je například model BG-600E od společnosti CAPSULCN ([29]), FLEX 05 od firmy IMA THOMAS ([30]) či zařízení LABCOAT™ od společnosti O'HARA ([31]). Konstruktivní řešení typu immersion tube jako je řada BYC opět od firmy CAPSULCN ([32]), nebo také například průběžné povlakovací bubny Fastcoat™, také od firmy O'HARA ([33]). Je však důležité poznamenat, že všechna tato zařízení jsou primárně navržena pro povlakování tablet ve farmaceutickém průmyslu.



Obr. 2-21 Komerčně dostupná zařízení: a) FLEX 05; b) zařízení řady BYC; c) Fastcoat™. ([29, 30, 33])

Jediná víceúčelová zařízení jsou řešení ROTOVER od firmy Imel a ROTAMAT od firmy WALTHER-TROWAL. Z tohoto důvodu je jim v následujícím textu věnována vyšší pozornost. Obě zařízení umožňují aplikaci široké škály nátěrů od dekorativních až po funkční, na plastové, kovové, nebo také dřevěné díly[34, 35]. Přehled sortimentu povlakovaných dílů z portfolia firmy Imel můžeme vidět na Obr. 2-22.



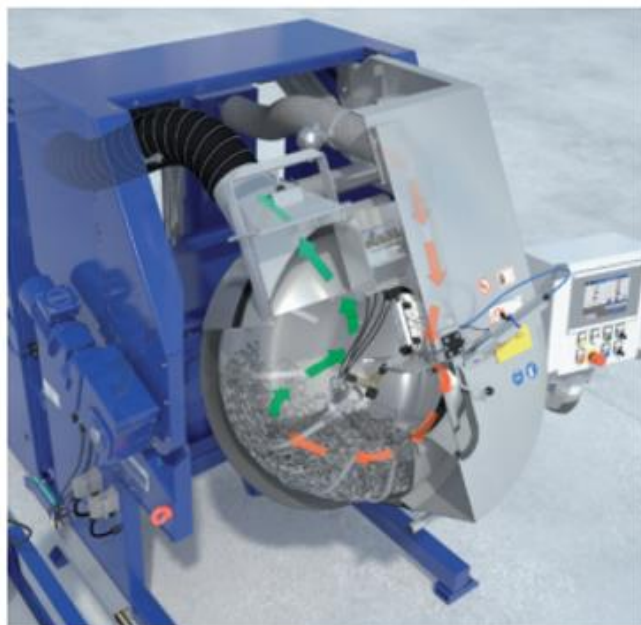
Obr. 2-22 Přehled sortimentu povlakovaných dílů z portfolia firmy Imel. [34]

Obě komerční zařízení vycházejí z obdobného konstrukčního uspořádání. Povlakovací buben válcového tvaru se zaobleným dnem, je umístěn v přední části zařízení uvnitř uzavřené procesní komory. Přední kryt je opatřen oknem s integrovaným osvětlením pro možnou vizuální kontrolu procesu obsluhou. Buben je uložen otočně pro možnost změny náklonu bubnu a snadný odběr povlakovaných dílů. [34, 35]



Obr. 2-23 OBRÁZEK: Zařízení ROTOVER (vlevo) a ROTAMAT (vpravo).[34, 35]

Do prostoru bubnu je přiváděn sušící vzduch pro zvýšení efektivity procesu. U zařízení ROTAMAT je proud sušícího vzduchu směřován nad lože povlakovaných dílů, nikoliv přímo do něj, jak je obvyklé u systémů typu immersion tube nebo immersion sword. Teplota povrchu dílů je monitorována pomocí infračerveného senzoru, který je namířen přímo na lože. [35] Zařízení ROTOVER naopak využívá více senzorů umístěných na přívodu vzduchu k topným tělesům, vstupu do krytované komory, bubnu a v místě odváděného vzduchu [34]. Obě zařízení využívají pro odsávání výparů odvod vzduchu. Ten je spolu s filtrací umístěn v zadní části zařízení. [34, 35] U zařízení ROTAMAT je filtrační zařízení řešeno jako samostatná odnímatelná jednotka.



a)



b)

Obr. 2-24 a) Systém přívodu a odvodu vzduchu. Červené šipky znázorňují ohřátý vzduch a zelené šipky odváděný vzduch. b) Odnímatelná filtrační jednotka.[35]

Obě zařízení využívají PLC řídicí systémy, jsou tak plně automatizovaná a dovolují zpětnou kontrolu procesních parametrů pro jejich následnou úpravu. Mezi řízené a současně kontrolované procesní parametry patří rychlost otáčení bubnu, teplota a objemové průtoky přiváděného vzduchu, laku a atomizačního a tvarovacího vzduchu do nástřikové trysky. K nanášení povlaku je v obou případech využívána vzduchová atomizace a lak je přiváděn čerpadlem. [34, 35]

Z konstrukčního hlediska vykazují obě zařízení vysokou míru podobnosti. Zařízení se liší pouze svým zpracováním. Zatímco u zařízení ROTAMAT je kladen důraz na modulárnost a tím praktičnost zařízení, ROTOVER je spíše kompaktním řešením s vyšším stupněm automatizace a bezpečnosti. Z hlediska provozních parametrů však nelze tato zařízení dostatečně porovnat, protože u zařízení ROTOVER tyto informace nejsou výrobcem uvedeny. Nalezené technické údaje jsou shrnuty v Tab. 2-4.

Tab. 2-4 Dostupné technické údaje k zařízením ROTAMAT a ROTAMAN.[34, 35]

Vlastnosti	ROTAMAT	ROTOVER
Průměr bubnu	(550÷850) mm	-
Náklon bubnu	(-90÷37) °	(-15÷35) °
Otáčky bubnu	(2÷30) min ⁻¹	-
Objem procesu	(2÷75) l	Maxim 75 l
Max. průtokový objem přiváděného vzduchu	160 m ³ /h	-
Max. teplota přiváděného vzduchu	150 °C	-
Max. průtokový objem odsávání	200 m ³ /h	-
Filtrace	EN 779 F6	EN ISO 16890
Rozměry zařízení	R60: 2080x1250x2010 R80: 2400x1450x2100 R90C: 2490x1920x2020	2600x2000x2100 mm

V rámci rešerše byly obě tyto firmy osloveny s dotazem na přesnost aplikace jednotlivých zařízení. Podle vyjádření produktového manažera zařízení ROTOVER však není možné přesnost aplikace kvantifikovat bez provedení testování se specifikovaným lakem a typem povlakovaných dílů [36].

2.5 Shrnutí hlavních zjištění

Provedená rešerše poskytuje základní přehled o chování kluzných povlaků na bázi MoS₂, specifikaci podmínek stanovených zákazníkem, požadovaných vlastností výsledného produktu, způsobu aplikace a klíčových parametrů procesu.

Kritická rešerše byla zaměřena na základní představení kluzných povlaků na bázi MoS₂. Především pak na vlastnosti, které ovlivňují tribologickou výkonost těchto povlaků. Bylo zjištěno že vlastnosti povlaku budou silně závislé na složení laku, poměru jednotlivých složek, typu a velikosti zatížení, dalšímu zpracování, drsnosti povrchu substrátu a jeho povrchové úpravě. Protože jsou však všechny tyto parametry definovány požadavky zákazníka, nebude jim dále věnována vyšší pozornost.

Důležitým parametrem, u něhož panují protichůdné názory, je tloušťka povlaku. S její rostoucí hodnotou byly v různých studiích pozorovány jak narůstající, tak konstantní, či dokonce klesající hodnoty součinitele tření. Práce Rabinowitze a Zanina se však shodují v tom, že existuje určitá kritická tloušťka, při níž dochází k významné změně tribologické výkonnosti. Určení optimálního rozsahu tloušťky je proto zásadní pro návrh technologie aplikace kluzného povlaku.

Dalším diskutovaným parametrem bylo provozní prostředí povlaku. Z výsledků rešerše jasně vyplývá, že nejlepších vlastností povlaku je dosaženo v prostředí vakua a inertním prostředí. Přítomnost vzdušné vlhkosti vede nejen k mírnému zvýšení součinitele tření, ale především k degradaci povlaku. Ta následně způsobuje další nárůst tření, vznik trhlin, odlupování povlaku a snižuje jeho životnost. Tento negativní efekt by však mohl být částečně potlačen u zákazníkem definovaného laku, a to díky přítomnosti aditivní přísady ve formě grafitu. Je však nutné poznamenat, že grafit může mít negativní vliv na součinitel tření v prostředí vesmíru, protože ten ke své správné funkci naopak vyžaduje prostředí s vzdušnou vlhkostí. Z tohoto důvodu bude nutné provést testování povlaku jak v běžných podmínkách prostředí, ve kterých probíhají přejímací testy povlaku, tak v relevantních podmínkách vesmíru pro ověření výkonnosti těchto povlaků.

V následující kapitole byly popsány specifikace zákazníka, kluzného laku a normativních požadavků. Na základě požadavků zákazníka, kapacity procesu a specifikovaných dílů byl určen proces aplikace povlaku jako nástřik v bubnu. To pomocí nástřikové trysky s atomizací vzduchem. Tlak atomizačního vzduchu by se měl dle doporučení výrobce pohybovat v rozmezí (0,2-0,5) MPa a zajištěna jeho čistota od vody a oleje. Samotný proces povlakování pak musí probíhat v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu mezi 40 % a 75 % a teplotou (20 ± 5) °C. Během aplikace povlaku bude nezbytné tyto parametry průběžně kontrolovat. Tato omezení znamenají, že nebude možné využít vyšší teploty sušícího vzduchu za účelem zvýšení efektivity procesu.

Normativní požadavky na aplikaci povlaku dále definují vlastnosti povlaku, které je nutné kontrolovat. Zkušební metody a požadované hodnoty jsou definovány zákazníkem a budou hodnoceny na výsledném produktu. Tato norma současně dovoluje využití dalších procesů úpravy povlakovaného povrchu, jako je například proces omílání. Využití této technologie by mohlo významně přispět k vyhlazení povlaku, snížení doby jeho záběhu a tím dosažení lepších výsledků v přejímacích zkouškách povlaku.

V poslední kapitole byl diskutován proces aplikace povlaku nástřikem v bubnu. Byly zde popsány různé konstrukce povlakovacích bubnů, ale především parametry ovlivňující proces aplikace. Ty lze rozdělit do pěti základních kategorií, a to parametrů spojených s aplikovaným lakem, povlakovaným dílem, aplikačním zařízením, termodynamickými faktory a konstrukcí povlakovacího zařízení.

Faktory související s aplikovaným lakem a povlakovaným dílem jsou definovány přímo požadavky zákazníka. Vlastnosti laku, jako je viskozita a povrchové napětí, jsou dány konkrétním typem použitého laku. Vlastnosti povlakovaného dílu, jako jsou vlastnosti povrchu a mechanické vlastnosti, jsou zase dány specifikovanými díly. Klíčovým parametrem, na který je nutné se zaměřit, je poměr délky k průměru povlakovaných součástí. Bylo zjištěno že čím více se tvar součásti vzdaluje od sférického tvaru, tím více klesá přesnost aplikace. Tuto chybu bude nutné kvantifikovat a případně zohlednit při návrhu procesu.

Faktory spojené s aplikačním zařízením, termodynamickými podmínkami a parametry povlakovacího zařízení budou výsledkem konstrukčního návrhu a optimalizace procesu nanášení. Správného návrhu lze dosáhnout pomocí dvou přístupů. Prvním z nich je využití numerického modelování pomocí DEM a CFD analýz. Výhodou tohoto přístupu je snížení potřebného počtu experimentů. Nevýhodou je však jeho vysoká výpočetní i časová náročnost. Alternativním přístupem je experimentální nastavení procesu a jeho snadné škálování s využitím principů Quality by Design

2.6 Identifikace novosti a příležitostí

V rámci rešerše na stav techniky byly nalezeny dostupná zařízení, ale pouze dvě se neomezují jen na farmaceutické produkty. Obě zařízení jsou konstruována tak, aby umožňovala aplikaci široké škály povlaků na různé typy materiálů, což bylo potvrzeno i v rámci komunikace se společností Imel [36]. Omezením obou zařízení je však vysoká kapacita procesu. Minimální objem povlakovaných dílů u zařízení ROTAMAT činí 2 litry. To představuje více než 400násobek minimálního objemu povlakovaných dílů definovaných zákazníkem. V současnosti tedy není na trhu dostupné zařízení, které by svou variabilitou a kapacitou procesu splňovalo požadavky zákazníka.

Dále nebylo nalezeno žádné zařízení, které by kombinovalo technologii aplikace povlaku s technologií omílání v rámci jednoho procesu. Využití obou těchto technologií by tak mohlo přispět ke snížení doby potřebné pro záběh povlaku, tedy k rychlejšímu ustálení hodnoty součinitele tření. To by mohlo vést ke zlepšení výsledků v přejímacích zkouškách výsledného produktu.

3 CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Materiály používané v satelitech a sondách mají přirozeně velmi špatné tribologické vlastnosti a je třeba je ošetřit. Náročné provozní podmínky vesmíru, kterými jsou extrémní teploty, velmi nízké tlaky nebo také radiace, nedovolují běžné využití olejů nebo mazacích tuků a je nutné je nahradit kluznými povlaky.

Možným řešením je využití kluzných laků na bázi disulfidu molybdenu. Ty dosahují výborných třecích vlastností v prostředí vakua a extrémních teplot, které jsou charakteristické pro prostředí vesmíru. Chování těchto povlaků je však silně závislé na jejich správné aplikaci a tloušťce povlaku. Hodnocení vlivu tloušťky povlaku na jejich tribologickou výkonnost je navíc v literatuře často nejednoznačné a může se lišit. Pokud povlak při provozu zařízení ve vesmíru selže, může to mít fatální vliv na osud mise či satelitu.

Z těchto důvodů jsou na testování kluzných povlaků kladeny vysoké nároky a je nezbytné zajistit, aby splňovaly požadované parametry. Pokud nedojde k jejich dosažení, nelze navíc často tento postup na vybranou součást opakovat a dojde tak k jejímu znehodnocení.

Vývoj metodiky pro správnou aplikaci těchto povlaků a zajištění jejich optimálních vlastností by dokázalo výrazně snížit celkové náklady a zvýšit spolehlivost jednotlivých komponent. Tato schopnost dosud v České republice není k dispozici, přestože se jedná o klíčové procesy, které je nutné nyní zabezpečovat nákupem v zahraničí.

V následující tabulce je zobrazen přehled cílů, funkcí, omezení a způsobů, důležitých pro úspěšný vývoj metodiky a zajištění kvality výsledného produktu. Tyto atributy byly definovány na základě potřeb zákazníka a informací ze systematické rešerše.

Tab. 3-1 Přehled atributů a cílů: C-cíle, F-funkce, O-omezení. Z-způsoby.

Charakteristika	C	O	F	Z
Vytvoření metodiky pro povlakování titanových šroubů	X			
Konstrukce prototypového zařízení pro aplikaci povlaku	X			
Testování procesu nanášení v bubnu				X
Opakovatelnost procesu			X	
Automatizace procesu nanášení				X
Rozpouštědla obsažená v laku		X		
Teplota aplikace laku		X		
Splnění požadavků na výsledný produkt dle ČSN EN 2491	X		X	
Dosažení požadovaného intervalu součinitele tření povlaku	X		X	
Využití technologie omílání				X
Dosažení optimální tloušťky povlaku			X	
Optimalizace procesních parametrů nástřiku				X
Testování závislosti tribologických vlastností na tloušťce povlaku				X

3.2 Cíl práce

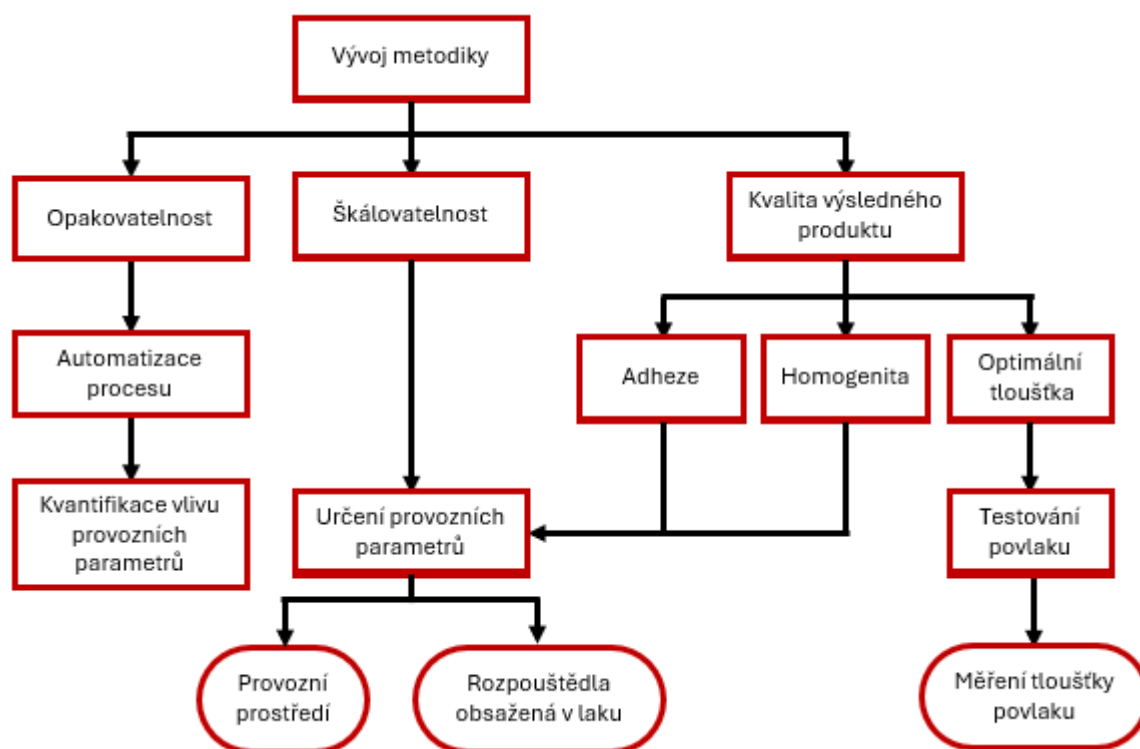
Globálním cílem práce je vytvoření metodiky aplikace zadaného kluzného laku na specifikované titanové šrouby technologií nástřiku v bubnu. To za účelem dosažení požadovaných vlastností povlaku, které budou ověřeny jejich testováním. To bude probíhat jak v atmosférických podmínkách, ve kterých probíhají přejímací zkoušky produktu, tak v relevantních podmínkách vesmíru pro ověření jejich výkonosti. Aby toho mohlo být dosaženo, je zapotřebí:

- Testování procesu nanášení.
- Provést výzkum vlivu tloušťky povlaku na tribologické vlastnosti.
- Konstrukce prototypového zařízení pro aplikaci povlaku.
- Optimalizace parametrů nanášení pro dosažení optimální tloušťky povlaku.
- Testování procesu nanášení v rotujícím bubnu.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Definované cíle a omezení byly dále analyzovány a hierarchicky sestaveny do stromu cílů a omezení, který můžeme vidět na Obr. 4-1. Globálním cílem práce je vytvoření metodiky aplikace povlaku, která zajistí opakovatelnost procesu, škálovatelnost a kvalitu výsledného produktu povlakování.



Obr. 4-1 Hierarchická struktura cílů a omezení.

Cílem pro zajištění opakovatelnosti nanášení je automatizace procesu nanášení. Ta bude důležitou součástí návrhu metodiky, protože zajistí co nejvíce konstantní podmínky aplikace. To umožní kvantifikaci vlivu provozních parametrů, jako je rychlost otáčení bubny a úroveň jeho plnění, stejně jako vlivu velikosti a geometrie povlakovaných dílů.

Společným cílem škálovatelnosti procesu a dosažení požadované kvality výsledného produktu je stanovení provozních parametrů aplikace. Požadavky na vlastnosti povlaku, jako jsou jeho adheze a vzhled, jsou definovány a kontrolovány na základě specifikací zákazníka. Optimální tloušťku povlaku však bude nejprve nutné určit testováním povlaků. Cílem tohoto testování bude určit závislost součinitele tření na tloušťce povlaku. Snížení součinitele tření povlaku v zadaném intervalu je podmínkou pro splnění přejímacích zkoušek výsledného produktu.

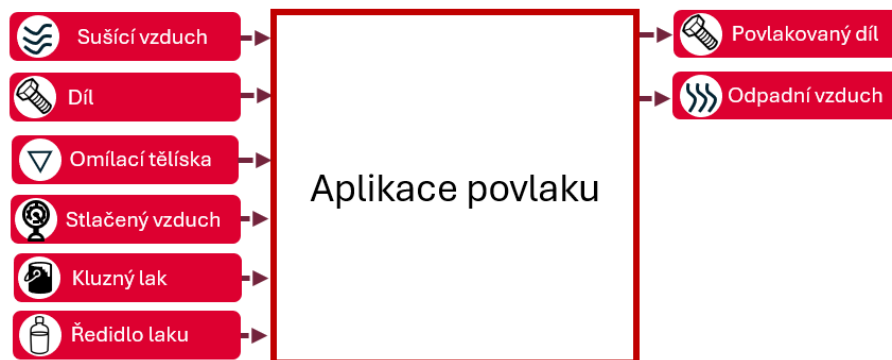
Omezením při hodnocení tloušťky povlaku jsou dostupné metody měření. Doporučenou metodou podle normy ČSN EN 2491 je mikroskopická metoda dle EN ISO 1463. Tato norma popisuje destruktivní měření tloušťky kovových a anorganických povlaků prostřednictvím metalografického průřezu, kdy se vzorek zalije, vybrousí a naleští tak, aby bylo možné mikroskopicky pozorovat a změřit tloušťku povlaku v průřezu. Jedná se o velmi přesnou metodu, která však vyžaduje náročnou přípravu vzorků. Z tohoto důvodu není vhodné ji využívat v počátečních fázích testování procesu a při optimalizaci provozních parametrů, vzhledem k vysokému počtu testovaných dílů.

Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o nahrazení této metody měření tloušťky povlaku pomocí optického profilometru. Protože optický profilometr zaznamenává pouze výškové rozdíly, je nutné vytvořit zamaskováním části povlakovaného dílu výchozí referenční plochu, od které lze tloušťku povlaku určit. Není tedy možné hodnotit tloušťku povlaku přímo v závitových plochách. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o nahrazení specifikovaných povlakovaných šroubů kolíky. Jedná se o určité zjednodušení, které neposkytuje informace o distribuci povlaku v závitovém spoji. Tento přístup však výrazně urychluje experimentální fázi návrhu procesních parametrů.

Další analyzovaná omezení jsou spojena s aplikací povlaku. Ta musí probíhat v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu mezi 40 % a 75 % a teplotou (20 ± 5) °C. Tato omezení znamenají, že nebude možné využít vyšší teploty sušícího vzduchu za účelem zvýšení efektivity procesu. Současně je nutné zajistit účinné odsávání výparů vznikajících při aplikaci, vzhledem k obsahu nebezpečných rozpouštědel v laku. Dále je nezbytné zvolit vhodné materiály komponent zařízení, aby nedocházelo k jejich degradaci vlivem působení rozpouštědel.

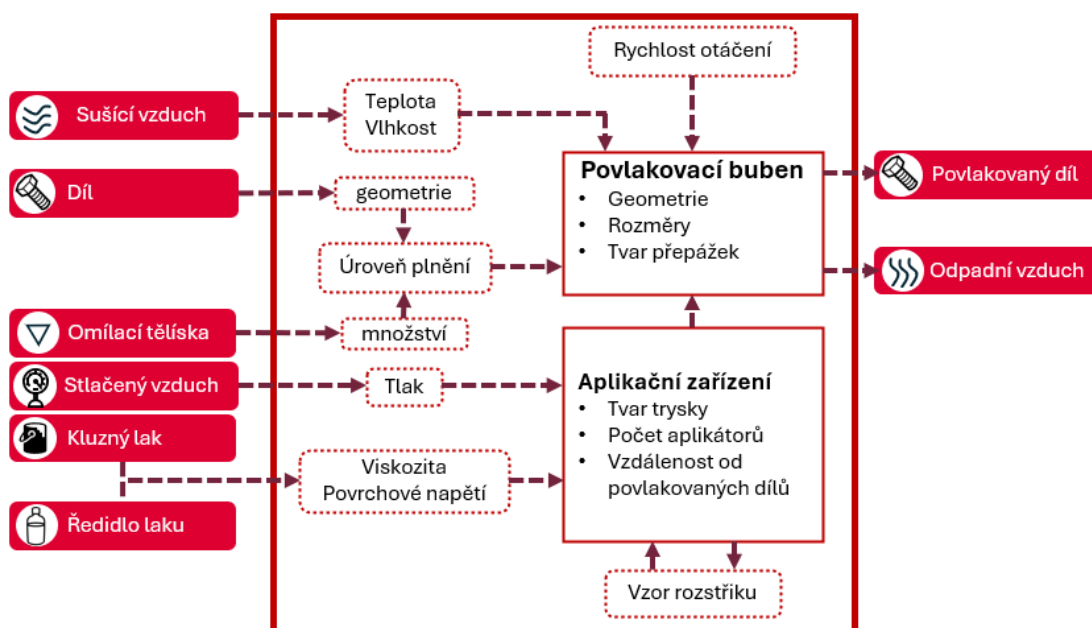
4.2 Technická funkční analýza

Aplikace povlaku nástřikem v bubnu je velice komplexním procesem, protože zahrnuje mnoho vstupů, které ovlivňují přesnost aplikace. Nejprve tak bude nutné pro správný návrh metodiky tyto vstupy identifikovat. Jednotlivé vstupy a výstupy jsou graficky zobrazeny ve formě glassboxu na následujícím obrázku.



Obr. 4-2 Primární faktory vstupující do procesu aplikace (blackbox).

Jednotlivé vstupy do zařízení byly následně rozšířeny o konkrétní faktory, které ovlivňují proces aplikace povlaku. Faktory spojené s konstrukcí zařízení jsou označeny plnou čarou, faktory spojené s provozními parametry poté čerchovanou čarou. Samotný návrh metodiky tak bude záviset na návrhu konstrukce povlakovacího zařízení, jehož vhodnost bude nutné ověřit testováním. Poté bude možné kvantifikovat a kvalifikovat vliv úpravy jednotlivých provozních parametrů.

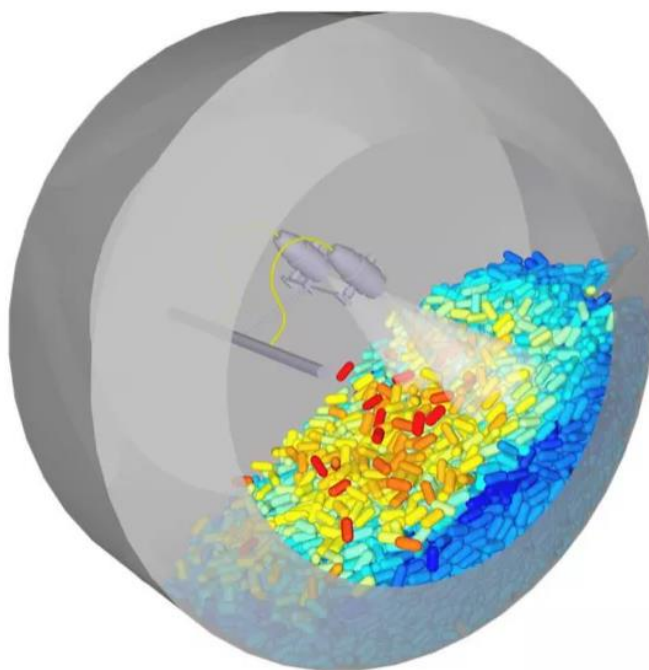


Obr. 4-3 Sekundární faktory vstupující do procesu aplikace (glassbox).

4.3 Návrh alternativních přístupů k řešení

Jak již bylo zmíněno v systematické rešerši, k návrhu zařízení a provozních podmínek lze přistupovat pomocí dvou přístupů, a to pomocí experimentálního nastavení technologie s následnou aplikací principů Quality by Design (QbD), nebo využitím multifyzikálních numerických simulací.

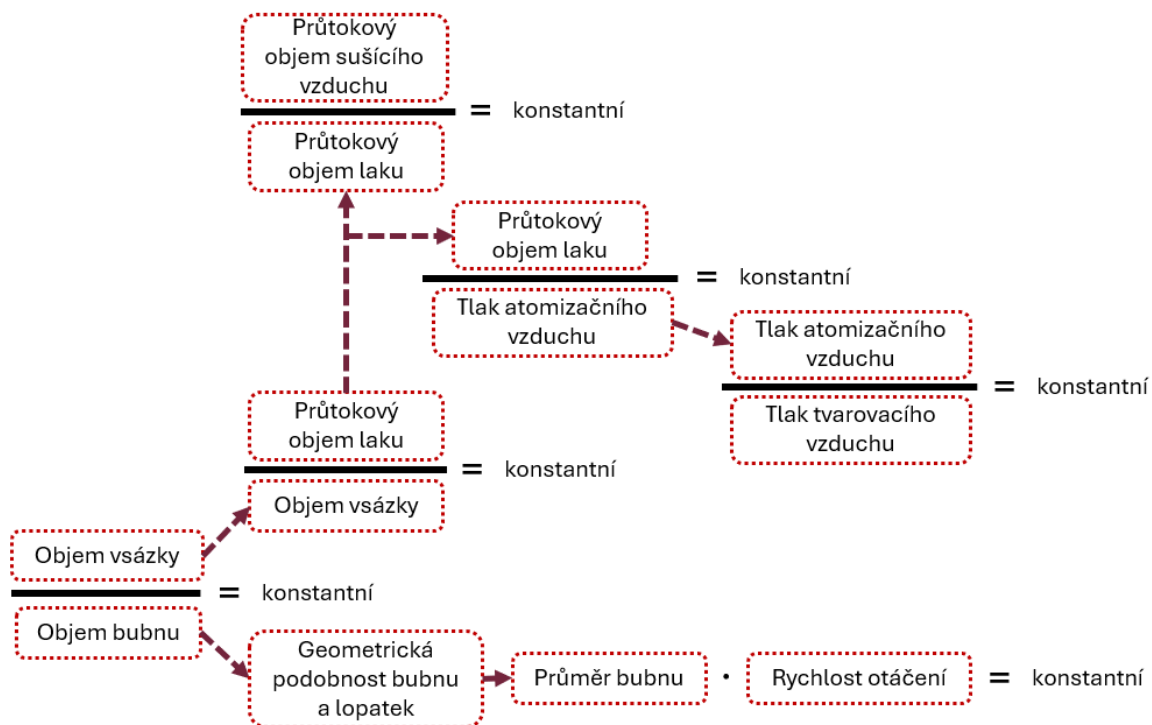
Multifyzikální analýza v tomto případě zahrnuje kombinaci metody diskrétních prvků (DEM) a výpočtové dynamiky tekutin (CFD). Ta propojuje mechaniku diskrétních částic s numerickým řešením proudění tekutin. To umožňuje simultánně řešit dynamiku povlakovaných součástí a jeho interakci s proudícím vzduchem a nanášeným lakem. Dostupným prostředkem k řešení těchto analýz je software Ansys Rocky, který nabízí integrované řešení DEM–CFD simulací.



Obr. 4-4 Numerická simulace povlakování součástí v bubnu v softwaru ANSYS Rocky.[42]

Výhodou tohoto přístupu je možnost snížení potřebného množství experimentů při návrhu technologie, čímž lze zefektivnit vývojový proces a minimalizovat spotřebu materiálu. Nevýhodou je však samotná výpočetní náročnost a fakt, že při simulaci hraje klíčovou roli nastavení vlastností materiálu, které je nutné určit experimentálně. Tyto vlastnosti se budou navíc během procesu významně měnit díky aplikaci kluzného povlaku, který bude snižovat součinitel tření mezi součástmi a povlakovacím bubnem. Výzvou je také samotné nastavení výpočtového modelu, protože povlakované součásti často nevykazují lineární dynamické chování během míchání [23]. Samotné nastavení simulace a následné výpočty tedy mohou být časově náročnější než experimentální nastavení technologie.

Experimentální nastavení technologie spočívá v testování procesu nanášení a určení provozních parametrů aplikace. Ty jsou poté při převodu z laboratorních podmínek do průmyslového prostředí udržovány a škálovány dle následujících pravidel:



Obr. 4-5 Schéma postupu při převodu do průmyslového prostředí a škálování procesu.
(Vytvořeno na základě informací z [18])

Tyto přístupy však nelze porovnat na základě definovaných cílů a omezení. Jedinou kvantifikační metou je v tomto případě časová náročnost, která je navíc diskutabilní. Na základě konzultace s vedoucím práce bylo rozhodnuto v prospěch experimentálního přístupu.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Před samotným návrhem metodiky aplikace kluzného laku bylo nezbytné určit optimální tloušťku povlaku. Tento krok je klíčový pro stanovení požadované tloušťky povlaku a potřebné přesnosti jeho nanášení. Optimální tloušťka bude určena na základě dosažené hodnoty součinitele tření, který je rozhodující pro splnění přejímacích zkoušek výsledného produktu. Tribologickým testům předcházelo testování samotného procesu nanášení povlaku.

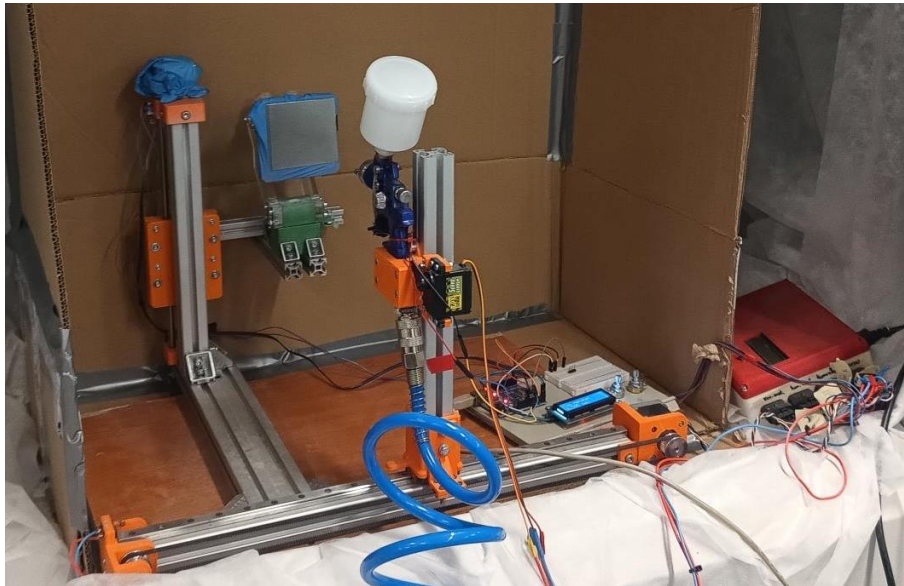
5.1 Testování procesu nanášení

Primárním cílem testování procesu nanášení bylo dosažení co nejhomogennější vrstvy povlaku a stanovení minimální dosažitelné tloušťky této vrstvy. Pro tento účel bylo nezbytné optimalizovat procesní parametry, jako jsou průtokové množství laku, tlak atomizačního vzduchu a poměr ředění laku. Získaná data sloužila rovněž ke korekci použitého výpočtového modelu depozice povlaku, který byl následně použit při aplikaci na vzorcích určených k tribologickým testům.

5.1.1 Zařízení a metody

Povlakovací zařízení

Pro testování procesu nanášení a aplikaci kluzného laku na zkušební vzorky bylo využito zmatňovací zařízení vyvinuté v rámci studentského projektu na Ústavu konstruování. Zařízení je řízeno mikrokontrolérem Arduino Uno a umožňuje nastavení rychlosti vertikálního pohybu lakovací pistole v rozsahu (100–800) mm/s, počet průjezdů v rozsahu 1–255, horizontální posun mezi jednotlivými průjezdy s minimálním krokem 5 mm a regulaci průtoku laku prostřednictvím ovládní spouště lakovací pistole. Vzdálenost mezi nástřikovým zařízením a vzorkem je nastavována manuálně. Zařízení je osazeno HVLP lakovací pistolí TAGRED TA131 s průměrem trysky 0,8 mm. Upevnění vzorků při nástřiku je realizováno pomocí magnetických držáků.



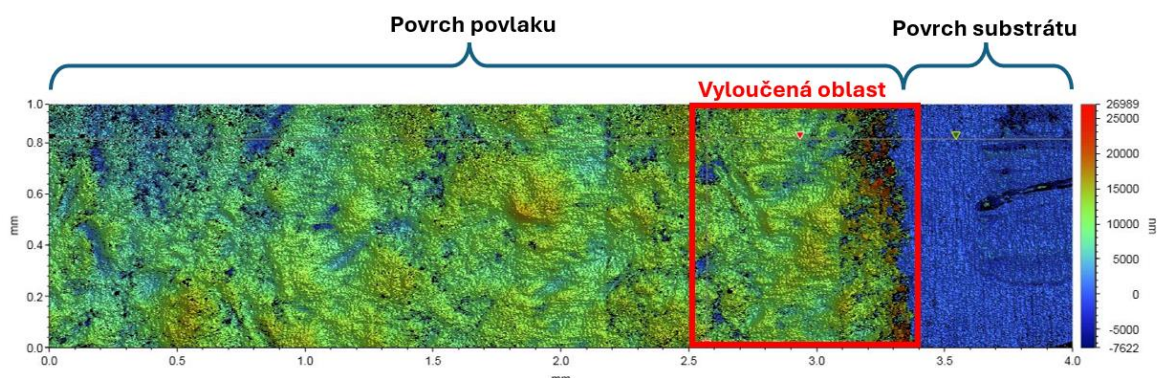
Obr. 5-1 Zmatňující zařízení

Měření tloušťky povlaku

Pro měření tloušťky naneseného povlaku byl využit optický 3D profilometr Bruker ContourGT-X8. Jedná se o bezkontaktní měřicí zařízení pracující na principu koherenční interferometrie s bílým světlem. Výstupem měření je detailní trojrozměrná mapa povrchu, díky čemuž jsme schopni hodnotit nejen tloušťku povlaku, ale také jeho rovnoměrnost a drsnost. Vyhodnocení měřených dat bylo prováděno pomocí softwaru Vision64, který současně slouží pro řízení zařízení.

Protože optický profilometr vyhodnocuje pouze výškové změny, bylo nutné vytvořit výchozí referenční hodnotu, od které bude možné určit tloušťku povlaku. Za tímto účelem byly vzorky před povlakováním částečně zakryty kaptonovou páskou. Po aplikaci povlaku jsme tak získali rozhraní mezi povlakovanou plochou a plochou substrátu. Tato plocha následně sloužila pro ustavení roviny naměřených dat v softwaru pomocí funkce Terms Removal. Výsledky měření totiž mohou být ovlivněny ustavením měřeného vzorku.

Tloušťka povlaku byla vyhodnocována vždy v alespoň pěti bodech podél zamaskované oblasti. Z naměřených dat byla vyloučena oblast v těsné blízkosti rozhraní mezi povrchem substrátu a povlaku. To z důvodů hranového efektu, který vzniká tokem materiálu mezi maskovací páskou a povlakovanou plochou. Snímek z optického profilometru spolu s vyznačenou vyloučenou oblastí je zobrazen na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Snímek z optického profilometru s vyznačenými oblastmi.

Naměřené hodnoty tloušťky povlaku poté sloužili jako vstupní hodnoty pro korekci matematického modelu. Informace o topografii povrchu k odhalení vad povlaku a optimalizaci procesních parametrů nástřiku.

5.1.2 Matematický model depozice povlaku

Primárním cílem použitého matematického modelu bylo zajistit požadovanou tloušťku povlaku na základě vstupních parametrů procesu. Proces povlakování není možné opakovat, a mohlo by tak dojít ke znehodnocení vzorků určených k testování tribologické výkonnosti povlaků. Úkolem matematického modelu proto bylo zvýšit kontrolu nad procesem aplikace tak, aby bylo možné vytvořit vhodný interval testovaných tlouštěk povlaku.

Použitý distribuční model definoval, jak dochází k přenosu aplikovaného laku z trysky na povrch součásti. Pro tento účel byl zvolen dvojitý beta distribuční model. Výhodou tohoto modelu je jednoduché nastavení charakteristiky depozice pro konkrétní nástřikovou trysku, a to prostřednictvím experimentálního určení parametrů β_x a β_y . Tloušťku naneseného povlaku v daném bodě lze následně určit podle následující rovnice:

$$d(x, y) = \int_0^{t_M} k_{\max} \left(1 - \frac{x_p^2}{a^2}\right)^{\beta_x - 1} \left(1 - \frac{(b(a^2 - x_p^2)^{1/2} - av_p t)^2}{b^2(a^2 - x_p^2)}\right)^{\beta_y - 1} dt \quad (5.1)$$

Kde a a b jsou poloměry nástřikové plochy trysky, v_p je rychlost pohybu nástřikové pistole, x_p je poloha nástřikové pistole v daném čase a k_{\max} je maximální dynamická tloušťka povlaku nanesená ve středu elipsy. Tu lze určit jako:

$$k_{\max} = \frac{8 \cdot Q_V}{a \cdot b \cdot \pi} \cdot \eta \quad (5.2)$$

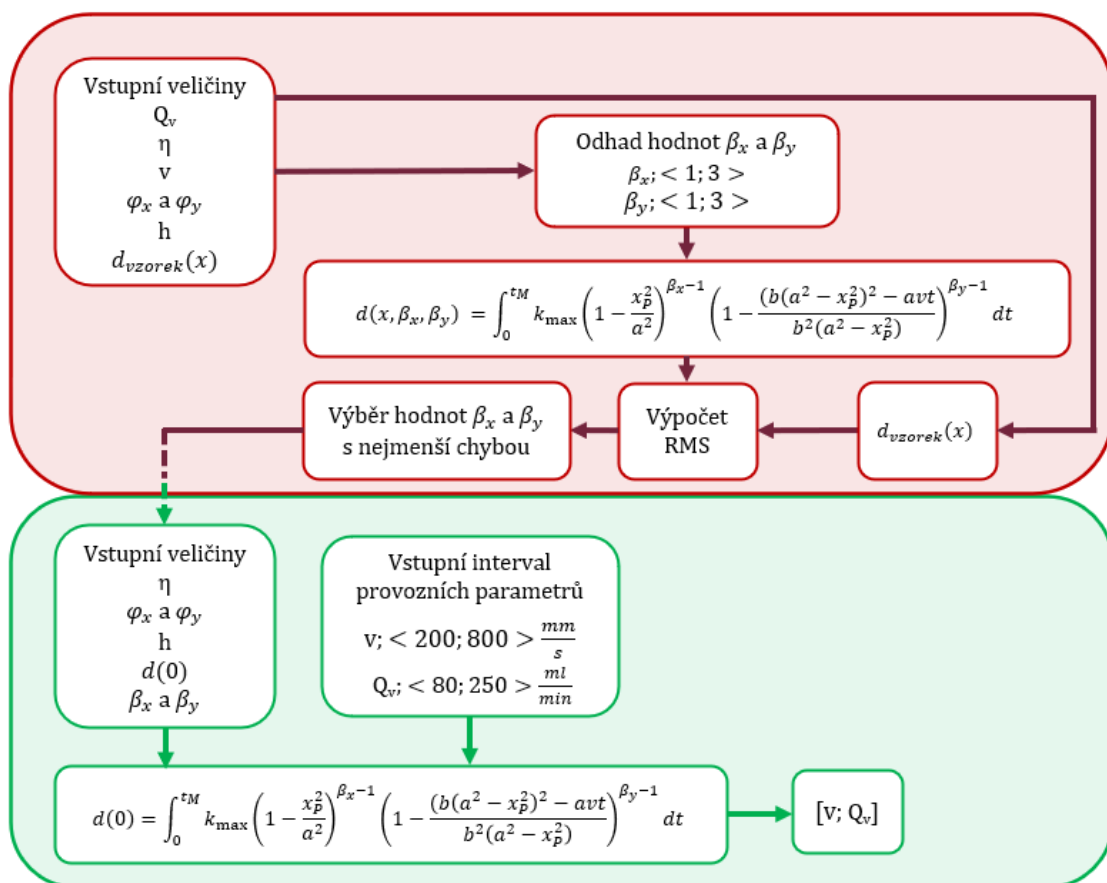
Kde Q_V je průtokový objem laku a η je přenosová účinnost.

Pro nastavení matematického modelu bylo nezbytné pro každou sadu naměřených tloušťek povlaku určit průtokový objem laku, přenosovou účinnost, rychlost pohybu nástřikové pistole a velikost plochy nástřikové plochy. Tu lze určit na základě úhlu trysky lakovací pistole φ_x a φ_y a vzdálenosti povrchu od ústí trysky h jako:

$$a = h \cdot \tan(\varphi_x) \quad (5.3)$$

$$b = h \cdot \tan(\varphi_y) \quad (5.4)$$

Průtokový objem laku byl stanoven na základě měření času potřebného k aplikaci předem definovaného množství laku. Přenosová účinnost byla určena jako podíl hmotnosti laku naneseného na vzorek vůči celkové hmotnosti aplikovaného laku. Rychlost pohybu pistole byla řízenou veličinou. Samotný výpočet parametrů β_x a β_y byl řešen pomocí MATLAB skriptu. Na základě charakteristik lakovací pistole tak bylo možné určit vhodnou kombinaci průtokového objemu laku a rychlosti pohybu která zajišťuje dosažení požadované tloušťky povlaku.



Obr. 5-3 Schéma optimalizace výpočtového modelu a jeho použití.

5.1.3 Výsledky

V rámci testování procesu nanášení byly získány informace o minimální a maximální dosažitelné homogenní tloušťce povlaku při jednom průjezdu lakovací pistole. Minimální dosažitelná tloušťka povlaku činila přibližně 5 μm a představovala dolní mez intervalu testovaných tlouštěk. Tato hodnota odpovídá minimální doporučené tloušťce povlaku [4]. Je však nutné poznamenat, že dosažení této hodnoty bylo částečně omezeno minimálním průtokem použité HVLP lakovací pistole a maximální rychlostí jejího pohybu.

Maximální dosažitelná tloušťka povlaku pak definovala minimální potřebný počet průjezdů lakovací pistole k dosažení horní meze testovaného intervalu. Vzhledem k tomu, že s rostoucím počtem průjezdů dochází ke sčítání profilů nástřiku, které mají tvar amplitudy, bylo cílem zajistit co nejméně průjezdů. Horní mez intervalu testovaných povlaků tak byla stanovena jako 50 μm , při maximální dosažitelné tloušťce povlaku 8,4 μm a 6 průjezdech. Tato hodnota současně představuje dvojnásobek doporučené tloušťky povlaku [4]. Maximální dosažitelná tloušťka při jednom průjezdu byla definována jako hodnota, při níž ještě nedochází ke stékání povlaku.

Rozsah aplikovaných tlouštěk povlaku na testované vzorky je znázorněn v Tab. 5-1. Testované vzorky odpovídají svým materiálem a povrchovou úpravou zadaným titanovým šroubům. Celkem bylo připraveno deset sad vzorků s různými tloušťkami povlaku, přičemž každá sada obsahovala tři kusy určené k testování za různých podmínek. U všech vzorků byl zachován atomizační tlak vzduchu 0,2 MPa a vzdálenost mezi ústím trysky a povrchem 200 mm. Aplikace povlaku probíhala při teplotě $(24 \pm 1) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $(55 \pm 10) \%$, které odpovídají požadavkům uvedeným v normě ČSN EN 2491. Nebyla však dodržena podmínka provedení aplikace ve stejném časovém úseku, což bylo způsobeno poruchou zmatňujícího zařízení.

Tab. 5-1 Zvolený interval tlouštěk povlaku pro testování tribologických vlastností.

Charakteristika	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9	T.10
Předpokládaná tloušťka povlaku	5 μm	8 μm	12 μm	15 μm	20 μm	23 μm	26 μm	32 μm	40 μm	50 μm
Poměr kluzného laku a ředidla	1:0	3:1	2:1	2:1	2:1	2:1	1:0	1:0	1:0	1:0

5.2 Testování povlaku

5.2.1 Testování v atmosférických podmínkách

Zařízení a metody

Vývoj součinitele tření povlaků byl testován pomocí univerzálního tribologického zařízení Bruker UMT tribolab. Experimenty byly navrženy v konfiguraci pin-on-plate s ohledem na možnost porovnání s výsledky uvedenými v rešeršní části práce. Pro dosažení podmínek odpovídajících kontaktu závitového spoje byl použit pin s plochou hlavou o průměru 3 mm, čímž se zvýšila konformita kontaktu mezi pinem a vzorkem.

Testovaný vzorek byl nejprve vyrovnán a následně pomocí otvorů pro šrouby připevněn k recipročnímu modulu zařízení. Tento modul vykonává lineární oscilační pohyb, přičemž na základě měření síly ve směru pohybu a známého zatížení je vyhodnocován součinitel tření. Podmínky experimentu jsou shrnuty v tabulce Tab. 5-2.

Tab. 5-2 Podmínky experimentu

Zatěžovací síla	Teplota a vlhkost prostředí	Délka dráhy	Průměrná rychlost
35 N	(24±3) °C a (50±20) % RH	10 mm	100 mm/s

Celkem bylo v těchto podmínkách otestováno 10 vzorků, přičemž pro každý z vzorků byla provedena 3 měření. Získaná data byla následně zpracována pomocí skriptu vytvořeného v softwaru MATLAB. Zpracování spočívalo ve filtrování hodnot v blízkosti bodu zvratu, tedy v okamžiku, kdy dochází k poklesu rychlosti a ke změně směru pohybu. V této části dochází k výrazným výkyvům ve snímané vertikální síle, ze které je následně vypočítávána hodnota součinitele tření. Získáváme tak pouze hodnoty součinitele tření při konstantní rychlosti průjezdu pinu po vzorku. Z těchto hodnot byla poté určena průměrná hodnota součinitele tření a jeho směrodatná odchylka pro každý z průjezdů.

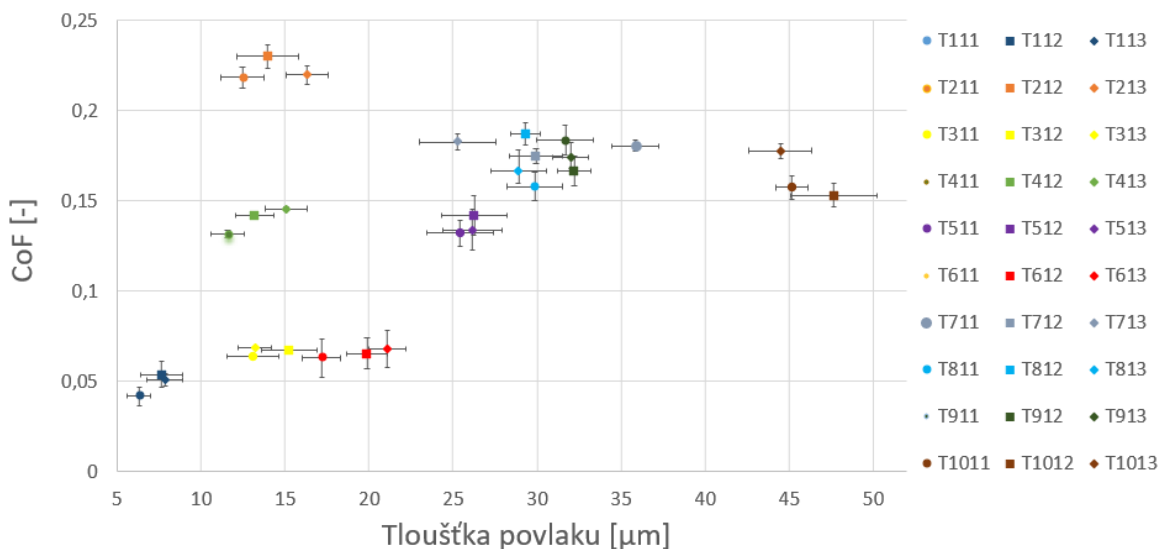
Po vykonání všech testů byla následně pomocí optického profilometru určena tloušťka povlaku. Ta byla měřena opět na rozhraní povlaku a povrchu substrátu. Měření bylo provedeno v místě průjezdu pinu po vzorku, kdy pro každou z testovacích drah byla provedena tři samostatná měření.



Obr. 5-4 vzorek po vykonání testu s vyznačenými oblastmi měření tloušťky povlaku.

Výsledky a diskuse

Cílem testování bylo stanovit optimální tloušťku povlaku, která splňuje požadavek na snížení součinitele tření v rozmezí definovaném zákazníkem. Dílčím cílem bylo také posoudit závislost součinitele tření na tloušťce povlaku. Vliv tloušťky povlaku na součinitel tření pro prvních sto cyklů od jeho ustálení můžeme vidět na Obr. 5-5.

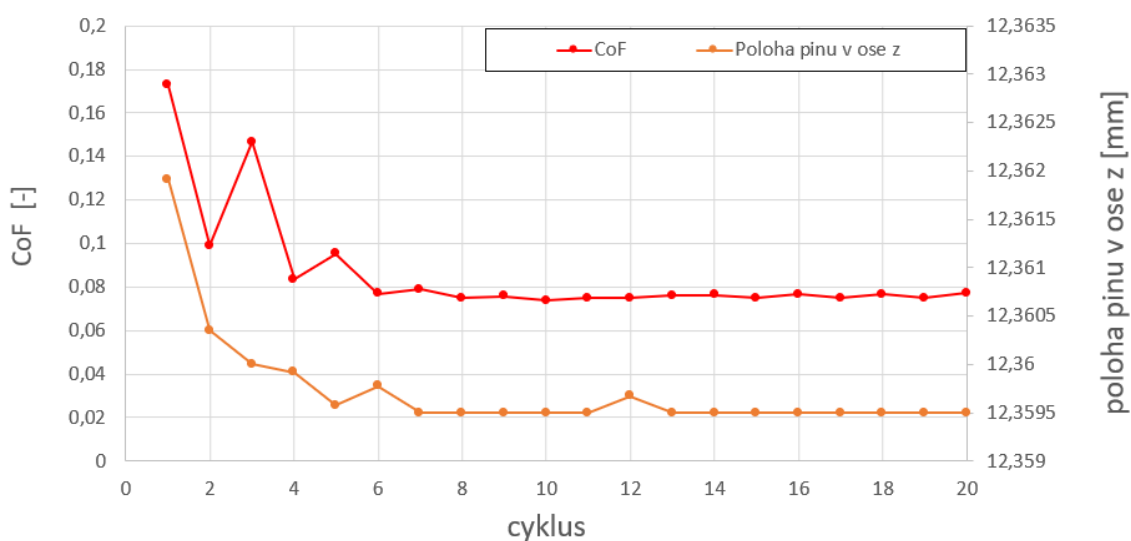


Obr. 5-5 Graf závislosti součinitele tření na tloušťce povlaku pro prvních 100 cyklů od ustálení hodnoty součinitele tření.

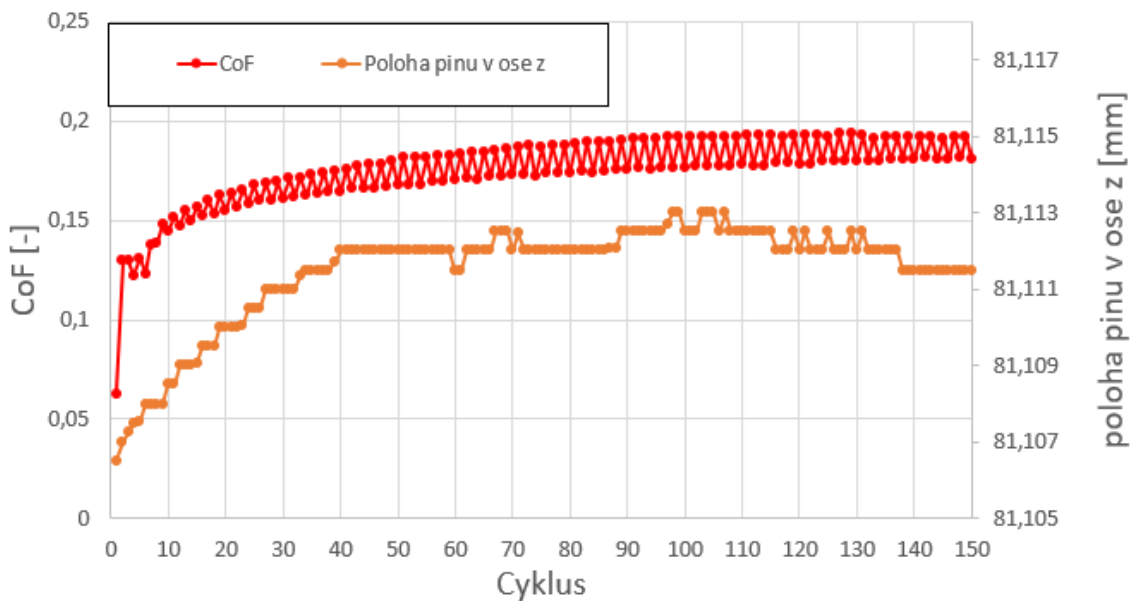
Nejnižších hodnot součinitele tření bylo dosaženo při tloušťkách menších než 25 μm , konkrétně pro vzorky T1, T3 a T6, kde průměrná hodnota součinitele tření činila 0,06. U vzorků T4 a T2 je nižší výkonnost povlaků přisuzována snížené opakovatelnosti procesu aplikace, která byla ovlivněna poruchou zmatujícího zařízení. Z tohoto důvodu nebudou výsledky těchto vzorků zahrnuty do dalšího hodnocení. Pro vzorky s vyšší tloušťkou povlaku než 25 μm byla průměrná hodnota součinitele tření přibližně 0,16. Tento rozdíl je výsledkem dvou odlišných trendů, které byly pozorovány během záběhu povlaku.

U vzorků T1, T3, T5 a T6 docházelo ke snižování součinitele tření a jeho stabilizaci v průběhu prvních deseti cyklů. Naproti tomu u vzorků T7, T8, T9 a T10 byl zaznamenán počáteční nárůst součinitele tření, který se ustálil až přibližně po sto cyklech. Podobný průběh byl popsán také v bakalářské práci Veličky, kde byl tento jev připisován opotřebením povlaku [37]. Nicméně následná analýza těchto vzorků prokázala, že k úplnému opotřebením povlaku nedošlo. Tloušťka zkoumaných povlaků se pohybovala v rozmezí 25 až 80 μm .

Jak můžeme vidět na Obr. 5-6 a Obr. 5-7, pokles součinitele tření je doprovázen poklesem polohy pinu ve směru zatížení, zatímco pro nárůst součinitele tření lze pozorovat opačný trend. Tento jev je způsoben ulpíváním povlaku a částic jeho opotřebením na nepovlakovaný pin. Zatížení je tak přenášeno přes rostoucí množství atomárních rovin, což vede k dalšímu zvýšení tření. U tenčích povlaků naopak dochází k postupnému vyhlazení povrchu a orientaci částic ve směru pohybu, čímž dochází ke snížení tření.

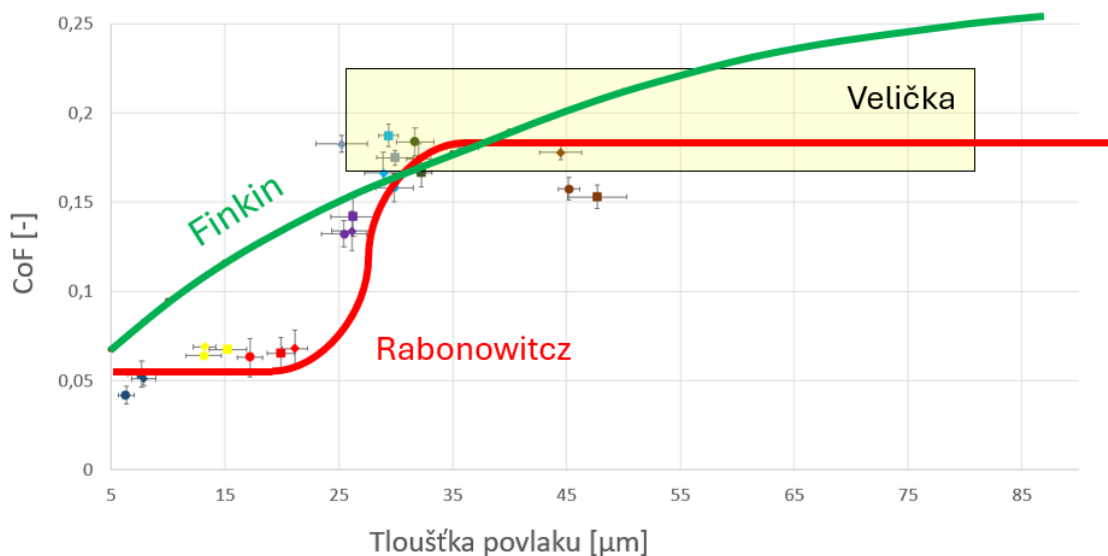


Obr. 5-6 Vývoj součinitele tření pro vzorek T312.



Obr. 5-7 Vývoj součinitele tření pro vzorek T812.

Naměřená data byla následně porovnána s teoretickými křivkami podle Rabinowitze[11] a Finkina[12]. Z výsledků vyplývá, že měřené hodnoty lépe odpovídají průběhu podle Rabinowitze. Toto zjištění podporují i experimentální data uvedená v bakalářské práci Veličky, kde v rozmezí tloušťky povlaku 25–80 μm již nedocházelo k výraznému nárůstu součinitele tření. Průměrná hodnota součinitele tření ve všech měřených případech činila 0,2 [37].



Obr. 5-8 Proložení grafu závislosti součinitele tření na tloušťce povlaku teoretickou křivkou dle Rabinowitze [11] a Finkina [12].

Povlaky tedy vykazují konstantní hodnotu součinitele tření až do dosažení kritické tloušťky povlaku, která se podle experimentálních dat pohybuje v rozmezí 21–25 μm . Tato hodnota odpovídá horní hranici doporučené tloušťky 20 μm , stanovené výrobcem povlaku [4]. Při aplikaci povlaku v rozsahu 5 až 20 μm lze tedy při správné aplikaci laku zajistit stabilní třecí podmínky, přičemž naměřené hodnoty součinitele tření v tomto intervalu splňují požadavky přejímacího testu výsledného produktu.²

Jediným z omezujících faktorů při volbě tloušťky povlaku je tak toleranční pole závitů povlakovaných šroubů. Pro šrouby určené k použití v letectví a kosmonautice, definované normou ČSN ISO 5855-1, je předepsáno toleranční pole závitů h4/H6 [38]. Překročení těchto tolerančních mezí může vést ke zvýšenému tření, případně až k nemožnosti zašroubování šroubu do příslušného závitu. Z tohoto důvodu je nutné udržet tloušťku povlaku na závitových plochách ve spodní části intervalu, tedy přibližně kolem hodnoty 5 μm .

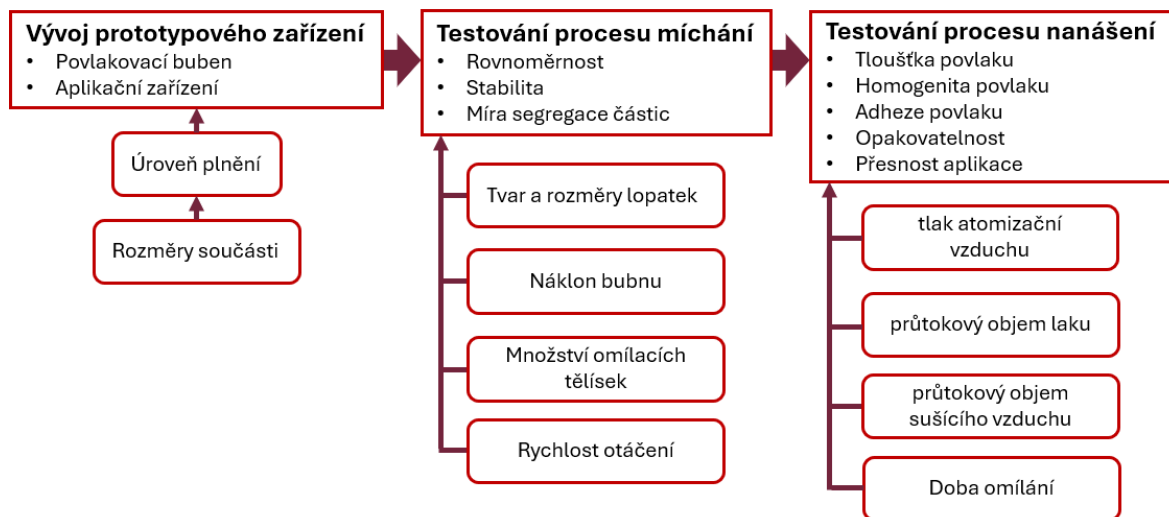
5.3 Předběžný návrh metodiky aplikace

Na základě technické funkční analýzy povlakování součástí v bubnu byl sestaven předběžný návrh metodiky aplikace povlaku. Stěžejním bodem návrhu je konstrukce prototypového zařízení, které umožní testování samotného procesu nanášení a kvantifikaci procesních parametrů na přesnost aplikace.

Zařízení bude navrženo s cílem umožnit testování co nejširšího intervalu zadaných rozměrů šroubů určených k povlakování. Z tohoto důvodu bude nutné stanovit vhodné rozměry bubnu. Konstrukční řešení bude dále nutné optimalizovat pro zajištění vhodné kinematiky procesu a odpovídajících podmínek pro samotnou aplikaci. Hlavními parametry, které bude nutné při návrhu zohlednit, jsou rychlost otáčení bubnu, množství omílacích tělísek, tvarové a rozměrové řešení přepážek a geometrie povlakovaných dílů.

Následně budou experimentálně určeny parametry aplikace povlaku, konkrétně průtokového objemu laku, průtokového objemu sušícího vzduchu a tlak atomizační vzduchu. Cílem bude dosažení požadované tloušťky povlaku a kvality výsledného povlaku. Po nalezení vhodného nastavení bude provedeno další testování, jehož cílem bude zhodnotit vliv jednotlivých parametrů na přesnost a opakovatelnost procesu.

² Konkrétní hodnoty nejsou součástí této práce. Předmět obchodního tajemství podle par.17-20 obch. Zákoníku.



Obr. 5-9 Schéma předběžného návrhu metodiky aplikace.

5.3.1 Předběžný návrh povlakovacího bubnu

Základním vstupním parametrem pro návrh rozměrů bubnu byl objem vkládaného materiálu. Na základě požadovaného rozsahu rozměrů součástí bylo nutné určit takový objem bubnu, který by co nejlépe pokryl celý tento interval. Při návrhu se uvažovalo s povlakováním nejmenších součástí při maximální požadované kapacitě procesu a zároveň s největšími součástmi při minimální požadované kapacitě. Byl tak definován nejmenší a největší vkládaný objem jako.

$$V_{\min} = V_{S_{\min}} \cdot n_{\max} \cdot k_g = 0,06 \text{ l} \quad (5.5)$$

$$V_{\max} = V_{S_{\max}} \cdot n_{\min} \cdot k_g = 2,2 \text{ l} \quad (5.6)$$

kde $V_{S_{\min}}$ a $V_{S_{\max}}$ jsou objemy nejmenší a největší povlakované součásti, n_{\min} a n_{\max} minimální a maximální počet kusů v dávce, a k_g je korekční faktor zahrnující prostorovou neuspořádanost dílů v bubnu. Hodnota faktoru k_g byla zvolena 3. I když je známý počet povlakovaných součástí v dávce, v této fázi návrhu není zatím jasně definované množství omílacích tělísek, která budou přidávána během procesu. Hodnota faktoru tedy zahrnuje i tuto nejistotu, a proto byla nastavena s rezervou. Přesnější stanovení této hodnoty by zároveň vyžadovalo určení konkrétní geometrie bubnu. Z výpočtů současně vyplývá, že i přes využití značně konzervativního korekčního faktoru je minimální objem výrazně pod běžným provozním limitem průmyslových zařízení.

Na základě maximální míry plnění bubnu v_{\max} uvedené v literatuře (48 % dle práce [20] a 30 % dle práce [39]) byl určen interval potřebného objemu bubnu jako:

$$V_{buben} = V_{max} \cdot \frac{v_{max}}{100} = (4,4 \div 7,3)l \quad (5.7)$$

Z toho vyplývá, že požadovaný objem bubnu je poměrně malý, což klade nároky na celkové rozměry zařízení. S tím souvisí i prostorová omezení pro konstrukci dalších prvků, jako je umístění nástřikové trysky, přívod sušícího vzduchu a systém odvodu výparů.

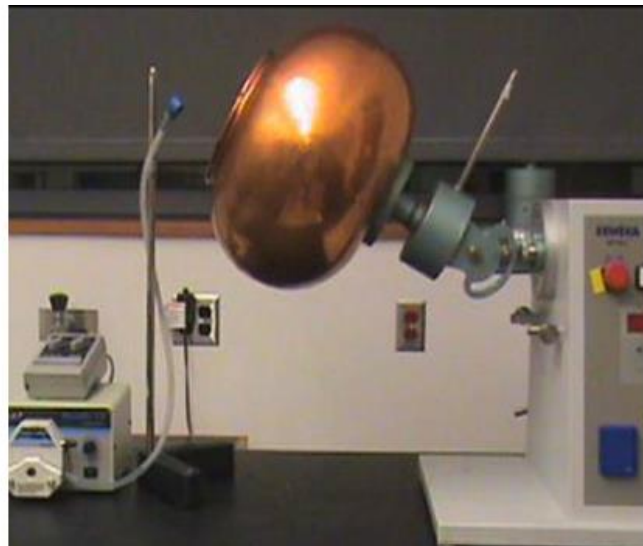
Z těchto důvodů bylo pro návrh prototypového zařízení zvoleno řešení na principu typu Accela-Cota s temperovaným bubnem. To umožní snadný průchod vzduchu prostorem bubnu, bez nutnosti použití přídavných trubic. Materiál bubnu bude nerezová ocel, a to s ohledem na snadnou údržbu a odolnost vůči chemickému působení rozpouštědla obsaženého v laku.

6 DETAILNÍ NÁVRH

6.1 Konstrukční návrh prototypového zařízení

6.1.1 Povlakovací buben

Na základě požadovaného objemu bubnu, volby materiálu a konstrukčního provedení bylo jako vhodné řešení z běžně dostupných komponent vybráno použití nerezových cedníků. Jejich geometrie odpovídá tvarovým řešením pro bubnová povlakovací zařízení. Cedníky jsou vzájemně spojeny pomocí šroubů přes přírubové dosedací plochy. Celkový vnitřní objem takto vytvořeného bubnu činí 7,2 litru, což odpovídá požadovanému pracovnímu objemu stanovenému v předchozí části návrhu.

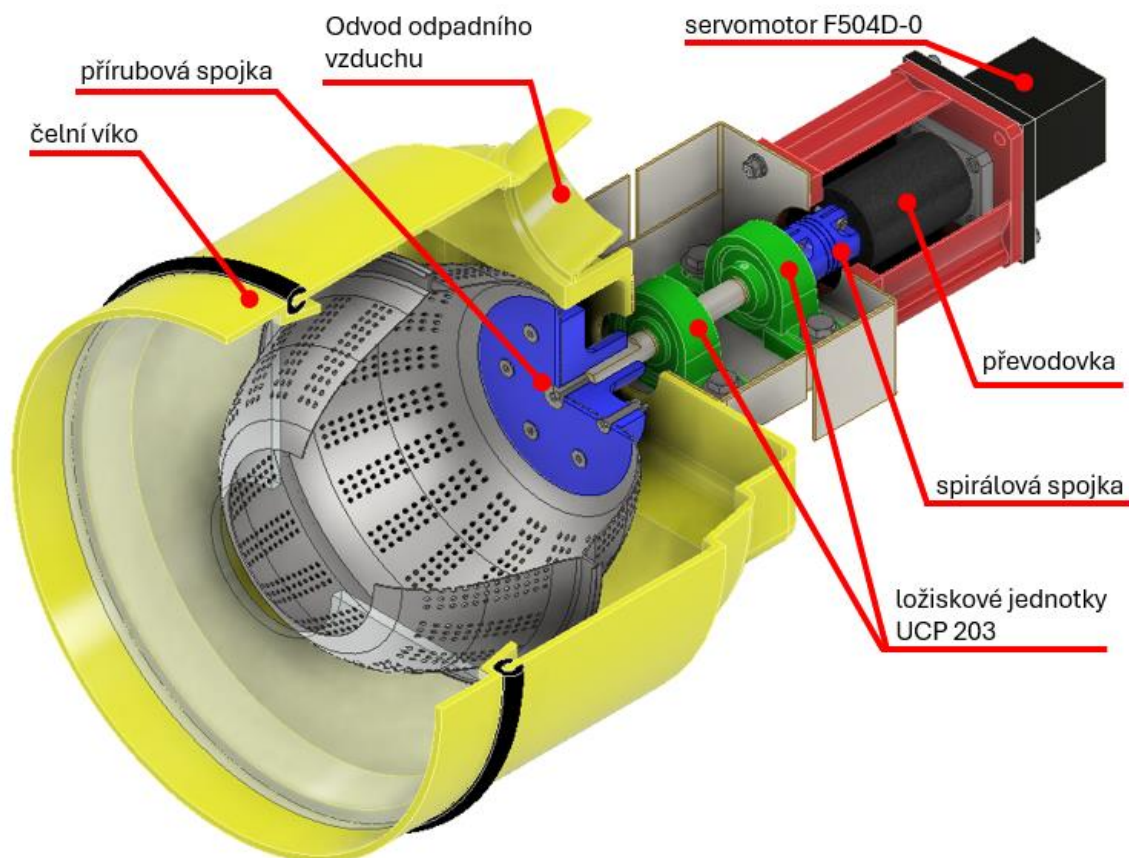


Obr. 6-1 Povlakovací buben použitý v této práci (vlevo) a v práci Sashi [20] (vpravo).

Buben je z jedné strany opatřen plnicím otvorem a z druhé strany přírubovou spojkou pro připojení k hřídeli. Ta přenáší kroutící moment z hřídele tvarovým spojem s plochou drážkou a je s hřídelí axiálně zajištěna šroubem se záпустnou hlavou a vnitřním šestihranem. Toto řešení umožňuje snadné vyjmutí bubnu pro účely čištění a údržby.

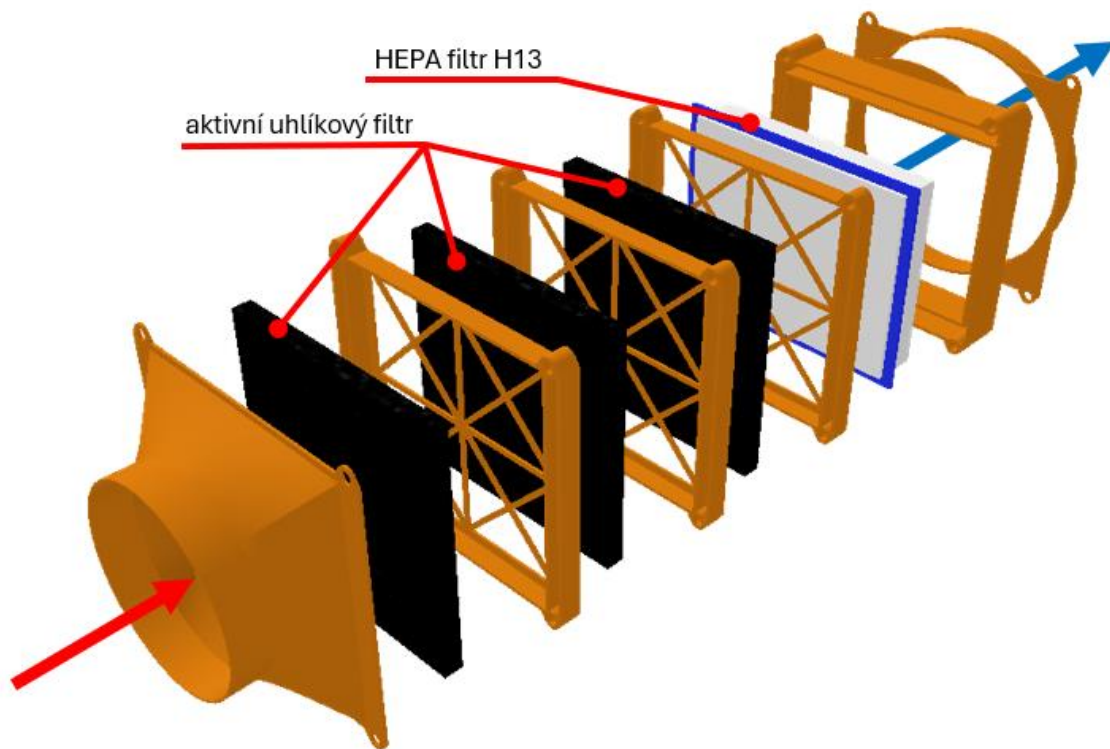
Hřídel je uložena na rámu zařízení pomocí ložiskových jednotek UCP 203, pro vyrovnání možné nesouososti uložení. Přenos krouticího momentu mezi hřídelí a převodovkou zajišťuje 3D tištěná pružná spirálová spojka z materiálu PETG. Převodovka, s převodovým stupněm 1:12, je poháněna střídavým servomotorem F504D-0 s regulovatelnými otáčkami.

Pro zajištění bezpečnosti provozu je buben umístěn v uzavřené pracovní komoře s odnímatelným čelním víkem z průhledného polykarbonátu, díky čemuž je umožněna vizuální kontrola procesu. Ve víku je umístěn otvor pro vložení aplikační trysky a zároveň slouží jako vstupní otvor pro přívod vzduchu. Vzhledem k omezením týkajícím se teploty procesu zařízení nevyužívá přívod ohřivaného sušícího vzduchu. Sušení je tedy zajištěno pouze prouděním okolního vzduchu, které je vyvoláno podtlakem odsávacího systému.

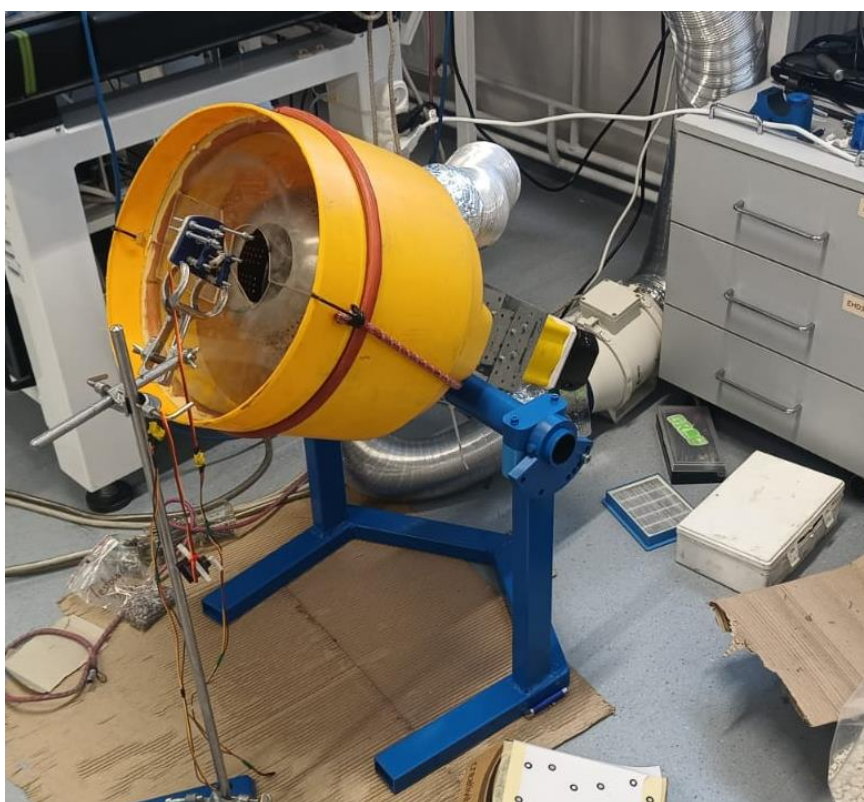


Obr. 6-2 Popis konstrukce povlakovacího bubnu.

Odsávání odpadního vzduchu je řešeno potrubním kruhovým ventilátorem TD 500/150 3V s regulovatelným výkonem odsávání v rozsahu 390–560 m³/h [40]. Před ventilátorem je umístěna 3D tištěná modulární filtrační jednotka s aktivními uhlíkovými filtry pro zachytávání těkavých organických látek a jemným HEPA filtrem H13 pro zachytávání pevných částic laku. Takto vyčištěný vzduch je následně odváděn z místnosti přes okno ven.



Obr. 6-4 Popis modulární filtrační jednotky.



Obr. 6-3 Sestavené prototypové zařízení.

Povlakovací buben s pohonnou jednotkou je otočně uložen na svařeném rámu z ocelových jechlů. Aretační mechanismus umožňuje nastavení úhlu naklonění bubnu v rozsahu -90° , 0° , 10° , 20° , 30° a 40° . To umožňuje nastavit vhodné podmínky pro míchání součástí a snadné vyprázdnění obsahu z bubnu.

6.1.2 Aplikační zařízení

Na základě testování procesu nanášení bylo zjištěno, že při vysoké rychlosti pohybu lakovací pistole ($800 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) byla při nejnižším průtokovém objemu laku (přibližně $110 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$) dosažena minimální tloušťka povlaku $5 \text{ }\mu\text{m}$. Při povlakování součástí v bubnu je však rychlost pohybu dílu v nástřikové oblasti určována pohybem součásti, nikoliv pohybem lakovacího zařízení. Lze předpokládat, že při takto vysoké rychlosti by mohlo docházet k poškození právě naneseného laku nebo k nechtěnému poškození závitových ploch v důsledku kolizí mezi součástmi. Z tohoto důvodu bylo nutné nahradit HVLP lakovací systém systémem airbrush, který umožňuje výrazně nižší průtok laku.

Pro tento účel byla zvolena airbrush pistole FENGDA BD-130 s tryskou o průměru $0,3 \text{ mm}$. Ta využívá nezávislý dvojčinný systém, který umožňuje samostatné ovládání přívodu vzduchu a barvy. Díky této nezávislosti zůstávají podmínky atomizace konstantní bez ohledu na aktuální nastavení průtoku barvy. To přináší lepší kontrolu nad procesem aplikace, a tím i vyšší kvalitu výsledného povlaku.

Na základě vlastností použité airbrush pistole bylo možné dosáhnout průtokového objemu laku v rozsahu $2,4$ až $7,5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ v závislosti na zvoleném poměru ředění laku a tlaku atomizace. Průtokový objem byl stanoven experimentálně, obdobně jako při předchozím testování, a to měřením času potřebného k aplikaci definovaného objemu laku.

Jedním z dílčích cílů této práce byla automatizace procesu nanášení, která má zajistit vyšší opakovatelnost samotného procesu i testování parametrů nanášení. Automatizační systém je postaven na platformě Arduino Uno. Ta řídí servomotory, které ovládají přívod vzduchu a průtok barvy. Ovládací rozhraní tvoří LCD displej, na kterém se zobrazují aktuálně nastavené vstupní veličiny procesu. Tyto veličiny, kterými jsou doba aplikace a úhel otevření jehly barvy, se nastavují pomocí dvou potenciometrů. Není tedy nutné upravovat kód při každé změně nastavení aplikace. Celý systém je potom umístěn na laboratorním stojanu, který zajišťuje stabilní polohu airbrush pistole během procesu aplikace.



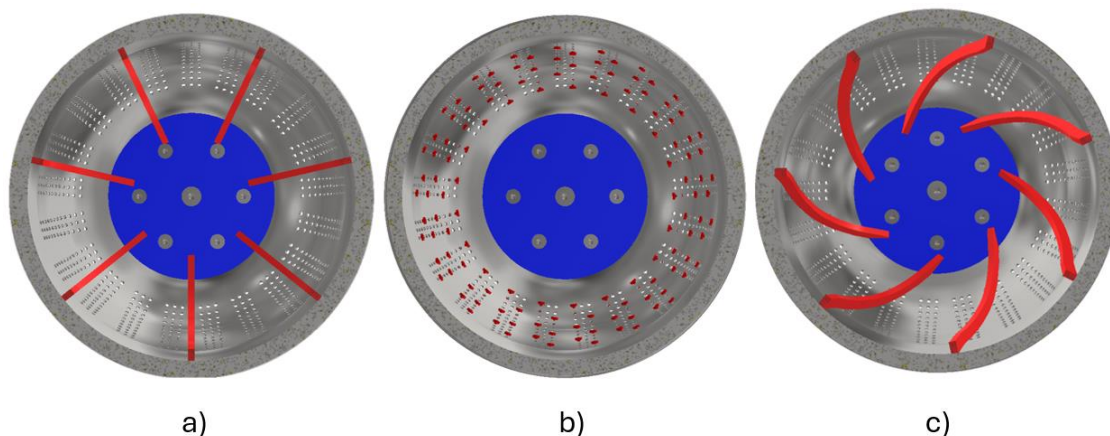
Obr. 6-5 Automatizovaná airbrush pistole FENGA BD-130.

Dále byly pro použitou airbrush pistoli experimentálně určeny charakteristiky úhlu nástřiku, který se v závislosti na atomizačním tlaku pohyboval v rozmezí 5,7 až 11,5°. Tyto hodnoty byly stanoveny na základě měření rozměrů nástřikové plochy při dané úst'ové vzdálenosti a různých atomizačních tlacích. Úhel nástřiku byl určován proto, aby bylo možné stanovit velikost nástřikové oblasti při samotné aplikaci. Ta byla pro danou úst'ovou vzdálenost, která se vzhledem ke konstrukčnímu řešení zařízení mohla pohybovat od 180 do 220 mm, určena podle vztahu uvedeného v rovnici (5.3) a (5.4). Tyto hodnoty byly důležité pro návrh samotné kinematiky procesu, kde bylo cílem vytvořit souvislou kaskádovou plochu vhodnou pro aplikaci laku.

6.2 Testování procesu míchání

Před samotnou aplikací povlaku bylo nutné stanovit vhodné podmínky pro míchání, a to především z hlediska dosažení rovnoměrnosti a stability procesu. Zároveň bylo nezbytné nastavením procesu vytvořit vhodnou oblast pro samotnou aplikaci povlaku, jak bylo diskutováno v předchozích kapitolách. Proces míchání byl testován na šroubech s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem v rozměrech M3×20, M4×40 a M8×16, s cílem zajistit stejné podmínky míchání součástí nezávisle na jejich velikosti a geometrické podobnosti.

Pro testování byly zvoleny různé úpravy vnitřního uspořádání povlakovacího bubnu, a to konfigurace základního provedení bubnu, s kolizními členy, s rovnými lopatkami a s lopatkami pod úhlem. Současně byly testovány různé úhly náklonu bubnu, jelikož podle rešeršních poznatků lze zvýšením úhlu náklonu zlepšit rovnoměrnost míchání součástí díky axiální složce pohybu [20].



Obr. 6-6 Konfigurace s a) rovnými lopatkami, b) kolizními členy a c) lopatkami pod úhlem.

Testování probíhalo při otáčkách bubnu 20, 30, 40 a 50 min^{-1} . Tento interval byl stanoven na základě rovnice (2.5) pro zachování lineární rychlosti pohybu, a to s ohledem na průměr bubnu a otáčky průmyslového zařízení ROTAMAT [36] a experimentálního zařízení popsaného ve studii Sashiho [20].

Rovnoměrnost míchání součástí byla hodnocena na základě sledování pohybu barevně odlišených součástí. Byla sledována frekvence výskytu jednotlivých označených dílů v předpokládané nástřikové zóně a variabilita časových intervalů mezi těmito výskyty. Tím bylo možné posoudit rovnoměrnost pohybu povlakovaných součástí v rámci procesu.

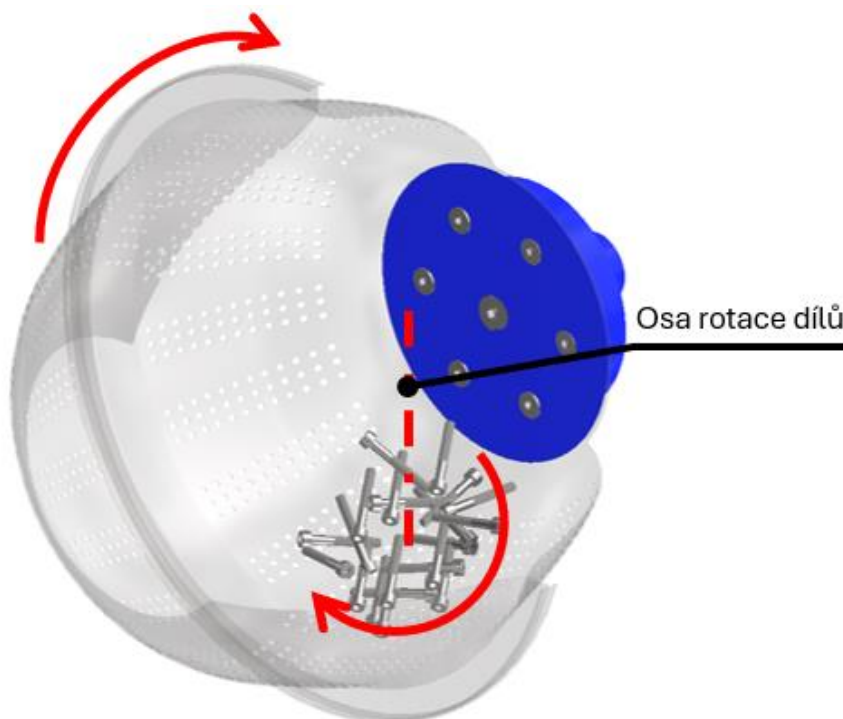
6.2.1 Úhel náklonu bubnu

Na základě experimentálního testování bylo zjištěno, že v rozsahu úhlu náklonu 0–20° nevznikla, bez ohledu na konfiguraci bubnu, vhodná kaskádová vrstva. Axiální složka pohybu v tomto rozsahu nehrála prakticky žádnou roli a díly byly rovnoměrně rozprostřeny po celé délce bubnu. Nevytvářela se tak stabilní oblast pohybu součástí, která by procházela nástřikovou zónou definovanou použitým aplikačním zařízením. Vzhledem k prostorovému omezení danému požadovanou kapacitou povlakovacího bubnu nebylo možné tento nedostatek kompenzovat přidáním další lakovací pistole.

Při úhlu náklonu 40° již axiální složka pohybu výrazně ovlivňovala chování součástí uvnitř bubnu. V důsledku vyšší setrvačné energie docházelo u šroubů k pronikání do střední části bubnu, zatímco lehčí omílací tělíska byla vtačována do zadní části bubnu. Tento jev vedl k výrazné segregaci obou složek a snížení rovnoměrnosti pohybu. Z tohoto důvodu je v následujících kapitolách pro účely dalšího hodnocení zohledněno pouze nastavení s úhlem náklonu 30° . Toto nastavení vykazovalo nejlepší podmínky s ohledem na stabilitu procesu, požadavek na vhodnou plochu pro aplikaci povlaku a míru segregace mezi součástmi a omílacími tělíska.

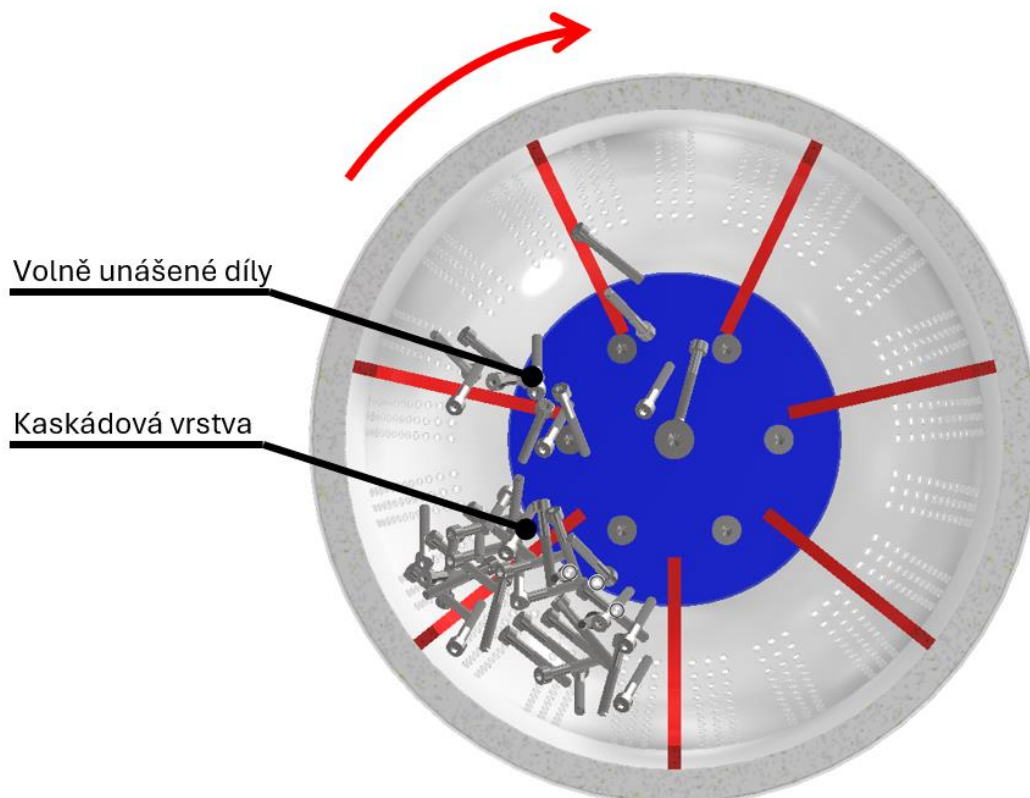
6.2.2 Konfigurace povlakovacího bubnu

První fáze experimentů byla provedena v konfiguraci základního provedení bubnu, tedy bez přídavných lopatek. Jedná se o řešení často využívané ve farmaceutických povlakovacích zařízeních. V těchto zařízeních je dosaženo rovnoměrného pohybu součástí a charakteristického kaskádového pohybu díky odstředivé síle povlakovaných součástí. V provedených testech se však tento efekt neprojevil, a to kvůli prokluzu mezi součástmi a povlakovacím bubnem, který narůstal se snižováním úrovně plnění bubnu. I přesto zde docházelo k obměně dílů díky axiální složce pohybu, vyvolané náklonem bubnu a jeho geometrií. Výsledkem byl však pouze rotační pohyb kolem inflexního bodu, s malou změnou orientace a různou rychlostí, což vedlo k nesterjnoměrné době strávené v oblasti nástřiku. Tento jev je z hlediska rovnoměrnosti aplikace povlaku nežádoucí.



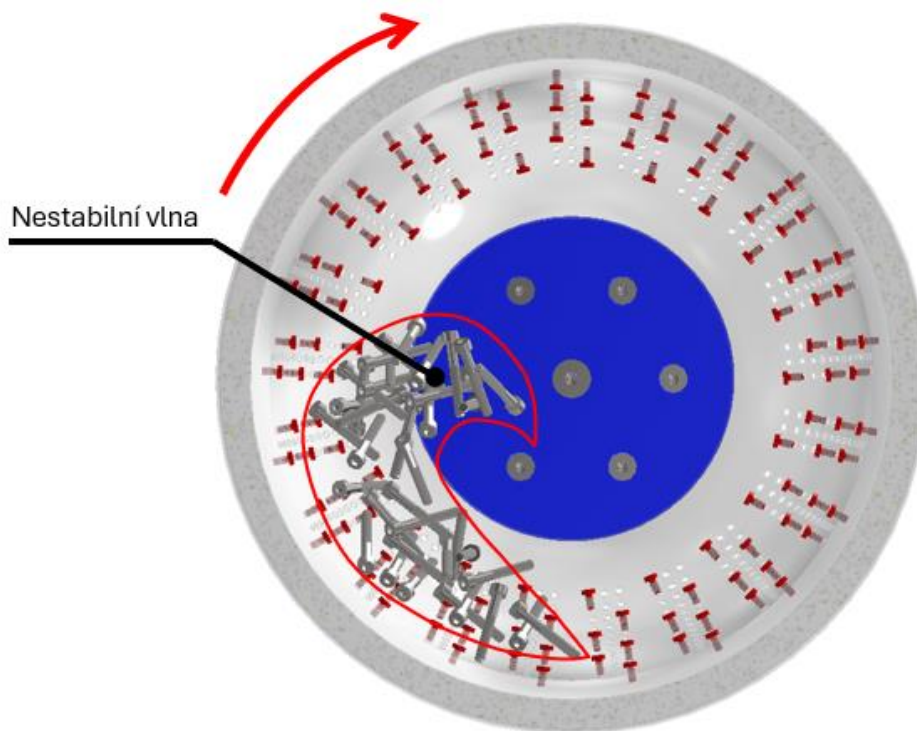
Obr. 6-7 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci základního provedení bubnu.

Druhá testovaná konfigurace využívala rovné lopatky, podobně jako zařízení typu ROTAMAT a ROTOVER. Lopatky aktivně řídily pohyb součástí a výrazně zvyšovaly intenzitu míchání. Docházelo zde tak k toku součástí a vytvoření charakteristické kaskádové vrstvy. Nicméně velká část dílů byla díky těmto lopatkám vyzvednuta vysoko nad úroveň této vrstvy a následně volně padala zpět na dno bubny, což způsobovalo nepravidelný a chaotický pohyb. Geometrické úpravy lopatek, jako sražení náběhové hrany pro zvýšení skluzu, ani snížení otáček bubny pro snížení odstředivé síly, tento efekt výrazně neomezily. Při nejnižších otáčkách navíc docházelo k shlukování dílů, kdy se součásti zaklínily a byly unášeny lopatkou jako jednolitý shluk, což vedlo k značné nestabilitě procesu.



Obr. 6-8 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci s rovnými lopatkami.

Na základě těchto pozorování byla navržena varianta s kolizními členy. Cílem bylo omezit negativní vlivy spojené s předchozími konfiguracemi, tedy omezit výšku, do které jsou součásti zvedány, a zvýšit interakci mezi součástmi a stěnou bubny. Tato úprava sice vedla k menším výkyvům ve výšce pádu a výrazně podpořila tvorbu souvislé kaskádové vrstvy, nicméně s rostoucí délkou provozu se zvyšovala míra segregace mezi povlakovanými díly a omílacími tělísky. Současně zde byla pozorována vyšší nestabilita procesu způsobená shlukováním dílů, která se nesnížila ani při zvýšení počtu kolizních členů.



Obr. 6-9 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci s kolizními členy.

Další navrženou konfigurací bylo využití lopatek pod úhlem, které mělo zachovat výhody spojené s použitím lopatek, tedy snížení segregace a dosažení požadovaného toku materiálu, a zároveň řešit problém s nadzvedáváním dílů. Toho se podařilo dosáhnout při úhlu sklonu lopatek 65° . Nedošlo zde k nadzvedávání součástí nad kaskádovou vrstvou, ale k jejich skluzu podél hrany lopatky směrem k zadní části bubnu. Výsledná kaskádová vrstva byla stabilní a prostorově omezená, čímž se vytvořila vhodná oblast pro aplikaci povlaku. Nejlepších podmínek pak bylo dosaženo při rychlosti otáčení bubnu 30 min^{-1} .

Tato konfigurace současně výrazně snížila nestabilitu procesu spojenou se shlukováním dílů. K úplné eliminaci tohoto jevu však došlo až po zvýšení podílu omílacích tělísek přibližně na dvojnásobek objemu vkládaných součástí. Vyšší poměr již dále testován nebyl, neboť přidávání tělísek snižuje účinnost procesu. Povlak je totiž aplikován nejen na součásti, ale také na omílací tělíska, což zvyšuje spotřebu kluzného laku.

6.3 Testování procesu nanášení

Cílem testování procesu aplikace povlaku bylo ověřit funkčnost navrženého zařízení a zvolené konfigurace provozních parametrů. Současně bylo cílem stanovit vhodné provozní podmínky samotné aplikace laku tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností výsledného produktu. Mezi tyto vlastnosti patří vytvoření homogenní vrstvy povlaku bez viditelných vad, dosažení požadované tloušťky povlaku stanovené na základě předchozího testování a zajištění dostatečné adheze, definované specifikací zákazníka.

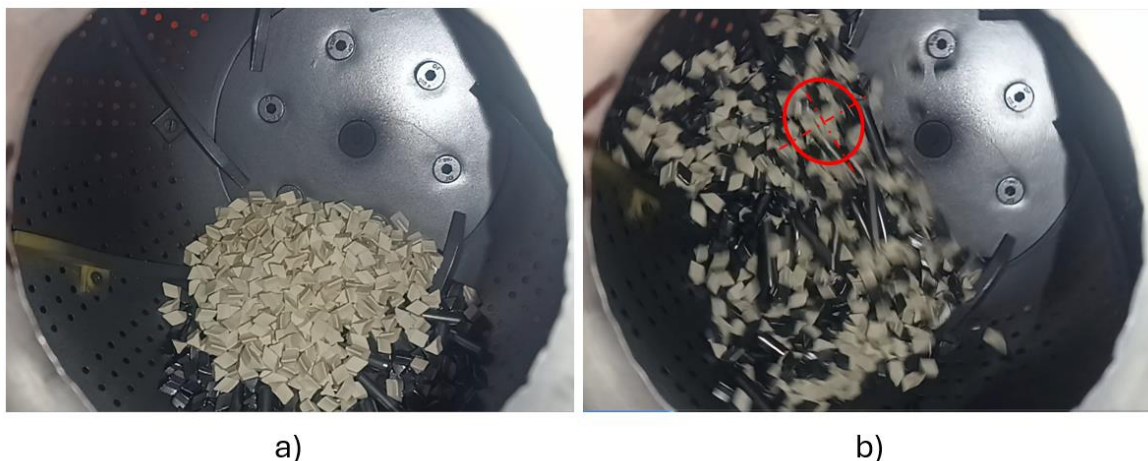
Vzhledem k omezením při měření tloušťky povlaku, popsané v kapitole 4.1, byly specifikované šrouby pro testování nahrazeny kolíky. Toto zjednodušení výrazně zkracuje čas potřebný pro měření a urychluje experimentální fázi návrhu procesních parametrů. Pro vizuální kontrolu kvality povlaku v závitech byly do každé vsázky přidány tři šrouby s ekvivalentní délkou a průměrem závitu.

6.3.1 Metody

Testování procesu aplikace

Kluzný lak byl aplikován pomocí automatizované airbrush pistole popsané v předchozích kapitolách. Pistole byla upevněna na laboratorní stojan, který zajišťoval její stabilní polohu během procesu. Její pozice byla nastavena na základě polohy kaskádové vrstvy v bubnu. Zóna postřiku byla nastavena přibližně 5 mm nad horní hranou kaskádové vlny a 5 mm nad dnem bubnu, aby nedocházelo ke zbytečnému přestříku na stěny bubnu.

Před samotnou aplikací povlaku proběhla inicializační fáze, během níž bylo zajištěno promíchání součástí a omílacích tělísek a současně přesně nastavena poloha aplikačního zařízení. Následně byl proces přerušen a byly definovány provozní parametry, konkrétně atomizační tlak, úhel otevření spouště barvy, aplikační čas a průtokový objem odsávacího vzduchu. Kluzný lak byl připravován těsně před zahájením aplikace, aby se minimalizovalo riziko sedimentace. Lak byl řádně promíchán a v případě potřeby naředěn dle aktuálně testovaného nastavení.



Obr. 6-10 a) Vsázka bubnu před začátkem inicializačního míchání a b) po 10 sekundách míchání s vyznačenou postřikovou zónou.

V rámci rešerše nebyly nalezeny žádné dostupné informace týkající se metodiky aplikace laku ani empirické vztahy pro stanovení potřebného množství laku či vhodného nastavení provozních parametrů s ohledem na požadovanou tloušťku a zachování celistvosti povlaku. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout vlastní přístup. Vzhledem ke složitosti procesu a proměnlivé orientaci součástí v nástřikové zóně nebylo možné použít matematický model jako ve fázi návrhu. Byl proto zvolen zjednodušený lineární přístup, vycházející z výpočtu množství povlaku potřebného k dosažení požadované tloušťky na celkové ploše součástí vstupujících do procesu. Tento přístup byl definován následující rovnicí:

$$V_{laku} = \frac{t \cdot (S_S \cdot n_S + S_T \cdot n_T)}{k} \quad (6.1)$$

Kde t je požadovaná tloušťka povlaku, S_S a S_T jsou plochy povlakované součásti a omílacího tělíska, n_S a n_T jejich odpovídající množství a k je konverzní faktor. Ten představuje účinnost procesu z hlediska množství laku, které je skutečně nanášeno na povrch součástí. Hodnota tohoto faktoru byla určena na základě experimentálního testování a dále sloužila jako metrika pro hodnocení opakovatelnosti procesu nanášení, neboť ji lze snadno použít napříč různými zvolenými tloušťkami povlaku.

Po nanesení požadovaného množství povlaku byl buben ponechán v chodu po dobu tří minut, během nichž docházelo k dalšímu omílání součástí. Tato doba byla jednotná pro všechny testované konfigurace a byla stanovena experimentálně jako minimální čas, při němž byl vizuálně pozorovatelný efekt omílání.

Vyhodnocení

Základním kritériem hodnocení kvality povlaku byla vizuální kontrola. Posuzováno bylo, zda se na povrchu nevyskytují vady, jako jsou škrábance, důlky, nerovnoměrnosti či jiná poškození. V případě, že vzorky tyto požadavky nesplnily, nebylo nadále přistupováno k dalšímu hodnocení, tedy k měření tloušťky povlaku.

Tloušťka povlaku byla měřena metodami popsanými v kapitole 5.1.1. Měření probíhalo vždy ve třech bodech po obvodu povlakovaných kolíků, jelikož tloušťka v ekvivalentní oblasti závitu představuje důležitý parametr z hlediska funkčnosti. Vzhledem k vysokému počtu testovaných součástí a s tím spojené časové náročnosti měření byl pro přibližný výpočet potřebné velikosti vzorku využit výpočet intervalu spolehlivosti normálního rozdělení podle rovnice:

$$N = \left(\frac{Z \cdot s}{E} \right)^2 \quad (6.2)$$

kde Z je kvantil normálního rozdělení, E je maximální přijatelná odchylka a σ je odhadovaná směrodatná odchylka. Kvantil byl zvolen pro 99 % spolehlivost, přičemž maximální odchylka byla stanovena jako 20 % průměrné hodnoty tloušťky povlaku. Relativně nízký požadavek na přesnost aplikace byl zvolen s ohledem na výsledky tribologických testů, které prokázali že přesnost aplikace neovlivňuje stabilitu součinitele tření a současně zohledňoval dosažitelnou přesnost aplikace v počáteční fázi testování. Pro každou sadu bylo nejprve proměřeno pět vzorků, na jejichž základě byla vypočtena směrodatná odchylka. Následně byl podle uvedené rovnice stanoven minimální počet vzorků potřebný k tomu, aby bylo s 99 % pravděpodobností zajištěno, že se tloušťka povlaku bude nacházet v rámci zvoleného tolerančního pole.

Na základě těchto naměřených tlouštěk byly jednotlivé sady vzorků vyhodnocovány z hlediska přesnosti aplikace pomocí variačního koeficientu. Ten vyjadřuje relativní rozptyl měření vůči průměrné hodnotě. Tento ukazatel je vhodný pro porovnávání variability napříč různými sadami dat a umožňuje lépe porovnat přesnost aplikace povlaku nezávisle na jeho absolutní tloušťce. Vyhodnoceny byly celkem tři variační koeficienty. Prvním vyhodnocovaným byl celkový variační koeficient, který zahrnoval všechna naměřená data bez ohledu na konkrétní vzorek a sloužil k určení obecné přesnosti aplikace v rámci dané konfigurace jako:

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

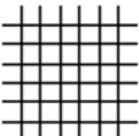
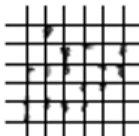
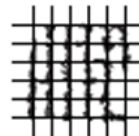

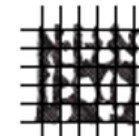
Kde σ je směrodatná odchylka naměřených tlouštěk povlaku a \bar{x} je průměrná hodnota naměřených dat.

Dále byly vyhodnocovány interní a externí variační koeficienty. Interní koeficient popisuje míru variability tloušťky povlaku v rámci jednoho vzorku a byl vypočten jako průměrná hodnota variačního koeficientu jednotlivých vzorků. Externí variační koeficient pak hodnotí rozdíly mezi průměrnými tloušťkami povlaku jednotlivých vzorků a slouží k posouzení konzistence celého procesu napříč sadou měření.

$$cv_{interní} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_{vzorek_i}}{\bar{x}_{vzorek_i}} \right) \right) \cdot 100 \quad (6.4)$$

$$cv_{externí} = \frac{s(\bar{x}_{vzorek})}{\bar{x}(\bar{x}_{vzorek})} \cdot 100 \quad (6.5)$$

Poslední metodou hodnocení výsledného povlaku byl adhezní test provedený podle požadavků zákazníka na základě mřížkové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 2409. Při tomto testu se do vrstvy nátěru provede šest na sebe kolmých řezů, čímž vznikne čtvercová mřížka. Vzhledem k tloušťce povlaku menší než 60 μm je předepsaná velikost mřížky 1×1 mm. Po odstranění uvolněných částic povlaku se oblast řezu vizuálně zkontroluje a porovná s následující klasifikační stupnicí.

Vzhled povrchu plochy s mřížkou					
Odloupnutá plocha	0%	<5%	<15%	<35%	<65%
Klasifikace	0	1	2	3	4

Obr. 6-11 Klasifikační stupnice dle ČSN EN ISO 2409 ([43], převzato a upraveno z [21])

Na základě požadavků zákazníka byl test dále rozšířen. Na vytvořenou mřížku byla přilepena páska s definovanou adhezí³, která se následně prudce odtrhla. Vizualní hodnocení se v tomto případě provádělo na samotné pásce. Výsledná klasifikace musela odpovídat stupni 0 dle ČSN EN ISO 2409, tedy na pásce nesměly zůstat žádné částice povlaku, pouze otisk vytvořené mřížky.

³ Konkrétní hodnoty nejsou součástí této práce. Předmět obchodního tajemství podle par.17-20 obch. Zákoníku.

6.3.2 Výsledky

V testovaném rozsahu průtokového objemu laku, který se pohyboval v rozmezí 2,4 až 7,5 ml·min⁻¹, se nepodařilo dosáhnout dostatečné kvality výsledného povlaku. Vrstva povlaku často nestihla zaschnout a v důsledku vzájemných kolizí mezi součástmi docházelo ke vzniku vad, jako jsou škrábance nebo důlky. Nejnižšího průtoku laku bylo dosaženo při aplikaci neředěného laku díky jeho vyšší viskozitě. Bylo tak sice nanese méně kluzného laku, ale právě díky vyšší viskozitě ve výrazně vyšší tloušťce. Vady povlaku tak byly mnohem viditelnější. Určité zlepšení přineslo ředění laku. Přestože došlo ke zvýšení minimálního průtoku laku, je nutné si uvědomit, že část tohoto objemu tvořilo ředidlo, které se během procesu odpařilo. Samotný proces odpařování však zároveň prodloužil dobu potřebnou k zaschnutí povlaku.



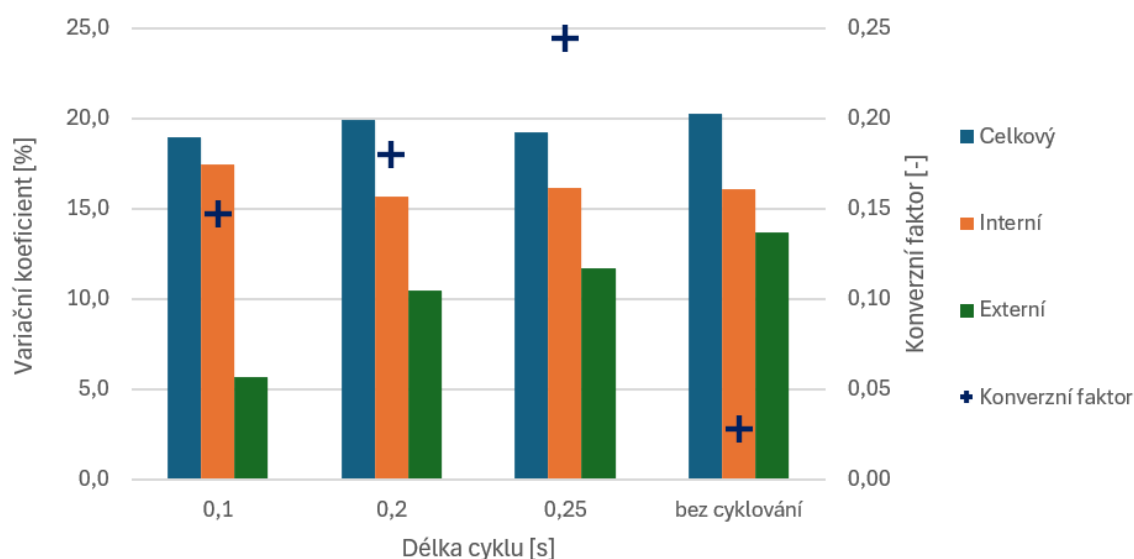
Obr. 6-13 Porovnání kvality povlaku pro vzorek s neředěným lakem (vlevo) a lakem ředěným v poměru 2:1 (vpravo).



Obr. 6-12 Porovnání výsledného povrchu povlaku aplikovaného na šrouby M5-20: a) pro průtokový objem odsávání 470 m³/h, b) bez povlaku, c) pro průtokový objem odsávání 390 m³/h,

Zvyšování intenzity odsávání během procesu mělo jen zanedbatelný vliv na rychlost sušení povlaku. Výraznější dopad byl zaznamenán u přenosové účinnosti, která se při zvýšení výkonu odsávání na $560 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ snížila až na přibližně 8 %. Na druhou stranu se podařilo snížit výskyt přestříku, tedy usazování uschlých kapek laku, které negativně ovlivňují jemnost povrchu. V důsledku tohoto zlepšení byl povrch výsledného povlaku hladší a vizuálně kvalitnější, což bylo patrné zejména v oblasti závitů. Na povrchu kolíků se vady způsobené přestříkem neprojevily. Celkové zlepšení kvality povrchu bylo výraznější než při zvyšování atomizačního tlaku, jehož cílem bylo zvýšit kinetickou energii kapek.

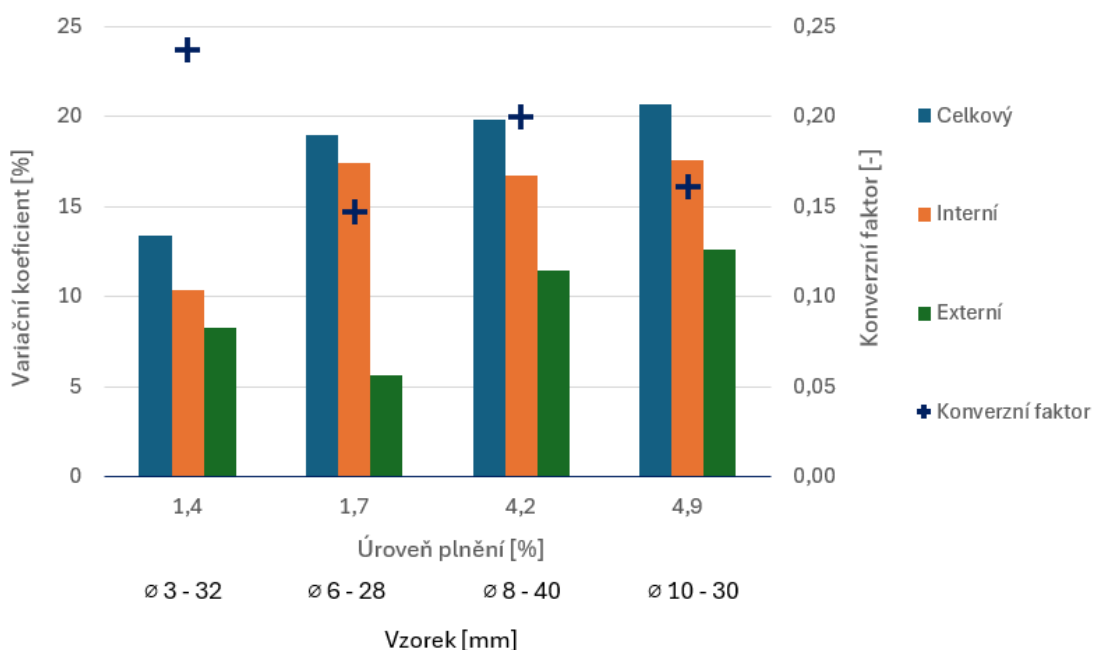
Výraznější pozitivní efekt přinesla až změna režimu aplikace pomocí cyklování doby nástřiku. Pro minimalizaci pravděpodobnosti synchronizace pohybu součástí s aplikačním cyklem byla délka cyklu nastavena tak, že doba bez nástřiku byla vždy dvojnásobkem doby nástřiku. Použití cyklování doby nástřiku vedlo ke snížení celkového průtokového objemu a k výraznému zlepšení kvality povrchu. Vliv cyklování nástřiku na přesnost aplikace a opakovatelnost procesu při povlakování kolíků o průměru 6 mm a délce 28 mm můžeme vidět na Obr. 6-14.



Obr. 6-14 Porovnání hodnot variačního koeficientu a konverzního faktoru pro různé délky cyklu aplikace povlaku pro vzorky \varnothing 6–28.

Z výsledků vyplývá, že cyklování nástřiku nemělo významný vliv na celkovou přesnost aplikace, která se pohybovala v rozmezí 19 až 20,3 %. Výrazně se nezměnil ani interní variační koeficient, jehož hodnota se pohybovala mezi 15,6 a 17,4 %. Významný rozdíl byl však zaznamenán u externího variačního koeficientu, který charakterizuje míru variability mezi jednotlivými vzorky. U testovaných sad se jeho hodnota snížila z původních 13,7 na 5,6 %. Se zkracující se délkou cyklu aplikace zároveň docházelo k poklesu konverzního faktoru, a tedy účinnosti procesu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny při aplikaci bez cyklování, tedy při trvalém průtoku laku.

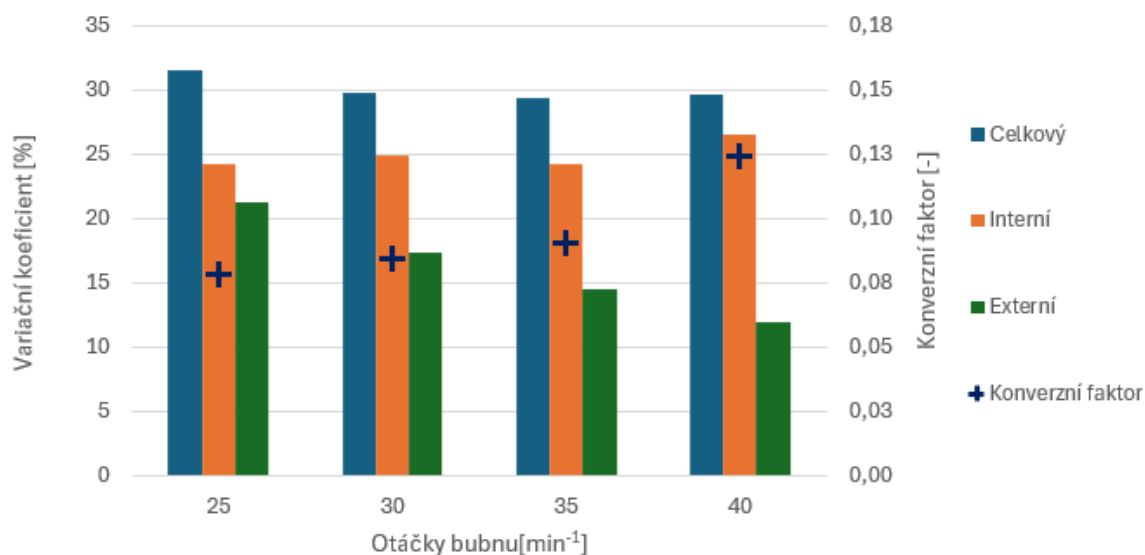
Nejlepších výsledků z hlediska přesnosti aplikace bylo dosaženo při použití cyklování doby nástřiku s délkou cyklu 0,1 sekundy. Při tomto nastavení se podařilo dosáhnout minimální homogenní tloušťky povlaku 2 μm . Proces byl následně rozšířen na další rozměry povlakovaných dílů v rozsahu požadavků stanovených zákazníkem. V rámci těchto testů byla určena minimální kritická úroveň plnění bubnu, při které již nebylo možné zajistit požadované vlastnosti povlaku. Tato kritická úroveň plnění byla stanovena přibližně na 0,7 % a při jejím dosažení se opět objevily problémy s povrchovými vadami. V rámci ověřování procesu byly provedeny testy v rozmezí úrovně plnění od 1,4 do 5 %.



Obr. 6-15 Porovnání hodnot variačního koeficientu a konverzního faktoru pro různé úrovně plnění bubnu.

Z výsledků vyplývá, že pro vzorky o průměrech 6, 8 a 10 mm byl celkový variační koeficient přibližně 20 % a interní variační koeficient se pohyboval okolo 17 %, přičemž tyto hodnoty nebyly výrazně ovlivněny úrovní plnění bubnu. Výraznější rozdíly byly pozorovány opět u externího variačního koeficientu. Tento ukazatel vykazoval klesající tendenci s nižší úrovní plnění, což naznačuje zlepšení rovnoměrnosti aplikace mezi jednotlivými vzorky. Výjimku představoval vzorek ø 3–32, u kterého byla hodnota celkového variačního koeficientu 13,4 %, interního variačního koeficientu 10,3 % a externí variační koeficient 8,3 %. Současně byla zaznamenána vyšší hodnota konverzního faktoru. Vzhledem k tomu, že konverzní faktor slouží jako ukazatel opakovatelnosti procesu, není tento vzorek vhodný k přímému porovnání s ostatními. Pro zbylé vzorky byl rozdíl v opakovatelnosti procesu přibližně 5 %.

Ze získaných výsledků je patrné, že celkový variační koeficient a interní variační koeficient se výrazně nemění v závislosti na průtokovém objemu laku, úrovni plnění bubnu ani geometrických rozměrech dílu. To naznačuje, že přesnost nanesení povlaku na jednotlivé součásti je ovlivněna kinematikou pohybu dílů během procesu nanášení. Kinematiku procesu lze ovlivnit změnou otáček bubnu. Vliv změny otáček na přesnost aplikace a opakovatelnost procesu při povlakování kolíků $\varnothing 6\text{--}28$ můžeme vidět na Obr. 6-16.



Obr. 6-16 Porovnání hodnot variačního koeficientu a konverzního faktoru pro různé rychlosti otáčení bubnu pro vzorky $\varnothing 6\text{--}28$.

Z výsledků je patrné, že změna rychlosti otáčení bubnu neměla významný vliv na celkový ani interní variační koeficient. Jejich vyšší hodnoty ve srovnání s předchozími měřeními jsou způsobeny odlišným nastavením procesních parametrů aplikace, které však zůstaly v průběhu testování vlivu otáček konstantní. Výrazná změna byla zaznamenána pouze u externího variačního koeficientu, kde při zvýšení otáček bubnu z 25 na 40 min⁻¹ došlo ke snížení hodnoty o 9,4 %. Rozdíl v opakovatelnosti procesu byl opět přibližně 5 %.

Posledním testovaným parametrem byl samotný proces omílání, konkrétně vliv omílacích tělísek na proces povlakování. Sledovanou veličinou byla míra úběru materiálu povlaku. K tomuto účelu byly opět využity vzorky o průměru $\varnothing 6\text{--}28$ mm, u nichž byla sledována změna tloušťky povlaku v závislosti na počtu otáček bubnu. Úbytek činil 0,0029 μm na otáčku při 240 otáčkách a 0,0023 μm na otáčku při 390 otáčkách. Ve změně drsnosti povrchu nebyl zaznamenán významný rozdíl. Drsnost R_a se snížila pouze přibližně o 0,1 μm .

6.4 Diskuse

V této kapitole jsou zhodnoceny výsledky získané z testování procesu nanášení povlaku a identifikovány klíčové faktory, které je nutné zohlednit při návrhu technologie. Následně jsou zhodnoceny dosažené klíčové parametry, jejich limitace a možnosti dalších vylepšení.

6.4.1 Proces povlakování v bubnu

Výsledky testování procesu nanášení kluzného povlaku v povlakovacím zařízení ukazují, že klíčovým prvkem návrhu technologie je nastavení optimálních parametrů procesu aplikace laku. Nejzásadnějším z těchto parametrů je určení vhodného množství naneseného laku, které je nutné řídit kombinací vhodného ředění a průtokového objemu. Tím lze zajistit, že výsledná vrstva bude co nejtenčí, rychle zaschne a minimalizuje vznik povrchových vad, jako jsou důlky a škrábance způsobené kolizemi mezi jednotlivými součástmi.

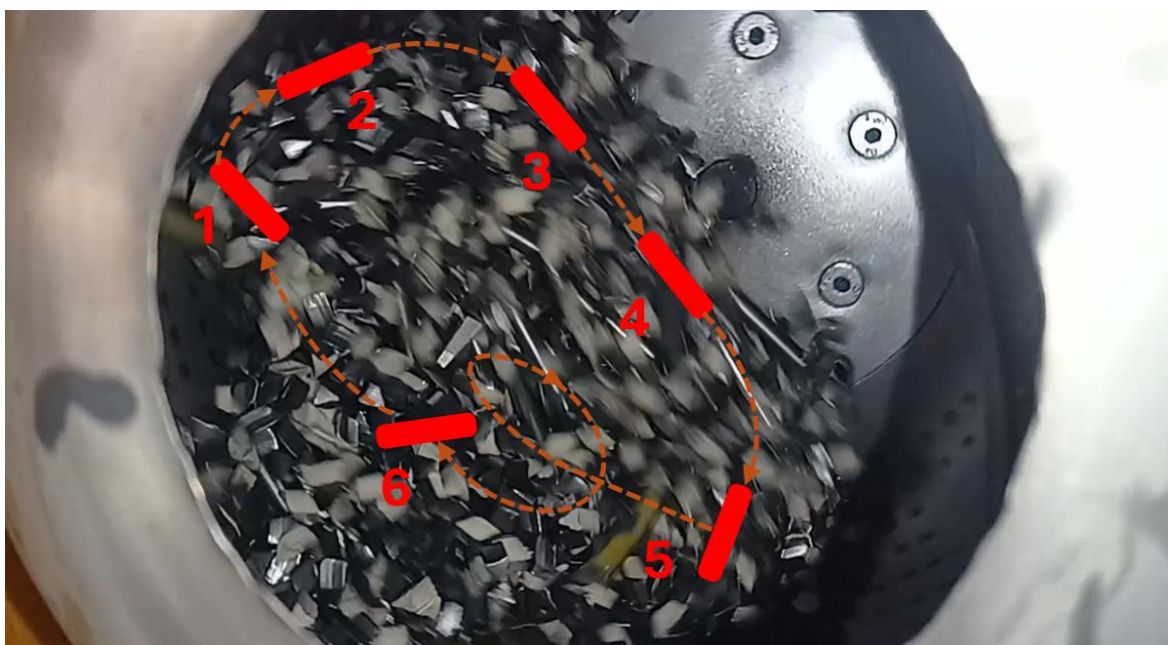


Obr. 6-17 Kolík \varnothing 6–28 mm se značnými povrchovými vadami způsobenými kolizemi mezi jednotlivými součástmi a nezaschlým povlakem.

K největšímu počtu kolizí dochází po opuštění kaskádové vrstvy, kdy jsou díly lopatkami vehnány do prostoru mezi ostatní součásti, kde se postupně uspořádávají, než znovu vstoupí do zóny postřiku. Doba potřebná k zaschnutí povlaku je tak omezena převážně časem, po který se díly pohybují kaskádovou vrstvou mimo oblast aplikace laku. Délka této vrstvy je určena objemem dílů vstupujících do procesu, což tedy zároveň omezuje maximální možný průtokový objem laku. Objem výroby je však dán požadavky zákazníka. Vyšší objem výroby, typický pro daný průmyslový proces, proto umožňuje využít větší průtok laku a zvýšit tak celkovou efektivitu.

Průtokový objem laku má význam jak z hlediska vizuální kvality, tak samotné přesnosti aplikace. Výsledky ukazují, že externí variační koeficient úzce souvisí s počtem průchodů dílů skrz nástřikovou zónu při daném průtoku. Tento závěr podporují i testy zaměřené na vliv rychlosti otáčení bubnu a úrovně jeho plnění. Protože doba samotné aplikace byla konstantní, variabilita mezi vzorky byla ovlivněna pouze počtem průchodů dílů. Z toho vyplývá, že po nastavení optimálních parametrů procesu, **je nutné při zvyšování objemu vsázky proporcionálně navýšit průtokový objem laku**, jak uvádí ve své práci Agrawal [18] a je znázorněno na Obr. 4-5.

Zlepšení rovnoměrnosti aplikace laku mezi jednotlivými vzorky bylo dosaženo snížením průtoku laku a vyšší rychlosti otáčení bubnu. Tím se snížilo celkové množství naneseného laku, a tím i chyba vznikající rozdílným počtem průchodů vzorků zónou nástřiku. Přesnost aplikace v rámci samotného vzorku se však tímto způsobem zlepšit nepodařilo. V testovaném rozsahu rychlosti otáčení bubnu se nepotvrdil závěr Ketterhagena [19], podle něhož by se se zvyšující rychlostí pohybu měly díly orientovat nezávisle na své preferenční orientaci vyplývající z jejich geometrie. Při použité konfiguraci lopatek však zůstává kinematika pohybu dílů konzistentní bez ohledu na jejich velikosti či tvaru. To znamená, že určité části povrchu dílů se opakovaně dostávají do zóny nástřiku, což vede k lokálnímu hromadění povlaku a tím ke zvýšení nerovnoměrnosti tloušťky vrstvy v rámci jednoho dílu.



Obr. 6-18 Schématické znázornění pohybu a orientace dílu během procesu.

Při zvyšování rychlosti pohybu dílů je však nutné zohlednit zvýšené mechanické namáhání. V tomto případě nejsme omezeni mechanickými vlastnostmi povlakovaného dílu, jak uvádějí Sashi [20] a Agrawal [18], ale samotným povlakem, který získává svou konečnou tvrdost až po tepelném zpracování. V rámci testované rychlosti otáčení bubnu **v rozmezí 25 až 40 min⁻¹ nebylo pozorováno žádné poškození povlaku**. S ohledem na pozitivní vliv zvyšující se rychlosti otáčení by měla být další fáze testování zaměřena na určení kritické hodnoty, při které zůstává kinematika pohybu dílů stabilní a zároveň nedochází k mechanickému poškození povrchu povlaku.

Přestože byla celková doba, po kterou byla tryska laku otevřená během jedné minuty, ve všech případech stejná, skutečný průtokový objem se lišil. Důvodem byla nelineární charakteristika průtoku při opakovaném otevírání a zavírání trysky a časové prodlevy spojené s těmito přechody. To se viditelně projevilo v délce procesu povlakování. Vyšší počet cyklů měl navíc negativní vliv na přenosovou účinnost, a to i přestože průtok atomizačního vzduchu byl konstantní a nezávislý na otevření trysky laku. U aplikace laku bez využití cyklování doby nástřiku je významné snížení přenosové účinnosti způsobeno vyšším přestřikem. Tedy vyšší objem laku dopadne na povrch součástí ve formě suchých kapek, které jsou následně odstraněny omílacími tělísky.

Další prodlužování doby omílání povlaku nad úroveň odpovídající 180 otáčkám po aplikaci kluzného laku nemělo významný vliv na snížení drsnosti povrchu. S ohledem na požadavky zákazníka musí oba procesy probíhat současně, přičemž schopnost omílacích tělísek účinně působit je výrazně omezena vrstvou laku, který je během procesu aplikovaným na jejich povrch. Je však důležité zdůraznit, že hlavním účelem použití omílacích tělísek není snížení drsnosti povrchu, ale zkrácení doby záběhu povlaku díky zahlazení jeho horní vrstvy. Tento efekt byl vizuálně dobře pozorovatelný na válcových částech, avšak na závitěch se výrazněji neprojevil, a to ani u závitů velikosti M10. Z toho lze usuzovat, že velikost používaných tělísek⁴ nebyla v tomto případě hlavním limitačním faktorem. Tělíska totiž během pohybu nedokázala účinně pronikat do prostoru závitů, a to ani přes svůj specifický tvar daný požadavky zákazníka. Možné zlepšení by mohlo přinést navýšení objemu vkládaných tělísek, čímž by se díky jejich nepravidelnému tvaru zvýšila náhodnost orientace a tím i pravděpodobnost, že jejich hrana účinně zasáhne do prostoru závitů.

Interní variační koeficient, popisující míru variability tloušťky povlaku v rámci jednoho vzorku, a tím i celkový variační koeficient, se výrazně neměnil se změnou průtokového objemu laku, otáček bubnu ani geometrie dílu. Celková přesnost aplikace je tedy určena rovnoměrností pohybu dílů a velikostí nástřikové zóny. U vzorků $\varnothing 3\text{--}32$ mm při úrovni plnění bubnu 1,4 % tato zóna pokrývala celou kaskádovou vrstvu součástí, což vedlo ke snížení celkového variačního koeficientu z průměrných 20 % na 13,4 %. Při dalším zvýšení **úrovně plnění bubnu na 1,7 až 4,9 %** již však nedošlo k žádné změně v přesnosti aplikace, i přestože došlo k významnému rozšíření šířky této kaskádové vrstvy. Tím se potvrzuje vliv axiální složky míchání, která zajišťuje výměnu dílů podél kaskádové vrstvy. Současně z toho vyplývá, že **po nalezení optimální nástřikové zóny je nutné její parametry udržovat konstantní**, nezávisle na míře plnění bubnu.

⁴ Konkrétní hodnoty nejsou součástí této práce. Předmět obchodního tajemství podle par.17-20 obch. Zákoníku.



Obr. 6-19 Velikost kaskádové vrstvy pro úroveň plnění 1,7 % (vlevo) a 4,2 % (vpravo).

Přívod sušícího vzduchu podtlakem neměl významný vliv na proces sušení povlaku. Důvodem je výrazně omezená sušící kapacita prostředí daná normativními požadavky. Výrazně vyšší kapacity by bylo dosaženo s nižší úrovní vlhkosti vzduchu a jeho vyšší teploty. Například zařízení ROTAMAT využívá přehřívání vzduchu až do teploty 150 °C [35]. Sušení povlaku také mohlo být omezeno prouděním přiváděného vzduchu zařízením, které bylo dáno umístěním otvoru pro odsávání.

Klíčovým faktorem se naopak ukázal být účinný odvod výparů ředidla, který výrazně urychloval sušení, zejména při vyšší míře ředění laku. Ačkoli vyšší ředění povlaku zpomaluje odpařování rozpouštědel a obecně prodlužuje dobu schnutí, díky efektivnímu odvodu těchto výparů docházelo k rychlejšímu zasychání než v případě silnější vrstvy neředěného laku.

6.4.2 Hodnocení klíčových parametrů

V rámci povlakování v bubnu bylo na měřených kolících, které představovaly ekvivalentní náhradu za reálné povlakované díly, dosaženo **minimální homogenní tloušťky povlaku 2 μm při úrovni plnění bubnu 1,4 až 5 %**. Lze tedy konstatovat, že touto technologií dosažitelná tloušťka vrstvy vyhovuje tolerančnímu poli závitů výsledného produktu. Homogenita povlaku byla zároveň ověřena i na reálných šroubech, přičemž nanosená vrstva splňovala požadovanou vizuální kvalitu. Dále je důležité zdůraznit, že ekvivalentní plocha těchto kolíků, na kterou je povlak nanášen, je přibližně 1,63krát menší než plocha závitového spoje. Z toho vyplývá, že jsme schopni řídit tloušťku povlaku již od hodnot 1,2 μm, přičemž je zachována homogenita nanesené vrstvy.

Limitací tohoto měření je skutečnost, že z časových důvodů nebylo ověřeno rozložení tloušťky povlaku v profilu závitů šroubu. Výsledky tribologických testů navíc vycházejí pouze z povlaků s tloušťkou vyšší než 5 μm . Podle údajů výrobce je však možné zachovat požadované vlastnosti i při nižších tloušťkách povlaku. Zkoušky povlaků v relevantních podmínkách vesmíru nebyly realizovány kvůli problémům s testovacím zařízením. Nebylo tak možné porovnat výkonost povlaku v různém prostředí ani posoudit vliv aditivní přísady grafitu na jeho vlastnosti. Na základě informací získaných v rámci systematické rešerše a s ohledem na skutečnost, že disulfid molybdeničitý představuje dominantní složku kluzného laku, lze očekávat vyšší výkonnost povlaku právě v podmínkách vesmíru.

U výsledného produktu byla zjištěna průměrná **chyba v přesnosti tloušťky povlaku ve výši 20 %**. Ještě vyšší přesnosti by bylo možné dosáhnout použitím plochého nástřikového vzoru, který danou oblast pokrývá rovnoměrněji, jak uvádí Agrawal [18]. Vzhledem k požadavku na nízký průtokový objem laku a dostupným prostředkům byla však v této práci použita airbrush pistole s kruhovým nástřikovým vzorem. Plochý nástřik by zvýšil rovnoměrnost rozložení laku v aplikační zóně a tím snížil rozdíly v tloušťce nanesené vrstvy. Jelikož díly procházejí vždy jinou částí nástřikové zóny, kruhový tvar postřiku má větší vliv na variabilitu v rámci jednotlivých vzorků než mezi vzorky celkově. Předpokládám, že využitím plochého nástřikového vzoru a správného nastavení šířky postřiku by tak bylo možné tuto **chybu snížit alespoň na 8 %**.

Dalších zlepšení by mohlo být dosaženo změnou režimu plnění laku. Použité lakovací zařízení využívá gravitační plnění, přívod laku do trysky je tedy řízen pouze výškou hladiny v nádobě, což ovlivňuje průtokový objem laku, a tím i stabilní podmínky procesu. Lepších podmínek by bylo dosaženo využitím plnění čerpadlem nebo tlakem. Další limitací použitého lakovacího zařízení byla velká míra přestřiku, která snižovala jak přenosovou účinnost procesu, tak vizuální kvalitu povlaku na závitových plochách. Lze tedy očekávat že s využitím kvalitnějšího aplikačního zařízení by bylo možné dosáhnout vyšší efektivity procesu.

Zmiňované úpravy by mohly dále přispět i k snížení **chyby v opakovatelnosti procesu, která činila 5 %**. Především pak vyšší kontrola polohy aplikačního zařízení a průtokového objemu odsávaného vzduchu. Množství laku, které bude skutečně nanášeno na povlakované díly bude rozhodovat o opakovatelnosti aplikace.

Výsledný produkt splňoval požadavky na homogenní pokrytí a adhezi povlaku, ověřené testováním. Z důvodu vysoké ceny specifikovaných dílů určených k aplikaci povlaku však nebyly u finálního produktu provedeny tribologické testy ani ověřeno splnění požadavku na snížení součinitele tření v předepsaném intervalu. Na základě výsledků testování procesu lze však očekávat že proces omílání nebude mít zásadní vliv na snížení doby záběhu povlaku. Přítomnost omílacích tělísek však významně přispěla ke stabilitě procesu míchání a tím přesnosti aplikace.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metodiky a koncepčního zařízení umožňujícího automatizovanou aplikaci kluzných laků s obsahem disulfidu molybdeničitého. Cílem bylo dosažení požadovaných vlastností výsledného povlaku, konkrétně jeho homogenity, dostatečné adheze a snížení součinitele tření na předepsanou úroveň, a to při splnění normativních požadavků definovaných normou ČSN EN 2491.

K dosažení těchto vlastností bylo nejprve provedeno testování samotného procesu nanášení a tribologické výkonnosti povlaků. Výsledky ukázaly, že součinitel tření zůstává konstantní bez ohledu na tloušťku povlaku až do dosažení kritické hodnoty 20 μm . Po jejím překročení dochází k výraznému nárůstu součinitele tření, který se poté opět ustaluje na konstantní úrovni. Tyto výsledky potvrzují teorii popsanou v práci Rabinowitze.

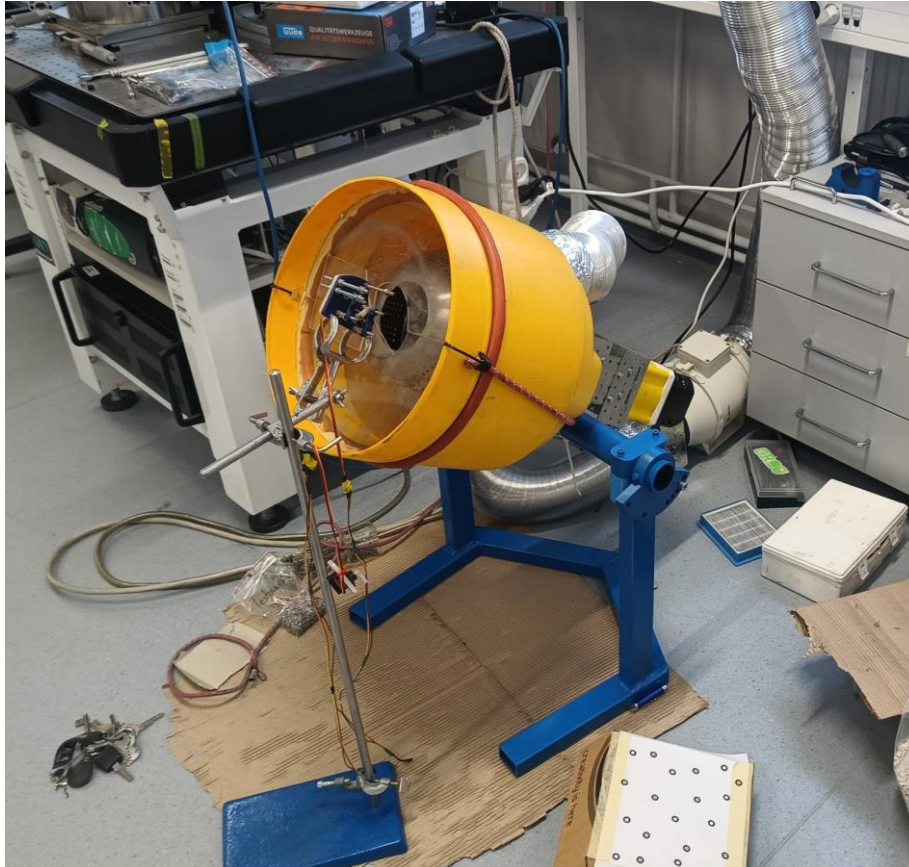
Na základě požadavků zákazníka, normativních omezení, rešerše a analýzy dostupných komerčních zařízení bylo navrženo koncepční zařízení využívající rotační buben. Do procesu byl zároveň integrován subproces omílání s cílem zkrátit dobu záběhu povlaku. Ačkoli se tento účinek nepodařilo experimentálně ověřit, omílací tělíska měla pozitivní vliv na stabilitu procesu a tím i na přesnost aplikace. Při testování technologie bylo zjištěno:

- Úhel náklonu bubnu musí být minimálně 30°, aby byly zajištěny vhodné podmínky pro aplikaci laku. Zvýšení úhlu na 40° již vede k nežádoucí segregaci dílů.
- Rovnoměrné míchání zajišťuje pouze konfigurace s lopatkami pod úhlem 65°. Ta umožňuje rovnoměrné míchání v rozmezí 25 až 40 min^{-1} , aniž by docházelo k mechanickému poškození povlaku.
- Stabilita procesu byla dosažena až při dvojnásobném objemu omílacích tělísek vzhledem k počtu dílů.
- Pro dosažení kvality povrchu je nutné, aby při průchodu dílu zónou nástřiku byla aplikována co nejtenčí vrstva. V rozsahu průtokového objemu laku od 2,4 do 7,5 $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ se nepodařilo dosáhnout požadované kvality povlaku. Je tedy nutné aplikaci optimalizovat buď využitím zařízení s nižším průtokovým objemem, nebo zavedením cyklického dávkování, které bylo v této práci realizováno.
- Přívod sušícího vzduchu podtlakem se neprojevil jako významný faktor ovlivňující sušení. Efektivní byl naopak odvod výparů, který výrazně zkracuje dobu odpaření rozpouštědel obsažených v laku.
- Celková přesnost aplikace je dána kombinací rychlosti otáčení bubnu, průtokového objemu laku a šířkou aplikační zóny.
- Při zvyšování úrovně plnění bubnu je nutné držet konstantní otáčky a šířku zóny a úměrně zvyšovat průtok laku.
- Kritická hodnota plnění bubnu je pro úspěšnou aplikaci 0,7 %, stabilních podmínek bylo dosaženo od úrovně plnění 1,7 %.

U testovaných vzorků byla zaznamenána průměrná odchylka v tloušťce povlaku ve výši 20 %, přičemž průměrná chyba opakovatelnosti procesu činila 5 %. Zvýšení přesnosti a opakovatelnosti procesu by bylo možné dosáhnout použitím plochého vzoru nástřiku, přesnější kontrolou polohy aplikační trysky a přesnějším řízením průtokového objemu laku i odsávaného vzduchu. Přesnost byla v této práci omezena technickými možnostmi dostupných zařízení.

Omezením této práce zůstává skutečnost, že výsledný produkt povlakování v rotačním bubnu nebyl testován z hlediska tribologické výkonnosti, která je klíčová pro úspěšné absolvování přejímacích zkoušek finálního povlaku. Vzhledem k vysoké ceně specifikovaných dílů určených k povlakování bylo rozhodnuto, že tribologické testování proběhne až na finálním zařízení, jehož návrhu předcházela konstrukce a testování koncepčního zařízení popsaného v této práci. Požadavky na homogenní pokrytí a adhezi povlaku byly v rámci testování úspěšně splněny.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU DLE RIV



Název:

Rotační povlakovací buben

Autoři:

Bc. David Homola, Ing. David Košťál Ph.D.

Typ produktu:

G – funkční vzorek

Apollo index:

197891

Technický popis:

Rotační povlakovací buben je zařízení určené k malosériovému nanášení kluzných povlaků metodou resin-bonded coating na nízkorozměrové mechanické součásti. Proces nanášení probíhá současně s mechanickým opracováním povrchu pomocí keramických omílacích tělísek. Konstrukce bubnu a vnitřní uspořádání lopatek jsou navrženy tak, aby docházelo k rovnoměrnému promíchávání součástí a vytváření charakteristické kaskádové vrstvy, do které je lak aplikován pomocí nástřiku.

Aplikace kluzného laku probíhá prostřednictvím airbrushové pistole FENGDA BD-130, která využívá tlakový vzduch k atomizaci kluzného laku. Řízení pistole zajišťuje mikrokontrolér Arduino Uno, který pomocí dvou servomotorů ovládá délku nástřiku a objem dávkovaného laku. Povlakované součásti společně s omílacími tělísky jsou vloženy do bubny, kde jejich rovnoměrný pohyb umožňuje rovnoměrné nanesení vrstvy na celý povrch. Zároveň dochází k jemnému omílání již naneseného povlaku, čímž se zlepšuje jeho homogenita a kvalita. Buben je umístěn v uzavřené komoře, ze které jsou aktivně odsávány a filtrovány škodlivé výpary vznikající během aplikace. Tím je zajištěna bezpečnost obsluhy a zároveň podpořeno efektivní sušení povlaku.

Základní technické parametry:

Objem bubny: 7,2l

Rychlost otáčení bubny: (25 až 50) min⁻¹

Úhel náklonu bubny-nastavitelný: (-90, 0, 10, 20,30, 40) °

Úhel náklonu bubny-pro aplikaci povlaku: 30°

Tlak atomizačního vzduchu: (0,3-0,5) MPa

Průtokový objem laku: (2,4 až 7,5) ml·min⁻¹

Úst'ová vzdálenost: (180 až 220) mm

Podmínky aplikace: vlhkost vzduchu (40 až 75) %RH a teplotě (20 ± 5) °C

Způsob realizace:

Zařízení bylo vyrobeno z dostupných konstrukčních prvků, hutních polotovarů a využitím 3D tisku a konvenčních metod obrábění a svařování.

Ekonomické parametry:

Spotřební zboží: 1 500,-

Materiál: 780,-

Výroba dílů: 260,-

Výsledky zkoušek:

Výsledky testování zařízení jsou zobrazeny v kapitole 6.3.2 a popsány v kapitole 6.4.

Vazba na projekt:

FW06010110 – Automatické nanášení speciálních maziv na tribologické komponenty vesmírných mechanismů.

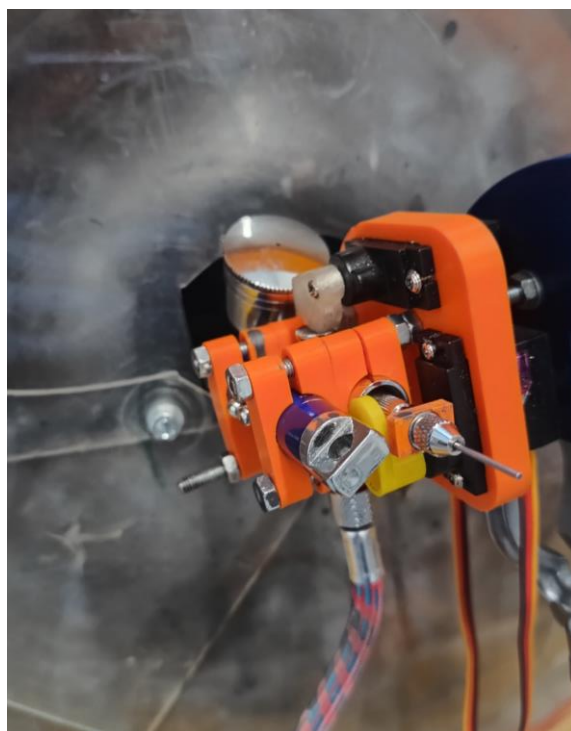
Umístění:

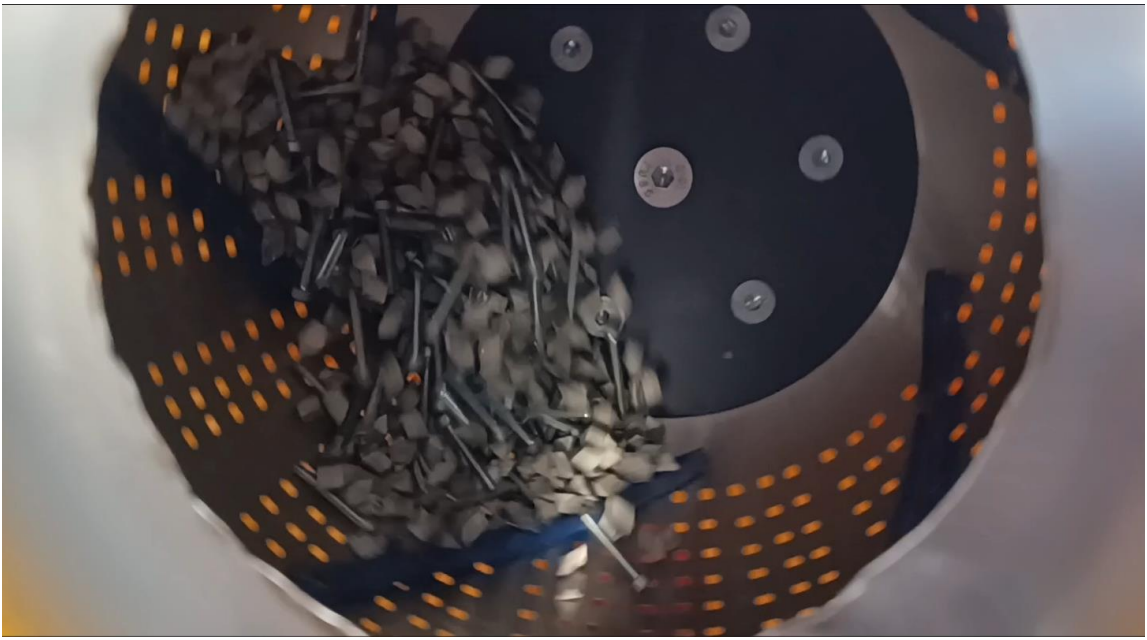
Laboratoř tribologie A3/519, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno

Kontaktní osoba:

Ing. David Košťál Ph.D.

Fotografická dokumentace:





9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BOOSER, E. Richard. *CRC HANDBOOK of LUBRICATION: (Theory and Practice of Tribology)*. 2. vyd. United States of America: CRC Press, 1983.
- [2] LINCE, Jeffrey R. Effective application of solid lubricants in spacecraft mechanisms. *Lubricants*. 2020, roč. 8, č. 7, s. 74 [vid. 11. březen 2024]. ISSN 20754442.
- [3] ROBERTS, Emyr W. *Space tribology handbook*. 5th vyd. Warrington, U.K: European Space Tribology Laboratory, 2013.
- [4] *Anti-Friction Coatings Selection Guide*. 2004 [vid. 8. březen 2025]. Dostupné z: <https://www.generaladhesivos.com/catalogo-pegamento/molykote-anti-friction-coatings-selection-guide.pdf>
- [5] XU, J., M. H. ZHU, Z. R. ZHOU, Ph KAPSA a L. VINCENT. An investigation on fretting wear life of bonded MoS₂ solid lubricant coatings in complex conditions. *Wear*. 2003, roč. 255, č. 1–6, s. 253–258 [vid. 12. březen 2024]. ISSN 0043-1648.
- [6] XU, J., Z. R. ZHOU, C. H. ZHANG, M. H. ZHU a J. B. LUO. An investigation of fretting wear behaviors of bonded solid lubricant coatings. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, roč. 182, č. 1, s. 146–151 [vid. 11. březen 2024]. ISSN 09240136.
- [7] KONG, Hosung, Hung Gu HAN, Eui Sung YOON, Oh Kwan KWON a Nickolay K. MYSHKIN. Evaluation of the wear life of MoS₂-bonded-films in tribo-testers with different contact configuration. *Wear*. 1998, roč. 215, č. 1, s. 25–33 [vid. 8. březen 2025]. ISSN 00431648.
- [8] MUKHTAR, Sheikh Haris, Ahraf GULZAR, Shahid SALEEM, M. F. WANI, Rakesh SEHGAL, A. A. YAKOVENKO, I. G. GORYACHEVA a Mukund Dutt SHARMA. Advances in development of solid lubricating MoS₂ coatings for space applications: A review of modeling and experimental approaches. *Tribology International*. 2024, roč. 192, s. 109194 [vid. 8. březen 2025]. ISSN 0301-679X.
- [9] LAOLU-BALOGUN, E., S. OWEN, S. READ, P. H. SHIPWAY a K. T. VOISEY. Effect of humidity and oxygen on friction, wear and durability of a polymer-bonded molybdenum disulfide (MoS₂)-based dry film lubricant (DFL) coating system in large amplitude fretting. *Wear*. 2024, roč. 552–553, s. 205426 [vid. 9. březen 2025]. ISSN 0043-1648.
- [10] ZANIN, M., G. PRIETO, W. TUCKART a M. FAILLA. Effect of Composition and Thickness on the Tribological Performance of Epoxy-MoS₂ Composite Coatings in Reciprocating Block on Ring Tests. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023 [vid. 11. březen 2024]. ISSN 15441024.

- [11] RABINOWICZ, Ernest. Variation of Friction and Wear of Solid Lubricant Films with Film Thickness. *ASLE TRANSACTIONS*. 1967, roč. 10, č. 1, s. 1–9 [vid. 9. březen 2025]. ISSN 05698197.
- [12] FINKIN, E. F. A Theory for the Effects of Film Thickness and Normal Load in the Friction of Thin Films. *Journal of Lubrication Technology*. 1969, roč. 91, č. 3, s. 551–555 [vid. 9. březen 2025]. ISSN 0022-2305.
- [13] DUPONT. *MOLYKOTE® 106 Anti-Friction Coating*. 2019.
- [14] WANG, Y.-M., Zhou, H.-D., Chen, J.-M., Chen, L., Ye, Y.-P. Preparation and friction and wear behavior of waterborne epoxy resin-based bonded solid lubricant coatings. *Tribology*. 2010, roč. 30, s. 577–583.
- [15] ČSN EN 2491, *Letectví a kosmonautika - Pevná maziva na bázi sulfidu molybdeničitého - Metody vytváření povlaku*. leden 2012
- [16] ČSN EN 2491, *Letectví a kosmonautika - Pevná maziva na bázi sulfidu molybdeničitého - Metody vytváření povlaku*. leden 2012
- [17] *Types of Tablet Coating Machines: The Ultimate Guide*. 12. duben 2023 [vid. 13. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.ipharmachine.com/types-of-tablet-coating-machines>
- [18] AGRAWAL, Anjali M. a Preetanshu PANDEY. Scale Up of Pan Coating Process Using Quality by Design Principles. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2015, roč. 104, č. 11, s. 3589–3611 [vid. 18. duben 2025]. ISSN 0022-3549.
- [19] KETTERHAGEN, William R. Modeling the motion and orientation of various pharmaceutical tablet shapes in a film coating pan using DEM. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011, roč. 409, č. 1–2, s. 137–149 [vid. 18. duben 2025]. ISSN 0378-5173.
- [20] SAHNI, Ekneet a Bodhisattwa CHAUDHURI. Experiments and numerical modeling to estimate the coating variability in a pan coater. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011, roč. 418, č. 2, s. 286–296 [vid. 18. duben 2025]. ISSN 0378-5173.
- [21] TRACTON, Arthur A.. *Coatings technology handbook*. 2006.
- [22] DUBEY, Atul, Richard HSIA, Kostas SARANTEAS, Dean BRONE, Tushar MISRA a Fernando J. MUZZIO. Effect of speed, loading and spray pattern on coating variability in a pan coater. *Chemical Engineering Science*. 2011, roč. 66, č. 21, s. 5107–5115 [vid. 18. duben 2025]. ISSN 0009-2509.

- [23] PANDEY, Preetanshu, Yongxin SONG, Ferhan KAYIHAN a Richard TURTON. Simulation of particle movement in a pan coating device using discrete element modeling and its comparison with video-imaging experiments. *Powder Technology*. 2006, roč. 161, č. 2, s. 79–88 [vid. 18. duben 2025]. ISSN 0032-5910.
- [24] JOSHUA GREEN. *An investigation into the mechanisms of liquid contact spreading in tumbling drums*. Sheffield, 2019. The University of Sheffield Faculty of Engineering.
- [25] BAYTOK, Yusuf Mert, Aytung EREK a Orçun SAF. Numerical Estimation of Film Thickness With an Air-Assisted Spray Gun. *Engineering Transactions*. 2023, roč. 71, č. 2, s. 241–263 [vid. 13. březen 2024]. ISSN 24508071.
- [26] VANDER WAL, Randy L., Gordon M. BERGER a Steven D. MOZES. The combined influence of a rough surface and thin fluid film upon the splashing threshold and splash dynamics of a droplet impacting onto them. *Experiments in Fluids*. 2006, roč. 40, č. 1, s. 23–32. ISSN 0723-4864.
- [27] QIU, Ming, Jianjun LU, Yingchun LI a Guisen LV. Investigation on MoS₂ and graphite coatings and their effects on the tribological properties of the radial spherical plain bearings. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. 2016, roč. 29, č. 4, s. 844–852 [vid. 11. březen 2024]. ISSN 10009345.
- [28] PANDEY, Preetanshu, Dilbir S. BINDRA a Linda A. FELTON. Influence of process parameters on tablet bed microenvironmental factors during pan coating. *AAPS PharmSciTech*. 2014, roč. 15, č. 2, s. 296–305 [vid. 21. duben 2025]. ISSN 1530-9932.
- [29] *Efficiency Coating Machine - IPharmachine*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.ipharmachine.com/efficiency-coating-machine>
- [30] *FLEX 05 Tablet Coating System | Thomas Processing*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://thomasprocessing.com/tablet-coating-systems/rd/flex-05-tablet-coater/#tab-id-3>
- [31] *Batch Coating Systems- O'Hara Technologies*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.oharatech.com/products/batch-coating-systems/>
- [32] *BYC Type Tablet Coating Machine - IPharmachine*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.ipharmachine.com/tablet-coating-machine-byc-300>
- [33] *FastcoatTM Continuous Coating Systems (1200 kg) - FCC 1200 - O'Hara Technologies*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.oharatech.com/product/fastcoat-continuous-coating-systems-1200-kg/>
- [34] *Small Parts Coating - Imel spa*. [vid. 23. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.imelspa.com/en/small-parts-coating/>

- [35] *Small part coating / Walther Trowal*. [vid. 25. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.walther-trowal.com/en/produkte/small-part-coating>
- [36] MIHAIL CARAMAN. *Inquiry About Coating Precision in ROTOVER i4-220 System [elektronická pošta]*. 6. březem 2025
- [37] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav, Bakalářská PRÁCE a Jan VELIČKA VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR ING DAVID KOŠTÁL. *Testování kluzných povlaků pro vesmírné aplikace*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. [vid. 1. květen 2025]. Dostupné z: doi:
- [38] ČSN ISO 5855-1, Letectví a kosmonautika-MJ závity-Část 1: Všeobecné požadavky. 2000.
- [39] DUBEY, Atul, Richard HSIA, Kostas SARANTEAS, Dean BRONE, Tushar MISRA a Fernando J. MUZZIO. Effect of speed, loading and spray pattern on coating variability in a pan coater. *Chemical Engineering Science*. 2011, roč. 66, č. 21, s. 5107–5115 [vid. 3. květen 2025]. ISSN 0009-2509.
- [40] *Soler & Palau TD 500/150 3V - potrubní ventilátor | CZVzduchotechnika.cz*. [vid. 4. květen 2025]. Dostupné z: https://www.czvzduchotechnika.cz/td-500-150-3v/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=V-PLA%3A%20Kategorie%203&utm_id=21422699210&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAqrG9BhAVEiwAaPu5ztWZi9f0HkTeOchYdgJQ0R_426atG_j8CRZsn0-uhx1WG2-9f5kVJR0CSU8QAvD_BwE
- [41] *Types of Tablet Coating Machines: The Ultimate Guide*. 12. duben 2023 [vid. 13. duben 2025]. Dostupné z: <https://www.ipharmachine.com/types-of-tablet-coating-machines>
- [42] *Ansys Rocky | Particle Dynamics Simulation Software*. [vid. 9. květen 2025]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-rocky>
- [43] ČSN EN ISO 2409, *Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška*. květen 2021

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam použitých zkratk

DEM	Discrete element method
CFD	Computational fluid dynamics
QbD	Quality by Design
PVD	Physical Vapor Deposition
PLC	Programmable Logic Controller

10.2 Seznam použitých symbolů a veličin

MoS ₂	Disulfid molybdeničitý
h_c	Kritická tloušťka povlaku
d_L	Velikost částic opotřebení
p	Velikost zatížení
w_{ab}	Adhezní energie
D_b	Průměr bubnu
g	Gravitační zrychlení
F	Froudovo číslo
ω	Úhlová rychlost otáčení bubnu
D	Charakteristický rozměr
v	Rychlost proudění
ρ	Hustota kapaliny
μ	Viskozita kapaliny
σ	Povrchové napětí kapaliny
Re	Reynoldsovo číslo
Oh	Ohnesorgovo číslo
φ	Úhel rozptylu nástřiku

h	Vzdálenost trysky od povrchu
a, b	Poloměry eliptické oblasti nástřiku
Q	Průtokový objem laku
η	Přenosová účinnost
v_p	Rychlost pohybu pistole
T	Označení testovacího vzorku
$V_{Smin}; V_{Smax}$	Objem nejmenšího; největšího povlakovaného dílu
$n_{min}; n_{max}$	Minimální; maximální počet dílů v dávce
n	Počet dílů
k_g	Korekční faktor
v_{max}	Maximální úroveň plnění bubnu
t	Tloušťka povlaku
k	Kompenzační faktor
$S_S; S_T$	Plocha součásti; tělíška
$n_S; n_T$	Počet součástí; tělísek
R_a	Drsnost povrchu
N	Velikost výběrového souboru
Z	Kvantil normálního rozdělení
E	Maximální přípustná odchylka
$S; S_{vzorek}$	Směrodatná odchylka všech dat; vzorku
$\bar{x}; \bar{x}_{vzorek}$	Průměrná hodnota všech dat; vzorku
$CV; CV_{interní}; CV_{externí}$	Variační koeficient celkový; interní; externí

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 PRISMA diagram.....	14
Obr. 2-2 Schématické znázornění skluzu rovin MoS ₂ . ([2], upraveno).....	15
Obr. 2-3 Závislost životnosti povlaku na drsnosti a úpravě povrchu.[4].....	17
Obr. 2-4 Závislost součinitele tření na počtu cyklů. [5].....	17
Obr. 2-5 Schématické znázornění jednotlivých fází opotřebení povlaku. ([6], upraveno).	18
Obr. 2-6 SEM snímek poškozeného povlaku. [6].....	18
Obr. 2-7 SEM snímek opotřebeného povrchu povlaku po provozu v různých prostředích: A) vzduch, B) argon. Relativní vlhkost prostředí 0,5–3 ±3 % RH. ([9], upraveno)	20
Obr. 2-8 Vývoj součinitele tření u povlaků s tloušťkou <70 μm.	21
Obr. 2-9 Vývoj součinitele tření u povlaků s tloušťkou >70 μm.	21
Obr. 2-10 Závislost průměrné míry opotřebení na tloušťce povlaku pro povlaky obsahující: a) 2,5 hm.% MoS ₂ , b) 5 hm.% MoS ₂ , c) 10 hm.% MoS ₂	22
Obr. 2-11 Standartní bubnové systémy: a) immersion sword system, b) immersion tube system, c) Pellegrini pan system. ([41], upraveno)	26
Obr. 2-12 Systémy s perforovanými bubny: a) Accela-Cota, b) Hi-Coater, c) Dricoaater. ([41], upraveno)	27
Obr. 2-13 Fish–bone diagram procesu povlakování v bubnu.[18]	27
Obr. 2-14 Závislost indexu orientace na kulovitosti dílu. Index orientace vyjadřuje, jak moc se orientace dílu liší od ideální orientace.[19].....	28
Obr. 2-15 Schematické znázornění dobrého a špatného smáčení.[21].....	29
Obr. 2-16 Změna tloušťky vrstvy povlaku způsobená tokem materiálu. ([21], upraveno)	29
Obr. 2-17 a) Vliv úhlu náklonu bubnu na variační koeficient tloušťky povlaku. b) Distribuce tloušťky povlaku v závislosti na průměru změně průměru částic pro různé úhly náklonu bubnu.[20].....	30
Obr. 2-18 Závislost distribuce povlaku na změně úst'ové vzdálenosti.[25]	32
Obr. 2-19 Kapka o průměru 2 mm dopadající rychlostí 3,15 m/s na: a) leštěný povrch; b) povrch s drsností Ra 200. (Upraveno,[26]).....	33
Obr. 2-20 Vztah mezi sušicí kapacitou a relativní vlhkostí v loži tablet [28]	34
Obr. 2-21 Komerčně dostupná zařízení: a) FLEX 05; b) zařízení řady BYC; c) Fastcoat™. ([29, 30, 33])	35

Obr. 2-22 Přehled sortimentu povlakovaných dílů z portfolia firmy Imel. [34]	36
Obr. 2-23 OBRÁZEK: Zařízení ROTOVER (vlevo) a ROTAMAT (vpravo).[34, 35]	36
Obr. 2-24 a) Systém přívodu a odvodu vzduchu. Červené šipky znázorňují ohřátý vzduch a zelené šipky odváděný vzduch. b) Odnímatelná filtrační jednotka.[35]	37
Obr. 4-1 Hierarchická struktura cílů a omezení.....	43
Obr. 4-2 Primární faktory vstupující do procesu aplikace (blackbox).....	45
Obr. 4-3 Sekundární faktory vstupující do procesu aplikace (glassbox).....	45
Obr. 4-4 Numerická simulace povlakování součástí v bubnu v softwaru ANSYS Rocky.[42]	46
Obr. 4-5 Schéma postupu při převodu do průmyslového prostředí a škálování procesu. (Vytvořeno na základě informací z [18])	47
Obr. 5-1 Zmatňující zařízení	49
Obr. 5-2 Snímek z optického profilometru s vyznačenými oblastmi.....	50
Obr. 5-3 Schéma optimalizace výpočtového modelu a jeho použití.....	51
Obr. 5-4 vzorek po vykonání testu s vyznačenými oblastmi měření tloušťky povlaku.....	54
Obr. 5-5 Graf závislosti součinitele tření na tloušťce povlaku pro prvních 100 cyklů od ustálení hodnoty součinitele tření.	54
Obr. 5-6 Vývoj součinitele tření pro vzorek T312.....	55
Obr. 5-7 Vývoj součinitele tření pro vzorek T812.....	56
Obr. 5-8 Proložení grafu závislosti součinitele tření na tloušťce povlaku teoretickou křivkou dle Rabinowitze [11] a Finkina [12].	56
Obr. 5-9 Schéma předběžného návrhu metodiky aplikace.	58
Obr. 6-1 Povlakovací bubnen použitý v této práci (vlevo) a v práci Sashi [20] (vpravo). ..	60
Obr. 6-2 Popis konstrukce povlakovacího bubnu.	61
Obr. 6-3 Sestavené prototypové zařízení.....	62
Obr. 6-4 Popis modulární filtrační jednotky.	62
Obr. 6-5 Automatizovaná airbrush pistole FENGA BD-130.....	64
Obr. 6-6 Konfigurace s a) rovnými lopatkami, b) kolizními členy a c) lopatkami pod úhlem.	65
Obr. 6-7 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci základního provedení bubnu. ..	66
Obr. 6-8 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci s rovnými lopatkami.	67

Obr. 6-9 Schématické zobrazení pohybu pro konfiguraci s kolizními členy.	68
Obr. 6-10 a) Vsázka bubnu před začátkem inicializačního míchání a b) po 10 sekundách míchání s vyznačenou postříkovou zónou.	70
Obr. 6-11 Klasifikační stupnice dle ČSN EN ISO 2409 ([43], převzato a upraveno z [21])	72
Obr. 6-12 Porovnání výsledného povrchu povlaku aplikovaného na šrouby M5-20: a) pro průtokový objem odsávání 470 m ³ /h, b) bez povlaku, c) pro průtokový objem odsávání 390 m ³ /h,.....	73
Obr. 6-13 Porovnání kvality povlaku pro vzorek s neředěným lakem (vlevo) a lakem ředěným v poměru 2:1 (vpravo).	73
Obr. 6-14 Porovnání hodnot varičního koeficientu a konverzního faktoru pro různé délky cyklu aplikace povlaku pro vzorky ø 6–28.	74
Obr. 6-15 Porovnání hodnot variačního koeficientu a konverzního faktoru pro různé úrovně plnění bubnu.	75
Obr. 6-16 Porovnání hodnot variačního koeficientu a konverzního faktoru pro různé rychlosti otáčení bubnu pro vzorky ø 6–28.	76
Obr. 6-17 Kolík ø 6–28 mm se značnými povrchovými vadami způsobenými kolizemi mezi jednotlivými součástmi a nezaschlým povlakem.	77
Obr. 6-18 Schématické znázornění pohybu a orientace dílu během procesu.	78
Obr. 6-19 Velikost kaskádové vrstvy pro úroveň plnění 1,7 % (vlevo) a 4,2 % (vpravo). 80	

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Typy povlaků MoS ₂ .([3], upraveno).....	16
Tab. 2-2 Složení kluzného povlaku Molykote. [13].....	24
Tab. 2-3 Charakteristické vlastnosti, požadavky a zkušební metody.[16]	25
Tab. 2-4 Dostupné technické údaje k zařízením ROTAMAT a ROTAMAN.[34, 35]	38
Tab. 3-1 Přehled atributů a cílů: C-cíle, F-funkce, O-omezení. Z-způsoby.....	42
Tab. 5-1 Zvolený interval tlouštěk povlaku pro testování tribologických vlastností.	52
Tab. 5-2 Podmínky experimentu.....	53

13 SEZNAM PŘÍLOH