



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POVRCHOVÉ ÚPRAVY KOMPOZITOVÉHO DÍLCE

SURFACE TREATMENT OF A COMPOSITE PART

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Bahenský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček, IWE

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Štěpán Bahenský**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček, IWE**
Akademický rok: 2021/22

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:

Povrchové úpravy kompozitového dílce

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současná doba klade vysoké nároky na snižování hmotností různých typů konstrukcí. Jednou z cest je využití kompozitních materiálů, které mají vysokou pevnost při nízké měrné hmotnosti. Diplomová práce je zaměřena na ochranu polyesterového kompozitu vyztuženého skleněnými vlákny z důvodů zvýšení stability v povětrnostních podmínkách. Pro finální úpravu jsou navrženy nátěrové systémy vytvrzované UV zářením, které budou implementované do výrobní linky.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární studii technologie výroby skelných kompozitů a rozbor možných typů nátěrových systémů.

Posoudit vliv povrchu na adhezi nátěrového systému.

Navrhnout a experimentem ověřit možnosti aplikace nátěrových hmot ve výrobní lince.

Provést a vyhodnotit experiment.

Vypracovat technicko–ekonomické hodnocení.

Seznam doporučené literatury:

COTELL, C. M. a kolektiv autorů. ASM Handbook Surface Engineering Volume 5, 2011 vyd. Materials Park, Ohio, 1994, ISBN 0-87170-377-7.

KRAUS, V. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009, 216 s. ISBN 80-7082-668-1.

MOHYLA, M. Technologie povrchových úprav kovů. 3vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 2006. 156s. ISBN 80-248-1217-7.

SEDLÁČEK, V. Povrchy a povlaky kovů. 1vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha. 1992. 176s. ISBN 80-01-00799-5.

PODJUKLOVÁ, J. Speciální technologie povrchových úprav I. 1.vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava.1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8.

Povrchová úprava - elektronický odborný časopis, IMPEA s.r.o.,
<http://www.povrchovauprava.cz/free-pdf-magazine>, přístup 12.října 2021

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na kompozitní materiály a na možnost jejich povrchové úpravy se zaměřením na lakování. Cílem bylo vytvořit na povrchu materiálu vrstvu, která by sloužila jako ochrana vůči UV záření a následné degradaci. První teoretická část je věnována materiálovému složení. V podkapitolách jsou uvedeny jednotlivé druhy funkčních složek kompozitů. Jsou zde popsány jejich možné aplikace a také jejich výhody a nevýhody. Teoretická část je navíc doplněna o používané druhy metod výroby kompozitních materiálů a o následnou přípravu povrchu s cílem zlepšit adhezní vlastnosti materiálu vůči laku. Druhá část, která byla vytvořena ve spolupráci s firmou GDP Koral, s. r. o., pojednává o zvoleném druhu povrchové úpravy pro kompozitní materiály vyrobené metodou pultruze. Byla zvolena metoda UV lakování, kde je mokrá vrstva laku vytvrzována UV zářením. Byly vytvořeny dvě sady vzorků, které se liší jak metodou nanášení laku, tak i parametry vytvrzovacího procesu. Na jednotlivých vzorcích byly následně provedeny mechanické testy, které měly za cíl prověřit výslednou adhezní schopnost lakovacího systému. Součástí praktické části je také navržení možných technologií, pro implementaci povrchové úpravy do výrobní linky. Ve třetí části je uvedeno technicko-ekonomické zhodnocení, které je zaměřeno na srovnání nákladů standardního lakování a lakování pomocí UV laků. Závěrečná kapitola obsahuje shrnutí zjištěných poznatků a zhodnocení zvoleného typu povrchové úpravy s ohledem na výsledky mechanických testů a možnosti aplikace při pultruzním výrobním procesu.

Klíčová slova

kompozit, lakování, adheze, UV laky, pultruze

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on composite materials and the possibility of their surface treatment with a focus on painting. The aim was to create a layer on the surface of the material that would serve as protection against UV radiation and subsequent degradation. The first theoretical part is devoted to the material composition. In the subsections, the different types of functional components of the composites are presented. Their possible applications as well as their advantages and disadvantages are described. In addition, the theoretical part is supplemented by the types of methods used for the production of composite materials and the subsequent surface preparation in order to improve the adhesion properties of the material to the paint. The second part, which was developed in cooperation with GDP Koral, s. r. o., deals with the chosen type of surface treatment for composite materials produced by the pultrusion method. The UV coating method was chosen, where the wet layer of the varnish is cured by UV radiation. Two sets of samples were created, which differ in both the method of varnish application and the parameters of the curing process. Mechanical tests were then performed on each sample to verify the resulting adhesion capability of the paint system. The practical part also includes the design of possible technologies for the implementation of the surface treatment in the production line. In the third part, a techno-economic evaluation is presented, which focuses on the cost comparison of standard painting and painting with UV varnishes. The final section contains a summary of the findings and an evaluation of the chosen type of coating with respect to the results of mechanical tests and the possibilities of application in a pultrusion production process.

Key words

composite, painting, adhesion, UV varnishes, pultrusion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAHENSKÝ, Štěpán. *Povrchové úpravy kompozitového dílce* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140051>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Povrchové úpravy kompozitového dílce vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 10. 5. 2022

místo, datum

Bc. Štěpán Bahenský

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jaroslavovi Kubíčkovi, IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě GDP Koral, s. r. o., především panu řediteli Ing. Radimu Bučkovi, MBA a projektovému inženýrovi Ing. Pavlovi Simonovi, Ph.D., za možnost práce na projektu ochrany povrchu vyráběných kompozitních materiálů. V neposlední řadě bych také rád poděkoval celé své rodině, která mi poskytovala podporu během celé doby studia.

OBSAH

ÚVOD	10
1 Teoretická část.....	11
1.1 Zpevňovací složky.....	11
1.1.1 Skelná vlákna.....	12
1.1.2 Čedičová vlákna	14
1.1.3 Borová vlákna.....	14
1.1.4 Uhlíková vlákna.....	15
1.1.5 Organická vlákna	17
1.1.6 Keramická vlákna	19
1.2 Matrice.....	20
1.2.1 Kovové matrice.....	21
1.2.2 Keramické matrice.....	21
1.2.3 Polymerní matrice.....	23
1.3 Mezifáze	24
1.3.1 Smáčivost.....	25
1.3.2 Vliv drsnosti povrchu	26
1.3.3 Typy vazeb u mezifáze	26
1.4 Metody výroby kompozitu	27
1.4.1 Ruční/mokrý pokládání.....	27
1.4.2 Ruční/mokrý pokládání s využitím vakuového vaku	28
1.4.3 Infuze	28
1.4.4 Metoda Pre-preg	29
1.4.5 Metoda RTM	30
1.4.6 Pultruze.....	31
1.4.7 Metoda navíjení vlákna	32
1.4.8 3D Tisk	33
1.5 Příprava povrchu na lakování.....	34
1.5.1 Energetické úpravy povrchu	35
1.5.2 Mechanické úpravy povrchu	38
1.5.3 Chemické úpravy povrchu.....	39
1.6 Povrchové úpravy kompozitních materiálů.....	41
1.7 UV laky	42
2 Praktická část.....	44
2.1 Představení firmy GDP Koral, s. r. o.	44
2.2 Zvolená metoda povrchové úpravy materiálu	45
2.2.1 Technologie UV vytvrditelných laků	45
2.2.2 Možnosti využití, chemie a vlastnosti UV laků.....	48
2.3 Testování vyvíněného laku na kompozitních dílcích	49
2.3.1 Použité metody testování laku	50
2.4 Nanesení metodou rozlití a následné kalibrace výšky laku.....	53
2.4.1 Výsledky testování laku – nanesení metodou rozlití	54
2.5 Nanesení metodou nástřiku lakovací pistolí.....	55

2.5.1	Výsledky testování laku – nanesení metodou nástřiku.....	56
2.6	Technologický návrh automatizovaného řešení UV lakování	59
2.6.1	Odprašovací stroj.....	59
2.6.2	Lakovací box a systém nanášení laku.....	62
2.6.3	UV vytvrzovací tunel.....	65
2.7	Varianty provedení technologického celku povrchové úpravy	68
2.7.1	Nástřik s krokem jeden metr.....	69
2.7.2	Nástřik s krokem půl metru	71
3	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	73
	ZÁVĚR.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
	SEZNAM PŘÍLOH	88

ÚVOD

Technologický pokrok je ovlivněn mnoha faktory. Jedním z těchto faktorů je rozvoj v oblasti materiálů. Ať se jedná o jakýkoliv obor, tak jsou konečná omezení definována v závislosti na typu materiálu. Právě kompozitní materiály představují obrovský pokrok v době, kdy jsou kladeny stále vyšší nároky na optimalizaci užívaného materiálu. Princip kompozitního materiálu není nějak nová myšlenka a v přírodě je to běžně se vyskytující jev. Příkladem může být dřevo. Jedná se o vláknitý kompozit složený z vláken celulózy v ligninové matici. Kompozitní materiály se svým způsobem využívají již hodně dlouho. Již v pravěku se používala sláma k zpevnění hlíny. Na počátku 60. let 20. století se začala zvyšovat poptávka po kompozitních materiálech a v roce 1965 započal výzkum a vývoj v této oblasti. Od této doby stále roste poptávka po materiálech, které jsou pevnější a zároveň lehčí. Tyto materiály se využívají v oblastech letectví, energetiky nebo ve stavebním průmyslu. Kompozit spojuje žádoucí vlastnosti jednotlivých složek a tím je jeho využití daleko výhodnější než využití jednotlivých samostatných materiálů. Dílčí složky mohou být kombinovány tak, aby měly jako celek požadované vlastnosti pro dané užití. [1]

Od počátku 20. století se začala využívat pryskyřice vyztužená skleněnými vlákny. Toto spojení materiálů vykazuje vysokou pevnost a nízkou celkovou hmotnost. Tuhost těchto materiálů není příliš vysoká zejména proto, že skelné vlákno není samo o sobě moc tuhé. V dalších letech začaly vznikat tzv. pokročilá vlákna, která mají vysoký modul pružnosti. K tomu se využíval například bór, křemík nebo oxid hlinitý. Kompozity vyztužené vlákny mají oproti jiným formám větší pevnost a tuhost. Užití vláken však vede ke zpevnění hlavně ve směru vláken. Vlákna lze uspořádat do dvourozměrného nebo trojrozměrného pole, aby došlo ke zpevnění i v jiných směrech. Při výrobě se zohledňují i nemechanické cíle. Pro výrobu materiálu, který by byl kompletně odolný vůči korozi, by bylo nutné využít laminát neboli tzv. sendvič. [1]

Kompozitní materiály lze také povrchově upravovat a tím zlepšovat jejich vlastnosti vůči povětrnostním podmínkám a stárnutí. Existuje několik možností, jak toho docílit. První variantou je užití kvalitních barevných gelcoatů, které jsou odolné vůči UV záření, avšak z dlouhodobého hlediska jsou stále nedostačující. Mezi další varianty patří lakování nebo příprava kompozitu s 2K-PUR povrchem v jednom kroku, označované také jako „All-in-one Step“. [2]

Cílem práce je vypracovat literární studii technologie výroby skelných kompozitů a rozbor možných typů nátěrových systémů. Dále posoudit vliv povrchu na adhezi specializovaného nátěrového systému a ověřit možnost aplikace za běžných výrobních podmínek. Součástí závěrečné části bude vypracování technicko-ekonomického hodnocení.



Původní vzhled materiálu

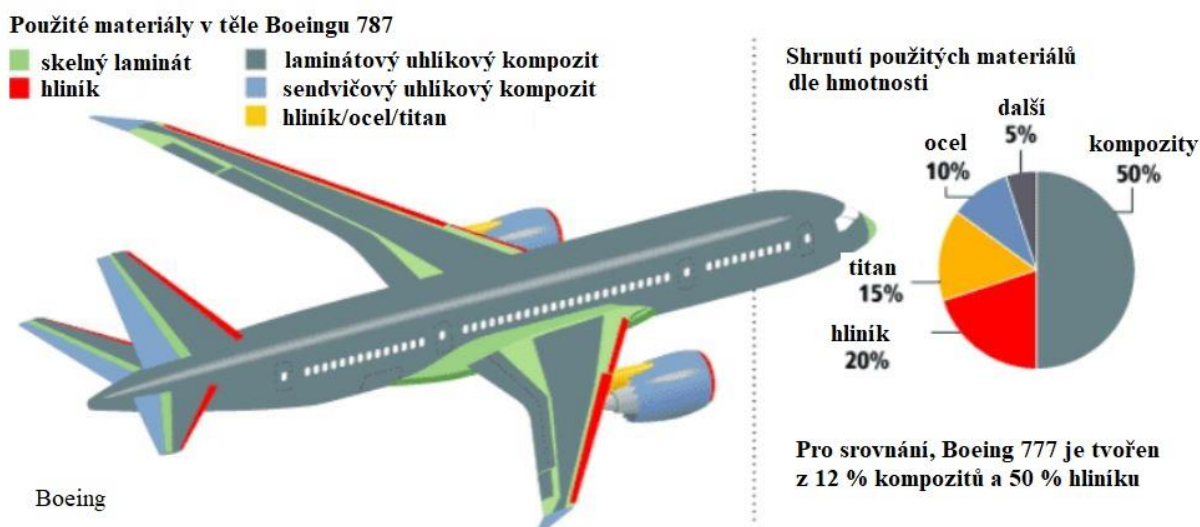


Vzhled materiálu po deseti letech

Obr. 1 Porovnání vzhledu povrchu materiálu, který byl vystaven venkovnímu působení UV záření.

1 TEORETICKÁ ČÁST

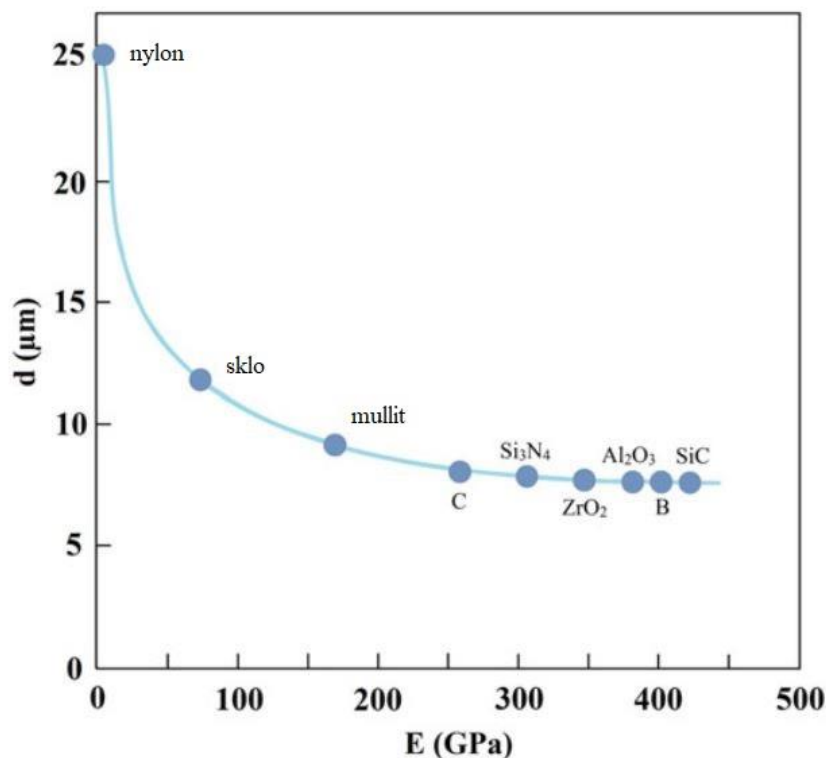
Kompozitní materiály se zpravidla skládají ze tří hlavních složek. Jde o zpevňovací složku, matici a mezifázi. Tyto jednotlivé složky budou v dalších podkapitolách popsány a rozděleny. Výše zmíněné složky mají velký vliv na konečné vlastnosti materiálu. Mezi zásadní faktory patří druh zpevňovacích složek, druh matrice a další přísady, které ovlivňují například jejich odolnost vůči UV záření nebo elektrickou vodivost. Kombinací vlastností jednotlivých složek vzniká široké spektrum materiálů, které nacházejí uplatnění v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Příkladem může být letecký průmysl. Na obr. 2 je znázorněno tělo dopravního letounu Boeing 787. Konkrétně v tomto případě tvoří polovinu použitých materiálů právě kompozity, které mají výborné mechanické vlastnosti a zároveň nízkou hmotnost. Nevýhodou je jejich nízká tepelná odolnost, která limituje jejich využití v částech motorů, kde vzniká vysoké teplo. Zde se proto využívají zejména titanové a ocelové slitiny.



Obr. 2 Grafické zobrazení použitých materiálů v těle Boeingu 787 – podle [3].

1.1 Zpevňovací složky

Zpevňovací složky mohou být ve formě částic, vloček, nebo vláken. Vlákna mohou být krátká ale i kontinuální. Některá vlákna mohou být ve formě listů. Většina využívaných zpevňovacích složek je právě ve formě vláken, protože materiály s touto strukturou mají větší pevnost a jsou tužší ve srovnání jinými formami. Hmota ve vláknité formě může být navíc velmi flexibilní. Konkrétně v této oblasti je směřována pozornost na tzv. pokročilá vlákna, která mají vysokou pevnost a tuhost. Tyto vlastnosti jsou navíc spojené s nízkou hustotou. Například skleněné vlákno ve svém různých formách je dosud nejběžnější výztuž pro polymerní matrice. Aramidové vlákno je oproti skelnému tužší a lehčí. Mezi další vlákna, která kombinují vlastnosti vysoké pevnosti a tuhosti patří například bór, karbid křemíku, uhlík nebo oxid hlinitý. Všechny typy těchto vláken byly vyvinuty ve druhé polovině 20. století. V posledních letech byla vyvinuta i vlákna na bázi keramiky. [1]



Obr. 3 Závislost průměru na modulu pružnosti materiálu – podle [1].

Užití vláken v těchto materiálech je založeno na třech důležitých vlastnostech.

- malý průměr vlákna s ohledem na jeho zrnitost
- vysoký poměr stran (délka/průměr, l/d)
- vysoký stupeň pružnosti

Flexibilita daného materiálu je funkcí elastické tuhosti a průřezu. Platí, že čím vyšší je tuhost materiálu, tím je méně pružný. Na obr. 3 můžeme vidět závislost průměru různých vláken na modulu pružnosti E . Je patrné, že i z křehkých materiálů jako je sklo, karbid křemíku nebo oxid hlinitý lze vyrobit velmi flexibilní vlákna, za předpokladu že je zle zpracovat na velmi malý průměr. [1]

1.1.1 Skelná vlákna

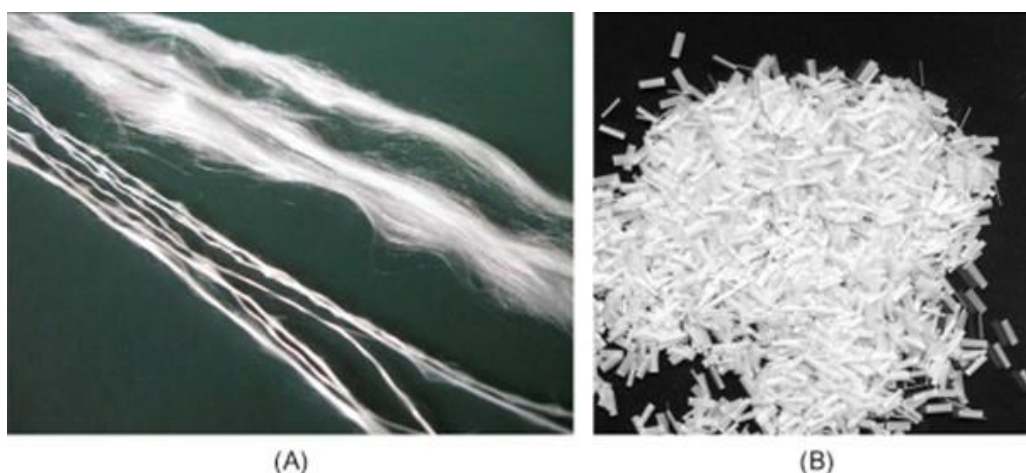
Kompozity, které obsahují jako zpevňující složku skleněná vlákna se obecně označují jako sklolamináty. Vláknem zde poskytuje pevnost, rovnoměrnou stálost a tepelnou odolnost. Skleněná vlákna v současnosti patří mezi nejuniverzálnější průmyslové materiály a jsou k dispozici takřka v neomezeném množství. Tato vlákna můžeme rozdělit do několika tříd podle obsahu prvků a sloučenin, které jsou v nich obsaženy. Všechny tyto třídy obsahují základní prvek, kterým je křemík. Mezi jejich vlastnosti patří tvrdost, průhlednost, chemická odolnost, stabilita. Žádoucími vlastnosti jsou také pevnost, pružnost a dostatečná tuhost. Skleněná vlákna se používají pro výrobu strukturálních kompozitů, desek s plošnými spoji a dalších speciálních produktů. [4]

Tab. 1 Hmotnostní podíl jednotlivých přísad v % ve vybraných třídách – podle [4].

Přísady	E-třída	S-2-třída
SiO ₂	52-56 %	64-66 %
CaO	16-25 %	
Al ₂ O ₃	12-16 %	24-26 %
B ₂ O ₃	8-13 %	
K ₂ O & Na ₂ O	0-1 %	
MgO	0-6 %	9-11 %

Přidáním oxidů se modifikují výsledné vlastnosti materiálu. Mezi nejpoužívanější varianty patří tzv. E-sklo a S-sklo. Sklo s označením „E“ má nejnižší výrobní náklady a je užíváno tam, kde je jsou kladeny požadavky na vysokou pevnost. Tento druh skelných vláken je také nevodivý. [5]

S-třída, také známá jako HT, byla původně vyvinuta pro vojenské aplikace. Příkladem může být opláštění střel nebo součástí vojenských letadel. Později byla pro civilní aplikace komercializována další verze s názvem S-2, která má nižší náklady na výrobu ale velmi podobné vlastnosti. Existují i další třídy skelných vláken, která nachází uplatnění v určitých aplikacích. Například C-třída skelných vláken má vyšší odolnost vůči korozi vyvolané kyselinami. AR-sklo se využívá v cementových podkladech a betonu. [5]



Obr. 4 (A) Kontinuální skelné vlákno (B) Nasekané skelné vlákno – podle [6].

Obecně lze výrobní proces popsat následovně. Jednotlivé suroviny se za sucha smísí a taví v peci při teplotě asi 1400 °C. Roztavené sklo se mění na vlákna při průchodu přes řadu otvorů. Průměr vláken je v této fázi asi 10 μm . Dále jsou vlákna potažena ochranou vrstvou z lubrikantů, antistatických činidel, pojiv a někdy i spojovacích činidel pro podporu adheze s polymerními matricemi. Takto upravená vlákna se skládají dohromady a vytváří souvislé prameny. Jiná forma skelného vlákna, také známá jako „Roving“, se získává navinutím skupiny nekroucených paralelních pramenů na válcový tvarovací balík. Tato skelná vlákna mohou být použita pro výrobu kompozitních materiálů konvenčním výrobním procesem. [5] Průměry komerčně dostupných skelných vláken se pohybují od 3 do 20 μm [7].

Tab. 2 Vybrané fyzikální vlastnosti komerčně dostupných skelných vláken – podle [5].

	E-třída	S-2-třída
Hustota [g/cm³]	2.58	2.46
Pevnost v tahu [MPa]	3445	4890
Modul v tahu [GPa]	72.3	86.9
Prodloužení [%]	4.8	5.7

V tab. 2 můžeme vidět, že modul pružnosti v tahu E-třídy skleněných vláken může dosáhnout až 3,4 GPa, zatímco S-třída dosahuje pevnosti až 4,9 GPa a vyšších hodnot v oblasti prodloužení.

Skelná vlákna mají řadu výhod při srovnání s jinými typy vláken. Jsou rozměrově stabilní, odolávají vlhkosti, ohni a chemikáliím. V neposlední řadě mají také výbornou tepelnou vodivost. Kompozity se skleněnými vlákny nacházejí uplatnění v leteckém, vojenském, automobilovém a sportovním průmyslu. Existují technologie, pomocí kterých je možné tyto kompozitní materiály recyklovat a oddělená skelná vlákna znovu použít. [4]

1.1.2 Čedičová vlákna

Čedič je vyvřelá hornina, kterou lze nalézt v oblastech Severní Ameriky, východní Evropy, Ruska atd. Z této horniny lze čedičová vlákna získat obdobným způsobem jako při výrobě skelných vláken. Čedičové vlákno má v mnoha ohledech velmi podobné vlastnosti jako skelné vlákno. Detailní složení čedičového vlákna je uvedeno v tab. 3. Přesné složení však závisí na původní čedičové hornině, ze které se vlákna vyrábí. Hustota čedičových vláken je téměř identická s hustotou vláken skelných. V tomto případě je zmiňovaná hustota 2.67 g/cm³. Čedičová vlákna mají naopak mnohem vyšší pevnost v tahu. [1]

Tab. 3 Hmotnostní podíl jednotlivých přísad v % v čedičových vláknech – podle [1].

Přísady	Hmotnost [%]
SiO₂	50-55
Al₂O₃	15
Fe₂O₃	10-13
MgO	5
Na₂O	3
TiO₂	1-3
K₂O	1

1.1.3 Borová vlákna

Borová vlákna se začala využívat v dobách, kdy nebyla uhlíková vlákna dostupná v kontinuálních délkách a skelná vlákna neměla dostatečný modul pružnosti. Borové vlákno se stalo prvním vysoce výkonným vláknem, které bylo užito ve výrobní aplikaci. Výroba borového vlákna probíhá chemickou depozicí z plynné fáze v reaktoru z borosilikátového skla. Wolframový substrát o průměru asi 12 μm se zavádí do reaktoru, který je utěsněný rtuť a táhne se reaktorem. Substrát je odporově zahříván na 1300 °C stejnosměrným zdrojem. Mezitím je zaváděn do horní části reaktoru chlorid boritý a vodík. Při průchodu reaktoru se na wolframovém substrátu tvoří bor vodíkovou redukcí chloridu boritého. Nepoužité plyny chloridu boritého a nezreagované vodíky jsou odváděny výstupním otvorem na dně reaktoru. Tyto plyny jsou dále čištěny a recyklovány. Borové vlákno o průměru 100 μm prochází při

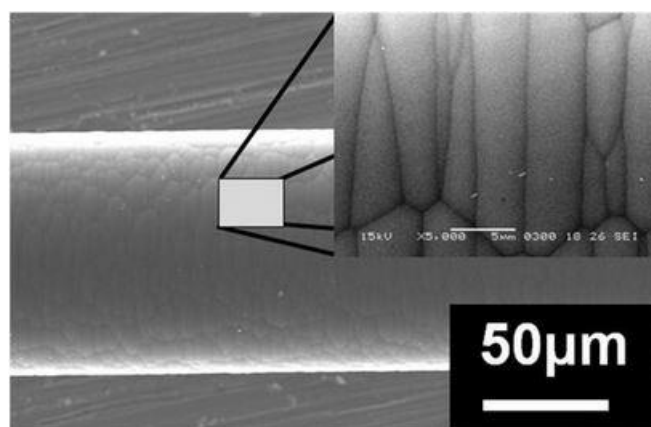
výstupu z reaktoru dalším rtuťovým těsněním a je navíjeno na navíjecí cívku. Optické skenery monitorují průměr vlákna před navíjením. [8]

Speciální vlastností borových vláken je jejich hrubá struktura, která připomíná kukuřičný klas. Tato struktura zlepšuje mechanické seřízení mezi vláknem a pryskyřicí. Borová vlákna nachází uplatnění v letectví a kosmonautice. Tato vlákna musí být přísně kontrolována na pevnost v tahu a modul pružnosti. [8]

Tab. 4 Vlastnosti borového vlákna o průměru cca 100 μm – podle [9].

Hustota [g/cm^3]	2.61
Pevnost v tahu [MPa]	4,000
Modul v tahu [GPa]	428
Pevnost v tlaku [MPa]	>6,000

Kompozity vyrobené z borových vláken mají nejvyšší pevnost v tlaku při srovnání s kompozity vyrobenými z vláken jiných typů. Přidáním borových vláken do kompozitu s vlákny jiného typu se zvýší modul v tahu a tlaku, tím se sníží celková výška a počet jednotlivých vrstev při snaze docílit ekvivalentní tuhosti. Snížení tloušťky laminátu vede ke snížení celkové hmotnosti. Při použití borových vláken nehrozí žádná galvanická koroze. [9]



Obr. 5 Struktura borového vlákna – podle [9].

1.1.4 Uhlíková vlákna

Uhlíkové (karbonové) vlákno se skládá z atomů uhlíků, které jsou vzájemně spojeny a tvoří dlouhý řetězec. Vlákna jsou extrémně tuhá, pevná a lehká. Nacházejí uplatnění v mnoha procesech a materiálových aplikacích. Materiál z uhlíkových vláken se dodává v různých „surových“ stavech. Mohou to být příze, jednosměrné vazby, copánky a další, které se využívají k výrobě kompozitních dílců. Vlastnosti dílů z uhlíkových vláken se blíží oceli a hmotnost je porovnatelná s plasty. Poměr pevnosti a hmotnosti je daleko vyšší než u oceli nebo plastu. Karbonová vlákna mají extrémní pevnost. Průměr uhlíkových vláken je přibližně 5-10 μm . Uhlíková vlákna jsou populární zejména v letectví, stavebnictví, vojenském průmyslu díky svým výborným mechanickým vlastnostem a nízké hmotnosti. Jejich cena je však vyšší ve srovnání například se skleněnými vlákny, která mají podobné vlastnosti. [10]



Obr. 6 Spředená uhlíková vlákna – podle [11].

Na základě vlastností uhlíkových vláken mohou být uhlíková vlákna rozdělena do skupin:

- Extra-vysoký modul, (angl. UHS), kde je modul vyšší jak 450 GPa
- Vysoký-modul, (angl. HM), kde modul dosahuje hodnot mezi 350-450 GPa
- Střední modul, (angl. IM), s modulem mezi 200-350 GPa
- Nízký modul a vysoká pevnost v tahu (angl. HT), modul menší jak 100 GPa, pevnost v tahu vyšší jak 3 GPa
- Velmi vysoká pevnost v tahu, (angl. SHT), kde pevnost v tahu je vyšší jak 4.5 GPa [10]

Na základě konečné teploty při zpracování se uhlíková vlákna dělí na:

- Typ 1 - vysokoteplotní zpracování (angl. HHT), teplota konečného tepelného zpracování by měla být nad 2000 °C, jde o vlákna s vysokým modulem
- Typ 2 – středně vysoké teplotní zpracování (angl. IHT), teplota konečného tepelného zpracování by měla být kolem nebo nad 1500 °C, jde o vysokopevnostní typ vláken
- Typ 3 – nízkoteplotní zpracování (angl. LHT), teplota konečného tepelného zpracování je nižší než 1000 °C, jedná se o nízko modulové a nízko pevnostní vlákna [10]

Výrobní proces PAN-karbonových vláken

Uhlíková vlákna lze také dělit podle materiálu, ze kterého jsou složeny jejich prekurzorová vlákna. Asi nejznámější jsou tzv. PAN-karbonová vlákna. Materiálem prekurzoru je v tomto případě polyakrylonitril. Asi 90 % uhlíkových vláken je vyrobeno z polyakrylnitrilu. Zbývajících 10 % je vyrobeno z umělého hedvábí nebo ropné smoly. Všechny tyto látky jsou organickými polymery, které jsou charakteristické dlouhými molekulovými řetězci, které jsou spojeny dohromady atomy uhlíku. [10]

Zvlákňování a stabilizace

Plast ve formě polyakrylnitrilu je spřádán do vláken pomocí jedné z několika možných metod. V některých metodách je plast smíchán s určitými chemikáliemi a přes malé trysky čerpán do chemické lázně nebo zchlazovací komory, kde plast koaguluje a tuhne do uhlíkových vláken. V jiném procesu se směs plastů zahřívá a čerpá do komory, kde se odpařují rozpouštědla a zanechají pouze pevné vlákno. Krok zvlákňování je velice důležitý, protože při něm vzniká výsledná vnitřní atomová struktura. Vlákna se dále perou a natahují na požadovaný průměr. Protahování napomáhá molekulám se zarovnat ve vláknu a následné karbonizaci. Před

karbonizací je třeba vlákna ještě chemicky upravit, aby se jejich lineární vazba přeměnila na žebříkovou vazbu, která je tepelně stabilnější. Toho je dosaženo zahříváním vláken na vzduchu při teplotě asi 200-300 °C po dobu 30-120 minut. Vlákná nabudou molekuly kyslíku a přeskupí atomový vazební vzor. V některých procesech jsou vlákna tažena řadou vyhřívaných komor. [10]

Karbonizace

Jakmile jsou vlákna stabilizována, jsou zahřívána na teplotu 1000-3000 °C po dobu několika minut v peci, která je naplněna směsí plynů, které neobsahují kyslík. Nedostatek kyslíku zabraňuje spálení vláken při vysokých teplotách. Tlak plynu je uvnitř pece udržován vyšší než atmosférický tlak. Vstup a výstup vláken do pece je utěsněn, aby nedocházelo ke vstupu kyslíku z okolí. Jakmile jsou vlákna zahřáta, tak začnou ztrácet svoje neuhlíkové atomy a atomy uhlíku začnou tvořit pevně spojené uhlíkové krystaly, které jsou uspořádány rovnoběžně s osou vlákna. [10]

Ošetření povrchu

Po karbonizaci mají vlákna povrch, který se špatně spojuje s epoxidy a dalšími materiály, které jsou užívány pro výrobu kompozitů. Pro zajištění lepších vazebních vlastností vláken je jejich povrch mírně oxidován. Kyslík jemně naleptá (zdrsní povrch) vláken a tím zajistí lepší mechanické vazebné vlastnosti. Oxidace může být dosaženo například ponořením vláken do různých plynů, jako je vzduch nebo oxid uhličitý. Proces povrchové úpravy musí být kontrolován, aby nedocházelo ke tvorbě defektů jako jsou důlky, které by mohly negativně ovlivnit vlastnosti vlákna. [10]

Potahování

Po povrchové úpravě jsou vlákna potažena, aby byla chráněna před poškozením při navíjení nebo tkaní. Potahované materiály se volí s ohledem na druh lepidla, které je používáno při výrobě kompozitních materiálů. Mezi typické nátěrové systémy patří epoxid, polyester nebo nylon. Potažená vlákna jsou navinuta na cívky. Ve spřádacím stroji jsou vlákna stočena do přízí. [10]

Tab. 5 Vlastnosti PAN-karbonového vlákna – podle [1].

Hustota [g/cm³]	1.74
Modul v tahu [GPa]	230
Elektrický odpor [Ω/cm]	18×10^{-4}

Uhlíková vlákna mají vysoký poměr pevnosti k hmotnosti a jsou velmi tuhá, korozivzdorná a chemicky stabilní. Vlákná z uhlíku jsou elektricky vodivá a odolná vůči únavě. Karbonová vlákna mají dobrou pevnost v tahu, jsou nehořlavá a dobře vedou teplo. Mezi další vlastnosti patří například nízký koeficient teplotní roztažnosti, biologická inertnost a propustnost vůči rentgenovému záření. Uhlíková vlákna jsou však relativně drahá a křehká. Díky svým vlastnostem nachází materiály s tímto typem vláken uplatnění v nejrůznějších odvětvích jako automobilový průmysl, letecký průmysl, chemický průmysl nebo v medicíně. [10]

1.1.5 Organická vlákna

Organická vlákna se skládají z polymerních řetězců. Tyto řetězce mohou být různě uspořádány. Pokud nejsou makromolekulární řetězce zarovnané v žádném směru ani nijak natažené, tak lze očekávat, že zde budou převládat slabé van der Waalsovy interakce a tím pádem budou mít tato vlákna i nižší pevnost a tuhost. Naopak, pokud jsou řetězce uspořádány, tak zde převládají kovalentní vazby a výsledný materiál bude mít lepší mechanické vlastnosti. Běžné polymery vykazují Youngův modul asi 10 GPa nebo méně, ale lze získat i polymery s Youngovým

modulem okolo 70 GPa. Abychom však získali takto silná vlákna, je nutné řetězce orientovat a plně prodloužit. Této struktury makromolekulárního řetězce však není v praxi snadné dosáhnout. V posledních letech v této oblasti došlo k výraznému pokroku. Mezi vlákna s vysokou pevností a modulem pružnosti patří aramidová a polyethylenová vlákna. Pro výrobu těchto vysokopevnostních vláken byly využity dva přístupy. [1]

Prvním přístupem je strukturální modifikace „konvenčních“ polymerů. Tímto způsobem byl vyvinut například vysokomodulový polyethylen. Druhý, zcela odlišný přístup zahrnuje syntézu, po které následuje extruze nové třídy polymerů, které se nazývají polymery s tekutými krystaly. Tyto polymery mají tuhou tyčovou strukturu molekulárního řetězce. Kapalný stav zde hraje velmi významnou roli a poskytuje vysokou uspořádanost prodloužených řetězců. [1]

Polyethylenová vlákna

Tato vlákna mají velmi vysokou molekulovou hmotnost a jsou velmi křehká. Zároveň mají vysokou tuhost a pevnost. Pro získání požadované struktury řetězců je nutné, aby měl materiál požadované charakteristiky linearitu a krystalinity. Proces, kterým se vytváří vysokopevnostní polyethylenová vlákna, se nazývá gelové zvlákňování. Polyethylenové vlákno je velmi lehké a plave na vodě. Jeho pevnost a modul je lehce nižší než u aramidových vláken. Polyethylenová a aramidová vlákna jsou omezena na aplikace při teplotách nižších jak 150 °C. [1]

Aramidová vlákna

Aramidové vlákno je termín, kterým označujeme třídu syntetických organických vláken nazývaných aromatická polyamidová vlákna. Aramidová vlákna jsou známa pod obchodními názvy jako Kevlar, Nomex nebo Twaron. Nylon je obecný název pro jakýkoli polyamid s dlouhým řetězcem. Aramidová vlákna jako Kevlar, Nomex nebo Twaron jsou kruhové sloučeniny, které jsou založeny na struktuře benzenu. Nylon se naopak vyrábí pomocí sloučenin dlouhých lineárních řetězců. Základní chemická struktura aramidových vláken je složena z orientovaných parasubstituovaných aromatických jednotek, což z nich dělá tuhé tyčové polymery. Tato struktura má za následek vysokou teplotu skelného přechodu a špatnou rozpustnost. Tyto vlastnosti činí výrobu těchto polymerů konvenčními metodami obtížnou. Místo toho jsou vlákna spřádána z roztoku kapalných krystalických polymerů suchým tryskovým zvlákňováním. Aramidová vlákna jsou velmi lehká a mají vysokou tuhost a pevnost v tahu. Mezi dvě nejznámější varianty patří Kevlar 49 a Kevlar 29. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v tab. 6. Kevlar 29 má téměř poloviční modul, ale má dvojnásobné napětí do selhání oproti Kevlaru 49. Díky těmto vlastnostem se Kevlar 29 používá pro výrobu ochranných vest. Aramidová vlákna mají nízkou pevnost v tlaku. Mezi další vlastnost patří například dobré tlumení vibrací. Stejně jako ostatní polymerová vlákna jsou aramidová vlákna citlivá na UV záření. Při vystavení tomuto typu světla se vlákna zbarví ze žluté na hnědou a ztrácejí své mechanické vlastnosti. Záření o určité vlnové délce může způsobit degradaci polymeru vlivem absorpce a narušení chemických vazeb. Je tedy nutné materiál před tímto typem záření chránit případně se vyhnout venkovním aplikacím. [1]

Tab. 6 Vlastnosti karbonových vláken – podle [1].

	Kevlar 29	Kevlar 49
Hustota [g/cm³]	1.44	1.45
Průměr [μm]	12	12
Pevnost v tahu [GPa]	2.8	2.8
Hodnota tahové deformace do lomu [%]	3.5–4.0	2.8
Modul v tahu [GPa]	65	125

Klasický kevlar se využívá jako pryžová výplň pneumatik u osobních automobilů. Slouží také jako radiální výztuž pneumatik pro nákladní vozidla. Kevlar 29 se používá na lana, kabely nebo balistické ochranné tkaniny. Kevlar 49 je určen pro vyztužení epoxidových polyesterových a jiných pryskyřic. Ty se následně využívají v leteckém, námořním, automobilovém nebo sportovním průmyslu. [1]

1.1.6 Keramická vlákna

Keramická vlákna se používají jako výztužné materiály pro kompozity kvůli svým jedinečným vlastnostem, jako je například vysoký modul pružnosti nebo odolnost vůči vysokým teplotám. Dělíme je na oxidová a neoxidová vlákna. Díky těmto vlastnostem jsou používána v automobilovém nebo leteckém průmyslu, kde je požadována vysoká tepelná odolnost konstrukcí. Keramická vlákna se vyskytují ve dvou formách jako kontinuální s velkou délkou a přerušovaná s kratší délkou. Kontinuální oxidová vlákna na bázi oxidu hlinitého a silikátu se vyrábí tzv. sol-gel procesem, zatímco krátká oxidová vlákna jsou produkovány tavným zvlákňováním. Na druhé straně neoxidová keramická vlákna na bázi křemíku a boru jsou v současné době vyráběna tepelnou konverzí polymerního prekurzoru. Kompozity s kovovou maticí jsou obecně vyztužovány keramickými vlákny od průměru větším jak $100\ \mu\text{m}$, aby odolávaly tepelné degradaci například při lisování za tepla. Pro výrobu složitých tvarových dílců se využívají keramická vlákna v kombinaci s keramickou maticí. Průměr keramických vláken je v tomto případě menší jak $20\ \mu\text{m}$. [12]

Sol-gel proces

Užitím tradičních zpracovatelských technik by byla výroba vysoce čistých oxidových vláken s různým složením velmi obtížná. Metoda zvaná Sol-gel se obecně využívá k výrobě keramických vláken na bázi oxidu. [12] Dochází zde k nanášení oxidů kovů, nitridů nebo karbidů na substrát ve velmi tenkých vrstvách za daných laboratorních podmínek. Proces je charakterizován přípravou suspenze koloidních částic (sol). Tyto částice jsou poté převedeny na gelovou strukturu (gel). Celý proces je založen z velké část na hydrolýze a kondenzačních reakcích kovových alkoxidů. Řízenou změnou parametrů jednotlivých reakcí je možné docílit vzniku zdokonalených materiálů, které mohou být ve formě skla, vláken nebo keramických prášků. [13]

Oxidová vlákna

Keramická oxidová vlákna jsou ve formě dlouhé a krátké délky a jsou komerčně dostupná od 70. let 20. století. Tato vlákna jsou většinou složena z oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo ze směsi oxidu hlinitého a oxidu křemičitého ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$). Případně mohou obsahovat oxid zirkoničitý (ZrO_2). Tyto látky mají vysoký bod tání, a proto jsou používány pro vysokoteplotní aplikace. V posledních letech se tato vlákna používají v letectví nebo energetice i vzhledem k tomu, že jsou odolná vůči korozi a jsou poměrně levná. V oblasti strojírenství jsou používána kvůli jejich mikrostrukturální stabilitě a dobrým mechanickým vlastnostem. Keramická vlákna na bázi oxidů mají obecně špatnou tepelnou a elektrickou vodivost a vyšší koeficienty tepelné roztažnosti oproti neoxidovým keramickým vláknům. Proto se tato vlákna se používají jako vysokoteplotní izolační materiály. Pro výrobu keramických oxidových vláken byly vyvinuty metody jako sol-gel nebo růst monokrystalů. Směs s prekurzory hliníku společně se soli křemíku se suší a slinuje při vysokých teplotách a získávají se z ní keramická vlákna. [12]

Vlákna na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) jsou nejběžnější z oxidových vláken. Tato vlákna mají vynikající mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti. Jsou rozměrově stálá a odolná vůči teplotním šokům. Krom toho jsou tato vlákna i chemicky stabilní jak proti oxidaci, tak i proti redukci v atmosférách až do teplot $1000\ ^\circ\text{C}$. Vlákna nachází uplatnění v různých oblastech od závodních vozů až po průmyslové pece nebo palivové články. Používají se také jako těsnění

nebo elektrické izolace. V neposlední řadě se používají tato vlákna jako konstrukční výztuž polymerních kompozitů. Výsledné kompozity jsou vhodné pro nosné aplikace a odolávají teplotám vyšším než kovy. [12]



Obr. 7 Keramická vlákna pro zpevnění kompozitů – podle [12].

Neoxidová vlákna

Výroba neoxidových vláken je komplikovaná kvůli jejich vysokým teplotám tání a odolnosti vůči zhuštění. Hlavním nedostatkem je nižší odolnost vůči oxidaci ve srovnání s oxidovými vlákny. Tato keramická vlákna mají buď jemný nebo široký průměr. [12]

Příkladem mohou být vlákna z karbidu křemíku (SiC). Tato vlákna mají vysokou pevnost a tepelnou stabilitu. Pevnostní a modulové vlastnosti vykazují lehké zhoršení při teplotách nad $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Materiál však odolává teplotám až do $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlákna na bázi karbidu křemíku se obecně používají jako kontinuální vlákna v keramické matrici. [12] Výroba těchto vláken zahrnuje řízenou pyrolýzu polykarbosilanového prekurzoru za vzniku pružného vlákna o malém průměru. Existují dva základní druhy výroby těchto vláken. Mezi konvenční způsob patří chemická depozice. Nekonvenční metodou je pak řízená pyrolýza polymerními prekurzory. [1]

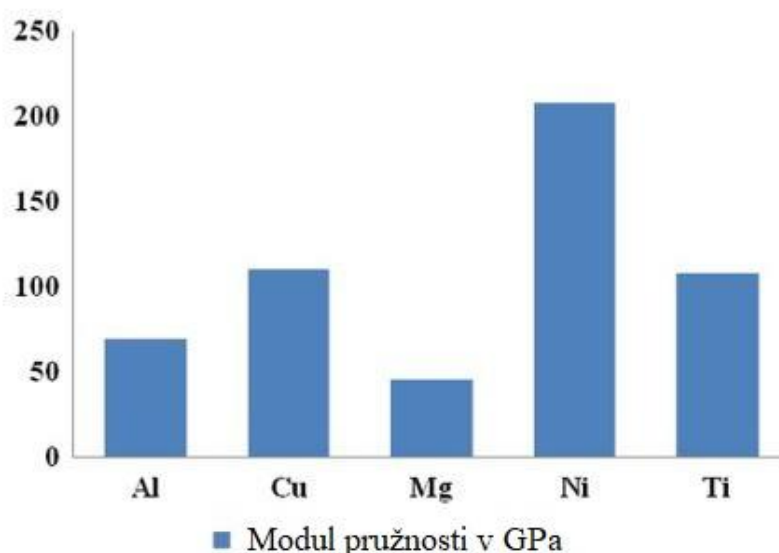
Kromě keramických vláken, které jsou na bázi karbidu křemíku, existují i další keramická vlákna jako např.: nitrid křemíku (Si_3N_4), karbid boru (B_4C) a nitrid boru (BN). Vlákna z nitridu křemíku lze připravit pomocí depozice chemických par těkavých sloučenin křemíku. Vlastnosti takto vyrobeného vlákna jsou velmi dobré, ale celkový průměr vlákna je ve výsledku dost vysoký. [1]

1.2 Matrice

Matrice je v podstatě homogenní materiál, ve kterém je zabudován vláknitý systém kompozitu. Je zcela kontinuální. Matrice funguje jako médium pro spojení a držení výztuh pohromadě. Slouží také jako ochrana zpevňovacích látek před poškozením a přenáší zatížení v materiálu. Matrice může mít vlastní povrchovou úpravu, texturu a barvu. Existují tři hlavní typy kompozitních matricových materiálů. [14]

1.2.1 Kovové matrice

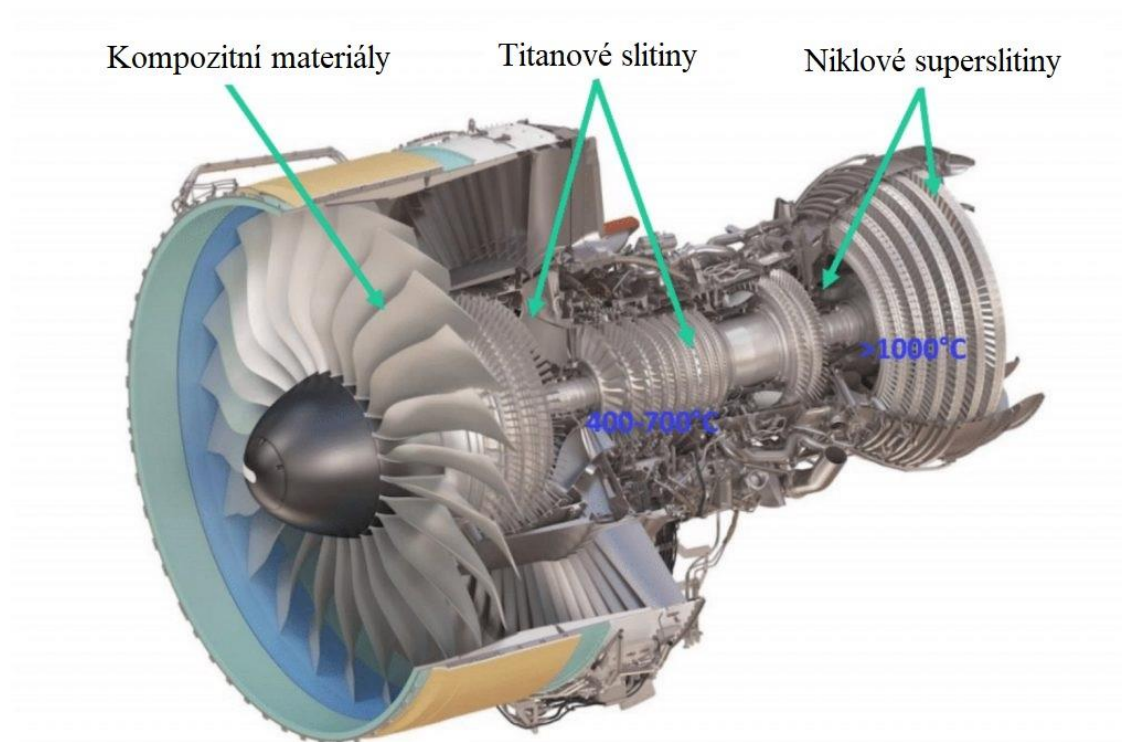
Kompozity s kovovou maticí jsou považovány za pokročilé materiály. Ve srovnání s konvenčními materiály mají lepší mechanické a tepelné vlastnosti. Mají dobrou odolnost vůči opotřebení. Na obrázku č. 8 je znázorněn modul pružnosti kovů, které se nejčastěji jako matrice používají. V současné době se nejčastěji používá hliník, měď, hořčík, nikl nebo titan. Slitiny hliníku se nejčastěji používají v automobilovém průmyslu a celkově v konstrukčním sektoru díky dobrým tvářecím a spojovacím vlastnostem. Do těchto slitin hliníku se mohou přidávat keramické částice pro zvýšení pevnosti. Kompozity na bázi titanu mají také široké uplatnění. Zejména se používají jako materiály pro vysokoteplotní konstrukce. Slitiny titanu se typicky používají v leteckém průmyslu. Nevýhodou je jejich vysoká cena. Hořčíkové slitiny jsou ze všech nejlehčí. Obecně nachází uplatnění v elektronických zařízeních. Také jsou však využívány v leteckém průmyslu a kosmických aplikacích. Měď je velmi dobře tvárná a dá se lehce odlévat do příslušných tvarů. Kompozitní materiály na bázi mědi mají vynikající vlastnosti proti opotřebení a používají se nejčastěji v elektronice jako elektrické kontakty. Kompozity s kovovými maticemi v současné době upoutaly pozornost v průmyslu pro nejruznější aplikace v mnoha odvětvích. Nyní je kladen velký důraz na zefektivnění výroby, aby se tyto materiály staly více komerčními a v neposlední řadě se snížila i jejich výrobní cena. [15]



Obr. 8 Modul pružnosti kovů užívaných jako matrice – podle [15].

1.2.2 Keramické matrice

V leteckém průmyslu a ve výrobě motorů jsou kladeny na použité materiály velmi vysoké požadavky. Je nutné, aby materiály při vysokých teplotách vykazovaly co nejmenší povrchové změkčení a zároveň byly co nejlehčí. Někteří výrobci motorů začali nahrazovat některé kovové části turbín za kompozity s keramickou maticí. Tyto kompozity snesou vyšší teploty než materiály vyrobené ze současných superslitin. Mají také třetinovou hustotu, která vede ke snížení hmotnosti dílu. Použití lehčího materiálu zaručuje snížení spotřeby paliva. Turbíny, které jsou vyrobeny z kovových superslitin mají provozní teploty 950-1100 °C. Použitím kompozitu s keramickou maticí došlo ke zvýšení této teploty až na cca 1300 °C. [16]



Obr. 9 Konstrukční materiály používané v leteckých motorech – podle [17].

Keramické kompozity s rovnými vlákny často selhávají při vystavení napětí. Toto napětí vede ke vzniku mikrotrhlin v keramické matici, změně tvaru a roztržení. Proto se používají ke zpevnění keramické matrice často tkaná vlákna, která poskytují odolnost vůči poškození tím, že brání vzniku trhlin a dalšímu šíření. V dnešní době jsou jako nejlepší označovány keramické kompozity vyztužené vlákny z karbidu křemíku (SiC). Vlákna jsou potažena mezifází, kterou běžně bývá například nitrid boru. Tento povlak je důležitý pro materiál z hlediska odolávání vůči napětí. Povlak poskytuje slabé rozhraní mezi vláknem a maticí. Případné trhliny proto cestují spíše podél a kolem vláken. Keramické kompozity jsou na povrchu potaženy externím ochranným povlakem, aby se zamezilo vlivům vnějšího prostředí a vzniku povrchových vad ve formě škrábanců nebo rýh. [16] Vlákna karbidu křemíku jsou na druhou stranu poměrně křehká v širokém pásmu teplot. V tab. 7 jsou shrnuty některé charakteristiky běžných kompozitů s keramickými maticemi. [1]

Tab. 7 Vybrané charakteristiky kompozitů s keramickou maticí – podle [1].

Materiál	Youngův modul [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Koeficient teplotní roztažnosti [10^{-6} K^{-1}]	Hustota [g/cm^3]
MgO	210-300	97-130	13.8	3.6
Si ₃ N ₄	310	410	2.25-2.87	3.2
Al ₂ O ₃	360-400	250-300	8.5	3.9-4.0
SiC	400-440	310	4.8	3.2

1.2.3 Polymerní matrice

Existuje celá řada klasifikačních metod, jak lze polymerní matrice pro kompozity dělit. Pryskyřice lze podle teplotního chování rozdělit na termosetové (reaktoplasty) a termoplastické.

Příklady termoplastických pryskyřic:

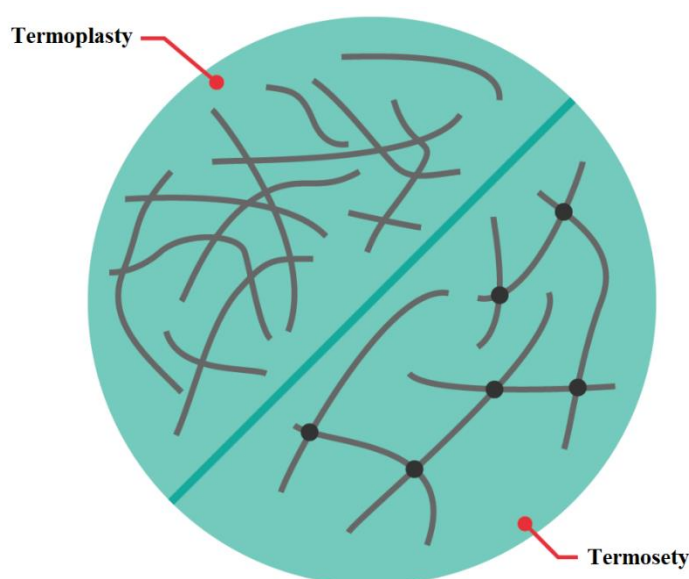
- PET
- PP
- PC
- Vinyl
- PE
- PVC

Termoplastické pryskyřice nebývají vyztužené a jsou formovány do určitých tvarů. Tyto pryskyřice jsou snadno rozpustné, tavitelné a lze je znovu zpracovávat bez jakékoli chemické změny. Výhodou termoplastických kompozitů je jejich vysoká rázová odolnost. V některých případech je až 10x vyšší oproti termosetovým pryskyřicím. [18]

Příklady termosetových pryskyřic:

- Polyesterová pryskyřice
- Vinyl esterová pryskyřice
- Epoxid
- Fenolické pryskyřice
- Uretan

Matrice z termosetových pryskyřic jsou zpevněny vlákny, které drží materiál na svém místě. Nejčastěji používaná je polyesterová pryskyřice. Termosetové pryskyřice se nevytvrzují při pokojové teplotě a vyztužují se například skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Termosetové pryskyřice odolávají rozpouštědlům a vysokým teplotám. Mají vynikající přilnavost a lze je snadno povrchově upravovat. Recyklování kompozitů z termosetových pryskyřic je extrémně obtížné. [18]



Obr. 10 Rozdíl mezi řetězci u termoplastů a termosetů – podle [19].

Polymerní řetězce u termoplastů se mohou volně pohybovat přes sebe a kolem sebe, zatím co u termosetů vznikají příčné vazby, které tyto pohyby omezují. [19]

Podle vnitřního uspořádání můžeme polymery dělit na krystalické a amorfnní. Krystalizace krystalického polymeru však není úplná a pohybuje se obvykle v rozmezí 20-85 %. Chemickou reakcí například zahřátím nebo vytvrzením, se termosetová matrice vytvrdí a vytvoří trojrozměrnou síť. Charakter takové sítě je obvykle amorfnní. [20]

Podle vlastností a aplikací můžeme pryskyřice dále dělit na [20]:

- pryskyřice pro všeobecné použití
- žáruvzdorné pryskyřice
- pryskyřice odolné vůči povětrnostním vlivům
- pryskyřice zpomalující hoření

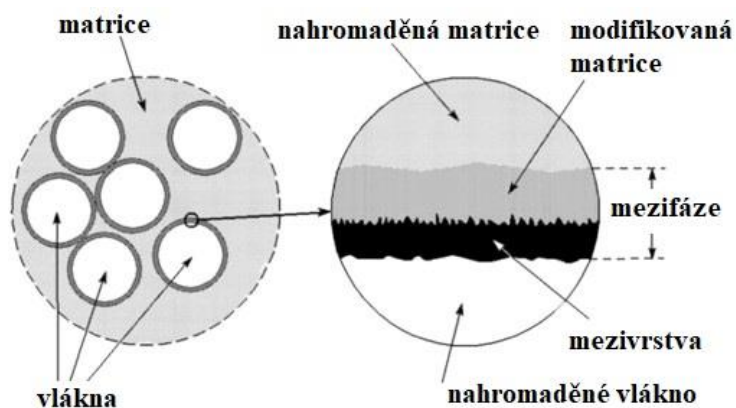
Výběr polymerní matrice by se měl řídit následujícími zásadami [20]:

- splnění potřeby aplikace produktu (teplota, tuhost, odolnost, odolnost vůči korozi)
- co nejvyšší modul v tahu, vysoká pevnost, vysoká lomová houževnatost pro co nejlepší mechanické vlastnosti materiálu
- dobrá smáčivost a přilnavost k vláknům a částicím
- snadná obsluha, malé smrštění při vytvrzování
- nízká toxicita
- cena

Největší odolnost vůči poklesu pevnosti za vyšších teplot mají kompozity s termosetovou matricí. Tyto materiály mají také dobrou únavovou odolnost. [21]

1.3 Mezifáze

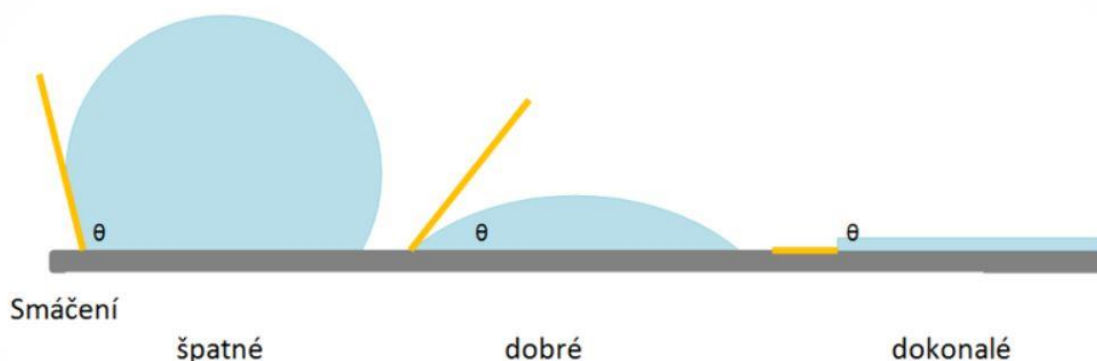
Mezifáze je definovaná jako rozhraní mezi zpevňující složkou a matricí. Na povrchu mezi těmito fázemi dochází v některých parametrech k nespojitostem. Nespojitost může být ostrá nebo tupá. Matematicky je toto rozhraní dvourozměrnou oblastí. V této oblasti může být rozdílná například koncentrace prvků, krystalová struktura, modul pružnosti, hustota nebo koeficient teplotní roztažnosti. Konkrétně v případě kompozitního materiálu, který je vyztužen vlákny, je mezifáze nebo také mezifázová zóna, složená z povrchové vrstvy vláken, matrice a jakékoli vrstvy materiálu mezi nimi. Hlavní roli hraje smáčivost vlákna, případně jiné výztuže s matricí. Dalším hlavním faktorem je také vazba mezi matricí a zpevňovací složkou. V tomto případě je důležité odlišovat smáčivost a lepivost. Matrice se špatnou smáčivostí budou mít přítomné mezery nebo dutiny v mezifázi. [1]



Obr. 11 Schéma mezifáze vláknového kompozitu – podle [22].

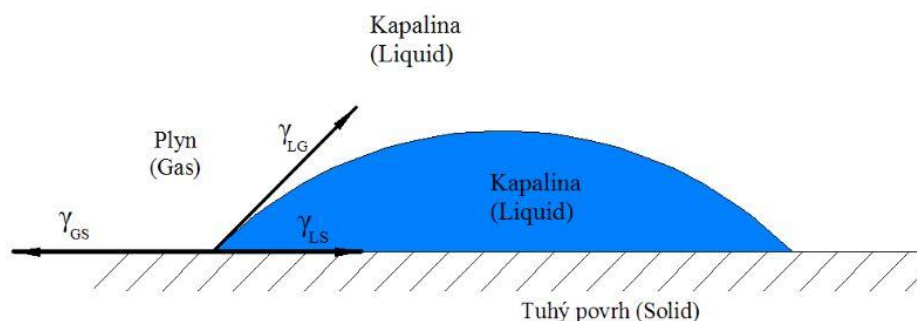
1.3.1 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky a nejčastěji se měří dynamickou kapkovou metodou. Další metodou je měření povrchové energie materiálu pomocí speciálních inkoustů. Kontaktní úhel θ vyjadřuje rozsah smáčivosti pevné látky a kapaliny. Patří mezi přímo měřitelnou jednotku rozhraní pevná látka-kapalina. Kapka vody se na povrch testovaného materiálu nanese pomocí mikropipety a matematicky se vyhodnotí tečnovou metodou. [23]



Obr. 12 Úhel smáčení θ – podle [23].

Na smáčivost má vliv také drsnost povrchu. Drsný povrch je obvykle smáčen lépe než povrch hladký v případě dobře smáčejších kapalin. U špatně smáčejších kapalin je tomu naopak. V případě smáčivých kapalin je drsnější povrch ideální, protože kapalina má tendenci se rozlévat. [23]



Obr. 13 Kapka kapaliny na zkoumaném povrchu. G-plyn (gass), L-kapalina (liquid) a S-pevná látka (solid) – podle [24].

Vztah mezi úhlem smáčivosti θ a jednotlivými mezifázovými energiemi je popsán pomocí Youngovi rovnice [25]:

$$\gamma_{LG} \times \cos\theta = \gamma_{GS} - \gamma_{LS} \quad (1.0)$$

nebo také:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{GS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \quad (1.1)$$

kde: θ – úhel smáčení [%]

γ_{LG} – mezifázové rozhraní kapalina – plyn

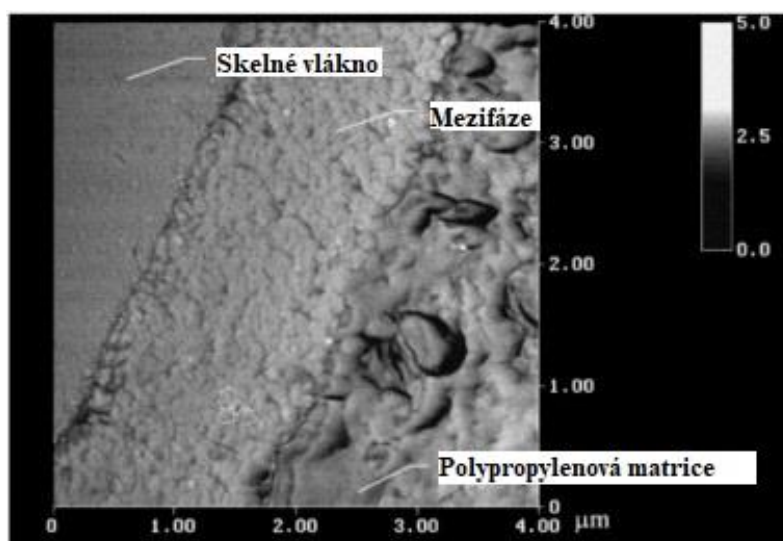
γ_{GS} – mezifázové rozhraní plyn – pevná látka

γ_{LS} – mezifázové rozhraní kapalina – pevná látka

Smáčivost popisuje rozsah těsného kontaktu mezi kapalinou a pevnou látkou. To však nemusí nutně znamenat silnou vazbu na rozhraní. Vazby mezi prostředími jsou Van der Waalsova typu. Pokud je kontaktní úhel malý, je smáčivost ideální. To je však nutnou ale ne postačující podmínkou pro silné spojení. Například smáčivost u polymerních kompozitů je velmi důležitá. Při výrobě tohoto typu kompozitů je nutné, aby kapalná matrice dostatečně navlhčila vlákna a pronikla do nich. V případě často používaných polymerových pryskyřic jako matrice mají termosetové pryskyřice viskozitu 1-10 Pa*s. Viskozita tavenin termoplastů se pohybuje řádově 2x až 3x výš než u termosetů. Smáčivost termoplastů je však daleko horší. Přesto, že je kontaktní úhel měřítkem smáčivosti, je nutné brát v potaz i proměnné jako je čas, teplota kontaktu, drsnost povrchu nebo geometrie. [1]

1.3.2 Vliv drsnosti povrchu

Obecně se předpokládá, že povrch podkladu je dokonale hladký. V praxi to však neplatí. Je velmi časté, že rozhraní mezi vláknem a matricí je spíše drsné než ideálně rovinné rozhraní. Většina zpevňovacích složek vykazuje určitý stupeň drsnosti. [1] Pro zjištění drsnosti povrchu vlákna se používá metoda Atomic force microscopic (AFM). Na základě této analýzy je možné charakterizovat povrch a mezifáze různých typů. Metoda umožňuje pozorovat mezifázové rozhraní o tloušťce 1 μm . Pro zkoumání modulu pružnosti mezifázové oblasti u kompozitů ze skleněných vláken a matrice vinylesteru se používá nanoindikační test. [22]



Obr. 14 AFM fázové snímky kompozitu – podle [20].

1.3.3 Typy vazeb u mezifáze

Aby bylo možné řídit stupeň vazby mezi matricí a zpevňovacími složkami, je nutné vzít v potaz všechny možné typy spojování. Jeden nebo více typů spojení může působit v jakémkoli daném okamžiku. [1]

Vazby dělíme na:

- mechanické
- fyzikální
- chemické
 - rozpouštěcí
 - reakční

Ke vzniku mechanické vazby může vést například mechanické klíčení nebo tzv. „zámkové efekty“ mezi dvěma povrchy. Za fyzikální vazbu lze označit jakékoli spojení zahrnující slabé sekundární nebo Van der Waalsovy síly. Vazebná energie u fyzikálních vazeb je velmi nízká, přibližně 8-16 kJ/mol. Chemické vazby jsou charakterizovány molekulárním transportem pomocí difuzních procesů. Jsou zde zahrnuty kovalentní, iontové a kovové vazby. Vazebná energie je v tomto případě přibližně 40-400 kJ/mol. [1]

Cílem je dosáhnout rovnovážného stavu mezi maticí a zpevňovacími složkami. K předpovězení konečného stavu se mohou využít fázové diagramy nebo data týkající se reakční kinetiky případně difuzivita jednotlivých látek. Pokud by nebyly k dispozici termodynamická a kinetická data, tak by kompatibilita musela být určena experimentálně. Na výsledný charakter mezifáze má vliv i topografická charakteristika složek. Ta může ovlivnit sílu výsledného atomárního kontaktu, kterého chceme mezi částicemi docílit. Následkem jsou geometrické nepravidelnosti (nerovnosti, dutiny) na rozhraní, které mohou být zdrojem napětí. [1]

1.4 Metody výroby kompozitu

Existuje mnoho způsobů, jak kompozitní materiál vyrábět a je nutné zvolit tu správnou metodu s ohledem na aplikaci a výsledné vlastnosti materiálu. Dále budou popsány nejčastěji používané metody pro výrobu kompozitních materiálů, zejména těch s termosetovou maticí. [26]

1.4.1 Ruční/mokrý pokládání

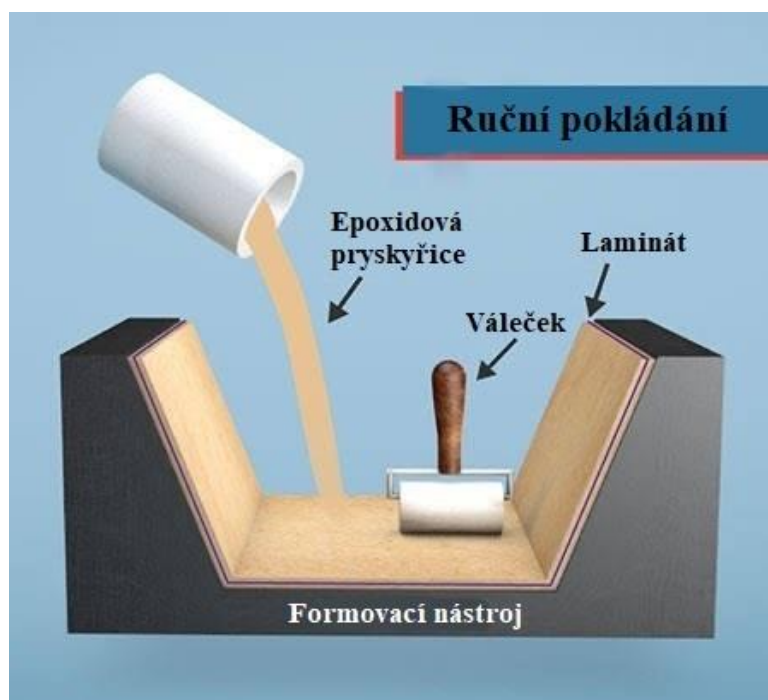
Ruční neboli (mokrý pokládání) je proces, při kterém se ručně nanáší pryskyřice na výztuž. Poté může následovat rolování, vytvrzování nebo vakuové balení. Ruční pokládání vyžaduje přesnost při nanášení pryskyřice na laminovací prvky, než se pryskyřice začne vytvrzovat. To může omezit výrobní množství a výslednou složitost produkovaných dílů. Obecně tato metoda patří mezi nejlevnější způsoby výroby kompozitů. Pro výrobu se mohou použít základní nástroje jako sekací pistole a válec, případně dražší varianty jako jsou vakuové sáčky. [26]

Nanášení pryskyřice

Pro nanášení se používají speciální přístroje, které míchají pryskyřici a jsou zakončeny pistolí, kterou se pryskyřice manuálně nanáší společně s krátkými skleněnými rovingy. Tyto stroje se obecně nazývají „sekací pistole“. Rychlost nanášení závisí na zkušenostech operátora. Při špatném nanesení mohou vznikat v materiálu dutinky a povrch může být deformovaný. Výsledný laminát nemá úplně nejlepší mechanické vlastnosti a je bohatý na pryskyřici. Ta může zaujímat až 60 % celkové hmotnosti. Tloušťka materiálu se těžko kontroluje a může být proměnlivá. Pro díly, u kterých se zanedbává hmotnost a povrch se následně upravuje, může tato metoda být ideální. Patří sem například kryty strojů, sprchové kouty nebo nádrže. [26]

Výroba kompozitů v otevřené formě

Opět jde o smáčení zpevňovacích složek pryskyřicí. Zde je však výztuž umístěna v otevřené formě. Výztuhu lze smáčet na místě nebo použít speciální impregnátor, který je určený pro namáčení velkých objemů najednou. Výsledek je opět závislý především na schopnostech operátora. Stejně jako u metody ručního nástřiku je zde kritickým krokem válcování laminátu, aby došlo k odstranění vzduchu. Jelikož jsou výztuhy odříznuty z rolí a následně umístěny do formy, je tloušťka konzistentnější. Tato metoda je vhodná pro díly s rozdílnou výškou nebo proměnlivou tloušťkou. Pryskyřice se v tomto případě používá zejména polyesterová nebo vinylesterová. [26]



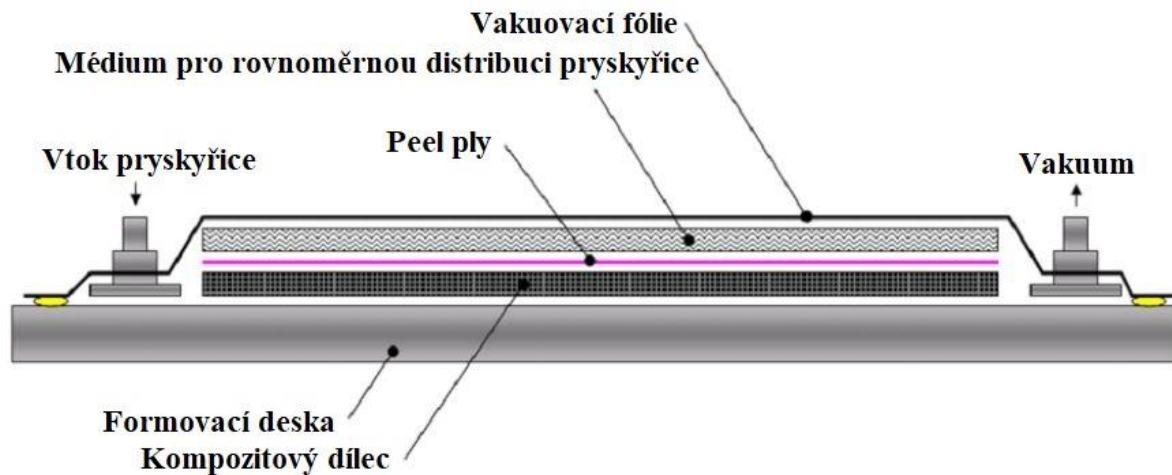
Obr. 15 Ruční nanášení pryskyřice v otevřené formě – podle [27].

1.4.2 Ruční/mokrý pokládání s využitím vakuového vaku

Pokládání pomocí vaku za mokra je jako otevřené lisování, jen v tomto případě je výztuž a pryskyřice laminována ve formě. Místo klasického vytvrzení se použije vak, ve kterém se vytvoří vakuum a pomocí něj se odstraní přebytečná pryskyřice ještě před samotným procesem vytvrzování. Tato metoda je náročná jak na materiál, tak i na čas. Materiál vyrobený touto metodou má lepší vlastnosti oproti klasickému mokrému pokládání. Zejména u součástí s jádrem umožňuje tlak vakua lepší spojení jádra a eliminuje dutiny v laminátu. Je nutné regulovat tlak, aby nedocházelo k přílišnému vytlačení pryskyřice. Tato metoda se používá například pro spojování jednotlivých dílů kompozitu a vytváření sekundárních spojů pro sestavení konstrukce. [26]

1.4.3 Infuze

Metoda infuze je založená na protlačování pryskyřice vyztužovacími vlákny pomocí tlaku. Do formy se umístí zpevňovací složka ze suchých vláken a pryskyřice. Vše se přikryje folií. Ve formě se vytvoří vakuum a rozdílem tlaku se pryskyřice tlačí přes suchá vlákna. V momentě, kdy pryskyřice zcela vyplní díl, se uzavře přírodní vedení a materiál se nechá vytvrdnout. Infuzi lze provádět pomocí jednorázových, případně opakovatelně použitelných folií. Vzhledem k tomu, že pryskyřice tímto způsobem vyplní všechny potenciální dutiny, je výsledná kvalita dílu vysoká. Na tuto metodu navazuje metoda RTM (Reakční vstřikování), u které je však tlak pryskyřice mnohem vyšší. [26]



Obr. 16 Schéma vakuové infuze – podle [28].

Výhodou této metody je, že pryskyřice je rozložena v celé vrstvě materiálu stejně. Metoda není až tak omezena dobou tvrdnutí matrice. Pomocí této metody lze vyrábět vysoce kvalitní lamináty s nízkým obsahem dutin a lze zde zajistit konzistentní kvalitu dílů. Metoda je vhodná pro středně sériovou výrobu. Ve srovnání s mokřím pokládáním je tato metoda mnohem čistší. Nevýhodou je nutnost přesné práce s vakuovými foliemi. Je nutné zajistit, aby se infuze nedostala mimo systém. Další nevýhodou je také velké množství odpadu spojené s produkcí. [29]

1.4.4 Metoda Pre-preg

Pomocí metody Pre-preg se vyrábí tkaniny a materiály na bázi vláken, které jsou předem impregnovány pro zvýšení jejich pevnosti a stability. Díky kombinaci všech vlastností nacházejí tyto materiály uplatnění v nejrůznějších odvětvích, kde je kladen důraz na výslednou hmotnost a mechanické vlastnosti. Běžně se pro výrobu předemimpregnovaných materiálů (prepregů) používají uhlíková nebo aramidová vlákna v kombinaci s kvalitními epoxidovými pryskyřicemi. Výrobní proces se skládá ze tří hlavních kroků. [30]

1. Výběr druhu pryskyřice

První krok je velmi důležitý a volba pryskyřice by měla být podložena analýzou finální aplikace materiálu, aby byly zajištěny co nejlepší konečné vlastnosti. Pre-pregy mohou být vyztuženy dvěma druhy pryskyřic. [30]

Termoplastická pryskyřice

Jde o nejčastěji používanou pryskyřici pro výrobu lahví, obalů, spotřebičů, automobilových interiérů atd. Přidání skelných nebo uhlíkových vláken zvyšuje pevnost a celkové vyztužení. Výhodou použití těchto pryskyřic je jejich schopnost změny tvaru po zahřátí. [30]

Termosetové pryskyřice

Tyto pryskyřice se využívají v uzavřených výrobcích, kvůli jejich odolnosti vůči deformaci. Termosetové pryskyřice poskytují vyšší odolnost vůči chemikáliím, vysokým teplotám a celkově mají lepší schopnost sjednocení s vlákny. [30]

2. Odstranění přebytečné pryskyřice z vyztuže

Metoda Pre-preg produkuje mnohem méně odpadu v porovnání s ostatními metodami. Proces impregnace pryskyřicí je přesně řízen poměrem vláken k pryskyřici a také tloušťkou vrstvy.

Poté, co je tkanina/výztuž napuštěna pryskyřicí, je přebytečný materiál ze struktury odstraněn. Během této doby dochází k částečnému vytvrzení. [30]

3. Vytvrzování při nízkých/vysokých teplotách

Pre-preg struktury vyžadují méně času na vytvrzení. Jakmile skončí fáze odstraňování přebytečné hmoty, tak se materiál přesune do chladicího zařízení, aby se mohl vytvrzovat. Po krátké době skladování se proces vytvrzování aktivuje působením tepla a tlaku. Například pomocí autoklávu. Termosetové a termoplastické Pre-pregy vytvářejí odolné a lehké kompozitní struktury, které jsou vhodné pro širokou řadu aplikací. [25]

1.4.5 Metoda RTM

Zkratkou RTM (z anglického resin transfer molding) je označována metoda reakčního vstřikování. Jde o další technologii, která se zabývá výrobou kompozitních materiálů složených z vláken a pryskyřicové matrice. Metodu lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi dochází k předlisování vláken a poté k vstřiku pryskyřice do předlisku, který je umístěn ve formě. Předlisek lze zhotovit přímo pomocí textilní technologie nebo tvarováním rovinného přístříhu. Metoda nachází uplatnění jak v kusové, tak i v sérové výrobě. [31]

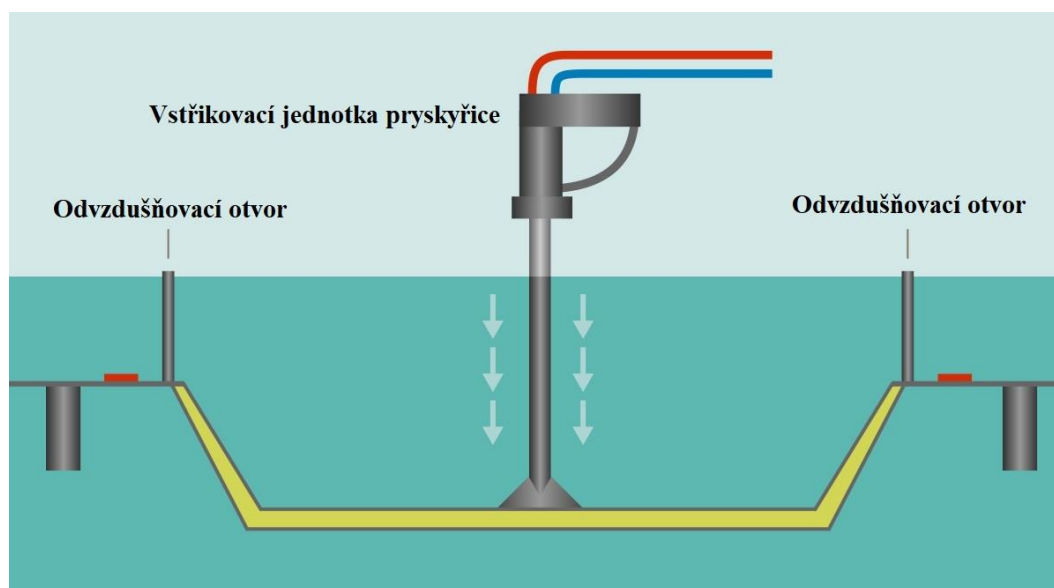
Oblasti aplikace kompozitů vyrobených pomocí metody RTM [31]:

- letecký průmysl – křídla, letky, palivové nádrže
- automobilový průmysl – kostry karosérie, nárazníky, skříně převodovek
- stavební průmysl – sloupky, stánky, telefonní budky, poklopy
- strojírenský průmysl – vrtule chladících větráků, kryty kompresorů, hnací hřídele, setrvačníky
- lodě – čluny, kryty kabin, paluby, lodní šrouby
- sport – rámy jízdních kol, golfové vozíky, surfová prkna

Výrobní postup lze rozdělit do několika základních kroků [31]:

- vyložení dutiny otevřené formy dělicí látkou, která slouží k zamezení přichycení matrice ke stěnám formy
- vložení předlisku do formy - (jde o suchá a uspořádaná vlákna)
- uzavření a uzamčení formy
- vstřikování směsi pryskyřice a vytvrzovacího činidla pod tlakem do dutiny
- vytvrzování pryskyřice
- otevření formy
- vyjmutí výrobku
- vyčištění dutiny formy a kontrola výrobku (případné finální úpravy)

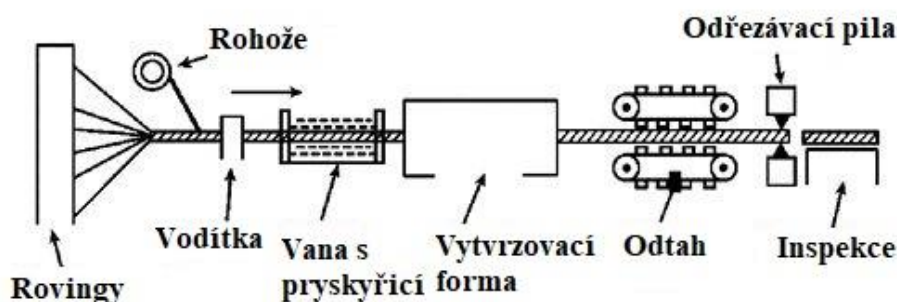
Tlak, kterým je pryskyřice vstřikována do formy, je asi 0,3 MPa. Tento tlak je však ovlivněn strukturou předlisku, tloušťkou, velikostí, tvarem výrobku a také druhem použité pryskyřice. Po vstříknutí pryskyřice je vzduch vytlačován přes odvětrávací ventily, které jsou zpravidla umístěny v nejvyšších bodech formy a které jsou vyplňovány jako poslední. Pokud je dutina zcela vyplněná, dojde k uzavření vtoků a ventilů. Následuje vytvrzení, které probíhá pomocí ohřevu nebo při pokojové teplotě za použití tvrdidla. Po vytvrzení je výrobek vyjmut z formy. Modifikací této metody je metoda infuze, kde vstřikovací tlak je roven atmosférickému. [31]



Obr. 17 Princip metody RTM – podle [32].

1.4.6 Pultruze

Pultruze je využívána k výrobě široké škály pevných a dutých součástí nejčastěji s konstantním průřezem. Typický proces pultruze zahrnuje odvíjení vláken, máčení, předtvarování, vytvrzování, posun (tah) a řezání. Tento proces je znázorněn na obrázku č. 18. Vláknata jsou nepřetržitě odvíjena z cívečnic přes pryskyřičnou lázeň a naváděna do vyhřívané formy, kde dochází k vytvrzení. Forma dokončuje proces impregnace a kontroluje obsah pryskyřice. Po průchodu materiálu formou je zhotoven konečný tvar dílu a přes tažné jednotky je automaticky řezán na požadovanou délku. Do formy mohou být zaváděny i tkaniny pro dosažení požadovaných vlastností. [33]



Obr. 18 Schéma procesu Pultruze – podle [33].

Pultruzní linka se skládá z několika hlavních částí [33]:

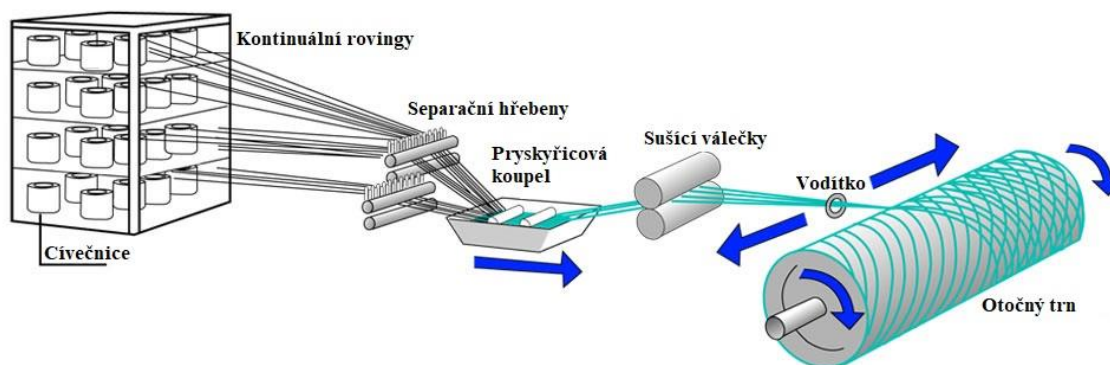
- cívečnice
- naváděcí mechanismus pro vlákna a tkaniny
- smáčení zařízení s matricí
- vyhřívaná vytvrzovací forma
- tažná jednotka
- řezací mechanismus
- provozní řídicí systém

Mezi nejčastěji používané zpevňovací složky patří vlákna skelná, polyesterová, uhlíková a aramidová. Vlákná mohou být také obalena tkaninou nebo opletena, aby došlo ke zlepšení horizontálních a interlaminárních mechanických vlastností. Pro tento proces lze využít jak termosetovou tak i termoplastickou pryskyřici. Pryskyřice by měla mít nízkou viskozitu a dobrou smáčenlivost. Důležité je, aby se matrice dala zpracovávat delší dobu a byla rychle vytvrditelná. Z toho důvodu se nejčastěji používají nenasyčené polyesterové pryskyřice, případně epoxidové pryskyřice. Pro snížení třecího odporu se do pryskyřice přimíchává vnitřní separační činidlo, které automaticky migruje na povrch dílů. Vytvrzování lze provádět najednou nebo postupně. Při postupném vytvrzování se do určitého stupně materiál vytvrdí ve formě a poté se nechá zcela vytvrdit v peci. Formy mohou mít nejrůznější tvary např.: různé úhly, drážky, profilované tvary. Mezi hlavní matrice používané pro termoplasty lze zařadit ABS, PA, PC, PES atd. [33]

Proces pultruze může být velmi rychle automatizovaný a tím pádem i ekonomický. Výsledné strukturální vlastnosti laminátů jsou velmi dobré. Vlákná v materiálu jsou rovná a zaujímají velký objem. Obsah pryskyřice lze snadno kontrolovat. Cena vláken je také minimalizována, jelikož nedochází k žádným ztrátám vlivem přířezů. Oblast impregnace vláken může být uzavřena a tím dojde k omezení škodlivých emisí. Pultruze je jedna z nejběžněji používaných metod pro výrobu výkonných a levných kompozitních materiálů. Mezi nejběžnější aplikace dílů vyrobených touto metodou patří výroba trubek, trámů, podpěr, roštových systémů nebo sloupů osvětlení. Pultrudované materiály mohou v některých aplikacích nahradit kov, plast, případně dřevo. [33]

1.4.7 Metoda navíjení vlákna

Navíjení vlákna je proces, při kterém jsou impregnovaná vlákna navíjena pod určitým napětím a úhlem na otáčecí trn. Vytvrzování probíhá buď za pokojových nebo za zvýšených teplot. Řízením pohybu vodítkové jednotky vůči trnu se nastavuje požadovaný úhel navíjení. Schéma procesu navíjení je znázorněno na obrázku č. 19. [33]



Obr. 19 Schéma procesu mokrého navíjení vlákna – podle [34].

Proces navíjení lze rozdělit na:

- suchý
- mokrý
- polosuchý

Navíjení za sucha využívá preimpregnovanou přízi. Tato příze je zprvu zahřata, aby došlo k jejímu změkčení. Poté je příze navíjena na trn. Produktivita tohoto procesu je velmi vysoká a rychlost navíjení se pohybuje od 100 do 200 m/min. Je však vyžadováno složitější navíjecí

zařízení, se kterým jsou spojeny i vyšší pořizovací náklady. Nevýhodou je nízká interlaminární smyková pevnost navíjených výrobků. [33]

Mokrý navíjení využívá systém tekuté pryskyřice. Vlákná jsou shlukována a máčena v matrici. Poté jsou navíjena na trn za stálé kontroly napětí a v poslední části vytvrzena. Zařízení pro mokrý navíjení jsou poměrně jednoduchá. Jelikož jsou namočená vlákna ihned navíjena, je obtížné kontrolovat obsah pryskyřice v materiálu. Zároveň dost často dochází k vzniku defektů ve formě bublin nebo dutin. Postup mokrého navíjení je velmi pracný a obtížný na automatizaci. [33]

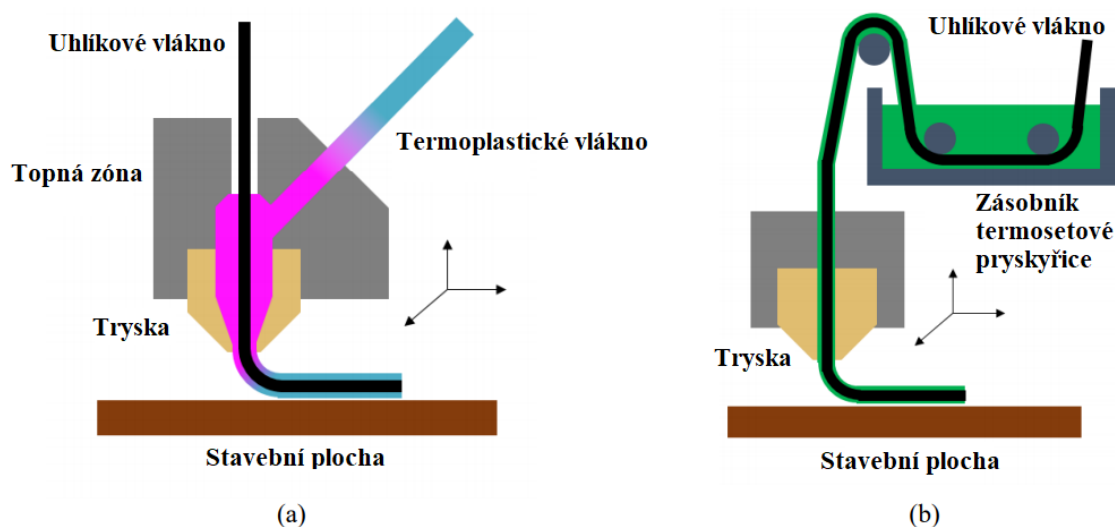
Polosuché navíjení zahrnuje navíc proces sušení mezi máčením a navíjením vláken. Stejně jako u mokrého navíjení je složité přesně kontrolovat obsah pryskyřice v produktech. Výhodou je však snížení počtu defektů v porovnání s mokrým navíjením.

V posledních letech se pro termoplastové pryskyřice vyvíjí prášková metoda. Nejprve se tento prášek rovnoměrně nanese na vyztužený roving elektrostatickou práškovou metodou. Dojde k vytvoření svazku preimpregnovaných vláken, který se poté zahřeje a navíjí na trn přes směrovací oko, kde dojde k vytvrzení. [33]

1.4.8 3D Tisk

Možnost tisknout vyztužené kompozitní materiály bylo cílem mnoha výzkumů. V posledních letech byl zaznamenán vývoj v oblasti strojů a technologií, které by byly vhodné pro tisk těchto materiálů zejména pro letecký nebo automobilní průmysl. Nejrozšířenějším filamentem užívaným pro 3D tisk kompozitů jsou uhlíková vlákna zejména pro jejich mechanické vlastnosti. [35]

Typ použité technologie závisí na typu kompozitu. Kompozity s krátkými vlákny lze tisknout procesem FDM, jelikož použitý filament již obsahuje vlákna. [30] Jedná se o nejrozšířenější metodu, která je schopna tisknout širokou škálu materiálů. Její výhodou je cenová dostupnost a rychlá výroba [34]. Naopak kompozity s kontinuálními vlákny se vyrábí hybridní technologií, kde je pramen vlákna napuštěn pryskyřicí a následně vytvrzen pomocí UV záření, podobně jako u metody SLA 3D tisku. [35]



Obr. 20 Schéma 3D tiskových systémů používaných pro výrobu kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny a) termoplastické matrice b) termosetové matrice – podle [36].

Celkově je však 3D tisk kompozitních materiálů složitější proces. Jelikož jsou vyžadovány dvě trysky. Obvykle jedna tryska slouží k vytlačování termoplastické matrice a druhá tryska vytlačuje vlákno. V závislosti na výrobci mohou mít technologie různé označení. [35] Například firma Markforged používá pro 3D tisk kompozitů název CFF (Continuous Filament Fabrication). Tato metoda produkuje vysoce kvalitní díly, které jsou schopné nahradit hliník a jsou až o 40 % lehčí [52]. Základním materiálem je polyamid, který je plněný uhlíkovými vlákny [53]. Na druhé straně firma Anisoprint používá technologii zvanou CFC (Composite Fiber Coextrusion). Společnost AREVO využívá proces, který je založený na technologii DED (Direct Energy Deposition). Zde se pro ohřev vláken využívá laser a válec, který stlačuje filameny s matricí dohromady. [35]

1.5 Příprava povrchu na lakování

Aby bylo možné kompozitní materiály povrchově upravovat, je v některých případech nutné povrch před samotným lakováním upravit. Níže popsané metody slouží zejména ke zvýšení adheze nátěrové hmoty, případně lepidla ke kompozitnímu povrchu. Lakováním nebo lepením kompozitních materiálů můžeme docílit lepších výsledných vlastností v širokém spektru aplikací. Techniky úpravy povrchu používané pro kovy mohou mít negativní vliv na mechanické vlastnosti kompozitu a proto je nutné použít metody, které vedou k přeměně povrchu a zvýšení adheze. Záměrem je povrchová úprava tenké vrstvy materiálu, aniž by došlo ke změně objemu. Účinnost povrchové úpravy je závislá na typu matrice. Příkladem může být čištění povrchu rozpouštědly. Na vhodných materiálech dojde k odstranění kontaminantů. Pokud však použijeme tuto metodu na jiný materiál, může dojít k interakci s povrchem a ke vzniku morfologických změn. Úpravy leptáním, kam lze zařadit například leptání kyselinou nebo laserem, mohou způsobit změny v chemických látkách a tím i změnu povrchové struktury. Povrchová úprava elektrickým výbojem může mít za následek zvýšení teploty povrchu ošetřovaného materiálu, což má za následek změnu povrchové struktury vlivem lokálního natavování. [37]

Důležitou vlastností kompozitů, kterou je třeba vzít v úvahu při ošetřování povrchu, je hladkost jejich povrchu. Povrch kompozitu je složen zejména z polymerní matrice. Povrchové energie kompozitů bývají velmi nízké zejména u termoplastických matric jako je PEEK nebo polypropylen. Smáčivost povrchu těchto matric je velmi nízká. [37]

Existuje nebezpečí, že některé metody ošetřování povrchu mohou způsobit defekty. Příkladem takového defektu může být delaminace těsně pod povrchem nebo poškození křehkých vláken. Tyto vady mají za následek horší mechanické vlastnosti kompozitu. Největším problémem je však přítomnost široké škály kontaminantů, které se vyskytují na povrchu a tvoří tak slabou hranici pro vazbu s lakem a případně lepidlem. Mezi tyto nečistoty patří silikony od separačních činidel, fluorokarbonové separační spreje, obráběcí oleje, otisky prstů nebo také komponenty v kompozitu, které migrovaly na povrch, jako stearan vápníku, voda nebo změkčovadla. [37]

Metody přípravy povrchu lze rozdělit na chemické, mechanické a energetické. Přehled nejpoužívanějších metod je uveden v tab. 8. V podkapitolách budou některé z metod více popsány.

Tab. 8 Přehled metod používaných pro přípravu povrchu kompozitů – podle [37].

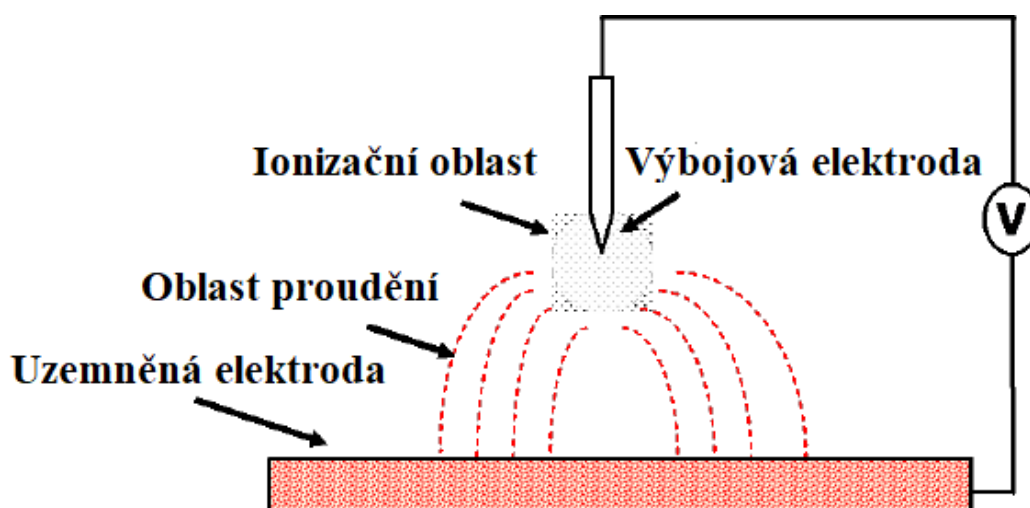
Chemické	Mechanické	Energetické
Čištění rozpouštědlem	otryskávání oxidem hlinitým	Korónový výboj
Mytí detergentem	Kryoblast	Plazma
Leptání kyselinou	Sodablast	Plamen
Základní nátěr	Peel ply	Excimerový laser
	Abraze Karbidem křemíku	

Energetické metody se využívají zejména u nepolárních polymerů nebo polymerů s nízkou povrchovou energií. Do této skupiny spadá například polyethylen nebo polypropylen. Zde je nutné vytvořit chemický reaktantní povrchové funkční skupiny pro zlepšení adheze. [38]

1.5.1 Energetické úpravy povrchu

Korónový výboj

Předúprava korónovým vysokonapětovým výbojem mezi elektrodou a protielektrodou ionizuje vzduch v elektrodové mezeře a ten vytváří reaktivní částice, které interagují s povrchem polymeru. Stejně jako u metody povrchové úpravy plazmatem jde o skupiny, které obsahují kyslík. Ty jsou zavedeny do horních molekulárních vrstev materiálu a zvyšují tak povrchovou energii materiálu. Existují dvě varianty této metody. Jde o přímý korónový výboj mezi elektrodou a uzemněnou protielektrodou, kde materiál je umístěn v mezeře mezi elektrodami, a nepřímý korónový výboj mezi dvěma keramickými elektrodami, kde je výboj směřován laminárním prouděním vzduchu na povrch, který má být ošetřen. [39]

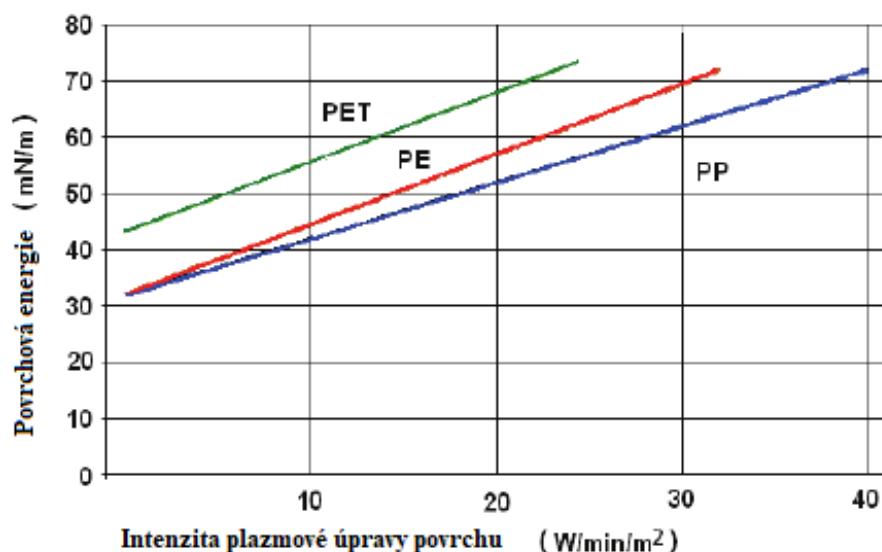


Obr. 21 Schéma přímého korónového výboje – podle [40].

Povrchová úprava plazmatem

Princip povrchové úpravy plazmatem je založen na navazování nových funkčních skupin na povrch polymerového řetězce. Podstatou je vytváření aktivních částic (iontů, radikálů, excitovaných atomů) průchodem plynu plazmovým výbojem. Tyto částice následně vytváří vrstvy a vyvolávají chemické reakce. Výsledkem těchto reakcí je změna povrchové energie, která se projevuje například zvýšením smáčivosti, případně zvýšením adhezních vlastností polymerů vůči jiným materiálům. Firma Surface Treat vyvinula zařízení, které je určeno k povrchové úpravě menších plastových součástek ale i větších dílů, pomocí nízkotlakého plazmového systému nebo za využití atmosférické trysky. Atmosférická tryska generuje pomocí klouzavého obloukového výboje plazmu za atmosférického tlaku. Zařízení je určeno pro využití u kontinuálních výrobních linek jako krok před lakováním či potiskem. Takto upravený povrch má lepší smáčivost a tím pádem případná nátěrová hmota lépe přilne k materiálu. Tuto metodu lze použít na materiály jako PE, PTFE, PP, PEEK apod. Změna povrchového napětí je měřena speciálním testovacím fixem nebo inkoustem, který má přesně definovanou hodnotu povrchového napětí. Případně lze použít metoda měření kontaktního úhlu. V současné době má tato metoda využití ve strojírenství, automobilovém a elektrotechnickém průmyslu, při úpravách kompozitních materiálů. [41]

V oblasti povrchových předúprav pro následné nanášení nátěrových hmot není dosud zveřejněn dostatek informací o problémech s korelací volné povrchové energie a adheze nátěrové hmoty vůči povrchu materiálu. [42]

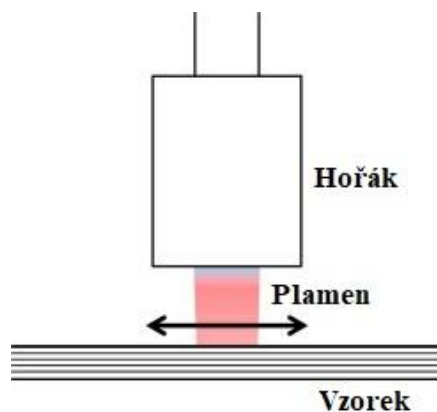


Obr. 22 Graf závislosti povrchové energie na intenzitě plazmové úpravy povrchu – podle [43].

Na základě experimentu, který se zabýval vlivem příměsí v plazmatu bylo zjištěno, že na zkoumaný polypropylenový povrch je nejlepší použít směs inertního argonu s přidavkem volných příměsí v závislosti na konkrétním podkladovém materiálu. Finanční dopad na výslednou cenu produkovaného materiálu při použití této směsi není zásadní v kombinaci s užitím RF šterbinové plazmové trysky. [42]

Povrchová úprava plamenem

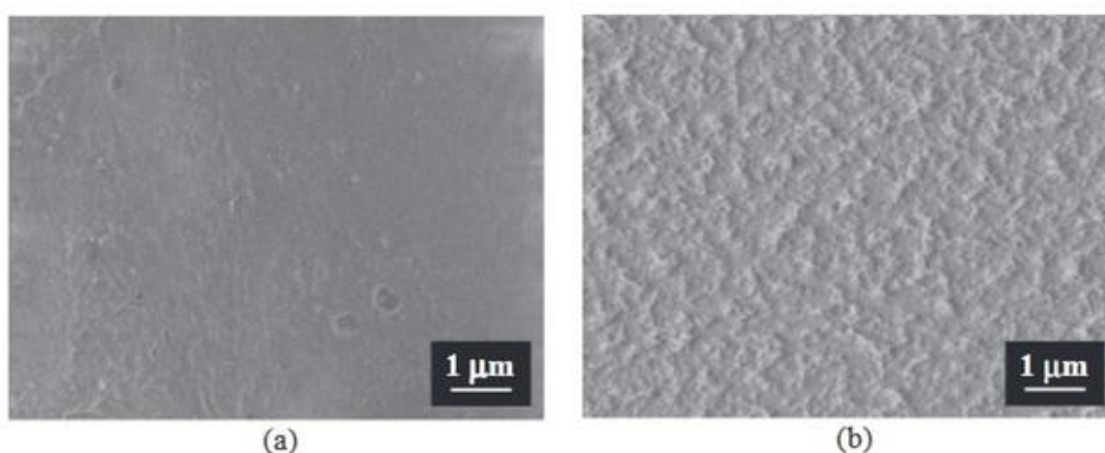
ITRO je metoda, která je založena na plamenové úpravě, a oproti současným standartním metodám užívaným pro polymerní kompozity má lepší výsledky při vysokorychlostním zpracovávání a produkuje povrchy s konstantními vlastnostmi. Tuto metodu lze snadno automatizovat. Metoda ITRO, která využívá plyn LPG, může při pracovní teplotě (~1000 °C) stejně jako konvenční plamenové metody oxidovat povrch vzorku. V této metodě je plyn obohacen o křemičité sloučeniny a na ošetřovaném povrchu se vytváří film z oxidu křemičitého (SiO₂). Film je nanášen pomocí spalovacího procesu. Konkrétně jde o chemickou depozici z plynné fáze. Proces povrchového ošetřování ITRO je znázorněn na obr. 23. [44]



Obr. 23 Schéma procesu ITRO pro úpravu povrchu – podle [44].

Do hořáku je přiváděna směs plynů se vzduchem a povrch vzorku je ožehnut plamenovým hořákem. Mezi proměnné vstupující do procesu lze zařadit poměr plynu ke vzduchu, průtok plynu, koncentrace křemíkových sloučenin, vzdálenost mezi hořákem a povrchem vzorku, rychlost ožehnutí a také počet průchodů hořáku přes vzorek. [44]

Na základě testu, který byl proveden na uhlíkovém kompozitu s epoxidovou matricí, bylo zjištěno, že povrchová teplota po dvou průchodech hořáku přes materiál nepřesáhla teplotu 80 °C. Z toho lze usoudit, že povrchové poškození je minimální. Materiál byl testován celkově na 12 průchodů, přičemž po každých dvou krocích byl vzorek ponechán vychladnout po dobu asi 1 minuty, aby nedošlo k přehřátí. Rychlost průchodu byla nastavena na 750 mm/s a povrch vzorku byl ošetřen organickým rozpouštědlem, aby došlo k odstranění povrchových nečistot. Tyto podmínky byly stanoveny podle doporučení vývojáře pro přípravu povrchu polymerních materiálů. [44]



Obr. 24 a) povrch ošetřený organickým rozpouštědlem b) povrch ošetřený metodou ITRO po dvanácti přechodech hořáku přes vzorek – podle [44].

Bylo zjištěno, že metoda ITRO významně zvyšuje adhezi povrchu materiálu. Po dvanácti přechodech je výsledná struktura materiálu srovnatelná se vzorkem, který byl mechanicky broušen. [44]

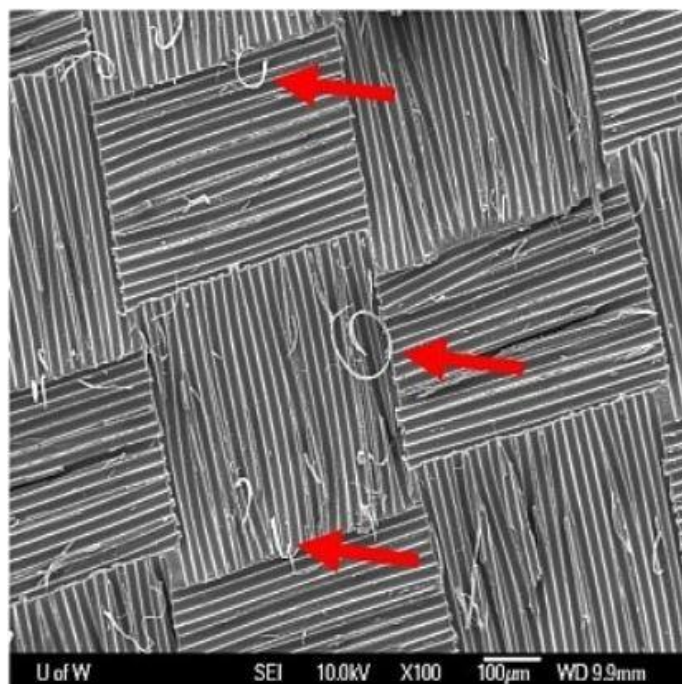
Laser

Pro předúpravu kompozitních povrchů mohou být také využity laserové paprsky. Existuje mnoho typů laserů pro předúpravu před lakováním či lepením. Lasery se dělí, podle rozsahu vlnové délky spektra, ve kterém pracují, na infračervené (IR) a ultrafialové (UV). Infračervené lasery odstraňují kontaminanty díky tepelnému efektu. Energie laseru je absorbována povrchem a může vést k přetavení a tepelné oxidaci svrchních vrstev materiálu. To má za následek změnu struktury a zvýšení schopnosti smáčivosti povrchu. Je nutné volit výkon laseru tak, aby nedocházelo k přílišnému zahřívání vláken a degradaci matrice, což by mělo za následek poškození integrity kompozitu. UV lasery mají oproti IR laserům minimální tepelně ovlivněnou oblast a lze je taktéž použít pro zlepšení smáčivosti nebo odstraňování separačních činidel z povrchu kompozitu. Laserové úpravy mají potenciál nahradit mechanické procesy zejména z důvodu snížení škodlivých vlivů na životní prostředí. [39]

1.5.2 Mechanické úpravy povrchu

Metoda Peel ply

Příprava povrchu metodou Peel ply je jednoduchou cestou, jak získat vhodný, dostatečně adhezní povrch. Do češtiny lze tuto metodu volně přeložit jako úprava povrchu pomocí slupky. Slupkou je v tomto případě označována jedna vrstva, která je umístěná na jedné straně kompozitního materiálu ještě před samotným výrobním procesem. Během vytvrzovací fáze je tato vrstva postupně impregnována polymerní matricí kompozitu. Na konci výrobního procesu je tato slupka z materiálu odstraněna. Po odstranění slupky povrch není hladký, ale jde o negativ vytvořený strukturou odstraněné vrstvy. [45] Slupovací vrstva je nejčastěji vyrobena z nylonu. Nylon však ve velké míře absorbuje vlhkost, kterou poté může po odstranění zanechávat na povrchu. Zbytková vlhkost má škodlivý vliv na pevnost a trvanlivost nanášeného laku, barvy či lepidla. Po odstranění slupovací vrstvy je nutné povrch před další úpravou dostatečně vysušit. [38] Dalším problémem nylonových a čistých polyesterových tkanin je jejich příliš vysoká tendence přilnout k matrici. Následně je velmi složité tyto tkaniny odstraňovat, jelikož dochází ke kontaminaci povrchu. V současné době se proto dává přednost odlupovacím vrstvám vyrobeným z velmi jemných polyesterových tkanin, které jsou již předimpregnované pryskyřicí. [46]



Obr. 25 Kontaminace povrchu vlivem odstranění odlupovací vrstvy – podle [45].

Výsledná řádová drsnost je až dvacetkrát vyšší než u kompozitů vyrobených konvenční metodou. Metoda Peel ply není ve výsledku až tak účinná v porovnání s plazmovou technologií přípravy povrchu. Použitím metody Peel ply je možné snížit kontaktní úhel na cca 20°, zatímco užitím technologie plazmy jsme schopni snížit kontaktní úhel až na 0°. [45] Metoda úpravy povrchu pomocí odlupovací vrstvy je vhodná především pro pravidelné rovinné dílce, které mají na povrchu dostatečnou vrstvu pryskyřicové matrice. Je ideální pro výrobu kompozitů pomocí vakuové infuze, jelikož odlupovací vrstvu lze zakomponovat přímo do výrobního procesu.

Otryskávání oxidem hlinitým

Cílem metody tryskání oxidem hlinitým je modifikovat morfologii povrchu a také odstranit případné povrchové kontaminanty. Hrubost, která je využita, vysoce ovlivňuje výslednou smáčivost povrchu kompozitu. Hlavní proměnnou, která vstupuje do procesu, je velikost zrn oxidu hlinitého, tlak tryskání, čas, úhel a vzdálenost trysky vůči povrchu. Bylo zjištěno, že pro narušení povrchu skelných či uhlíkových kompozitních vláken stačí i nízké tlaky po krátké časové úseky. [37]

Kryoblast

Tento typ metody tryskání využívá pevný oxid uhličitý ve formě pelet. Metoda je méně intenzivní než tryskání oxidem hlinitým. Tato technologie se využívá pro odstraňování povrchových kontaminací, beze změny morfologie povrchu nebo poškození vláken. [37]

Sodablast

Příprava povrchu sodablast technologií využívá suspenzi bikarbonátu sodného (jedlé sody) ve vodě. Technologie byla původně vyvinuta k přípravě trupů letadel pro lakování. Nevýhodou této metody je, že využívá vodu a tím zvyšuje obsah vody i v kompozitu. Kompozitní materiál proto musí být před jakýmkoli dalším procesem lakování či lepení vysušen. [37]

Abraze karbidem křemíku

Abraze karbidem křemíku probíhá nejčastěji ve formě brusného papíru. Metodu lze provádět za sucha nebo častěji ve spojení s rozpouštědlem, které pomáhá odstranit veškeré nečistoty. Stejně jako u tryskání oxidem hlinitým i zde dochází k viditelnému poškození uhlíkových a skelných vláken. Poškození uhlíkových vláken je viditelné na snímku z elektronového mikroskopu na obr. 26. [37]



Obr. 26 Poškození uhlíkových vláken vlivem abraze karbidu křemíku – podle [37].

1.5.3 Chemické úpravy povrchu

Čištění rozpouštědlem

Pro čištění povrchu rozpouštědlem se nejčastěji používají organická rozpouštědla, která odstraňují z povrchu nečistoty, aniž by fyzikálně nebo chemicky narušila povrch materiálu. Do této skupiny povrchové úpravy lze zahrnout metody jako je odmašťování parou, stříkání, ponoření a mechanické či ultrazvukové čištění. Čištění rozpouštědly může být použito jako finální proces, ale také jako příprava na další chemickou úpravu. [47]

Existují čtyři základní postupy čištění rozpouštědlem:

- odmašťování parou
- ultrazvukové odmašťování parou
- ultrazvukové čištění s ponorem
- nátěr či ponor v rozpouštědlu

Odmašťování parou je postup, při kterém dochází k rozpouštění a odstranění rozpustných nečistot, zejména olejů, tuků, vosků a částic ulpívajících na povrchu matrice. Princip parního odmašťování je kondenzace par na povrchu součásti a tvorba tekutiny, která rozpouští a odplavuje nečistoty. K tomu je nutné zvolit vhodný typ rozpouštědla, které má vlastnosti jako: vysoká rozpustnost nečistot, nehořlavost, vysoká hustota par ve srovnání se vzduchem, nízké výparné teplo, chemická stabilita a nízký bod varu pro snadnou kondenzaci. Mezi tyto rozpouštědla lze zařadit například: perchlorethylen (tetrachlorethylen), trichlorethylen nebo trichlortriflorethan. [47]

Ultrazvukové odmašťování parou se provádí pomocí ultrazvukového měniče, který je zabudován v nádrži na oplach s čistým rozpouštědlem. Díly se nejprve očistí buď oplachem parou nebo ponořením do vroucího rozpouštědla. Následně jsou díly ponořeny do lázně s ultrazvukovými měniči, které zajišťují kavitaci, při které dochází k přenosu energie na povrch. Účinnost metody je ovlivněna frekvencí ultrazvuku. Běžný frekvenční rozsah je od 20000 do 50000 Hz. Ultrazvuková metoda s ponorem součásti využívá ruční aplikaci kapalných rozpouštědel. Účinnost procesu není tak vysoká jako u ostatních metod čištění povrchu rozpouštědly, a proto slouží jako předběžná příprava povrchu. Metody nátěru, nástřiku či ponoru jsou vhodné především pro kusovou výrobu. [47]

Leptání kyselinou

Chemická úprava povrchu leptáním kyselinou má téměř totožné výsledky jako úprava korónovým výbojem. Cílem je zoxidovat povrch materiálu. K tomu se v případě matrice z polyethylenu nebo polypropylenu používá například kyselina chromová nebo kyselina sírová. Na výsledek povrchové úpravy má vliv doba leptání a teplota. [47]

Postup leptání kyselinou chromovou:

1. očištění povrchu acetonem a sušení na vzduchu
2. leptání povrchu po dobu 10–15 sekund, následný oplach vodou
3. oplach součásti deionizovanou vodou a následné sušení v troubě při teplotě 60 °C

Druh použité kyseliny se odvíjí od druhu materiálu, který je povrchově ošetřován. Jak již bylo zmíněno, termoplastické povrchy (polyethylen, polypropylen, lineární polyestery nebo fluorpolymery) vyžadují na rozdíl od termosetových materiálů fyzikální (energetické) nebo chemické modifikace pro zajištění dostatečné smáčivosti povrchu. Metody leptání kyselinou jsou všeobecně velmi náročné na životní prostředí, a proto je nutné dodržovat veškeré bezpečnostní pokyny a předpisy. [47]

Základní nátěr

Základní nátěr (primer) se využívá pro zabránění poškození a kontaminace povrchu, který se dále povrchově upravuje. Zároveň dochází také ke zlepšení smáčivosti upravovaného povrchu. Základní nátěry jsou ve většině případů složeny ze zředěných polymerů a rozpouštědel. Základní materiál může obsahovat spojovací činidla pro podporu adheze a složky zabíraující korozi. [47]

1.6 Povrchové úpravy kompozitních materiálů

Výsledná povrchová úprava může mít z dlouhodobého hlediska rozhodující vliv na vzhled kompozitních materiálů. Vlákenně vyztužené kompozity lze upravovat pomocí široké škály metod povrchových úprav, mezi které lze zařadit tzv. gel coat, povrchové závoje nebo lepení. Další povrchové úpravy zahrnují chemické látky jako jsou například alifatické izokyanáty, polyuretany, polyester, akryly nebo epoxidy, které mohou být součástí nátěrových systémů. V některých případech mohou být součástí těchto systémů jemná písková zrnka, která zajišťují dodatečnou ochranu. [48]

Gel Coat

Metoda gel coatu, v češtině známá také jako gel lak, je využívána speciálně pro aplikaci povrchových úprav kompozitů. Gelový povlak je vytvořen zejména z polyesterové pryskyřice obsahující tixotropní činidla, která zajišťují dostatečnou viskozitu a nestékavost. Mezi další důležité komponenty gel laku patří plniva zabezpečující tekutost, pigmenty pro dosažení požadovaných barevných odstínů a další přísady zajišťující specifické vlastnosti výsledného povrchu. Gel coaty jsou primárně aplikovány kontaktně tj. ručně nebo sprejem. Gelový povlak je obvykle pigmentovaný a výsledkem je upravený povrch, který je odolný vůči povětrnostním vlivům a opotřebení. Další výhodou gelových povlaků je jejich schopnost skrýt vzor skelné, případně jiné výztuže. Pro správný výběr gelového laku je nutné vzít v potaz kompatibilitu s podkladovým kompozitním materiálem, aby byla zajištěna dostatečná adheze. Výslednými faktory, které ovlivňují odolnost vůči povětrnostním podmínkám, jsou: typy plniv, barviva, typ pryskyřice použité pro gelový povlak a tloušťka povlaku. [48]

V současné době se metoda gelových laků aplikuje postupem zavádění do vytvrzovací formy. To znamená, že gel coat je pod tlakem vstříkáván do formy, kde je vytvrzován společně s laminátem. Vzájemná adheze laminovací pryskyřice a gelového povlaku je velmi důležitá a jde o kritický problém, který je nutné vzít v potaz. Tloušťka gelového laku se liší v závislosti na výsledné aplikaci materiálu. Gelové povlaky se typicky nanáší stříkáním v tloušťce přibližně 0,003 mm mokré vrstvy. Gelové povrchy nenavysílají strukturální pevnost kompozitu, ale jsou dostatečně pružné, aby nedocházelo k jejich praskání vlivem tepla. Gel coat na rozdíl od běžných barev neobsahuje žádná rozpouštědla, která by se musela odpařit před vytvrzením. Místo rozpouštědlového základu je zde reaktivní ředidlo, tzv. monomer, který se během vytvrzování zesílňuje. Tento monomer se během vytvrzování nevypařuje, což je výhodné, protože nedochází ke ztrátám monomeru emisemi. Typicky používanými monomery v gelových povlacích mohou být styreny, případně akryly. [48]



Obr. 27 Dávkovací systém pro zpracování gelcoatu – podle [49].

Povrchové závoje

Pod pojmem povrchový závoj si lze představit svrchní vrstvu, která chrání materiál před korozi a dalšími povrchovými vlivy. Jde o tkaninu, která je nejčastěji vyrobená z nylonu nebo polyesteru. Tato vrstva má vysokou absorpční schopnost a dokáže absorbovat pryskyřici až do 90 % svého objemu. Vysoká absorpční schopnost je důležitá pro udržení další ochranné vrstvy pryskyřice na povrchu produktu. Povrchové závoje se používají pro zlepšení výsledného vzhledu povrchu a zajišťují korozní odolnost součástí, které se využívají v chemických aplikacích, jako jsou například trubky nebo nádrže. Jako další výhodu lze uvést odolnost vůči UV záření. Technologie povrchových závoje může být použita ve spojení s gelovými povlaky k zajištění ještě vyššího zpevnění materiálu. [48]

Lepení

Užití kompozitních materiálů v nejrůznějších průmyslových odvětvích je doprovázeno i jejich možností lepení. Pro lepení kompozitů se používají dvě hlavní kategorie lepidel. Jde o strukturální a syntetická lepidla. Mezi strukturální lepidla lze zahrnout například epoxidová, polyuretanová a akrylová lepidla. Lepidla z epoxidové pryskyřice nabízejí odolnost proti mechanickým nárazům a proti tepelným šokům. Syntetická lepidla jsou založena na termoplastech, emulzích a elastomerech. Mají dobrou přilnavost k různým materiálům a lze je rychle aplikovat. Výsledný spoj má výborné pevnostní charakteristiky. Lepidla jsou cenově výhodná, patří mezi ně epoxid, kyanoakrylát, polyuretan nebo polyvinylacetát. [50]

Nátěrové systémy

Vláknem vyztužené kompozity lze snadno povrchově upravovat pomocí nátěrových systémů. Pokud je povrch kompozitního materiálu správně připraven, je schopný přijímat širokou škálu povrchových nátěrů. Tyto nátěry mohou být olejové, vodní nebo i více komponentní. Povrch vláknem vyztužených kompozitů je neabsorpční a inertní. To umožňuje nanášení nejrůznějších povrchových barev. Barvy nemusí být prodyšné a v závislosti na typu matrice kompozitu je odvozena další příprava povrchu. U většiny případů stačí povrch před aplikací nátěrového systému zbrousit a odstranit zbytková separační činidla. [48]

1.7 UV laky

V posledních letech zaznamenal vývoj nanášení UV vytvrditelných laků rychlý růst. Výhodou této technologie úpravy povrchu je zejména zkrácení doby vytvrzení, snížení energetické náročnosti, nižší prostorové nároky na instalaci technologie a v neposlední řadě také možnost užití UV laků na různé podklady. UV laky se aktuálně využívají v nejrůznějších odvětvích průmyslu a jejich možnosti dalších aplikací se stále rozšiřují. [51]

V současné době jsou kladeny stále vyšší požadavky na snížení výrobních nákladů, spotřebu energie a na co možná nejnížší vliv na životní prostředí. Technologie UV laků je jednou z možností, jak všechny tyto parametry co možná nejlépe naplnit. Z počátku byl vývoj doprovázen problémy se špatnou přilnavostí nebo smršťováním laku při procesu polymerace. V prvních fázích byly vyvíjeny tyto laky pouze jako transparentní nebo černé. Intenzivním výzkumem bylo však docíleno zlepšení vlastností a v současné době UV laky vyhovují náročným požadavkům na ošetrupzdornost, přilnavost, tvrdost apod. Došlo také k rozšíření možných barevných odstínů. V oblasti průmyslu byly tyto laky nejprve užívány v dřevařském a grafickém průmyslu a postupem času došlo k rozšíření do dalších odvětví pro aplikaci na kovových a plastových dílcích (ABS, polykarbonát, PP, atd.). Při zvolení vhodných podmínek pro vytvrzení, jako je vhodný systém zářičů a typ UV laku, je možné lakovat i konstrukčně složité díly. [51]

Dle obsahu těkavých organických látek lze UV laky rozdělit na: [51]

- UV laky na bázi organických rozpouštědel
- UV laky na vodní bázi
- 100% UV laky bez obsahu rozpouštědel

100% UV laky jsou hlavním předmětem vývoje. Hlavní součástí těchto laků jsou reaktivní činidla, která upravují viskozitu laku pro nanesení a při vytvrzování zpolymerují do filmu. Poskytují vysokou odolnost vůči korozi a různým médiím. Z toho důvodu se často používají například v automobilovém průmyslu. 100% UV laky a UV laky na vodní bázi se stále častěji využívají pro lakování plastů. Pro lakování plastů ale i kovů je obvykle nutné povrch před lakováním upravit. UV laky se skládají z pojiv, reaktivních ředidel, fotoiniciátorů a aditiv. V případě pigmentovaných laků jsou zde obsaženy navíc pigmenty a plniva. Nově se také využívají dvousložkové Dual Cure systémy s vyšší chemickou odolností. [51] Detailněji budou tyto nátěrové systémy popsány v praktické části.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část byla vypracována ve spolupráci s firmou GDP Koral, s. r. o. Tišnov a je zaměřena na testování UV lakovacího systému od společnosti Synpo, a. s. za běžných podmínek výrobního procesu. Cílem bylo ujistit se, zda vyvíjený UV lak bude možné aplikovat ve výrobní lince a jeho výsledné vlastnosti nebudou nějak ovlivněny vstupujícími vnějšími faktory. Další kapitola praktické části bude věnována možné variantě návrhu bloku, který bude obsahovat jednotlivé technické úseky, které jsou nutné pro aplikaci a vytvrzení výše zmíněného lakovacího systému. Závěrečná část bude věnována technicko-ekonomickému zhodnocení implementace systému povrchové úpravy do výrobního procesu.

2.1 Představení firmy GDP Koral, s. r. o.

Firma GDP Koral, s. r. o. se sídlem v Tišnově byla založena v 90. letech 20. století a zaměřuje se na technologii výroby kompozitních materiálů metodou pultruze. Výrobní závod je součástí francouzské společnosti GDP SA, který se také orientuje na výrobu tažených kompozitních profilů a nosných konstrukcí. Dohromady společnost disponuje 26 výrobními linkami ve výrobních závodech v Tišnově a Motendre. Oba výrobní závody fungují v nepřetržitém provozu 24/7. Výroba kompozitů metodou pultruze byla v Tišnově zahájena již v 60. letech 20. století. V té době byla výroba zaměřena z velké části na armádní potřeby, kde bylo cílem najít materiál, který má srovnatelné pevnostní vlastnosti jako kov a zároveň je lehký a nevodivý. Armádní projekty byly časem nahrazeny výrobou laminátů použitých například jako výztuže do lyží. V současné době se firma zaměřuje na výrobu profilů standardních ale i specifických tvarů podle potřeb zákazníka. [54]



Obr. 28 Příklad jednotlivých možných variant tvarů profilů – podle [54].

Výrobní metoda pultruze nabízí širokou škálu návrhů geometrií s ohledem na finální pevnostní vlastnosti. Profily se specifickou geometrií jsou omezeny maximální délkou, kterou je možné vyrobít a následně transportovat, maximálními rozměry a tloušťkou stěny, která je omezena na 60 mm. Rádusy jsou omezeny na 0,5–1 mm s ohledem na možné defekty. Standartní profily zahrnují typizované konstrukční tvary I, L, T, U pro nejružnější průmyslová odvětví. [54]

Společnost se zaměřuje výhradně na výrobu skelných kompozitů, kde ve většině případů je využita jako matrice polyesterová pryskyřice. Tato kombinace materiálů zajišťuje vysokou pevnost, tuhost a zároveň nízkou hmotnost výsledného produktu. S ohledem na požadavky zákazníků je možné vyrábět i profily, které zohledňují specifické požadavky jako například teplotní odolnost, barevné provedení nebo zvýšená mechanická odolnost. Společnost má také zkušenosti se spojováním jednotlivých profilů a vytvářením pevných konstrukcí pomocí

mechanických spojovacích prvků nebo lepením. Součástí výrobního celku je také opracování a povrchová úprava profilů. Pomocí CNC strojů a jednoúčelových linek je možné vyrobené profily opracovat dle nároků zákazníka. V rámci povrchových úprav se firma specializuje na aplikaci folií různých barev a dekorů zejména pro interiérové, ale i exteriérové aplikace. Tyto fólie zajišťují zvýšenou odolnost vůči UV záření a dodatečnou ochranu proti mechanickému poškození. [54]

Výsledné díly nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, kam lze zařadit zejména automotive a dopravu. Současná výroba zahrnuje produkci střešních profilů, zavazadlových košů, obložení klimatizací, rámců pro podlahové díly či přídržných tyčí. Další možnou aplikací je stavebnictví a konstrukce, kde jsou tyto materiály součástí střešních konstrukcí či profilů pro dveře nebo okna. Mezi další aplikace vyráběných profilů lze zařadit konstrukce a rámy solárních panelů, lopatky ventilátorů chladicích věží, součásti trakčních vedení nebo komponent pro sportovní vybavení. [54]

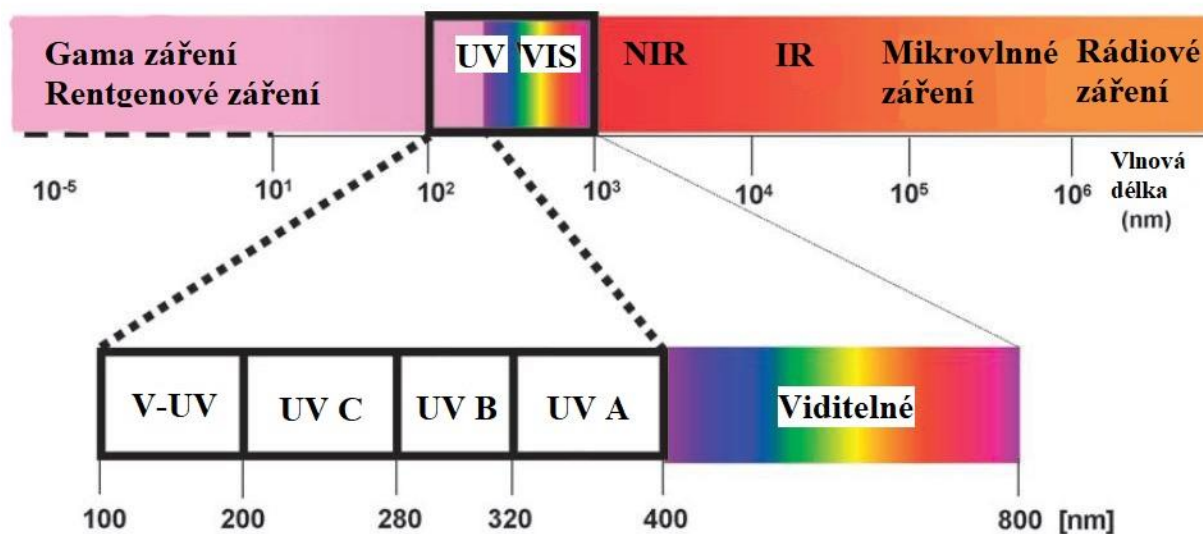
S možností aplikací těchto kompozitních materiálů zejména v oblasti exteriéru je kladen stále vyšší důraz na odolnost materiálu zejména vůči výše zmíněnému UV záření. Z toho důvodu je nutné materiál proti tomuto vlivu chránit. Proto byl v nedávné době zahájen projekt, který se zaměřuje na povrchovou úpravu materiálu. S ohledem na rostoucí náklady spojené s přepravou a následnou povrchovou úpravou mimo podnik se vývoj zaměřil na rozšíření povrchové úpravy přímo ve výrobním procesu implementací technologie přímo do výrobní linky. Detailněji bude tato technologická varianta popsána v další kapitole.

2.2 Zvolená metoda povrchové úpravy materiálu

Jak již bylo zmíněno v kapitole o možných povrchových úpravách kompozitů, je k dispozici jen několik možných variant, jak lze tyto materiály upravovat. Po uvážení všech možných řešení byla s ohledem na vhodnou možnost implementace zvolena varianta povrchové úpravy pomocí lakování. Využití této metody nevyžaduje zásadní změny v dosud využívané výrobní technologii. Část produkce je již dnes lakována ručně barvami na bázi rozpouštědel. Navíc i z ekonomického hlediska je tato varianta výhodnější například ve srovnání s metodou Gel coatu, kde je nutné mít upravený typ vytvrzovací formy. Při hledání vhodného typu lakovacího systému byl proveden průzkum dostupných možností s ohledem na druh povrchově upravovaného materiálu. Jelikož metoda pultruze je kontinuální metoda výroby, bylo nutné vzít v úvahu i možnost vytvrzování lakované vrstvy v krátkých časech, co možná nejefektivněji. V návaznosti na tyto požadavky byla oslovena společnost Synpo, a. s., která má již dlouholeté zkušenosti s vývojem barev a nátěrových hmot. Po vzájemné spolupráci bylo zjištěno, že pro tuto konkrétní aplikaci by technologie povrchové úpravy pomocí UV vytvrditelných laků mohla být vhodnou cestou k zajištění výsledných požadovaných vlastností povrchu. Zároveň byla potvrzena možnost implementace ve výrobním procesu.

2.2.1 Technologie UV vytvrditelných laků

Technologie UV vytvrzování byla zavedena jako alternativní metoda vytvrzování k tepelnému vytvrzování. Původně tato metoda sloužila k vytvrzování citlivých podkladových materiálů jako je dřevo, papír nebo plast. Tato alternativní technologie využívá k vytvrzování energii fotonů produkovaných zářeními zejména v oblasti krátkých vlnových délek elektromagnetického spektra. Při působení záření dochází k vytvoření reaktantů, které spouštějí rychlý růst řetězců a tím dochází k vytvrzovací reakci. Na obr. 29 je zobrazeno celé elektromagnetické spektrum. UV záření je dále klasifikováno na UV-A, UV-B, UV-C. Právě tyto oblasti jsou především využívány pro technologii vytvrzování. [55]



Obr. 29 Elektromagnetické spektrum – podle [55].

Energie fotonu je definována rovnicí [55]:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ [J]} \quad (1.2)$$

kde: h – Planckova konstanta $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$
 ν – frekvence [Hz]
 c – rychlost světla [m/s]
 λ – vlnová délka [m]

Na základě této rovnice lze říci, že čím je vlnová délka kratší, tím je energie fotonu vyšší. UV záření v oblasti vlnových délek 300-400 nm by mělo být schopno štěpit vazby C-C. Oblast záření pod touto vlnovou délkou stačí ke štěpení vazeb C-C nebo C-H. Tím pádem teoreticky není nutné mít v nátěrovém systému obsažený speciální fotoiniciátor. V případech vytvrzování UV zářením o delších vlnových délkách jsou tyto fotoiniciátory důležité, jelikož zde dochází ke zhoršenému přenosu energie, která je nutná pro vznik reakce. [55]

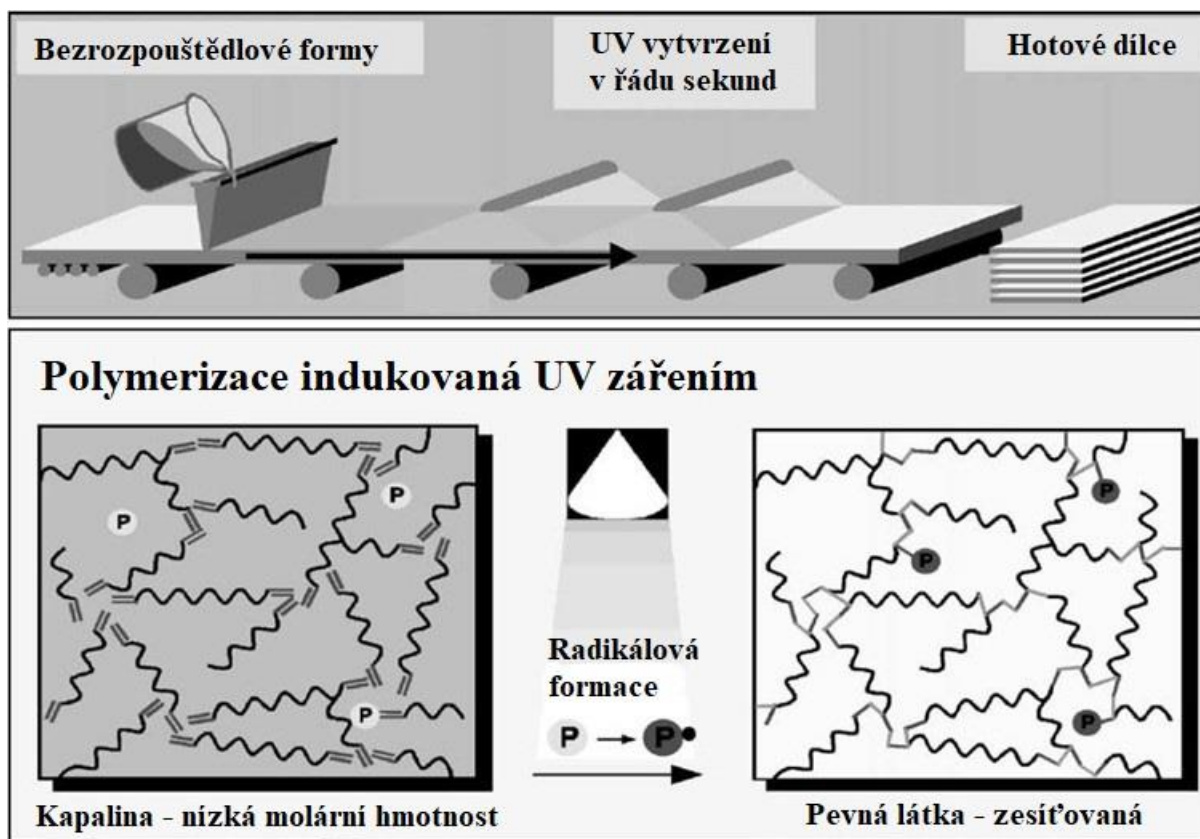
Až do nedávna se k povrchové úpravě UV zářením využívaly hlavně bezbarvé laky. V současné době však již existují varianty možných pigmentů, které lze do těchto nátěrových hmot přidávat. Typické složení UV vytvrzitelných laků je shrnuto v tab. 9. [55]

Tab. 9 Obecné složení UV laků a funkce jednotlivých složek – podle [55].

Složka	Podíl (%)	Funkce
Oligomerní pryskyřice	25-90	Tvorba filmu, základní vlastnosti laku
Reaktivní ředidla	15-60	Úprava viskozity
Fotoindikátory	1-8	Iniciace vytvrzovacího procesu
Aditiva	1-50	Pigmenty, plniva, stabilizátory

Typická hodnota viskozity pro aplikaci válečkem se pohybuje v rozmezí $3\text{--}5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Pro aplikaci UV laku stříkáním je hodnota viskozity $0,1\text{--}0,2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Využitelnost UV lakování je omezeno několika faktory. Jedním rozhodujícím parametrem je samotná technologie vytvrzování, která je ve většině případů omezena na dvourozměrné aplikace. Lze takto vytvrzovat pouze rovinné součásti. Proces vytvrzování je schematicky znázorněn na obr. 30. Povrch je nejprve potažen lakem (zde jde konkrétně o lící proces) a poté prochází pod UV lampami, kde je lakovaný

povrch vystaven intenzivnímu záření. Během několika sekund je kapalná nízkomolekulární hmota přeměněna na pevnou síť. Po vytvrzení lze upravený materiál okamžitě zpracovávat. [55]



Obr. 30 Schéma procesu UV vytvrzování a procesu zesíťování – podle [55].

UV laky disponují řadou výhod i nevýhod. Nejdůležitější body budou uvedeny níže. [55]

Ekonomické výhody

- vysoká rychlost výroby
- malé nároky na prostor
- možnost okamžitého zpracování bezprostředně po vytvrzení

Ekologické výhody

- možnost snadné recyklace (redukce odpadu)
- úspora energie (vytvrzování při pokojové teplotě)

Výhody vytvrzování laku UV zářením

- nízké zahřívání substrátu
- vysoká životnost produktu
- univerzálnost aplikace
- vysoká odolnost vůči mechanickému poškození
- vynikající houževnatost

Nevýhody vytvrzování laku UV zářením

- vyšší materiálové náklady
- přítomnost stabilizátorů v laku zpomaluje rychlost vytvrzování
- citlivost na vlhkost lakovaného povrchu
- obtížnější vytvrzování pigmentovaných nátěrů (při tloušťkách $>5 \mu\text{m}$)

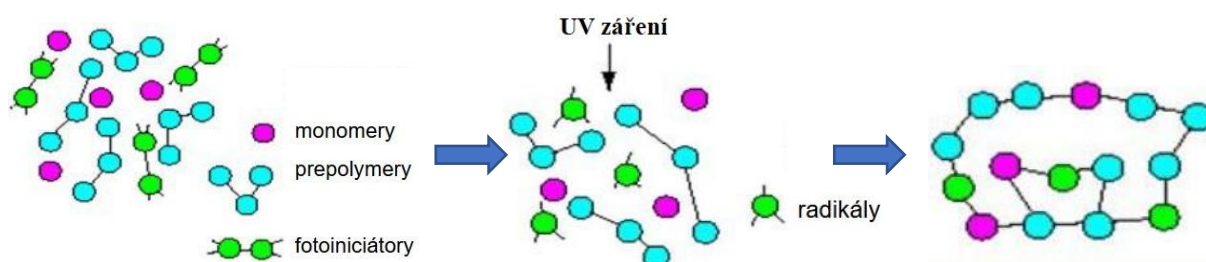
Jak již bylo zmíněno, jednou z hlavních nevýhod technologie vytvrzování UV zářením je omezení na vytvrzování dvourozměrných ploch. To je dáno skutečností, že výkon lampy kvadraticky klesá se vzdáleností. Je tedy obtížné efektivně kontrolovat energii (sílu záření, která dopadá na povrch), která je nutná k dostatečnému vytvrzení nátěru v každém bodě trojrozměrného povrchu. [55]

2.2.2 Možnosti využití, chemie a vlastnosti UV laků

Původní patent pro užití UV vytvrditelných tiskových barev byl udělen již v roce 1946. Následně se v 70. letech tento druh povrchové úpravy začal využívat v sítotisku, kdy započala sériová výroba UV vytvrditelných barev. V 90. letech byla technologie UV vytvrditelných barev částečně nahrazena možností použití vodou ředitelných barev. Poté se vývoj začal opět orientovat více na UV barvy, jelikož vzešly v platnost zákony o omezení exhalací těkavých organických látek. Aktuálně se technologie UV vytvrditelných barev a laků využívá v nejrůznějších oblastech, které krom polygrafie zahrnují i technologické aplikace. Barvy nacházejí uplatnění v grafickém ale i průmyslovém sítotisku. Grafický sítotisk zahrnuje zušlechťování plošné, parciální, případně ochranné lakování. Dále se tato metoda povrchové úpravy využívá pro plošný nebo rastrový tisk na papír, karton nebo plast. V technických aplikacích nachází tato metoda uplatnění v tisku pro automobilový průmysl. Zde se jedná jak o funkční, tak o dekorativní výsledný efekt. Užití UV barev je neodlučně spojeno s potiskem dutých těles (především obalů), lékařských pomůcek ale i s technologií UV vytvrditelných gelových laků v oblasti manikúry. Úspěch byl zaznamenán ve vývoji UV barev, které lze tisknout na sklo. [56]

UV barvy a laky se vytvrzují působením UV světla, které nastartuje chemickou řetězovou reakci (polymeraci). Výsledkem této reakce je jednolitý a stabilní povrch. Fotoiniciátory přítomné v systému zapříčiní reakci monomerů a prepolymerů s reaktivní dvojnou vazbou. Pro spuštění reakce je nezbytné UV záření o dané vlnové délce. Po vytvrzení UV barvy nenarušují povrchové vrstvy podkladového materiálu a na povrchu drží adhezními silami. Pokud je nátěrový systém správně vytvrzen, přestává být dále citlivý vůči UV záření. [56]

Vytvrzovací reakci lze popsat následujícími kroky. V první fázi dojde k absorpci fotonů UV záření prostřednictvím fotoiniciátorů. Následuje fotochemické reakce, kdy se fotoiniciátory rozpadnou na radikály, případně kationy v závislosti na typu polymerace (radikálová/kationtová). Radikály reagují s monomery a polymery a dochází k vytvoření síťové struktury (polymerní sítě). [57]



Obr. 31 Schéma polymerní reakce při vytvrzování za působení UV záření – podle [57].

2.3 Testování vyvíjeného laku na kompozitních dílcích

Jak již bylo zmíněno, firma Synpo má již dlouhodobé zkušenosti s výzkumem a vývojem nátěrových hmot se širokými možnostmi následné aplikace na nejrůznějších druzích podkladových materiálů. Z toho důvodu byla firmou GDP Koral, s. r. o. vytvořena poptávka a na základě další komunikace byla zvolena cesta lakování a následného vytvrzování pomocí UV záření. Cílem bylo vytvořit lak, který zajistí dostatečnou odolnost zejména vůči UV záření, kterému jsou profily v exteriérových oblastech vystaveny, a také zvýšit mechanickou odolnost vůči dalším vnějším vlivům. Technologie vytvrzování UV zářením je velmi efektivní a k vytvrzení dochází v řádu sekund. V tomto případě se jedná o ideální variantu, jelikož drtivá většina produkovaných kompozitů je vyráběna metodou pultruze. Materiál kontinuálně vytlačován z vytvrzovací formy, a tudíž není možné výrobu snadno přerušit.

Pro vytvrzování byla využita přenosná UV jednotka od firmy Aeroterm, která je určena pro vytvrzování tenkých vrstev nátěrových systémů. Svrchní část s UV lampou je opatřena systémem zrcadel a její pracovní šířka je 185 mm. Výkon UV lampy je přepínatelný ve dvou režimech a tj. 50 a 100 %, což konkrétně v tomto případě odráží lineární výkon 60/120 W/cm. Dle doporučení výrobcem byla ve všech případech vzdálenost UV lampy od povrchu cca 8 cm. Tato vzdálenost byla zajišťována vyrobeným přípravkem pro umístění vytvrzovací hlavičky přímo nad lakovaným povrchem.

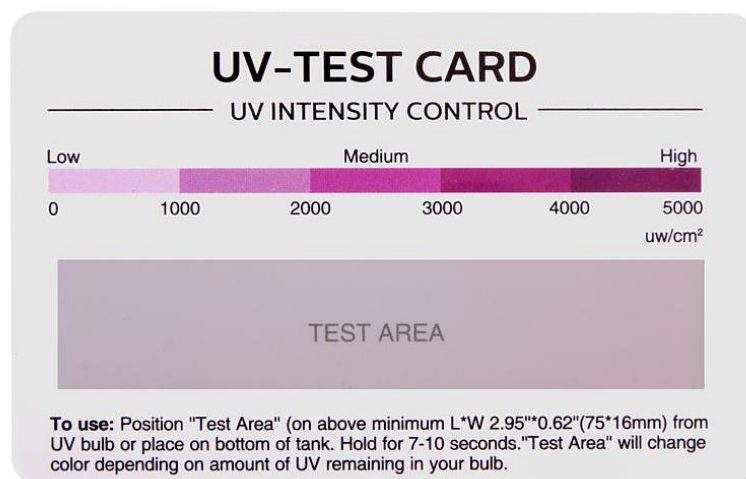


Obr. 32 Ruční vytvrzovací UV jednotka od společnosti Aeroterm – podle [58].

Přesto, že je lakovací systém stále ve stavu vývoje, bylo již provedeno několik testů, které měly za cíl odhalit schopnost adheze laku vůči materiálu. Vyvíjený lak by mělo být ideálně možné použít na co největší množství vyráběných kompozitních materiálů. Zde je hlavním kritériem složení matrice kompozitu, konkrétně typ použité pryskyřice. Testy byly provedeny na třech druzích pryskyřice, které pokrývají většinu produkovaného materiálu. Jednalo se o polyesterové, vinylesterové a polyuretanové pryskyřice. Nejlepší výsledky byly dosud zaznamenány na povrchu, který je tvořen matricí z vinylesterové pryskyřice. V ostatních případech byly pozorovány obtíže zejména ve schopnosti adheze.

Lakovací systém je nutné ideálně vytvrdit, aby nedocházelo ke snižování houževnatosti povlaku, ale zároveň je nezbytné, aby byl lak dostatečně vytvrzen před vstupem

do horizontálních manipulátorů, které materiál posouvají dále směrem k odřezávací pile a expedici. Výkon UV vytvrzovací jednotky byl ve všech případech dostačující. Naopak bylo nutné dávku ozáření redukovat odstíněním části ozářené oblasti. Jelikož od výrobce nebyla přesně zveřejněna intenzita záření příslušné UV lampy, ale jen výše zmíněný lineární výkon, byla pro měření intenzity UV záření použita speciální testovací karta, kterou je možné vidět na obr. 33. Zjištění intenzity záření je nutné pro vyhodnocení výsledného stupně vytvrzení.



Obr. 33 UV testovací karta pro zjištění intenzity UV záření – podle [59].

Jelikož výsledky z minulých testů na polyesterových a polyuretanových matricích nebyly uspokojivé, jsou v další části uvedeny pouze výsledky z posledních testů na vinylesterových matricích. V příloze je však uvedena kompletní fotografická dokumentace, která zahrnuje veškeré provedené testy na všech výše zmíněných druzích matrice.

Dosažení reálných podmínek výrobního procesu je v prostorách laboratoře velmi obtížné, proto bylo nutné otestovat funkčnost laku, který byl nanesen přímo na výrobní lince, aby došlo k ověření požadovaných vlastností. Vzorky, které vizuálně odpovídaly požadovaným výsledkům, byly dále testovány pomocí mechanických testů, které jsou popsány níže.

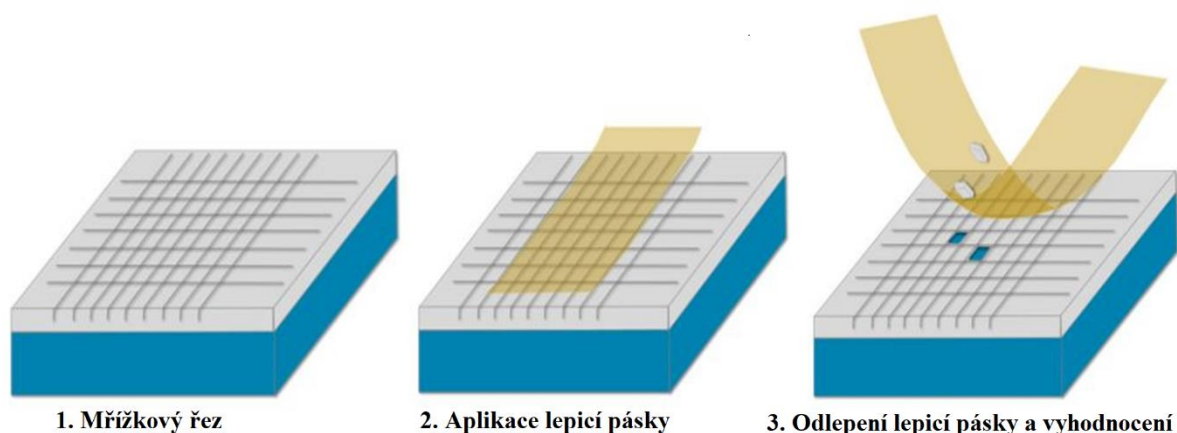
2.3.1 Použité metody testování laku

Základní funkční charakteristikou nátěru k podkladu je síla přilnavosti k podkladu neboli adhezni síla. Přilnavost popisuje potřebnou výslednou sílu k oddělení dvou lepených částí podél rozhraní. Všechny testy adheze jsou založeny na různých metodách oddělování povlaku od substrátu za působení určitého zatížení. Při všech testech je nutné zajistit co možná nejvíce konstantní zatížení, aby bylo možné porovnat všechny testované vzorky. Pokud dojde k oddělení materiálu mimo spojovací rozhraní, tak se jedná o tzv. kohezní selhání, při kterém dojde k porušení v jednom z materiálů. V tomto případě lze přilnavost považovat za dokonalou. [60]

Mřížková zkouška

Mřížkový test (také páskový test) je jednou z nejpoužívanějších metod pro testování adheze. V první fázi je testovaný povlak ostrým nástrojem (čepel, nůž, břitva) proříznut v celé tloušťce až v podkladovém materiálu, aby došlo k vytvoření hran, ze kterých lze povlak poté odloupnout. Vzory pro řezání mohou být různé. Nejpoužívanějším jsou vzory X. Jedná se o dva řezy, mezi nimiž je úhel 30-45°. Vzdálenost mezi jednotlivými řezy je z pravítka mezi 1-3 mm. Následně se na oblast nanese silná lepicí páska, která se přilepí k povrchu vzoru. Poté se páska stáhne ve směru rovnoběžném s povrchem. Pokud jsou jednotlivé fragmenty nátěru odstraněny

z podkladu, je adhezní síla považována za nedokonalou. Zkoušená oblast se vizuálně prozkoumá pomocí lupy či mikroskopu a v závislosti na množství odstraněného povlaku se vyhodnotí adhezní síla. [60]



Obr. 34 Postup pro vyhodnocení mřížkového testu – podle [61].

Pro test byla využita sada pro mřížkovou zkoušku od firmy Proinex Instruments. Touto sadou lze hodnotit přilnavost k podkladu dle normy ČSN EN ISO 2409. Test byl proveden příslušným řezákem s vyměnitelnými hlavicemi, které se mění v závislosti na tloušťce nátěru. Výsledný stupeň ISO byl následně hodnocen dle přiloženého etalonu, který je součástí manuálu. Kompletní manuál je součástí přílohy.

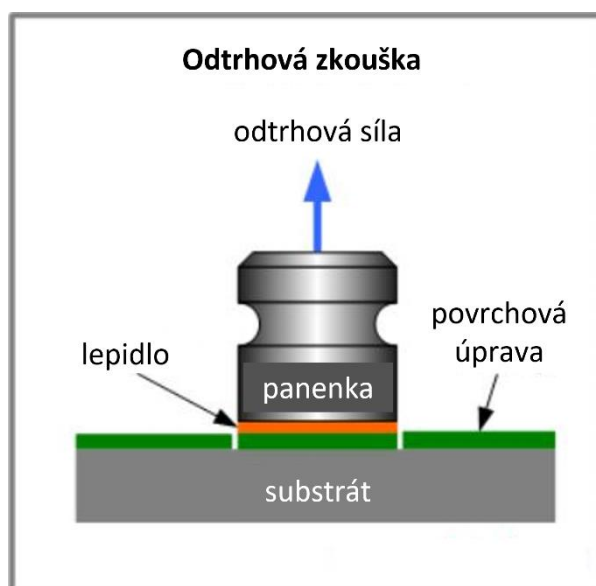


Obr. 35 Snímky použité sady pro mřížkový test.

Odrhová zkouška

Při odtrhové zkoušce je zatížení kolmé na povrch povlaku. Pro test se využívá speciální „panenka“, která je připevněna k povrchu nátěru pomocí lepidla. Směrem od této panenky kolmo vzhůru je postupně zvyšována zátěž, dokud nedojde k oddělení povlaku od substrátu. Zkoušku lze ukončit při určité hodnotě zatížení, pokud je tato hodnota nastavena jako požadovaná minimální úroveň adhezní pevnosti. Při této zkoušce je měřena pevnost v tahu spoje povlaku a substrátu. Z toho důvodu nejsou její výsledky přímo srovnatelné s jinými zkušebními metodami, kde je aplikováno smykové napětí. Dalším omezením odtrhové zkoušky

je síla adhezního spojení mezi panenkou a povrchem nátěru. Pokud dojde k porušení podél tohoto povrchu, je přilnavost nátěru k podkladu vyšší. [60]



Obr. 36 Princip odtrhové zkoušky [60].

V tomto případě byl pro test využitý mechanický odtrhoměr Comtest OP1 od firmy Proinex Instruments. Přístroj je určený k měření pevnosti v tahu kolmo ke zkoumanému povrchu. Zatěžovací člen je v tomto případě vybaven indukčním snímačem síly. Zatěžování probíhá přes zatěžovací rameno, pomocí kterého lze vzorek plynule zatěžovat až do odtržení zkušební panenky. Výsledky provedené tímto odtrhoměrem splňují normu ČSN EN ISO 4624 o klasifikaci nátěrových hmot z hlediska přilnavosti. [72] Přístroj byl zkalibrovan dle kalibračního listu, který je uvedený v příloze.

Postup odtrhové zkoušky: [72]

1. Pomocí vhodného lepidla se přilepí na měřené místo zkušební panenka.
2. Povrchová úprava se prořízne až do základního materiálu ruční frézku a tím se zajistí definovaná měřená plocha.
3. Po vytvrzení lepidla se ke zkušební panence připojí odtrhový přístroj a otáčením zatěžovacího ramene je zkušební panenka zatěžována.
4. K přístroji patří i měřící jednotka, která je vybavena akustickou indikací, která hlásí překročení optimální rychlosti zatěžování. Během testu je neustále přepočítávaná zatěžovací síla.
5. Testovací panenka o průměru 20 mm se zatěžuje až do okamžiku odtržení. Na displeji měřící jednotky zůstane zaznamenaná maximální naměřená hodnota odtrhové síly, která se následně odečte.

Tab. 10 Vybrané technické parametry odtrhoměru Comtest OP1 – podle [72].

Rozsah měření	7 kN resp. 19,98 MPa na panence o průměru 20 mm
Rozlišení	0,02 MPa
Max. chyba měření	$\pm 1,5 \%$ z naměřené hodnoty ± 2 digity
Hmotnost zatěžovací jednotky	1,7 kg
Rozměr zátěžové jednotky	200 x 85 mm
Napájení/kapacita	Baterie 9 V / cca 100 odtrhových zkoušek



Obr. 37 Fotografie použitého odtrhoměru Comtest OP1.

2.4 Nanesení metodou rozlití a následné kalibrace výšky laku

Lak byl nanesen na povrch během podmínek výrobního procesu. Vyvíjený lak je založen na polyester akrylátech a nese pracovní označení Phot 54. Za tekutého stavu má tento lakovací systém bílou až mléčnou barvu. Všechny vzorky byly nanесeny metodou rozlití a následně byla výška mokré vrstvy laku zkalibrována přesným kalibrem. Výška laku byla stanovena na 60 a 120 μm .



Obr. 38 Fotografie kalibru užitého k zajištění rovnoměrné vrstvy nátěru a jeho použití.

Bylo otestováno nanášení při dvou různých teplotách. Toho bylo docíleno nanášením ve dvou zónách provozní linky v závislosti na vzdálenosti od vytvrzovací formy (teplota se vzdáleností od formy klesá). Konkrétně se tedy jednalo o teploty 113 a 83 $^{\circ}\text{C}$. Teplota byla naměřena infračerveným laserovým bezdotykovým teploměrem. Rozdíl teploty lakovaného povrchu byl tedy 30 $^{\circ}\text{C}$.

Pro vytvrzení lakované vrstvy byl použit přípravek k zajištění vzdálenosti mezi lakovaným povrchem a vytvrzovací UV lampou. Tato vzdálenost byla stanovena na cca 8 cm. Doba osvětlení

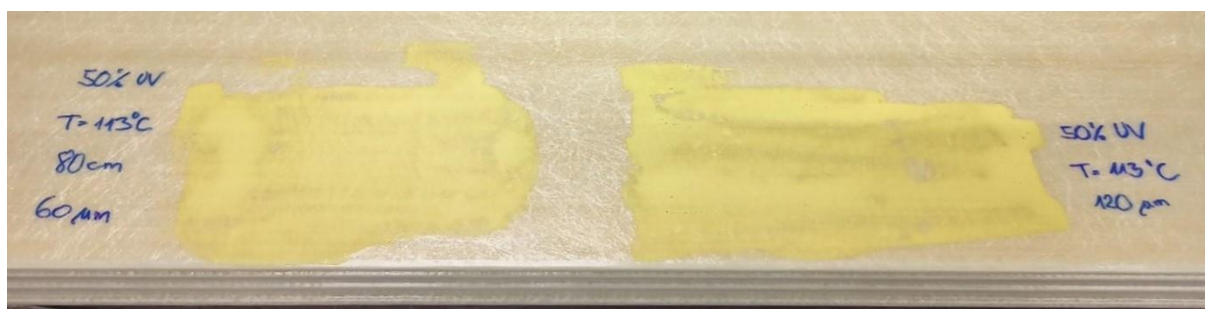
byla v tomto případě omezena pouze rychlostí tažení materiálu. Konkrétně v tomto případě se jednalo o rychlost 35 cm/min. Byl také otestován vliv výkonu lampy. Vzorky byly vytvrzeny při plném i polovičním výkonu lampy. Jelikož se v tomto testu lak aplikoval na širší typ dílce, byla vytvrzovací UV lampa umístěna tak, aby pokryla šířku celého materiálu.

Doba vytvrzování při těchto podmínkách byla 43 s a povrch byl těsně před nátěrem očištěn od prachových nečistot. Celkově bylo vytvořeno 8 vzorků s odlišnými parametry vytvrzování, teploty materiálu a výšky nátěru. Vzorky s příslušnými parametry jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Souhrn příslušných parametrů pro jednotlivé vzorky.

	Výkon UV lampy [%]	Teplota materiálu při nanášení [°C]	Výška mokré vrstvy laku [μm]
vzorek 1	50	113	60
vzorek 2	50	113	120
vzorek 3	50	83	60
vzorek 4	50	83	120
vzorek 5	100	113	60
vzorek 6	100	113	120
vzorek 7	100	83	60
vzorek 8	100	83	120

Pro ilustraci je níže přiložena fotografie, na které jsou viditelné vzorky č. 1 a č. 2. Snímky byly pořízeny bezprostředně po vytvrzení. Fotografie zbylých pořízených vzorků jsou uvedeny v příloze na konci dokumentu. Materiál byl nařezán po skupinách dvou vzorků a na nich byly následně provedeny výše zmíněné mechanické testy.



Obr. 39 Fotografie vzorku č. 1 a vzorku č. 2.

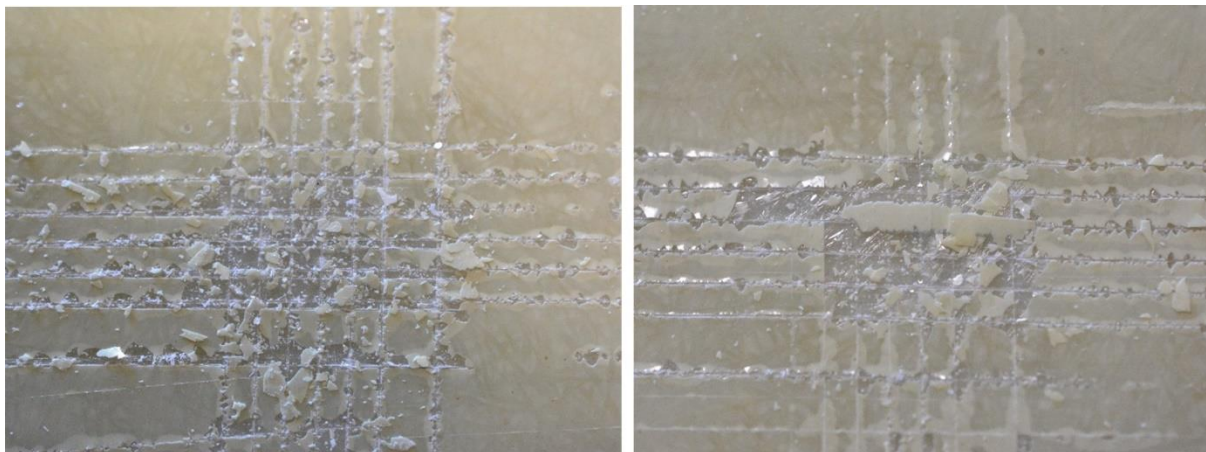
2.4.1 Výsledky testování laku – nanesení metodou rozlití

Vizuální zhodnocení

Jak je již patrné z přiložené fotografické dokumentace (obr. 39 + příloha 4), na všech vzorcích je patrná změna odstínu lakovacího systému po vytvrzení. Konkrétně zde dochází ke změně původní bílé barvy na světle žlutou barvu. Tato skutečnost je zapříčiněna příliš vysokou dávkou UV záření při vytvrzovacím procesu. Povrch laku po vytvrzení jeví odolnost vůči mechanickému poškození a na první pohled je v porovnání s původními vývojovými verzemi laku zlepšena jeho adhezní schopnost vůči podkladovému materiálu.

Mřížkový test

Mřížková zkouška byla provedena na všech osmi vzorcích pomocí sady pro mřížkovou zkoušku od firmy Proinex Instruments. Byl zachován výrobcem specifikovaný postup práce a následného vyhodnocení. I zde je uvedena fotografie dvou prvních vzorků. Zbylé fotografie jsou uvedeny v příloze.



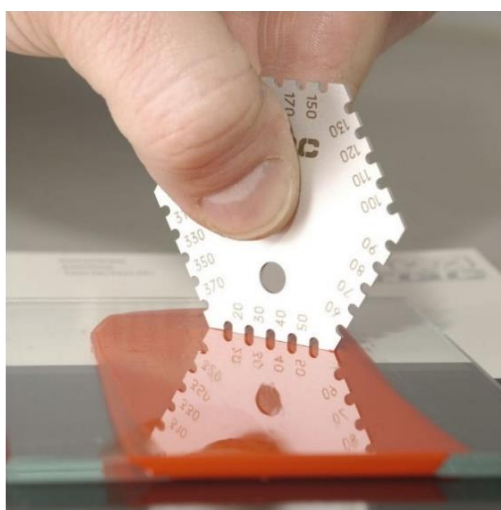
Obr. 40 Výsledky mřížkové zkoušky. Vzorek č. 1 - (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo).

Jelikož se jedná o nátěry s tloušťkou 60 a 120 μm , byl zvolen nůž s šesti řezáky a mezerou 2 mm, který je vhodný pro měkký i tvrdý podkladový materiál. Výsledek testu ukázal, že nátěr je příliš křehký a jeho adhezni schopnost vůči substrátu je nízká. Příčinou je v tomto případě příliš intenzivní vytvrzení UV zářením. Metoda rozlití a následné kalibrace může mít také nepříznivý vliv na výsledné vlastnosti a dochází zde k lokálním nerovnostem ve výšce nanesené vrstvy. Dle normy ISO 2906 byl podle příslušného etalonu stanoven nejnižší stupeň, tj. ISO 5, který odpovídá poškození ploše větší než 65 %.

Jelikož ani jeden z testovaných vzorků neodpovídal předpokládané kvalitě, nebylo nutné provádět žádné další testy. Výsledná adhezni schopnost je velmi nízká a je nutné vytvořit lepší podmínky pro vytvrzování a nanášení laku na podkladový materiál.

2.5 Nanese ní metodou nástřiku lakovací pistolí

I v tomto případě byl lak na povrch materiálu nanesen nástřikem lakovací pistolí za běžných podmínek výrobního procesu. Při testu byl opět využit vyvíjený lak od firmy Synpo, a. s. s pracovním názvem „Phot 54“. Matrice podkladového materiálu je opět na bázi vinylesteru. Výška laku byla stanovena pomocí specializovaného hřebene pro zjištění tloušťky mokré vrstvy nátěru. Nástřik byl proveden za pomoci odborníka a výška se ve všech vzorcích pohybovala od 80 do 150 μm . Průměr trysky lakovací pistole byl 1,8 mm a pracovní tlak cca 1,5 baru.



Obr. 41 Hřeben pro měření tloušťky mokré vrstvy nátěru – podle [62].

Zde byly vzorky pořízeny na odlišné výrobní lince a teploty při níž se materiál vytvrzoval ve výrobní formě se také oproti předchozímu testu liší. Z toho důvodu byly pro tento případ stanoveny tři tepelné zóny, ve kterých proběhlo lakování. Tyto zóny opět korelují se vzdáleností od vytvrzovací formy. Konkrétně šlo o zóny s teplotami 60-95 °C, 85-105 °C, 95-115 °C. Teploty byly měřeny opět laserovým bezdotykovým teploměrem.

Pro vytvrzení byl opět použit přípravek pro zajištění konstantní vzdálenosti vytvrzovací UV lampy od povrchu lakovaného materiálu. Vzdálenost byla stanovena na cca 8 cm. Míra osvitu byla ovlivněna rychlostí pultruze materiálu (40 cm/min) a v tomto případě i odstíněním části ozářené oblasti. Šířka výsledné oblasti ozáření se liší v závislosti na jednotlivých vzorcích. Tím bylo dosaženo snížení intenzity záření, která byla pomocí testovací UV citlivé karty stanovena na 1000-2000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Vzorky byly vytvrzeny při obou výkonnostních podmínkách UV vytvrzovací jednotky pro zajištění co nejširšího množství variant vzorků.

Celkově byly vzorky pořízeny při třech podmínkách vytvrzování. Jejich parametry jsou uvedeny v tab. 12. V závislosti na těchto podmínkách byly vytvořeny vzorky, které byly nařezány na menší části pro jejich objektivnější testování a vytvoření většího množství dat o výsledných vlastnostech. Povrch materiálu v tomto případě nebyl nijak ošetřen.

Tab. 12 Parametry jednotlivých vytvrzovacích podmínek.

Podmínky vytvrzování	výkon UV lampy [%]	teplota materiálu při nanášení [°C]	výška mokré vrstvy laku [μm]	Šířka ozářené oblasti [mm]	číslo vzorku
1	50	95-115	150	60	1,2
2	50	60-95	80-100	25	3
3	100	85-105	80	60	4,5

Na obr. 42 jsou fotografie již nařezaných vzorků, které byly následně testovány. Fotografie byly pořízeny před samotnými testy. Výsledný vzhled laku se od doby vytvrzení nijak nezměnil. Další fotografická dokumentace zahrnuje snímky z výrobního procesu a jsou uvedeny v příloze.



Obr. 42 Fotografie jednotlivých vzorků.

2.5.1 Výsledky testování laku – nanesení metodou nástřiku

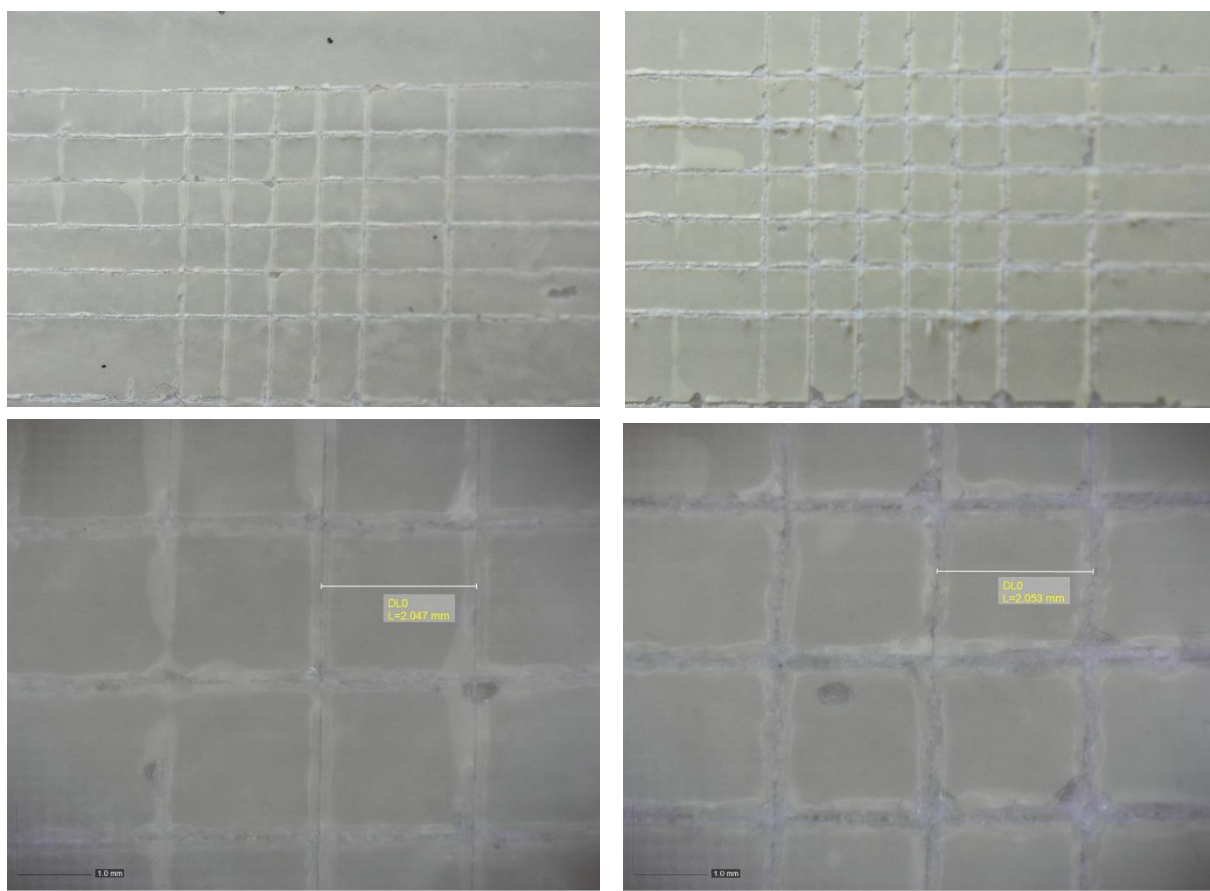
Vizuální zhodnocení

Dle přiložených fotografií je i v tomto případě na všech vzorcích patrné zabarvení laku po vytvrzení. Zde však tato změna odstínu není tak markantní. Je zřejmé, že snížení dávky ozáření

má přímý vliv na pigmentaci. Pro dosažení ideálního odstínu je tedy nutné ještě více snížit intenzitu ozáření, případně upravit lakovací systém tak, aby k tomuto jevu dále nedocházelo. Povrch laku je jednotný a možnost aplikace nástřikem je daleko vhodnější než v předchozím testu. Dílec, na který byl lak nanesen, není zcela rovný a při okrajích je mírně vystouplý. V těchto místech pak došlo k nahromadění vrstvy laku, což může mít vliv na výsledné vlastnosti a vést například k případnému odlupování. Pod povrchem laku jsou patrná zrnka prachu, která mají také negativní vliv na výslednou adhezní schopnost. Bude tedy nezbytné materiál před samotným lakováním očistit například vzduchovými noži.

Mřížkový test

Pro test byla opět použita stejná sada pro mřížkovou zkoušku jako v předchozím testu. Na obr. 43 jsou přiloženy fotografie vybraných vzorků z fotoaparátu a také jim příslušné fotografie z mikroskopu na kterých jsou viditelné detaily pro následné vyhodnocení zkoušky. Zbývající fotografie vzorků jsou uvedeny v příloze.



Obr. 43 Výsledky mřížkové zkoušky. Vzorek č. 3 (vlevo) a vzorek č. 4 (vpravo).

Pro výše zmíněné tloušťky nátěru byl použit nůž s šesti řezáky a mezerou 2 mm. Při snaze proříznout celou tloušťku laku byl na vzorku č. 4 povrchově poškozen základní materiál. Na fotografii jsou viditelná porušená vlákna. Na výsledek testu však tato skutečnost neměla vysoký vliv. Snížením intenzity záření bylo dosaženo vyšší adhezní schopnosti. Lak v tomto případě není tak křehký a tím pádem nedochází k jeho praskání při narušení nožem. Metoda nástřiku je vhodnější, jelikož dochází k rovnoměrnému nanášení vlivem tlaku stříkácí pistole. Dle normy ISO 2906 byl podle příslušného etalonu stanoven pro dva výše zmíněné vzorky stupeň ISO 2, kde nátěr je sice poškozen podél řezu, ale není poškozena plocha větší než 15 %. V tab. 13 jsou uvedeny klasifikace všech pěti testovaných vzorků v závislosti na výsledku zkoušky.

Tab. 13 Klasifikace výsledků mřížkové zkoušky dne normy ISO 2409.

vzorky	Stupeň ISO dle ISO 2906
vzorek č. 1, vzorek č. 2	ISO 2
vzorek č. 3	ISO 2
vzorek č. 4, vzorek č. 5	ISO 3

Odrhový test

Odrhové testy byly provedeny na stejných vzorcích jako v případě mřížkové zkoušky. Podmínky vytvrzování jsou tedy také u všech testovaných vzorků stejné. Ocelové panenky o průměru 20 mm byly na povrch laku přilepeny pomocí epoxidového lepidla a následně po vytvrzení byly provedeny příslušné odtrhy na vzorcích. V rámci každého vzorku byly provedeny čtyři odtrhy, aby bylo možné stanovit průměrnou hodnotu výsledné odtrhové síly v MPa a následně vyhodnotit, které vytvrzovací podmínky jsou nejvhodnější pro daný typ laku.

Tab. 14 Souhrn naměřených hodnot odtrhových sil pro jednotlivé vzorky.

Název vzorku	Naměřené hodnoty odtrhové síly [MPa]	Průměrná hodnota odtrhové síly [MPa]
vzorek č. 1	1,04; 1,19; 0,98; 1,24	1,11
vzorek č. 2	1,48; 1,34; 1,23; 1,28	1,33
vzorek č. 3	1,77; 1,61; 1,34; 1,41	1,53
vzorek č. 4	1,27; 1,46; 1,50; 1,31	1,39
vzorek č. 5	1,36; 1,40; 1,63; 1,30	1,42

Hodnota odtrhových sil se v případě těchto typů laků pohybuje v rozmezí 1-1,7 MPa. Průměrné hodnoty jsou u všech testovaných vzorků vyšší jak 1 MPa a tím pádem jsou pokládány za uspokojivé. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u vzorku č. 12. Vzorek č. 3 byl vytvrzen při podmínkách, kde byl co nejvíce omezen čas a intenzita záření. (Podrobné detaily o podmínkách vytvrzování jsou uvedeny v tab. 3.) Druhé nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u vzorku č. 4 a vzorku č. 5, které byly vytvrzeny při podmínkách vytvrzování, které jsou v tabulce označeny číslem tři. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorků č. 1 a č. 2. Tyto vzorky byly vytvrzovány při nižším výkonu než vzorky č. 4 a č. 5. U vzorků č. 1 a č. 2 byla nanesena nejvyšší vrstva laku. Je zjevné, že výška nátěru má také vysoký vliv na výslednou adhezní schopnost.

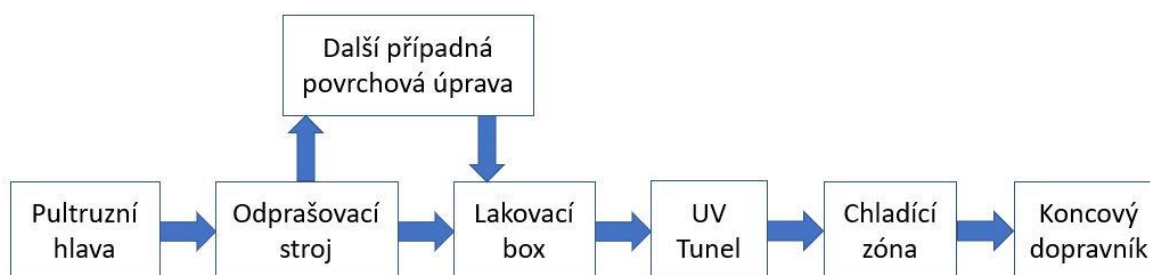
Celkově výsledky mřížkové zkoušky a zkoušky odtrhu nasvědčují, že podmínky, při kterých byl vytvrzen vzorek č. 3 se jeví jako nejideálnější. Stále je nutné zajistit co možná nejvíce rovnoměrnou vrstvu laku, aby nedocházelo ke slévání a také se pokusit eliminovat změnu pigmentu lakovacího systému po vytvrzení. Toho by mohlo být možné dosáhnout pomocí další úpravy vytvrzovacích podmínek, případně úpravou laku v laboratoři. V neposlední řadě je také nutné před samotným lakováním odstranit prachové částice na povrchu materiálu, aby nedocházelo k zhoršení adhezních vlastností a výsledného vizuálního vzhledu povrchově upravené součásti.



Obr. 44 Fotografie vzorků pro odtrhový test. (Vlevo) vzorky s nalepenými panenkami. (Vpravo) vzorky po odtrhových zkouškách.

2.6 Technologický návrh automatizovaného řešení UV lakování

V rámci návrhu automatizovaného řešení pro nanášení laku a následného vytvrzování byl vytvořen technologický návrh obsahující jednotlivé procesy a možné použitelné technologie k zajištění výsledných požadovaných vlastností povrchově upravovaného materiálu. Jednotlivé technologie a procesy musí být implementovatelné do stávající výrobní linky, kde je materiál vyráběn metodou pultruze. Systém povrchové úpravy je nutné umístit v rámci výrobní linky do oblasti, která je na jedné straně ohraničena vytvrzovací formou a na druhé straně manipulátory, které materiál posouvají již k odřezávací pile a expedici.



Obr. 45 Schéma návaznosti jednotlivých technologických úseků.

2.6.1 Odprašovací stroj

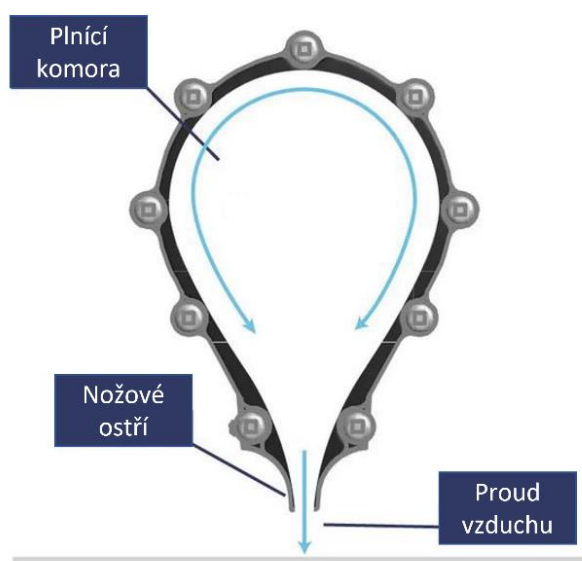
Jelikož při procesu vytvrzování materiálu v pultruzní hlavě (vytvrzovací formě) vzniká tenká vrstva jemného prášku na povrchu materiálu vlivem chemických reakcí, je nutné tyto prachové částice odstranit před následující povrchovou úpravou. Zrnka prachu mají negativní vliv nejen na adhezní síly mezi substrátem a lakovacím systémem, ale i na výsledný povrchový vzhled.

Nepřetržitý ofuk se průmyslové praxi zajišťuje několika způsoby s ohledem na aplikaci. Jde o ofuk pomocí vrtaných trubek, trubek s tryskami nebo speciálními vzduchovými noži, které mohou být také v provedení, které pracuje se zdrojem nízkotlakého vzduchu [63].

Zajištění ofuku pomocí vrtaných trubek je nejjednodušší a snadno realizovatelnou možností. S tím jsou spojeny i nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je vysoká provozní hlučnost a nízká účinnost. Zásadním problémem je v tomto případě vysoká spotřeba vzduchu, se kterou souvisí vysoké provozní náklady. Plastové trysky, které směřují proud vzduchu a tím zvyšují účinnost ofuku, jsou také relativně jednoduchým řešením. I zde je však hlavním problémem vysoká spotřeba vzduchu. [63]

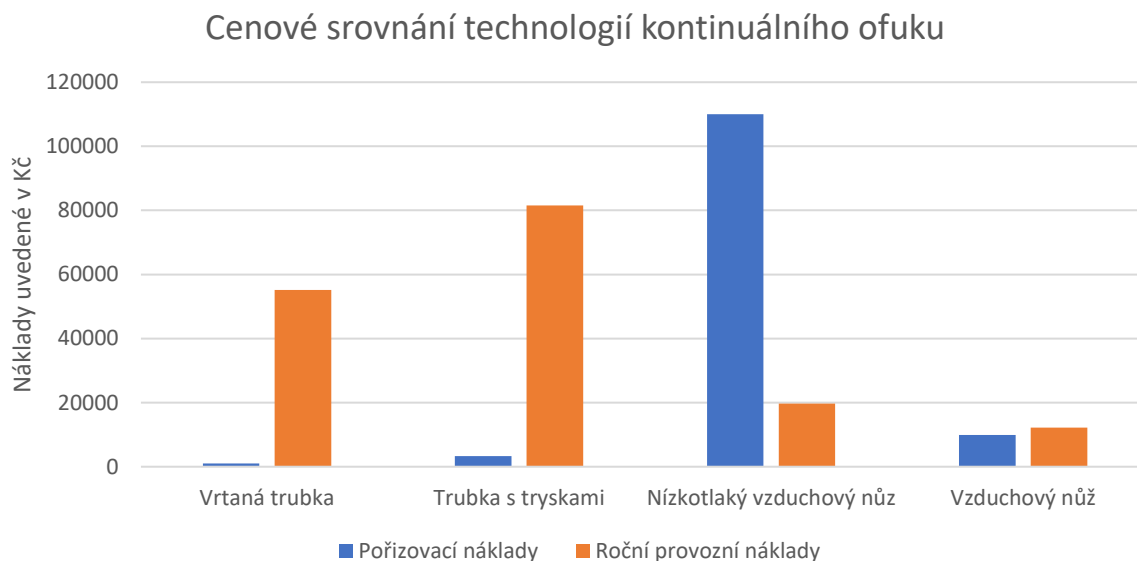
Nízkotlaké vzduchové nože jsou velmi sofistikovaný řešením, které pracuje za nízkých tlaků. S tím jsou spojeny nižší provozní náklady. Směrování proudu vzduchu zvyšuje jejich účinnost. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady. [63]

Vzduchové nože se běžně skládají z konstrukce, která je obvykle z hliníku, oceli nebo plastu. Uvnitř konstrukce je umístěna komora, která má na jedné straně speciální otvor, který je tvořen dvěma spojenými lopatkami, které mají tvar ostří nože. Vzduchové nože jsou schopné vytvářet nejvyšší poměr síly a spotřeby vzduchu. Jsou využívány k čištění, sušení a ofukování. Vytváření silného a stálého proudu vzduchu je zajištěno pomocí štěrbin, které jsou podél ostří. Velikost štěrbin je nastavitelná a lze tedy redukovat průchod vzduchu úpravou šířky štěrbin. To umožňuje ofuk předmětů nejrůznějších tvarů a velikostí. Plnicí komora zajišťuje vyrovnání tlaku a vzduch tak může být rovnoměrně vystřelován. Dochází tak k vzniku laminárního proudění, kde se vzduch pohybuje stejnou rychlostí stejným směrem bez křížení. Může tak být vytvořena bariéra se sterilním prostředím. [64]



Obr. 46 Profil vzduchového nože – podle [64].

Pracovní tlak se u vrtaných trubek, trubek s tryskami a vzduchových nožů pohybuje okolo čtyř barů. Nízkotlaké vzduchové nože pracují za tlaku 0,2 baru. Na obr. 47 jsou uvedeny pořizovací náklady a náklady na roční provoz výše zmíněných systémů. Data jsou převzata z dostupných informací na webu společnosti MOS Pneumatics, která se zabývá výrobou vzduchových nožů. [63]

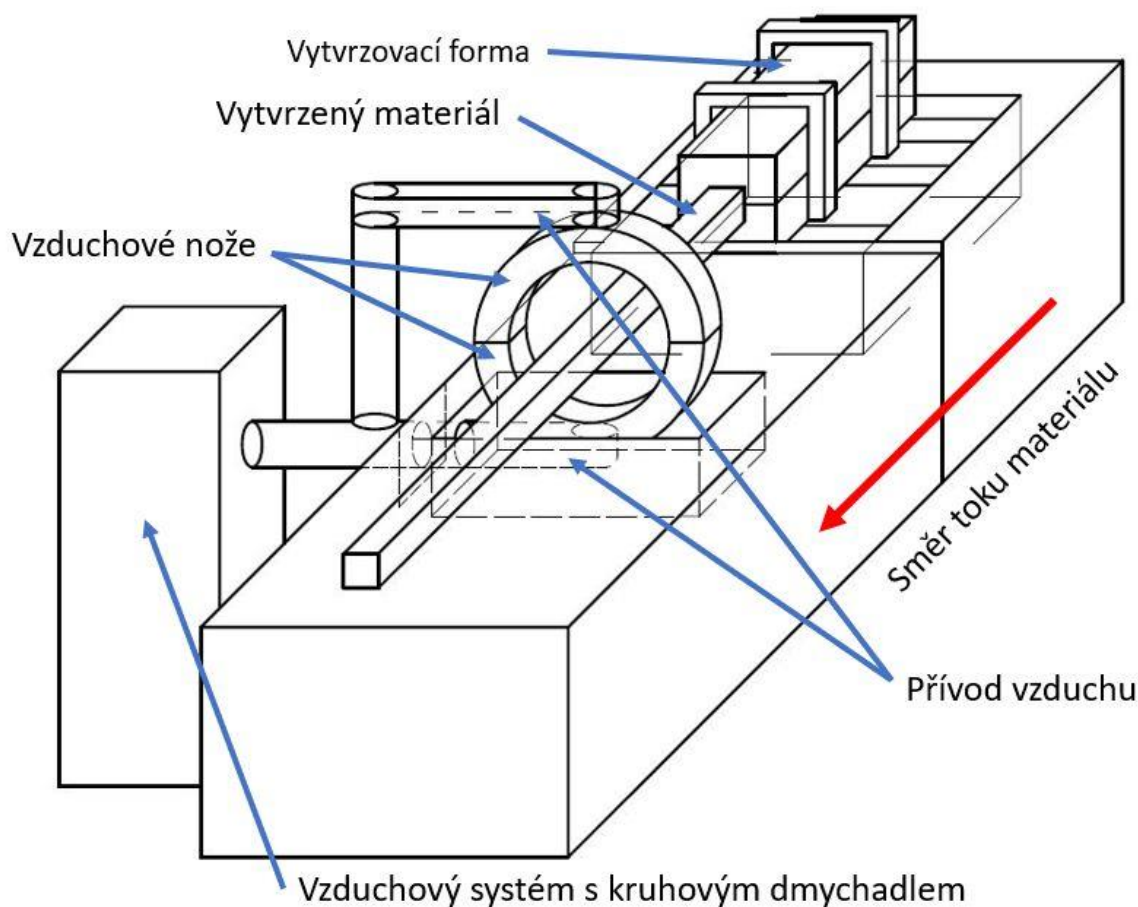


Obr. 47 Graf cenového srovnání technologií ofuku – podle [63].

Na základě výše zmíněných informací by bylo vhodné pro aplikaci ofuku na Pultruzní lince zvolit variantu vzduchových nožů. Jejich pořizovací náklady a náklady na roční provoz jsou ve srovnání s ostatními technologiemi kontinuálního ofuku velmi ekonomické. Jelikož firma GDP Koral, s. r. o. produkuje široké spektrum profilů s různou technologickou složitostí, je nutné zvolit správný tvar vzduchového systému nožů. Na trhu jsou k dispozici vzduchové nože nejrůznějších tvarů a velikostí. Pro ofuk dlouhých a tvarově složitých dílců by v tomto případě mohl být vhodnou variantou kruhový vzduchový nůž, který se skládá ze dvou polokruhových částí.



Obr. 48 Aplikace kruhového nože pro sušení/ofuk – podle [65].

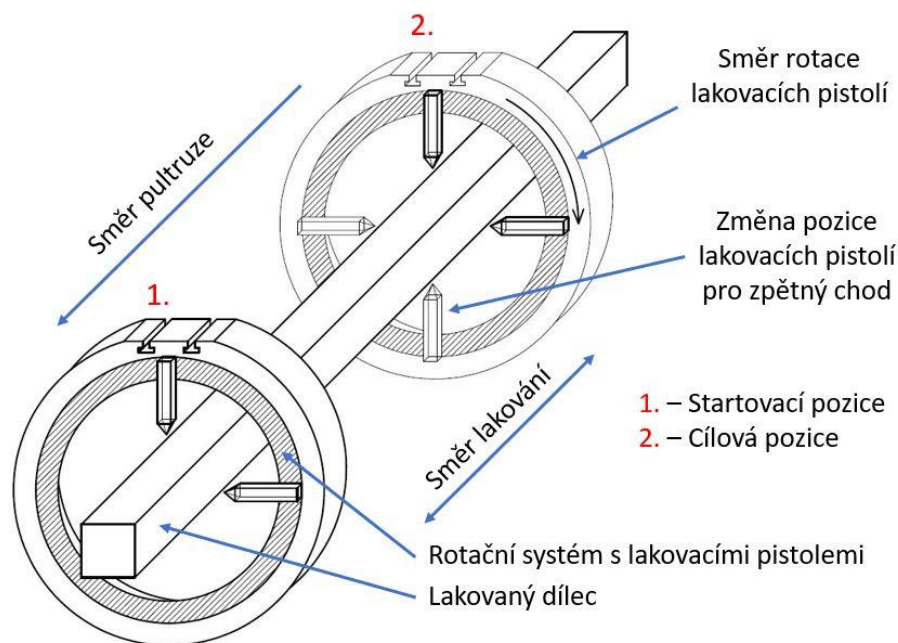


Obr. 49 Grafické znázornění možné aplikace kruhových vzduchových nožů pro ofuk materiálu.

Součástí navrženého systému jsou samotné vzduchové nože a k nim příslušný zdroj vzduchu. Vzduch je hnán do systému kruhovým dmychadlem, které zajišťuje nepřetržitý přívod vzduchu. Zásobovací část systému zahrnuje kompresory, úpravu vzduchu, primární skladování a řídicí systém, kterým je regulováno množství vyráběného stlačeného vzduchu, aby byl udržen konstantní tlak v systému. Ze stlačeného vzduchu je nutné odstranit vlhkost, olej a nečistoty pomocí vzduchových filtrů a sušičky vzduchu. Ke zvýšení účinnosti může být do systému zabudován zásobník na stlačený vzduch. Po odstranění prachových částic odprašovacím strojem je nutné zabezpečit, aby zvěšené zbytky prachu nedopadaly na již očištěný povrch. Proto by bude nezbytné za odprašovací stroj umístit tunel, který bude chránit povrch materiálu až po vstup do lakovacího boxu.

2.6.2 Lakovací box a systém nanášení laku

Výsledky dosud provedených testů odhalily, že pokud jsou zajištěny správné podmínky lakování a vytvrzování, není nutné do systému včleňovat další povrchovou úpravu před samotným procesem lakování. Na základě dostupných informací byl vytvořen návrh lakovacího boxu a systému nátěru, který je vhodný pro nanášení laku na kontinuálně se pohybující dílec vyráběný pultruzním procesem. Níže uvedený systém a jeho konkrétní parametry byly navrženy pro uzavřený profil s čtvercovým půdorysem.

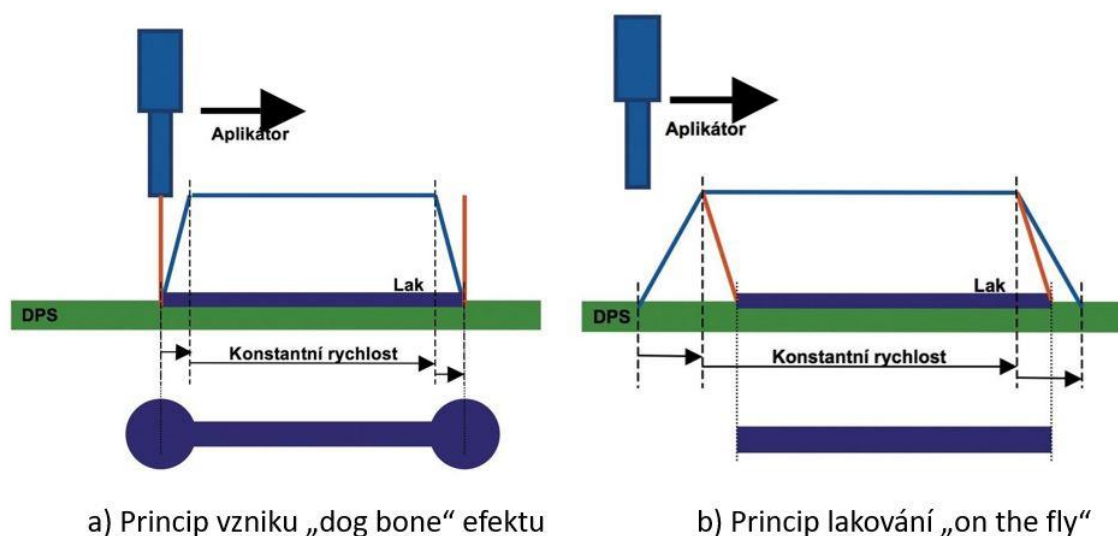


Obr. 50 Náskres pohyblivého lakovacího prstence a trysek.

Proces nástřiku

Nástřik je zajištěn pomocí dvou trysek, které jsou umístěné na vnitřní rotační části prstence, který na základě dat z řídicího systému definuje jednotlivé pozice pro začátek a konec nanášení laku. Pohyb prstence je zajištěn pomocí lineárního motoru. Celé schéma je možné vidět na obr. 52. Navržený proces je rozdělen na čtyři části. První pozice je startovací. Zde jsou trysky natočeny pod úhlem 0 a 90°. Na základě informací z řídicí jednotky systém zahájí první část procesu lakování, kde dojde k nanesení laku na dvě stěny materiálu. Tato část je ukončena předem definovanou vzdáleností a okamžikem dojezdu prstence na tuto definovanou pozici. Zde dojde k otočení trysek o 180°. Tím dojde k napozicování trysek do polohy pro druhou část lakování. Jelikož je materiál neustále posouván, je nutné zajistit, aby sekundární fáze nástřiku začala ve stejném bodě, kde skončila první. Tato pozice je v obr. 52 znázorněna pozicí č. 3. Jakmile se prstenec dostane do výše zmíněné polohy, začne proces lakování zbylých dvou stěn materiálu. Proces sekundárního lakování je ukončen ve chvíli, kdy se prstenec dostane do pozice č. 4, která je dána součtem rychlostí nástřiků a rychlosti otočení obou trysek v pozici č.2. Po ukončení lakování dojde opět k otočení trysek do původní pozice a následně k napozicování prstence do výchozí pozice č. 1. Pro zajištění možnosti nástřiku dílců s odlišnými rozměry a geometrickou složitostí, je možné pozici a počet trysek měnit.

Jelikož výsledná délka produkovaných profilů se pohybuje v rozmezí 3-9 metrů, tak v průběhu lakování se nelze vyhnout alespoň částečným přestřikům na materiálu, které vedou k nerovnostem a rozdílným tloušťkám laku v celé délce nanášení. Tomu lze předejít nanášením materiálu za konstantních rychlostí. Na obr. 51 je možné vidět, jaký vliv má rychlost nanášení na výsledný povrch. Pokud dojde k otevření aplikátoru před zajištěním pohybu, dojde ke vzniku tzv. „dog bone“ efektu. Na počátku a na konci naneseného pásu vzniknou oblasti s větším množstvím materiálu. Opakem je metoda nanášení „on the fly“ neboli za letu. Zde je aplikátor nejprve uveden do pohybu a až následně po dosažení optimální konstantní rychlosti dojde k jeho otevření. Toto řešení vyžaduje výpočet balistiky nanášení materiálu a otevření ventilu s předstihem. Tím dojde k zajištění uniformní vrstvy materiálu po celé délce. [66]

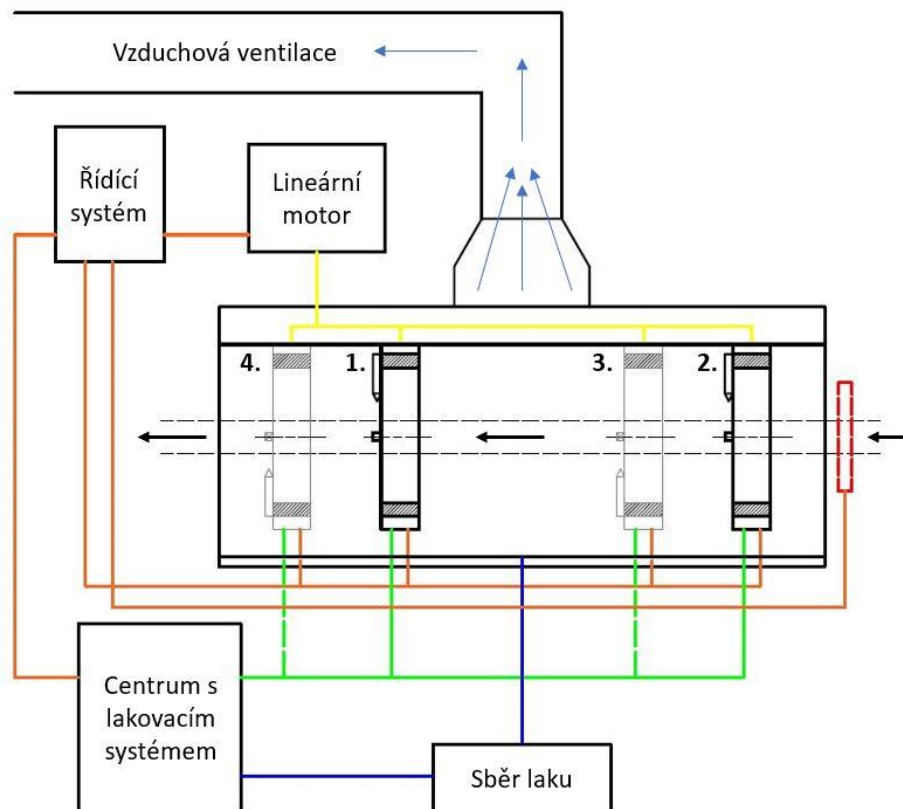


Obr. 51 Vliv metody aplikace materiálu na výsledný povrch [66]

Nástřik barvy je zajištěn pomocí stlačeného vzduchu, který je produkován kompresorem. Ideální volbou je tzv. bezolejový kompresor, který nepřidává další olej do stlačeného vzduchu. Jelikož nasávaný vzduch obsahuje nečistoty ve formě prachových částic, vodní páry a uhlovodíků (olejů), je nutné do systému umístit filtry, které tyto částice odstraní. [67]

Alternativou ke klasickému vzduchovému lakování může být technologie Aircoat od firmy Wagner. Tato technologie zaručuje vysokou rychlost nástřiku téměř bez přestřiků a také vysokou účinnost díky homogennímu rozprášení materiálu [68]. Oproti konvenčním tryskám jsou trysky typu Aircoat doplněny o jemný přídavný proud vzduchu o tlaku 0,5-2,5 bar, který zaručuje lepší kvalitu nástřiku a přesnější regulaci paprsku [69]. Metoda je vhodná pro aplikaci laků, barev, PU, epoxidů, dvousložkových materiálů a také UV materiálu [68]. Trysky od firmy Wagner jsou variabilní v závislosti na šířce paprsku v rozmezí od 55-400 mm. Použitím této technologie je možné ušetřit až 30 % nástřikového materiálu. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady v porovnání s konvenčním vysokotlakým lakováním [70].

V závislosti na sériovosti výroby je nutné zvolit odpovídající velikost a materiál lakovací skříně. Výsledná délka je ovlivněna rychlostí tažení profilu a také požadavkem co nejmenších překryvů při navazujících krocích lakování. Je nutné také počítat i s přidanou délkou, aby nedocházelo k úniku lakovacího systému a nečistot mimo lakovací box. Ve výsledné návrhové kapitole bude odhadnuta nejen délka lakovacího boxu ale i celé technologické části řešené povrchové úpravy. Je nutné zajistit, aby lakovací skříň měla dostatečné mechanické vlastnosti a její užití odpovídalo sériové výrobě. Kovové materiály mají větší odolnost vůči mechanickému poškození. Jejich velikost je však větší v porovnání s plasty. Důvodem je možné ulpívání laku na stěnách lakovacího boxu. Lakovací skříň je taktéž opatřena vzduchovou ventilací, pro odvod částic, které vznikají při procesu lakování.



Obr. 52 Schéma technologického návrhu lakovacího systému.

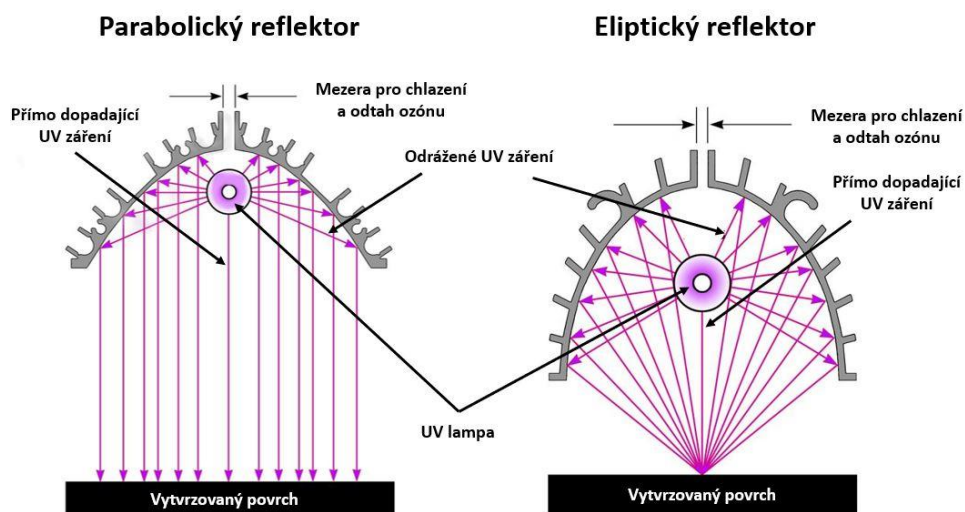
Na obr. 52 je znázorněno technologické schéma navrženého lakovacího systému. Dno lakovací kabiny je nutné přizpůsobit tak, aby fungovalo jako sběr přebytečného laku vzniklého přestříkem a případných odkapů. Odtud je lak sbírán a pomocí čerpadla hnán zpět do centra s lakovacím systémem. Využitím shromážděného laku je zajištěna ekonomičnost systému. Distribuční centrum s lakem je opatřeno vzduchovým kompresorem, které rozhání lak do lakovacích trysek. Řídící systém posílá informace do lineárního motoru, který se stará o pozici lakovacích prstenců. Průchod materiálu je na vstupu snímán 3D světelnou bránou. Celý systém je napojen na hlavní systém linkového provozu. Z něj jsou posílány informace o rychlosti průjezdu materiálu a případných pozastaveních procesu pultruze vlivem čištění nebo odstavení výrobní linky do řídicího systému lakování. Je nutné zajistit, aby k pozastavení výrobního procesu nedošlo v okamžiku lakování.

Vstup a výstup do lakovacího boxu je třeba co možná nejlépe izolovat od okolí, aby nedocházelo k úniku lakovacího systému mimo lakovací zónu. Proto byl měl tvar těchto míst kopírovat tvar povrchově upravovaného materiálu s mírným přídavkem. V poslední řadě je nutné zajistit, aby nedošlo ke kontaminaci lakovaného povrchu před vstupem do vytvrzovacího tunelu. K tomu může sloužit jednoduchá konstrukce z plexiskla, která bude chránit povrch před prachovými částicemi z vnějšího okolí výrobní haly.

2.6.3 UV vytvrzovací tunel

Pro dosažení co možná nejlepších výsledných vlastností laku je nutné zajistit vhodné vytvrzovací podmínky. Na základě provedených testů a dostupných informací byl navržen univerzální vytvrzovací tunel, kde je možné měnit výšku UV lamp v závislosti na typu vyráběného profilu. Konstrukce tunelu a kazet s lampami je opatřena reflektory, které pomáhají směřovat a koncentrovat záření na povrchově upravované plochy. Pro směřování světla na rovinné plochy je vhodné využít parabolický reflektor. Tento typ reflektoru vytváří širokou

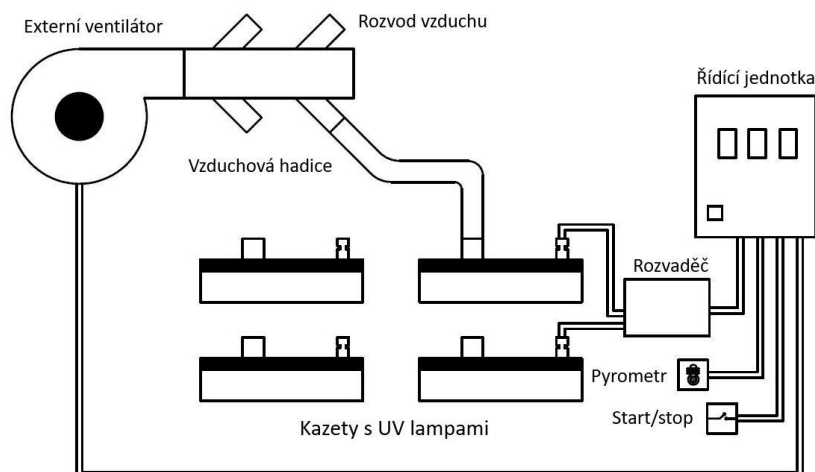
plochu, na kterou odrážené UV záření dopadá. Dochází tak k rovnoměrnému vytvrzování lakované vrstvy v celé šířce ozářené oblasti. Naopak eliptický reflektor světlo směřuje do konkrétního místa a jeho intenzita je tím zvětšována. Na obr. 53 jsou zobrazeny tyto dva základní druhy reflektorů a také výsledný směr dopadajícího záření na vytvrzovaný povrch.



Obr. 53 Parabolický a eliptický reflektor – podle [71].

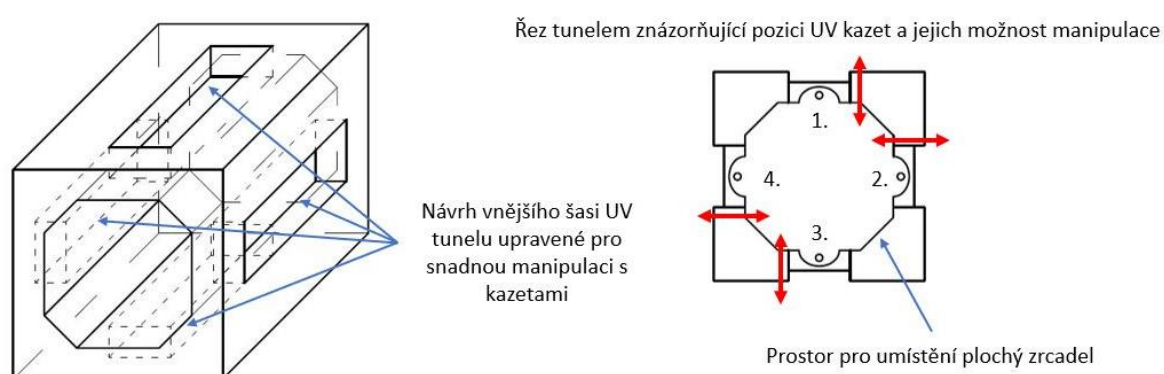
Systém, který je založen na technologii firmy IRT Industrial využívá čtyři kazety s UV lampami, které se vkládají do konstrukce tunelu. Záření pomáhají směřovat parabolické reflektory, které jsou součástí konstrukce. Počet zapojených kazet se liší v závislosti na typu vytvrzovaného profilu. Pokud se jedná o typický plochý profil, kde jsou povrchově upraveny pouze dvě rovinné plochy, tak k vytvrzení mohou být použity jen dvě UV lampy. Pro složitější dílce je nutné zajistit, aby UV záření dopadalo na všechny tvarové plochy. Tato skutečnost je doprovázena zvýšeným počtem zdrojů UV záření.

Na obr. 54 je prakticky znázorněno zapojení kazet s UV lampami do systému. Jednotlivé UV kazety jsou chlazeny pomocí externího ventilátoru s rozvodem vzduchu. Napájení a řízení jednotlivých kazet je řešeno pomocí rozvaděče a řídicí jednotky. Zde je možné monitorovat teplotu jednotlivých kazet. Teplota je měřena pomocí pyrometru. [73] V případě užití ozonových UV lamp je nutné vytvrzovací blok doplnit systémem odsávání, který je napojen na centrální systém. Pro nutné případy je v systému umístěn i externí start/stop systém, který sleduje provoz výrobní linky.



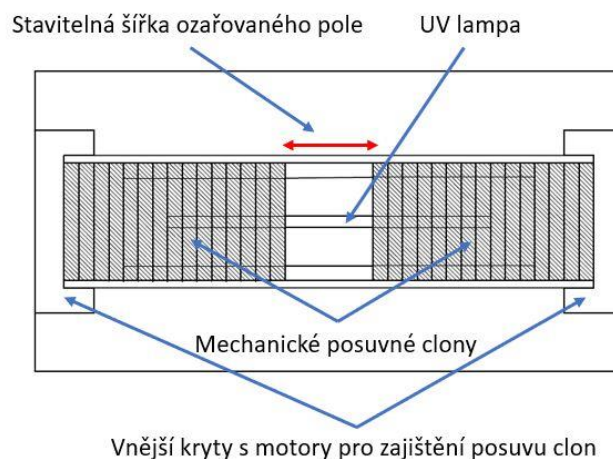
Obr. 54 Schéma zapojení vytvrzovacích UV kazet – podle [73].

Zahájení výrobního procesu pultruze je doprovázeno vznikem prachu a dalších nečistot. UV lampy je nutné proti vznikajícím nečistotám co možná nejvíce chránit. Z toho důvodu byla navržena konstrukce s odnímatelnými kazetami. Vnitřní konstrukce je navržena ve tvaru osmihranu, do kterého se v horizontálním a vertikálním směru vkládají kazety s UV lampami. UV kazety zaručují mechanickou odolnost a tím se předchází poškození vnitřní UV lampy. Na vnitřních šikmých stěnách konstrukce tunelu jsou umístěna rovná zrcadla, která také pomáhají směřování záření. Je nutné zajistit, aby nedocházelo k úniku UV záření mimo vytvrzovací tunel. Tomu lze předejít úpravou výsledné délky tunelu, ale také umístěním odstínění do vstupní části tunelu, které kopíruje tvar povrchově upravovaného dílce. Výstupní část vytvrzovacího tunelu může být opatřena například závěsnou fólií, která odstíní záření a při průchodu materiálu taktéž kopíruje tvar dílce. Jak již bylo zmíněno, výšku jednotlivých UV lamp od vytvrzovaného povrchu lze měnit a tím pádem ovlivňovat intenzitu ozáření během vytvrzování. Do systému je možné zakomponovat také UV integrátor monitorující parametry UV lamp a tím zajistit včasnou výměnu.



Obr. 55 Návrh vytvrzovacího UV tunelu s možností manipulace kazet s UV lampami.

Rychlost procesu pultruze je velmi proměnlivá v závislosti na rozměrech profilu a použité matrici. Z toho důvodu je nutné zajistit ideální podmínky pro vytvrzování vzhledem k rychlosti tažení materiálu, aby nedocházelo k přexponování povrchově upravené plochy. Jelikož rtuťové UV lampy není možné opakovaně v krátkých intervalech zapínat a vypínat, je nutné do systému umístit posuvné clony. Jednotlivé clony jsou poháněny motory, které jsou připojeny na řídicí systém výrobní linky. Odtud jsou do motorů posílány informace o případných zastaveních průjezdu materiálu z důvodu čištění nebo odstavení linky. V těchto případech dojde k úplnému odstínění záření do doby obnovení provozu.



Obr. 56 Návrh systému clon pro redukci ozařovaného pole.

2.7 Varianty provedení technologického celku povrchové úpravy

Jak již bylo uvedeno v kapitole návrhu lakovacího zařízení, firma GDP Koral cílí na povrchovou úpravu konstrukčních profilů s normalizovanými rozměry od 3-9 metrů. V této kapitole budou představeny jednotlivé konstrukční varianty navrženého technologického celku.

Výše navržený systém povrchové úpravy se skládá ze tří hlavních technologických částí. První částí je odprašovací část z ofukových nožů. S ohledem na výsledné rozměry je ideální umístit ofukové nože co možná nejbližší vytvrzovací formě. Je však nutné vzít v potaz prachové částice, které budou proudem vzduchu vířeny směrem k vytvrzovací formě. Toto víření je nutné co nejvíce eliminovat například postupně zužujícím se obalem okolo vytvrzeného dílce s možností odsávání. Firma MOS, která se zabývá výrobou komponentů pro ofukování stlačeným vzduchem, nabízí širokou škálu vzduchových nožů, které jsou dostupné v několika velikostech. Pro tuto konkrétní aplikaci je možné zvolit dvoudílný kruhový vzduchový nůž s pevnou šířkou konstrukce 33 mm.

Oblast za ofukovacími noži je nutné oddělit od vnějšího prostředí, aby prachové částice již na očištěný materiál nedopadaly před vstupem do lakovacího boxu. Řešením může být jednoduchá konstrukce, kterou je možné snadno manipulovat. V praxi se může jednat o jednoduchý tunel z plexiskla, který zajistí ochranu povrchu, ale také umožní obsluhu kontrolu kvality produkovaného dílce.

Rozměry lakovacího boxu je nutné navrhnout tak, aby bylo pokryto co možná nejširší spektrum produkovaných profilů. Trysky musí být snadno manipulovatelné, aby bylo možné měnit jejich vzdálenost od lakovaného povrchu a také přístupné pro případnou výměnu. Větším počtem trysek s variabilní šířkou stříkané oblasti je možné docílit nástřiku i tvarově složitých dílců. Pro výslednou délku lakovacího boxu je klíčová vzdálenost jednotlivých kroků nástřiku a také je nutné vzít v potaz rychlost pultruze materiálu. Ta může být v některých případech až 90 cm/min. Následně je nutné do celkové délky započítat i přídavky, které zajistí ochranu před únikem lakovacího systému do dalších technologických částí. Před vstupem do UV vytvrzovacího tunelu je taktéž nezbytné již povrchově upravený materiál ochránit před nečistotami z okolí. Zde je opět možné využít jednoduché konstrukce, která bude materiál izolovat od vnějších nečistot.

Výsledná délka UV vytvrzovacího tunelu a vzdálenost zdroje záření od povrchu materiálu se odvíjí zejména od typu použitých UV lamp. Za předpokladu využití stejných UV lamp, které byly použity pro testy v kapitolách 2.4 a 2.5 (bezozónové rtuťové UV lampy) a stejných parametrů, které byly použity pro test nástřikem, je postačující šířkou oblasti ozáření 25 mm při rychlosti pultruze 40 cm/min. Pro variantu, kdy je materiál produkován rychlostí 90 cm/min, je nutné tuto oblast zvětšit na 56 mm. Pracovní oblast výše zmíněných UV lamp je pro všechny varianty dostačující a naopak je nutné do systému umístit clony, které celkovou oblast ozáření budou redukovat na požadovanou velikost. Celkovou délku UV tunelu je třeba rozšířit o přídavky, které zabrání úniku zbytkového UV záření mimo vytvrzovací tunel. Doporučená výměna UV lamp uváděná firmou Aeroterm je po cca 2 000 provozních hodinách.

Na základě těchto údajů byly vytvořeny dva návrhy technologického celku povrchových úprav. Největší vliv na celkové rozměry má velikost lakovacího úseku. Ta byla vypočítána pro nejméně příznivou variantu nástřiku, kdy materiál je produkován rychlostí 90 cm/min a pro dvě délky lakovacích kroků. V případech nižší rychlosti pultruze nedochází k zásadním změnám ve výsledných rozměrech. Je zde však prodloužena doba stání v lakovacím úseku.

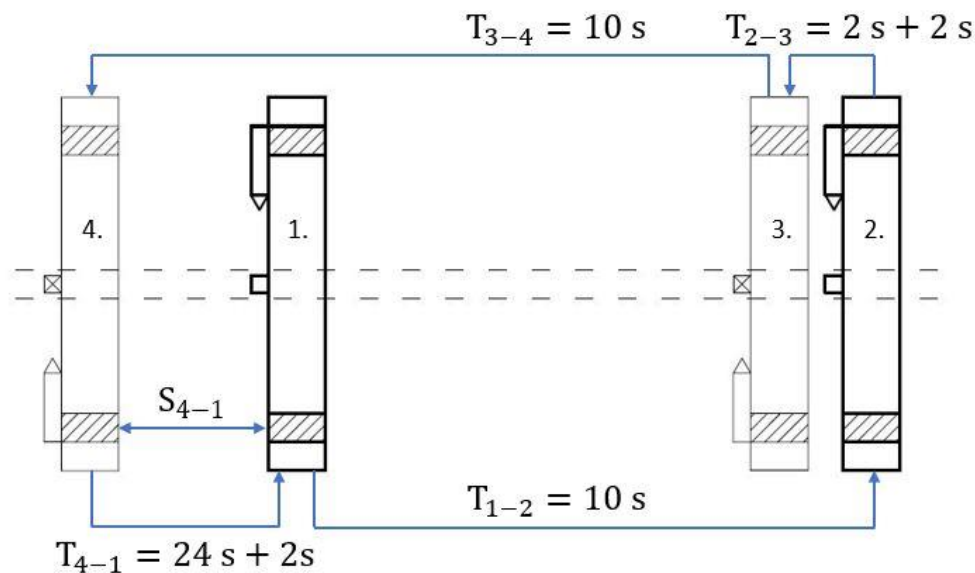
2.7.1 Nástřík s krokem jeden metr

Celkové rozměry technologického úseku jsou dány součtem:

$$L_C = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 \quad (1.3)$$

kde: L_1 – vzdálenost vzduchových nožů od vytvrzovací formy, $L_1 = 600$ [mm],
 L_2 – šířka vzduchových nožů, $L_2 = 33$ [mm],
 L_3 – vzdálenost vzduchových nožů od lakovacího boxu, $L_3 = 300$ [mm],
 L_4 – délka lakovacího boxu [mm],
 L_5 – vzdálenost mezi lakovacím boxem a vytvrzovacím UV tunelem, $L_5 = 200$ mm [mm]
 L_6 – délka vytvrzovacího UV tunelu [mm]

Na základě dostupných informací byla stanovena rychlost nástříku o tloušťce $80 \mu\text{m}$ na 100 mm/s . Rychlost pultruze materiálu je $90 \text{ cm/min} \approx 15 \text{ mm/s}$. Rychlost posuvu prstence s lakovacími tryskami je rovna rychlosti posuvu materiálu. Rychlost otočení trysek v bodech 2 a 4 byla stanovena na 2 s.



Obr. 57 Grafické znázornění časové náročnosti procesu lakování pro délku 1 000 mm.

Výpočet časové náročnosti procesu lakování při délce lakování 1 m je dána vztahem:

$$T_C = T_{1-2} + T_{2-3} + T_{3-4} + T_{4-1} \quad (1.4)$$

kde: $T_{1-2} = 10$ – čas lakování mezi body 1 a 2 [s],
 $T_{2-3} = 2 + 2$ – čas otočení trysek + čas nájezdu do konc. bodu 1. fáze lakování [s],
 $T_{3-4} = 10$ – čas lakování mezi body 3 a 4 [s],
 $T_{4-1} = 24 + 2$ – čas přejezdu z pozice 4 do pozice 1 + čas otočení trysek v pozici 1 [s].

$$T_C = 10 + (2 + 2) + 10 + (24 + 2)$$

$$T_C = 50 \text{ s}$$

Vzdálenost mezi body 4–1 je dána vztahem:

$$S_{4-1} = V_p * T_4 \quad (1.5)$$

kde: V_p – rychlost pultruze ≈ 15 [mm/s],
 T_4 – čas přejezdu z pozice 4 do pozice 1 ≈ 24 [s].

$$S_{4-1} = 15 \cdot 24$$

$$S_{4-1} = 360 \text{ mm}$$

Výpočet doby stání před zahájením nového procesu lakování je dán vztahem:

$$T_R = T_P - T_C \quad (1.6)$$

kde: T_P – čas průjezdu nalakovaného dílce o délce 1 m [s].

$$T_P = \frac{l_1}{V_p} \quad (1.7)$$

kde: l_1 – nástrík o délce 1000 mm [mm].

$$T_P = \frac{1\,000}{15} \cong 66,7 \text{ s}$$

$$T_R = 66,7 - 50 = 16,7 \text{ s}$$

Délka lakovacího boxu je dána vztahem:

$$L_4 = l_1 + S_{4-1} + l_{p1} \quad (1.8)$$

kde: $l_{p1} = 340$ – odhadovaný přírůstek na rozměry lakovacího boxu [mm].

$$L_4 = 1\,000 + 360 + 340$$

$$L_4 = 1\,700 \text{ mm}$$

Délka vytvrzovacího tunelu je dána vztahem:

$$L_6 = l_{lampry} + l_{p2} \quad (1.9)$$

kde: $l_{lampry} = 200$ – délkový rozměr použitých UV lamp pro vytvrzování [mm],

$l_{p2} = 200$ – odhadovaný přírůstek na rozměry vytvrzovacího UV tunelu [mm].

$$L_6 = 200 + 200$$

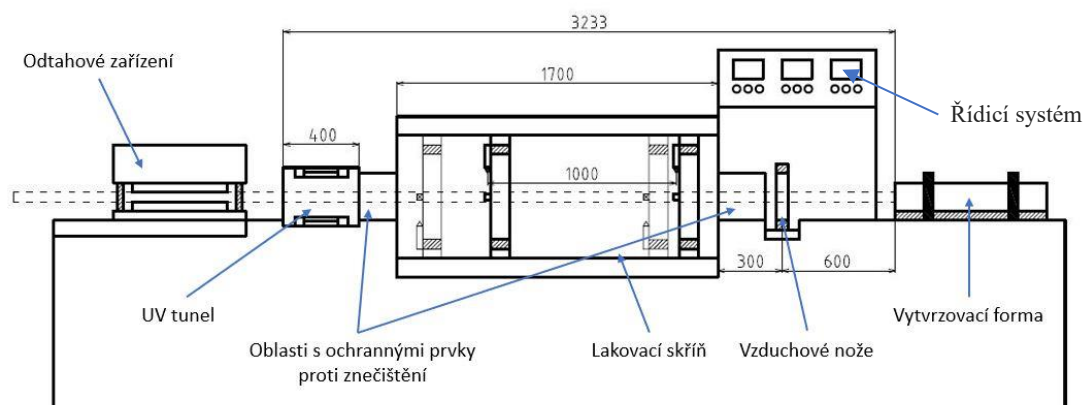
$$L_6 = 400 \text{ mm}$$

Výsledné rozměry technologického úseku:

$$L_C = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6$$

$$L_C = 600 + 33 + 300 + 1\,700 + 200 + 400$$

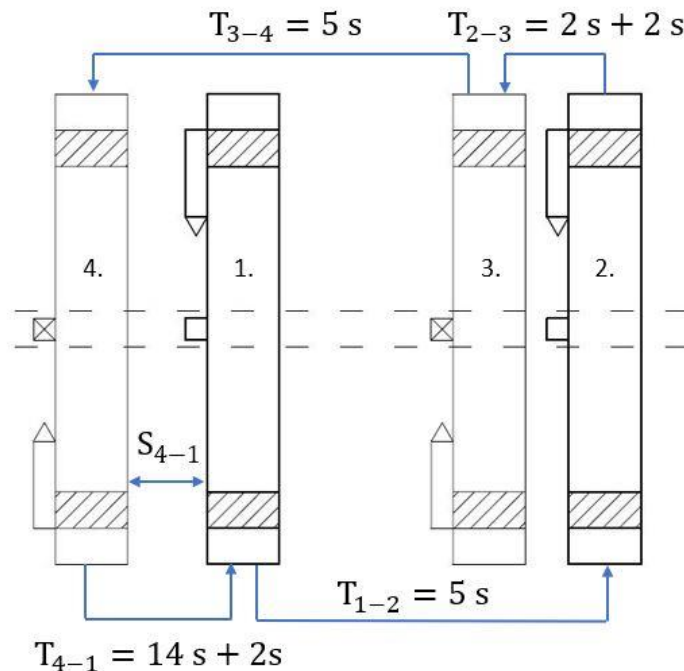
$$L_C = 3\,233 \text{ mm} \cong 3,2 \text{ m}$$



Obr. 58 Rozměry navržené technické části povrchové úpravy s krokem lakování 1 000 mm.

2.7.2 Nástřik s krokem půl metru

V porovnání s předchozí variantou je v tomto případě rozdílná pouze délka lakovacího boxu, všechny ostatní vstupní hodnoty zůstávají stejné. Opět je počítáno s rychlostí pultruze 90 cm/min ≈ 15 mm/s. Rychlost lakování, posuvu prstence a rychlost otočení trysek je taktéž stejná.



Obr. 59 Grafické znázornění časové náročnosti procesu lakování pro délku 500 mm.

$$T_C = T_{1-2} + T_{2-3} + T_{3-4} + T_{4-1}$$

$$T_C = 5 + (2 + 2) + 5 + (14 + 2)$$

$$T_C = 30 \text{ s}$$

Vzdálenost mezi body 4–1 je dána vztahem:

$$S_{4-1} = V_p * T_4$$

$$S_{4-1} = 15 * 14 = 210 \text{ mm}$$

Výpočet doby stání před zahájením nového procesu lakování je dán vztahem:

$$T_R = T_P - T_C$$

$$T_P = \frac{l_2}{V_p} \quad (2.0)$$

kde: l_2 – nástřik o délce 500 mm [mm].

$$T_P = \frac{500}{15} \cong 33,3 \text{ s}$$

$$T_R = 33,3 - 30 = 3,3 \text{ s}$$

Délka lakovacího boxu je dána vztahem:

$$L_4 = l_2 + S_{4-1} + l_{p1} \quad (2.1)$$

$$L_4 = 500 + 210 + 340$$

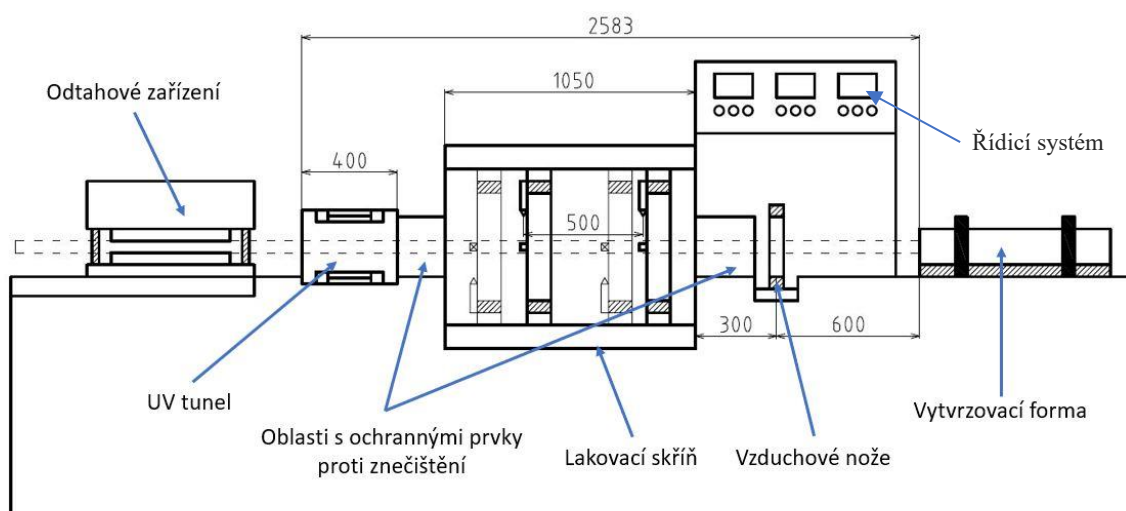
$$L_4 = 1\,050\text{ mm}$$

Celkové rozměry technologického úseku jsou dány součtem:

$$L_C = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6$$

$$L_C = 600 + 33 + 300 + 1050 + 200 + 400$$

$$L_C = 2\,583\text{ mm} \cong 2,6\text{ m}$$



Obr. 60 Rozměry navržené technické části povrchové úpravy s krokem lakování 500 mm.

Tab. 15 Zhodnocení navržených variant technologických celků povrchové úpravy.

	Krok lakování 1 000 mm	Krok lakování 500 mm.
Výhody	Snížení počtu přestřiků na povrchu jednoho dílce vlivem delšího kroku lakování	Prostorová úspora, se kterou souvisí i výsledná délka výrobní linky
Nevýhody	Delší doba stání při lakování Prodloužení výrobní linky	Dvojnásobný počet přestřiků na povrchu materiálu v porovnání s krokem lakování po 1000 mm

Při volbě technologického celku s delším krokem lakování je nutné počítat s prodloužením výrobní linky. Zahájení pultruzní výroby je doprovázeno protažením skelných vláken přes celou délku až do odtahových zařízení. S prodloužením výrobní linky je tedy spojena i rostoucí spotřeba materiálu, která je nutná pro zahájení výroby, ale také zmenšení manipulačního prostoru ve výrobní hale. Výhodou je naopak zmenšení počtu přestřiků na povrchu materiálu po jednotlivých krocích lakování. Volba varianty se zkráceným krokem lakování vede k redukci rozměrů technologického úseku. Na základě výše provedených výpočtů bylo dosaženo zmenšení rozměrů úseku povrchové úpravy o 600 mm. Výše provedené výpočty jsou doprovázeny množstvím přídavek, které mohou být následně upravovány dle konkrétních požadavků využitých technologií. Tím může být následně ovlivněna reálná délka technologického úseku povrchové úpravy.

3 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro výše navržený technologický úsek povrchové úpravy bylo provedeno technicko-ekonomické hodnocení se zaměřením na úsporu nákladů na materiál (lakovací systém) a také snížení nákladů na zaměstnance ve spojení s navrženým automatizovaným řešením. Výpočet nákladů na materiál vychází z dat společnosti GALATEK a.s., které jsou uvedeny v tab. 16. Pro výpočet byl využitý profil s čtvercovým půdorysem o rozměrech 50x50 mm s délkou 6 m.

Tab. 16 Porovnání provozních nákladů pro vybrané nátěrové systémy – podle [51].

Materiálové náklady	Tradiční lakování	UV lakování
Cena laku - P_{lak} [€/kg]	6,50	16,20
Obsah pevných částic (ve směsi) - $O_{suš}$ [%]	40	100
Hustota (lak ve směsi) [kg/l]	0,95	1,10
Hustota (při naředění) [kg/l]	0,89	
Přestřík mimo materiál - M_{odpad} [%]	30 [74]	3
Emise VOC [kg/rok]	32 367	0
Doba sušení [min]	20	0,07
Chlazení [min]	10	

Reálná úspora množství laku a s tím spojených nákladů na lakování profilu o délce 6 m.

a) Tradiční lakování

Výpočet plochy pro lakování:

$$S_{Dílce} = (50 \times 6000) \times 4 = 1\,200\,000 \text{ mm}^2 = 1,2 \text{ m}^2$$

Výška mokré vrstvy laku (H_M) je dána vztahem:

$$H_M = \frac{H_S}{O_{suš}} \quad (2.2)$$

kde: $H_S = 80 \text{ } \mu\text{m} = 0,08 \text{ mm}$ – výška suché vrstvy laku
 $O_{suš} = 40 \text{ } \%$ - podíl sušiny v laku

$$H_M = \frac{0,08}{0,4} = 0,2 \text{ mm}$$

Teoretická spotřeba laku ($V_{teoretická}$):

$$V_{teoretická} = S_{Dílce} \times H_M = 1\,200\,000 \times 0,2 = 240\,000 \text{ mm}^3 = 0,24 \text{ l}$$

Reálná spotřeba laku ($V_{reálná}$):

$$V_{reálná} = \frac{V_{teoretická}}{M_{odpad}} \quad (2.3)$$

kde: $M_{odpad} = 30 \text{ } \%$ - odpad vznikající přestříky

$$V_{reálná} = \frac{0,24}{0,7} \cong 0,343 \text{ l}$$

Materiálové náklady (P) na lakování daného dílce tradičním způsobem lakování:

$$P = V_{reálná} \times P_{lak} \quad (2.4)$$

kde: $P_{lak} = 6,5 \text{ €/l}$ – cena laku za litr

$$P = 0,343 \times 6,5 = 2,23 \text{ €/kus}$$

b) UV lakování

$$S_{Dílce} = (50 \times 6\,000) \times 4 = 1\,200\,000 \text{ mm}^2 = 1,2 \text{ m}^2$$

Výška mokré vrstvy laku:

$$H_M = \frac{H_S}{O_{suš}}$$

kde: $H_S = 80 \text{ } \mu\text{m} = 0,08 \text{ mm}$ – výška suché vrstvy laku
 $O_{suš} = 100 \text{ %}$ - podíl sušiny v laku

$$H_M = \frac{0,08}{1} = 0,08 \text{ mm}$$

Teoretická spotřeba laku:

$$V_{teoretická} = S_{Dílce} \times H_M = 1\,200\,000 \times 0,08 = 96\,000 \text{ mm}^3 = 0,096 \text{ l}$$

Reálná spotřeba laku:

$$V_{reálná} = \frac{V_{teoretická}}{M_{odpad}}$$

kde: $M_{odpad} = 3 \text{ %}$ - odpad vznikající přestřiky

$$V_{reálná} = \frac{0,096}{0,97} \cong 0,099 \text{ l}$$

Materiálové náklady na lakování daného dílce UV lakováním:

$$P = V_{reálná} \times P_{UVlak}$$

kde: $P_{UVlak} = 16,2 \text{ €/l}$ – cena laku za litr

$$P = 0,099 \times 16,2 = 1,60 \text{ €/kus}$$

Použitím technologie UV lakování dojde ke snížení ceny povrchové úpravy o 0,63 €/kus, což při aktuálním kurzu ČNB k datu 16. 5. 2022 odpovídá 15,6 Kč/kus, tato částka představuje 28% redukci nákladů. Hlavní roli zde hraje podíl sušiny v lakovacím systému. Tradiční laky obsahují kolem 40 % sušiny, proto je nutné počítat s vyšší spotřebou laku. Ačkoli jsou pořizovací náklady UV laku mnohem vyšší v porovnání s tradičním lakovacím systémem, stále se jedná o ekonomicky výhodnější variantu, jelikož přestřiky vzniklé během procesu UV lakování je možné recyklovat a opětovně využít.

Výpočet úspor nákladů spojených se zaměstnanci:

Výpočet úspor spočívá v porovnání personálních nákladů, které by musela firma vynaložit za předpokladu, že by nadále využívala stávající systém ručního lakování v porovnání s navrhnutým automatizovaným řešením. Cílem do budoucna je lakovat 100 % výroby na dané automatizované lince v tří směnném provozu.

Výsledná vyprodukovaná délka materiálu (L_{celkem}) za 8 hod. směnu při rychlosti pultruze 40 cm/min:

$$L_{celkem} = 0,4 \times 60 \times 8 = 192 \text{ m}$$

Počet vyrobených šesti metrových profilů za směnu:

$$X_{profilů} = 192 \div 6 = 32$$

Kapacita výrobní linky byla stanovena na 32 profilů za 8 hod. směnu. Stávající rozměry firemní lakovací kabiny umožňují lakovat celou kapacitu výrobní linky za směnu. Aktuálně lakovna zaměstnává jednoho lakýrníka a jednoho skladníka, který je současně jeho pomocníkem. Implementací automatizovaného systému lakování do výrobní linky lze zredukovat aktuální počet zaměstnanců. Již není nutné zaměstnávat odborného lakýrníka. Pro obsluhu automatizovaného systému lakování stačí pouze čtvrtinové časové vytížení skladníka. Zde se jedná zejména o kontrolu systému a doplňování lakovacího systému.

Roční úspora při automatizovaném lakování:

- Lakýrník: $1 \rightarrow 0$
- Skladník: $1 \rightarrow 0,25$

Průměrná hrubá mzda lakýrníka: $HM_L = 40\,000 \text{ Kč/měsíc}$

Průměrná hrubá mzda skladníka: $HM_S = 29\,000 \text{ Kč/měsíc}$

Výpočet nákladů zaměstnavatele na zaměstnance ($N_{\text{zaměstnanec}}$) spojené s odvody sociálního a zdravotního pojištění a dalšími náklady spojenými se zaměstnáváním pracovníka:

$$N_{\text{zaměstnanec}} = HM \times 1,338 \times N_{\text{ostatní}} \quad (2.5)$$

kde: HM – hrubá měsíční mzda daného pracovníka

kde: $N_{\text{ostatní}} = 1,6$ – další náklady spojené se zaměstnáváním pracovníka, režie firmy

$$N_{\text{lakýrník}} = 40\,000 \times 1,338 \times 1,6 = 85\,632 \text{ Kč/měsíc}$$

$$N_{\text{skladník}} = 29\,000 \times 1,338 \times 1,6 = 62\,083 \text{ Kč/měsíc}$$

Následující výpočet vychází ze stávající praxe, kdy lakýrník je schopen za směnu nalakovat 32 kusů profilů o délce 6 metrů. V případě požadavku na lakování celkové kapacity výrobní linky při tří směnném provozu (tj. 96 kusů), je nutné zaměstnat další zaměstnance.

Výpočet roční úspory nákladů na zaměstnance při využití automatizovaného řešení lakování:

$$N_{\text{zaměstnanci}} = \{[N_{\text{lakýrník}} + (N_{\text{skladník}} \times 0,75)] \times 12\} \quad (2.6)$$

$$N_{\text{zaměstnanci}} = \{[85\,632 + (62\,083 \times 0,75)] \times 12\} = 1\,586\,331 \text{ Kč/rok}$$

Roční náklady na lakování v nepřetržitém (tří směnném) provozu za stejných podmínek:

$$N_{\text{zaměstnanci-3směny}} = N_{\text{zaměstnanci}} \times T_K \times \text{počet směn} \times T_p \quad (2.7)$$

kde: $N_{\text{zaměstnanci}}$ – náklady na zaměstnance

$T_K = \frac{365}{225}$ – koef. pro roční čas. fond výrobní linky a pro roční čas. fond zaměstnanců

počet směn = 3

$T_p = 90\%$ – využitelný časový fond výrobní linky za rok

$$N_{\text{zaměstnanci-3směny}} = 1\,586\,331 \times \frac{365}{225} \times 3 \times 0,9 = 6\,948\,130 \text{ Kč/rok}$$

Výpočet úspory nákladů na materiál za rok v nepřetržitém (tří směnném) provozu:

$$N_{\text{lak-3směny}} = X_{\text{profilů}} \times \text{počet směn} \times \text{počet dní v roce} \times \frac{\text{úspora}}{\text{kus}} \times T_p \quad (2.8)$$

$$N_{\text{lak-3směny}} = 32 \times 3 \times 365 \times 15,6 \times 0,9 = 491\,962 \text{ Kč/rok}$$

Celkové úspory za rok v nepřetržitém (tří směnném) provozu:

$$N_{3směny} = N_{zaměstnanci-3směny} + N_{lak-3směny} \quad (2.9)$$

$$N_{3směny} = 6\,948\,130 + 491\,962 = 7\,440\,092 \text{ Kč/rok}$$

Z ekonomického hlediska technologie UV lakování zahrnuje množství úspor, které mají významný dopad na náklady spojené s povrchovou úpravou v porovnání s klasickými nátěrovými systémy. Mezi tyto úspory lze zařadit například: [51]

- vysoký obsah sušiny, se kterým souvisí vyšší vydatnost laku a vysoká hospodárnost
- snadná možnost recyklace přestříků laku
- vytvrzení během několika sekund
- není nutná vytěkáací zóna a sušení za zvýšené teploty
- nižší energetická náročnost v porovnání s tradičním lakováním

ZÁVĚR

V průmyslových materiálových aplikacích jsou kladeny stále vyšší požadavky na mechanické vlastnosti, ale také výslednou hmotnost voleného materiálu. Řešení představují kompozitní materiály. Jejich výsledná hmotnost a mechanické vlastnosti jsou ovlivněny především materiálovým složením vláken a matrice. Vlastnosti jednotlivých složek určují výsledné vlastnosti materiálového celku. V závislosti na druhu aplikace jsou pak voleny konkrétní kompozitní materiály. Jako nejznámější a nejrozšířenější lze označit uhlíkové a skelné kompozity. Ty nacházejí uplatnění v letectví, automobilovém průmyslu a dalších odvětvích. Jejich aplikace je omezena zejména teplotou vnějšího prostředí. Při vysokých teplotách dochází k vzniku trhlin a selhání materiálu. Řešením mohou být speciální keramické povlaky, které chrání materiál vůči vnějším vlivům.

V oblasti výroby existuje široké množství metod výroby kompozitů. Typ zvolené výroby má dopad na výsledné vlastnosti materiálu, ale také na jejich cenu. Skelné kompozity je možné vyrábět metodou pultruze. Tato metoda je považována za nejběžnější a je složena ze základních částí jako: odvíjení, impregnace, vytvrzování, tah a řezání. Jedná se o plně automatizovaný proces, který je v porovnání s ostatními metodami výroby kompozitů velmi ekonomický. Vlákná jsou kontinuálně odvíjena, smáčena v pryskyřici a tažena přes vytvrzovací formu. Tím dochází k redukci nákladů, jelikož tato metoda nevyžaduje přířezy skelných vláken.

Výsledný povrch kompozitního materiálu je možné obrábět, ale také povrchově upravovat a tím zlepšovat povrchové vlastnosti. Mezi metody úpravy povrchu lze zařadit úpravu plazmatem, tryskání, abrazi, leptání, případně další chemické úpravy. Tyto metody mají především zlepšit schopnost adheze základního materiálu vůči lepidlům, barvám nebo lakovacím systémům.

Kompozitní materiály jsou velmi často užívány v prostředích, kde jsou vystaveny vnějším vlivům, které mají negativní dopad na jejich mechanické vlastnosti, životnost a výsledný vzhled. Mezi tyto vlivy lze zařadit mechanické poškození, korozi nebo působení UV záření. Řešením mohou být povrchové úpravy, které zajistí odolnost vůči těmto vlivům. Lakování UV vytvrditelnými laky je metodou, která nachází uplatnění na širokém spektru podkladových materiálů. Jedná se o metodu, která je technologicky nenáročná a zároveň ekonomická. Mezi nejpoužívanější patří 100% UV laky, které působením UV záření vytváří účinnou ochrannou vrstvu na povrchu materiálu.

V praktické části, která byla vytvořena ve spolupráci s firmou GDP Koral s. r. o., byla ověřena možnost aplikace vyvíjeného UV lakovacího systému od firmy Synpo, a. s. Testy byly provedeny na různých typech podkladových materiálů a také byla prověřena možnost vytvrzení za výrobních podmínek. Na základě testů byly stanoveny ideální parametry pro nanášení, ale také pro vytvrzování daného lakovacího systému. Na jednotlivých vzorcích byly následně provedeny mechanické testy, které měly ověřit schopnost adheze základního materiálu vůči laku. Experimentální měření hodnot potvrdilo, že povrch materiálu není nutné před lakováním dále mechanicky, případně chemicky upravovat a schopnost adheze při dodržení podmínek vytvrzování je dostatečná. Povrch materiálu je nutné pouze očistit od prachových částic, které mají vliv na adhezní schopnost a také výsledný vzhled povrchově upraveného materiálu. Vstupními parametry jsou v tomto případě zejména: výkon UV lampy, vzdálenost zdroje záření od vytvrzovaného povrchu, metoda nanesení a výška mokré vrstvy laku. Při testech byla odhalena změna pigmentu laku po vytvrzení, která přetrvávala i při zajištění ideálních vytvrzovacích podmínek. Je proto nutné vyvíjený lakovací systém prověřit a případně upravit jeho pigment v laboratorních podmínkách.

S ohledem na výsledky testů, vstupní parametry a rozměrové požadavky byl navržen technologický úsek povrchové úpravy. Úsek je složen ze tří hlavních částí, mezi které patří odprašovací stroj, lakovací box a UV vytvrzovací tunel. Pro technologický ofuk byla zvolena

varianta vzduchových nožů, které mají v porovnání s ostatními variantami průmyslového ofuku velmi nízké provozní i pořizovací náklady. Jelikož materiál je kontinuálně tažen výrobní linkou při nízkých rychlostech, bylo nutné upravit systém nanášení laku. Zde byl navržen automatizovaný systém lakování, který je napojený na centrální řídicí systém linkového provozu. Tím je zajištěno nanesení kontinuální vrstvy laku během lakovacího cyklu. Pro daný typ dílce byl navržen tvar vytvrzovacího tunelu s požadovaným počtem UV lamp. Do systému byly zakomponovány clony, pomocí kterých je možné upravovat šířku ozářené oblasti během procesu vytvrzování a tím zajistit optimální čas vytvrzování.

Byly vytvořeny dvě varianty technologického celku povrchové úpravy s ohledem na výsledné rozměrové požadavky. Navržené varianty technologických úseků se liší délkou kroku lakování. Pro variantu s krokem lakování jednoho metru byla celková délka úseku odhadnuta na 3,2 m. Ve variantě s polovičním krokem lakování byly omezeny rozměry lakovacího boxu a výsledná délka technologického úseku byla tím pádem také zredukována. V tomto případě na 2,6 m. Výhodou lakování s delším krokem je snížení počtu přestříků na materiálu. Nevýhodou jsou delší časové prodlevy mezi jednotlivými lakovacími cykly a výsledné prodloužení výrobní linky, se kterou je spojeno omezení prostoru ve výrobní hale, nutného pro manipulaci s hotovými dílci.

Z ekonomického hlediska je technologie lakování UV vytvrditelnými laky výhodnější ve srovnání s tradičním způsobem lakování. Vysoký obsah sušiny v těchto lacích výrazně snižuje potřebné množství laku pro lakování. Možnost recyklace přestříků a nižší energetická náročnost jsou z ekonomického hlediska také velmi důležitými parametry. Výpočtem bylo ověřeno, že daná metodika přinesla až 28% snížení nákladů na lakování zvoleného dílce. Za daných předpokladů vstupujících do výpočtu nákladů na zaměstnance a materiál byly vyčísleny celkové úspory za rok při třísměnném provozu. Hodnota ročních úspor byla vyčíslena na cca 7,5 mil. korun.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials: Science and Engineering* [online]. 4rd ed. Birmingham (Alabama): Springer, Cham, 2019, 560 s. [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-3-030-28982-9. 978-3-030-28983-6. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-28983-6>
2. HOLUŠA, Radim, Jiří HUSÁK, Jan SKOUPIL a Ivan BERÁNEK. Možnosti přípravy polyesterových kompozitů s vyšší přidanou hodnotou v oblasti povrchových vlastností. In: *Synpo: Aplikovaný výzkum, zkušebnictví a výroba* [online]. Pardubice, 2017 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.synpo.cz/publikacni-cinnost>
3. PARAJULI, Sandesh. Recent advances in the development of aerospace materials. In: *Cherrubics: Understanding Research Papers Together* [online]. c2022, 27 February 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://cherrubics.com/recent-advances-in-the-development-of-aerospace-materials/>
4. SINGH, Girendra Pal. Glass fibre as a reinforcing material for composites. In: *Technical Textile.net* [online]. Ahmadábád: Fibre2Fashion Pvt., c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.technicaltextile.net/articles/glass-fibre-as-a-reinforcing-material-for-composites-8113>
5. Fiber-Reinforced Phthalonitrile Composites. DERRADJI, Mehdi, Jun WANG a Wenbin LIU. *Phthalonitrile Resins and Composites: Properties and Applications* [online]. William Andrew, 2018, s. 241-294 [cit. 2022-04-19]. ISBN 9780128129678. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128129661000056>
6. Additives for Plastics. SHRIVASTAVA, Anshuman. *Introduction to plastics engineering: A volume in Plastics Design Library* [online]. Cambridge, MA: William Andrew, [2018], s. 111-141 [cit. 2022-04-19]. PDL handbook series. ISBN 978-0-323-39500-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323395007000046>
7. a , ed. Composites: Overview. BASSANI, Franco, Gerald L. LIEDL a Peter WYDER. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* [online]. Academic Press, [2005], s. 192-208 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-0-12-369401-0. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123694019005453#!>
8. FOLTZ, Tom. Boron fiber: The original high-performance fiber: History and future developments for high-performance boron fiber. In: *CompositesWorld:Delivering the Global Composites Market* [online]. Gardner Business Media, c2022, 26 Jun 2020 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/boron-fiber-the-original-high-performance-fiber>
9. Boron Fiber. In: *Specialty Materials: Manufacturer of Boron & Silicon Carbide Fiber Products* [online]. Lowell [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.specmaterials.com/boron-fiber-test-page>
10. BHATT, Pooja a Alka GOE. Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use. *Material Science Research India: An International Peer Reviewed Research Journal* [online]. Bhópál, 9 Jun 2017, 14(1) [cit. 2022-04-19]. ISSN 2394-0565. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.13005/msri/140109>
11. Laser cutting of carbon fiber composite materials. In: *Elen: The future in a beam* [online]. Florencie [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://elenlaser.com/blog/laser-cutting-carbon-fiber-composite-materials.html>

12. BASTURK, Suat Bahar, YALAMAC, Emre a Mucahit SUTCU, ed. Ceramic fibers. SEYDIBEYOGLU, M. Ozgur, Amar MOHANTY a Manjusri MISRA. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* [online]. Cambridge, MA: Woodhead Publishing, [2017], s. 187-207 [cit. 2022-04-19]. ISBN 9780081018712. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/fiber-technology-for-fiber-reinforced-composites/seydibeyoglu/978-0-08-101871-2>
13. Proces SOL-GEL. In: *Enpedie: Portál na podporu veřejné informovanosti v oblasti jaderné energetiky* [online]. 17. 12. 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Proces_SOL-GEL
14. Composite Matrix Materials. In: *AZO Materials: Material Science* [online]. Manchester (UK): AZoNetwork, c2000-2022, 9 August 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9814>
15. SHARMA, Arun Kumar, Rakesh BHANDARI, Amit AHERWAR a Rūta RIMAŠAUSKIENĖ. Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings* [online]. United Kingdom: Elsevier, 2020, 29 November 2019, 21(3), 1559-1562 [cit. 2022-04-19]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.086>
16. FELLET, Melissae a Wolfgang ROSSNER. Ceramic-matrix composites take the heat. *MRS Bulletin* [online]. Cambridge University Press, 2015, 40(11), 916-918 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0883-7694. Dostupné z: doi:10.1557/mrs.2015.283
17. VESPERINAS, Alejandro Simó. The Future Of High-Temperature Materials For Gas Turbines. In: *Matmatch* [online]. Matmatch, c2022, 13 August 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://matmatch.com/resources/blog/the-future-of-high-temperature-materials-for-gas-turbines/>
18. JOHNSON, Todd. Termoplastické vs. termosetové pryskyřice. In: *EFerrit* [online]. c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://cs.eferrit.com/termoplasticke-vs-termosetove-pryskyrice/>
19. Difference between chains in thermoplastics and thermosets. In: *Coventive Composites* [online]. c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://coventivecomposites.com/explainers/types-of-polymer-matrix/>
20. Polymer Matrix Composites. YAO, Jialiang, Zhigang ZHOU a Hongzhuan ZHOU. *Highway Engineering Composite Material and Its Application* [online]. Singapore: Springer, [2019], s. 113-137 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-981-13-6067-1. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6068-8_5#citeas
21. HAHN, Filip. *Kompozity na bázi přírodních vláken* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63344. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Radek Přikryl.
22. RAY, Bankim Chandra a Dinesh RATHORE. Advances in Colloid and Interface Science: Durability and integrity studies of environmentally conditioned interfaces in fibrous polymeric composites: Critical concepts and comments. In: *Science Direct: Science, health and medical journals, full text articles and books* [online]. Elsevier, c2022, 2014 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868614000025#f0005>
23. Povrchové napětí nepodceňujte. In: *Ekobal: Balící stroje a obalový materiál, pakovací lis* [online]. Praha, 27. 3. 2019 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.ekobal.cz/o-nas/aktuality/povrchove-napeti-nepodcenujte>

24. HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29171. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Simona Fialová.
25. BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠÍŠKOVÁ. Úhel smáčení. In: *Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT Praha* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005, 2005 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html
26. ROGERS, Chris. Composite Manufacturing Methods. In: *Explore Composites: How to build with composite materials: design, tooling, materials, laminating and more* [online]. c2022, 1. 9. 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://explorecomposites.com/articles/design-for-composites/basics-manufacturing-methods/>
27. MOHAPATRA, Subhasish. What is the wet layup process in a composite?: Wet/Hand Lay-Up Process. In: *Quora* [online]. Quora, c2022, 2019 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-wet-layup-process-in-a-composite>
28. ABDUROHMAN, Kosim a Mabe SIAHAAN. Journal of Physics Conference Series: https://www.researchgate.net/publication/325017393_Effect_of_mesh-peel_ply_variation_on_mechanical_properties_of_E-glas_composite_by_infusion_vacuum_method. In: *Research Gate: Find and share research* [online]. ResearchGate, c2008-2022, April 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Normal-procedure-for-vacuum-infusion-process-9_fig1_325017393
29. ROGERS, Chris. Introduction to Vacuum Infusion. In: *Explore Composites: How to build with composite materials: design, tooling, materials, laminating and more* [online]. c2022, 25. 1. 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://explorecomposites.com/articles/lamination/introduction-to-vacuum-infusion/>
30. A Brief Look Inside the Prepreg Manufacturing Process. In: *Composites One: Top Composite material supplier in North America* [online]. Schaumburg: Composites One, c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/a-brief-look-inside-the-prepreg-manufacturing-process/>
31. AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastu* [online]. publi.cz, 2015 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-80-88058-75-5. Dostupné z: <https://publi.cz/epubli/book/183-technologie-zpracovani-plastu>
32. Resin Transfer Molding (RTM). In: *Molded Fiber Glass Companies: FRP Composites Supplier* [online]. Ashtabula, c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.moldedfiberglass.com/processes/resin-transfer/>
33. Pultrusion. WANG, Ru-Min, Shui-Rong ZHENG a Ya-Ping ZHENG. *Polymer Matrix Composites and Technology* [online]. Woodhead Publishing, 2011, s. 296-298 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-0-85709-221-2. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpPMCT0003/toc?issue_id=kpPMCT0003&hierarchy=undefined
34. Filament Winding: A Cost-effective Composites Process. In: *The Composites Hub* [online]. Owens Corning, c1996-2022, 6. 3. 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.thecompositeshub-india.com/filament-winding--a-cost-effective-composites-process>

35. V., Carlota. The Complete Guide to 3D Printing Composites. In: *3D Printing & 3D Printers* [online]. 3Dnatives, c2022, 28 January 2020 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/complete-guide-3d-printing-composites-280120204/#>
36. O'NEAL, Bridget. Improving Mechanical Properties of 3D Printing with Continuous Carbon Fiber Shape Memory Composites. In: *3Dprint.com: The voice of 3D Printing* [online]. 3DR Holding, c2016-2022, 18 July 2019 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://3dprint.com/249170/improving-mechanical-properties-of-3d-printing-with-continuous-carbon-fiber-shape-memory-composites/>
37. WINGFIELD, J.R.J. Treatment of composite surfaces for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. Elsevier, July 1993, **13**(3), 151-156 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0143-7496\(93\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0143-7496(93)90036-9)
38. Can surface preparation improve bond strength when adhesive bonding composites?. In: *TWI Global: Joining Innovation with Expertise* [online]. Cambridge, UK: TWI, c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-can-surface-preparation-improve-bond-strength-when-adhesive-bonding-composites>
39. MARQUES, Ana, Alexandra MOCANU, Nataša TOMIĆ, et al. Review on Adhesives and Surface Treatments for Structural Applications: Recent Developments on Sustainability and Implementation for Metal and Composite Substrates. *Materials* [online]. 2020, **13**(24), 1-43 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13245590
40. SID AHMED AHMEDOU, Saleck, Rouaud OLIVIER a Michel HAVET. Electrohydrodynamic enhancement of heat and mass transfer in food processes. In: *Research Gate: Find and share research* [online]. ResearchGate, c2008-2022, January 2007 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-a-corona-discharge-pin-plate-configuration_fig1_230815647
41. Plazma – efektivní nástroj pro povrchové úpravy. In: *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 5. listopadu 2014 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/plazma-efektivni-nastroj-pro-povrchove-upravy_27718.html
42. KLÍMA, Miloš, Eva KEDROŇOVÁ, Maja GAŠIĆ, Miroslava BANÝROVÁ, František VOJÍŘ a Vladimír ŠPAČEK. Plazmová předúprava povrchu - povrchová energie versus adheze. *MM Průmyslové spektrum: Technologie, stroje a řezné nástroje v obrábění. Komponenty obráběcích strojů, nekonvenční technologie obrábění*. [online]. Praha: MM Publishing, Prosinec 2016, 14. 12. 2016, **16**(12), 104-105 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/plazmova-preduprava-povrchu-povrchova-energie-versus-adheze>
43. WOLF, Rory a Amelia Carolina SPARAVIGNA. Role of Plasma Surface Treatments on Wetting and Adhesion. In: *Research Gate: Find and share research* [online]. ResearchGate, c2008-2022, January 2010 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Linear-trends-of-surface-energies-of-polyester-polyethylene-and-polypropylene-films_fig2_229038863
44. TAKEDA, Tomo, Tetsuo YASUOKA, Hikaru HOSHI, Sunao SUGIMOTO a Yutaka IWAHORI. Effectiveness of flame-based surface treatment for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. United Kingdom: Elsevier, 2020, April 2019, (119), 30-37 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.01.013>

45. BÉNARD, Q., M. FOIS a M. GRISEL. Peel ply surface treatment for composite assemblies: Chemistry and morphology effects. *Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. United Kingdom: Elsevier, 2020, November 2005, **36**(11), 1562-1568 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.02.012>
46. GARDINER, Ginger. Wet and dry peel plies. In: *CompositesWorld: Delivering the Global Composites Market* [online]. Gardner Business Media, c2022, 9. 9. 2016 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/wet-and-dry-peel-ply>
47. EBNEAJJAD, Sina a Cyrus F. EBNEAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesive bonding* [online]. Second edition. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 2014 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-0-323264-35-8. Dostupné z: <https://primo.lib.vutbr.cz/primo-explore/search?vid=420BUT>
48. Surface Finishes. In: *CompositesLab: All You Need to Know About Composites* [online]. ACMA, c2016 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composite-materials/surface-finishes/>
49. Gelcomix: systém na zpracování gelcoatu: Precizně zpracovaná ochranná vrstva pro Vaše komponenty. In: *DOPAG: Dávkovací a míchací technologie* [online]. Jeneč: DOPAG Eastern Europe, c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.dopagcz.com/produkty/2k-davkovaci-systemy/zubove-davkovaci-systemy/gelcomix/>
50. Adhesives for Composites Applications. In: *AZO Materials: Material Science* [online]. Manchester (UK): AZoNetwork, c2000-2022, 8 August 2013 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9772>
51. MOKROŠ, Martin a Miroslava BANYROVÁ. Aplikace laků vytvrzovaných UV zářením a možnosti jejich průmyslového využití. *Transfer: Výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. Praha: Výzkumný a zkušební letecký ústav, Červen 2014, **10**(22), 18-23 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1801-9315. Dostupné z: <https://www.vzlu.cz/wp-content/uploads/2021/03/file902.pdf>
52. *3D Wiser: Dostupný 3D tisk odolných kompozitů a kovů* [online]. Praha: 3Dwiser, c2014-2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kompozity/markforged/>
53. Composite Filament Fabrication (CFF). In: *Qualified3D* [online]. Southfield: Qualified3D, c2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.qualified3d.com/3d-printing-service/composite-filament-fabrication/>
54. *GDP Koral Composites* [online]. Tišnov [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <http://gdpkoral.cz/>
55. SCHWALM, Reinhold. *UV Coatings: Basics, Recent Developments and New Applications* [online]. Elsevier Science, 2006 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-0444529794. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/uv-coatings/schwalm/978-0-444-52979-4>
56. TRUCKENMÜLLER, Jörg a Alena POPELKOVÁ. UV technologie. In: *Servis Centrum* [online]. Česká: SERVIS CENTRUM, c2005-2022, 22. 1. 2019 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.sc-brno.cz/blog/technologie-uv-barev-v-sitotisku>
57. BROŽ, Oliver. UV a EB zářením vytvrzované tiskové barvy. In: *SlidePlayer* [online]. SlidePlayer.cz, c2022 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2893389/>
58. Ruční UV jednotky: UV jednotka HandStar 185/120cf. In: *Aeroterm* [online]. Ostrava: Aeroterm [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.aeroterm.cz/produkty/produkty-prumysl/rucni-uv/handstar-185-120-cf/>

59. UV-Test card. In: *PTS Josef Solnař* [online]. Ostrava [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ndtshop.cz/cs/uv/178-uv-test-card.html>
60. KOPELIOVICH, Dmitri. Adhesion tests. In: *Subs Tech - Substances & Technologies: Knowledge source on Materials Engineering* [online]. 3. 5. 2014 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests
61. Nichiban Cellulose Tape CT-18: LP-18 for Coating Test. In: *Panfix Self Adhesive Cellulose Tape* [online]. Japonsko: NICHIBAN [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://panfix.com/tips/>
62. Nerezový hřeben pro měření tloušťky mokré vrstvy nátěru. In: *Proinex: Měřicí přístroje - tloušťkoměry, leskoměry, tvrdoměry* [online]. Ostrava, c2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/307-nerezovy-hreben-pro-mereni-tloustky-mokre-vrstvy-nateru.html>
63. Vzduchové nože MOS. In: *MOS PNEUMATICS: Vzduchové nože* [online]. Odry, c2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/porovnani-ofukovani/>
64. How Air Knives Work. In: *SolvAir: Air Knife Drying Systems & Centrifugal Blowers* [online]. United Kingdom: SolvAir, c2022 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.solvair.co.uk/resource/how-air-knives-work/>
65. Ring-Blade: Air Wipe System. In: *NueAir Engineered Products* [online]. Cincinnati: NueAir [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <http://www.nueair.com/product/360airwipe.html>
66. VONDRÁČEK, Jiří. Požadavek na rychlost a přesnost v selektivním lakování DPS. In: *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. Cliquo & Binteractive, c2022, 2012 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6876/pozadavek-na-rychlost-a-presnost-v-selektivnim-lakovani-dps>
67. MAIER, Vladimír. Stlačený vzduch a kvalita povrchových úprav. In: *Engineering: Prvý strojářský portál - Strojírenství* [online]. Žilina: CB Media [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/3414-stlacený-vzduch-a-kvalita-povrchových-uprav>
68. Wagner: Pistole AirCoat (AirMix). In: *Wagner: Stříkáčková technika a zařízení* [online]. Planá nad Lužnicí, c2013 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.watech.cz/servis-technicka-podpora/dokumenty-ke-stazeni/category/6-wagner-pistole-strikaci-pistole.html?download=9:wagner-aircoat-pistole-gm-4100ac-gm4700ac-airmix>
69. AirCoat stříkáčková pistole (AirMix): Stříkání s přídavným vzduchem. In: *WAtch: Průmyslová stříkáčková, lakovací a lepicí technika* [online]. Praha: WAtch, c2020 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.watech.cz/wagner-group-produkty/wagner-produkty-mokry-prumysl/aplikace-strikani-pistole/strikani-aircoat-airmix.html>
70. Helen. How to Choose Between an Airless, an AirCoat or a HVLP Spray Gun: AirCoat guns. In: *Ailess Discounter* [online]. Berlín: Airless Discounter, c2009-2022, 27. 6. 2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.airless-discounter.de/news/choose-airless-aircoat-hvlp-spray-gun/>
71. UV Reflectors: UV Reflector Extrusions. In: *Hill Technical Sales Corp.* [online]. Palatine: Hill Technical Sales, c2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.hilltech.com/products/uv_components/UV_reflectors.html
72. *Proinex: Tloušťkoměry, leskoměry, tvrdoměry* [online]. c2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/cs/237-mechanicky-odtrhomer-comtest-op1.html>
73. Průmyslová řešení: Inteligentní technologie sušení. In: *Hedson: Performance above all* [online]. Hammarvågen, 2018 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://www.hedson.com/wp-content/uploads/2018/02/IRT_Industrial_Solutions_2017_CZ_20180118_v07.pdf

74. Estimation of Pipe Paint Quantity. In: *Piping Engineering* [online]. Piping Engineer, c2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.pipingengineer.org/estimation-of-pipe-paint-quantity/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
E	modul pružnosti v tahu	[GPa]
d	průměr vlákna	[mm]
HM _L	Průměrná hrubá mzda lakýrníka	[Kč]
HM _S	Průměrná hrubá mzda skladníka	[Kč]
H _M	Výška mokré vrstvy laku	[μm]
H _S	Výška suché vrstvy laku	[μm]
h	Planckova konstanta	[-]
L _C	celkové rozměry technologického úseku povrchové úpravy	[mm]
L _{celkem}	Výsledná vyprodukovaná délka materiálu	[m]
L ₁	vzdálenost vzduchových nožů od vytvrzovací formy	[mm]
L ₂	šířka vzduchových nožů	[mm]
L ₃	vzdálenost vzduchových nožů od lakovacího boxu	[mm]
L ₄	délka lakovacího boxu	[mm]
L ₅	vzdálenost mezi lakovacím boxem a vytvrzovacím UV tunelem	[mm]
L ₆	délka vytvrzovacího UV tunelu	[mm]
l	délka vlákna	[mm]
l _{p1}	přídavek na rozměry lakovacího boxu	[mm]
l _{p2}	přídavek na rozměry vytvrzovacího UV tunelu	[mm]
l _{lampy}	délkový rozměr použitého druhu UV lampy	[mm]
l _{1/2}	délka kroku nástřiku	[mm]
N _{ostatní}	režie firmy a další náklady spojené se zaměstnáváním pracovníka	[-]
N _{zaměstnanec}	Náklady zaměstnavatele na zaměstnance	[Kč/měsíc]
N _{3směny}	Celkové úspory za rok v nepřetržitém (tří směnném) provozu	[Kč/rok]
O _{suš}	Hmotnostní obsah sušiny v laku	[%]
P	Materiálové náklady na lakování	[€/kus]
P _{lak}	Cena konvenčního laku za litr	[€/l]
P _{UVlak}	Cena UV laku za litr	[€/l]
S _{Dílce}	Celková plocha dílce určená k lakování	[mm ²]
S ₄₋₁	vzdálenost mezi lakovacími body 4-1	[mm]
T _C	časová náročnost procesu lakování	[s]
T _K	Koef. pro roční čas. fond výr. linky a pro roční čas. fond zaměst.	[-]
T _p	čas průjezdu nalakovaného dílce o délce X	[s]
T _p	Využitelný časový fond výrobní linky	[-]
T _R	doba stání před zahájením nového cyklu lakování	[s]
T _{X-Y}	čas nutný pro lakování mezi jednotlivými body	[s]
V _p	rychlost pultruze	[mm/s]
V _{reálná}	Reálná spotřeba laku	[l]
V _{teoretická}	Teoretická spotřeba laku	[l]
X _{profilů}	Počet vyrobených profilů dané délky	[-]
γ	vektor mezifázového rozhraní	[-]
θ	úhel smáčení	[°]
λ	vlnová délka	[m]
ν	frekvence	[Hz]

Zkratky

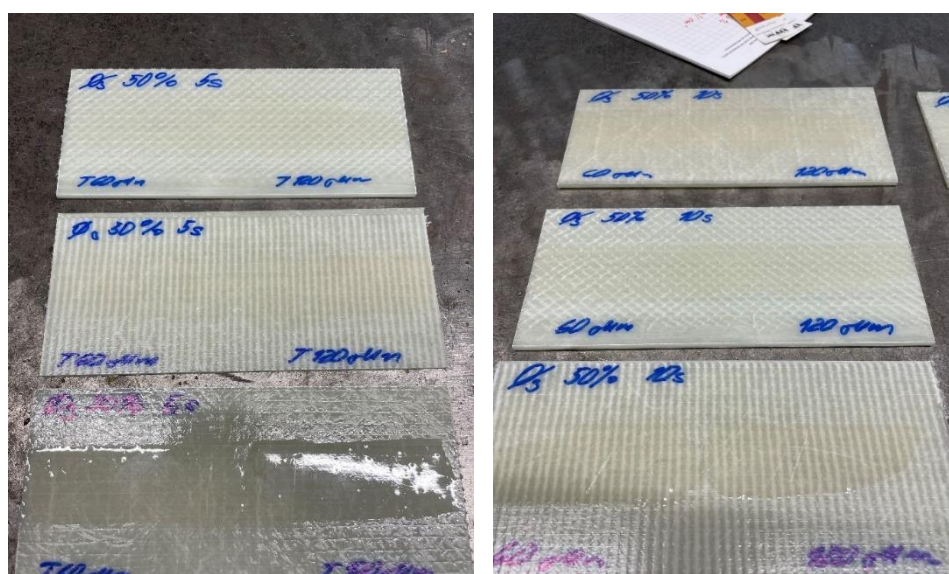
Označení	Legenda
ABS	Polymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu
AFM	Atomic force microscopic
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
B ₄ C	Karbid boru
BN	Nitrid boru
B ₂ O ₃	Oxid boritý
CaO	Oxid vápenatý
CFC	Composite Fiber Coextrusion
CFF	Continuous Filament Fabrication
DED	Direct Energy Deposition
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
K ₂ O	Oxid draselný
LPG	Liquified Petroleum Gas
MgO	Oxid hořečnatý
Na ₂ O	Oxid sodný
PA	Polyamid
PAN	Polyakrylonitril
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PEEK	Polyetereterketon
PES	Polyester
PET	Polyethylen
PTFE	Polytetrafluoretylén
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin transfer moulding
SiC	Karbid křemíku
Si ₃ N ₄	Nitrid křemíku
SiO ₂	Oxid křemičitý
TiO ₂	Oxid titaničitý
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý
2K-PUR	Dvoukomponentní polyuretan

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Test vyvíjeného laku Phot 54 na polyuretanových dílcích – metoda rozlití.
- Příloha 2 Test komerčně dostupného UV laku na polyesterových dílcích – metoda rozlití.
- Příloha 3 Výrobní podmínky pro testování laků během výrobního procesu.
- Příloha 4 Fotografie pořízených vzorků na vinylesterovém materiálu užitých pro další testování – metoda rozlití.
- Příloha 5 Výsledky mřížkových zkoušek na vzorcích, které byly nanесeny metodou rozlití na vinylesterový materiál.
- Příloha 6 Proces nástřiku UV laku Phot 54 a výsledný povrchový vzhled.
- Příloha 7 Výsledky mřížkových zkoušek na vzorcích, které byly nanесeny metodou nástřiku na vinylesterový materiál.
- Příloha 8 Informační list k použití mřížkového testu od firmy Proinex Instruments.
- Příloha 9 Technický list použitého odtrhoměru od výrobce Coming Plus, a. s.
- Příloha 10 Kalibrační list použitého odrthoměru od výrobce Coming Plus, a. s.



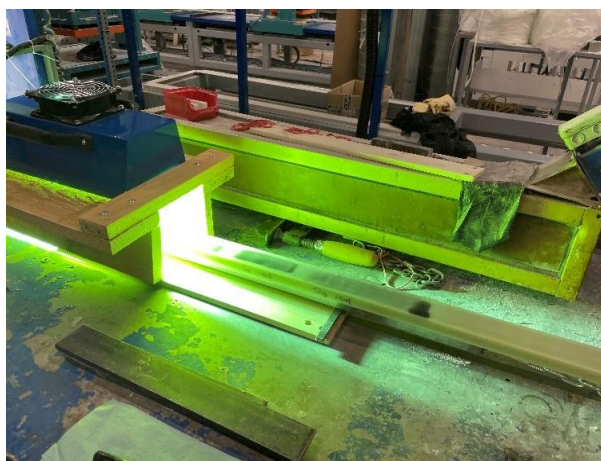
Příloha 1 Testy vyvíjeného laku Phot 54 na polyuretanových dílcích. Parametry testu: 100% výkon UV lampy; tloušťky nátěrů 60, 120 μm ; teplota povrchu 74-75,6 $^{\circ}\text{C}$; doba expozice 43 s.



Příloha 2a Testy komerčně dostupného laku TELUE na polyesterových dílcích. Byly testovány různé varianty vytvrzovacích podmínek.



Příloha 2b Testy komerčně dostupného laku TELUE na polyesterových dílcích.
Byly testovány různé varianty vytvrzovacích podmínek.



Příloha 3 Fotografie zachycující testování vytvrzení laku při výrobních podmínkách.



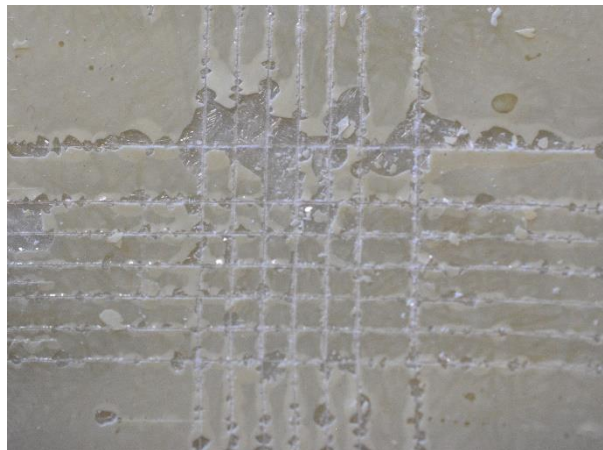
Příloha 4a Fotografie vzorku č. 3 a vzorku č. 4 na vinylesterových dílcích. Vzorky byly naneseny na materiál metodou rozlití.



Příloha 4b Fotografie vzorku č. 5 a vzorku č. 6 na vinylesterových dílcích. Vzorky byly naneseny na materiál metodou rozlití.



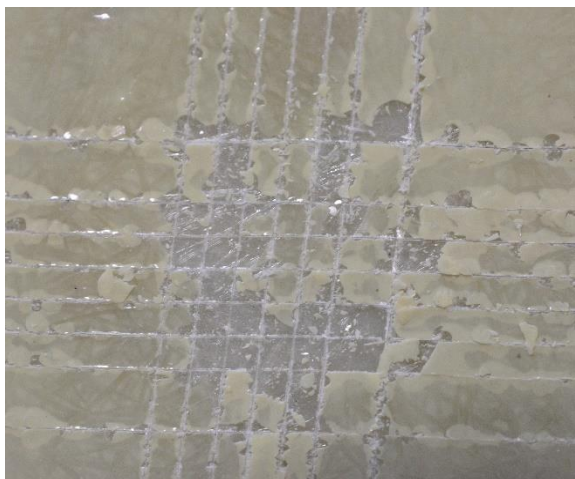
Příloha 4c Fotografie vzorku č. 7 a vzorku č. 8 na vinylesterových dílcích. Vzorky byly naneseny na materiál metodou rozlití.



Příloha 5a Výsledky mřížkové zkoušky na vinylesterových dílcích. Vzorek č. 3 - (vlevo) a vzorek č. 4 (vpravo). Nanesení laku metodou rozlití.



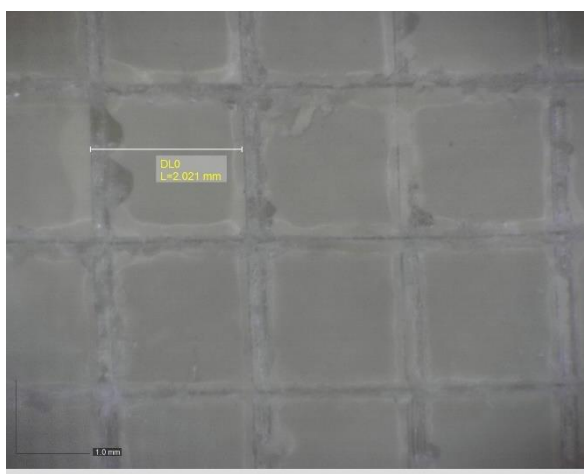
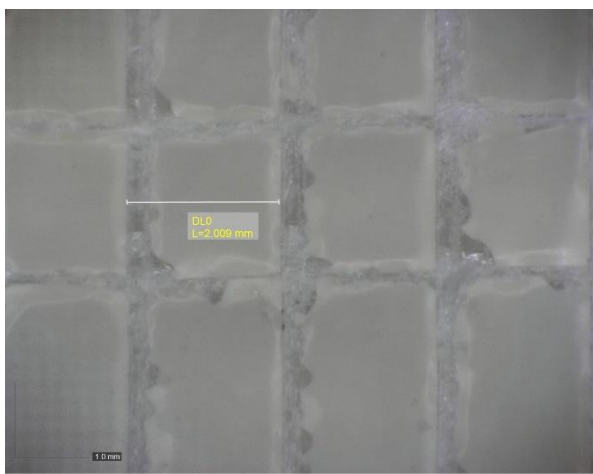
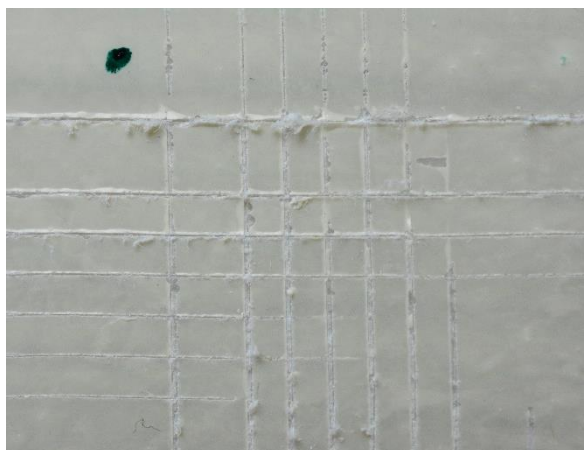
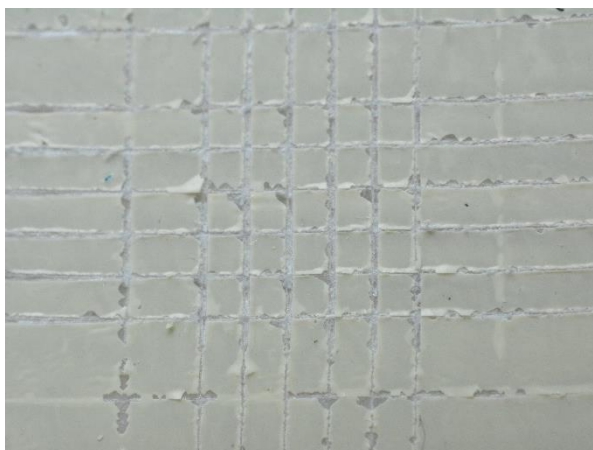
Příloha 5b Výsledky mřížkové zkoušky na vinylesterových dílcích. Vzorek č. 5 - (vlevo) a vzorek č. 6 (vpravo). Nanesení laku metodou rozlití.



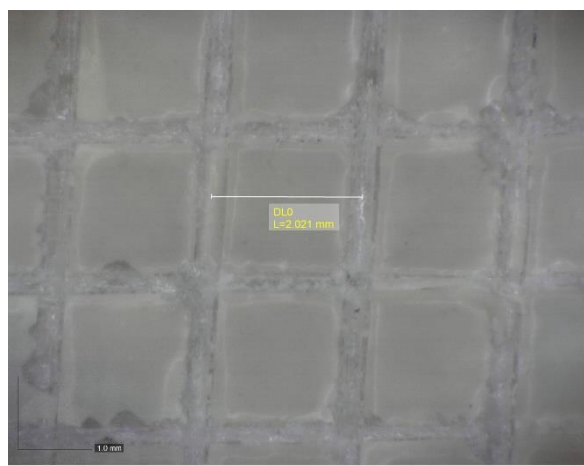
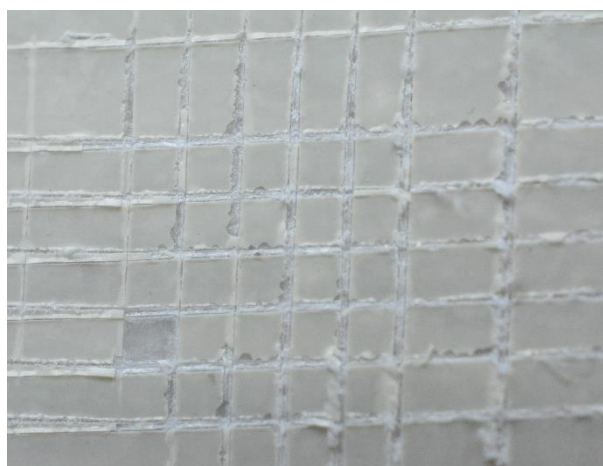
Příloha 5c Výsledky mřížkové zkoušky na vinylesterových dílcích. Vzorek č. 7 - (vlevo) a vzorek č. 8 (vpravo). Nanesení laku metodou rozlití.



Příloha 6 Proces nástřiku UV laku na vinylesterový materiál a výsledný vzhled lakovaného povrchu bezprostředně po vytvrzení.



Příloha 7a Výsledky mřížkové zkoušky. Vzorek č. 1 (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo). Nanesení laku metodou nástřiku lakovací pistolí.



Příloha 7b Výsledky mřížkové zkoušky. Vzorek č. 5. Nanesení laku metodou nástřiku lakovací pistolí.

Popis jednotlivých stupňů dle ISO

- ISO 0

hrany řezů jsou rovné, žádný ze čtverců není poškozen
- ISO 1

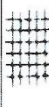
odtržení šupin v okolí křížení řezů, není poškozena plocha větší než 5 %
- ISO 2

nátěr je poškozen i podél řezů, není poškozena plocha větší než 15%
- ISO 3

nátěr je poškozen ve větším rozsahu a to i v některých čtvercích, není poškozena plocha větší než 35%
- ISO 4

některé čtverce jsou zcela odtrženy, není poškozena plocha větší než 65%
- ISO 5

jakýkoli stupeň poškození větší než stupeň ISO 4

Surface	ISO
None	0
	1
	2
	3
	4
Greater than 65%	5

Proinex Instruments, s. r. o.

Sídlo společnosti:

Vratimovská 624/11, Kunčičky, 718 00 Ostrava

IČ: 27297845, DIČ: CZ27297845

Tel.: +420 599 509 995

E-mail: info@proinex.cz

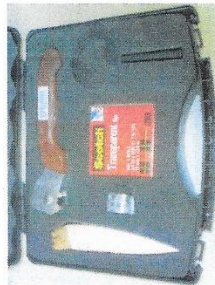
Homepage:

www.proinex.cz

Sada pro mřížkovou zkoušku

BGD502

Sada pro hodnocení přilnavosti nátěru k podkladu dle ČSN EN ISO 2409



Úvod

Princípem zkoušky je vyřezat mřížku skládající se z pravouhlých řezů náterem až k podkladu. Výsledný vzhled (míra odloupání nebo rozpraskání) je porovnán se stupnicí. Další informace o typu řezáku, počtu řezů nutných k provedení mřížky se nacházejí v mezinárodních normách ČSN EN ISO 2409 a ASTM D3359-B. Zkouška odpovídá normě ISO 2409.

Balení obsahuje

Rukojeť s řezákem 6x1, 6x2 nebo 6x3 mm
(Náhradní výměnný řezák 6x1, 6x2 nebo 6x3mm – pokud je v objednávce)
Adhezivní pásku
Lupu
Štětce
Kufřík
Návod

Příprava

Důležité je zvolit správný odstup řezů:

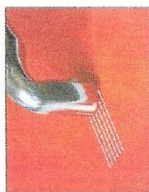
Nůž	Počet řezáků	Podklad	Tloušťka povlaku
1mm	6	tvrdý	0-60µm
1mm	11	kov	0-50µm
1,5mm	11	sřední	0-60µm
2mm	6	měkký	0-60µm
2mm	6	tvrdý/měkký	60-120µm
3mm	6	tvrdý/měkký	121-250µm

Ačkoliv lze dosáhnout požadovaných výsledků, doporučují normy ČSN EN ISO 2409 a ASTM D3359-B používání 3 mm nože pro provádění zkušební metody popsané v tomto manuálu.



Postup práce

1. Jedním plynulým pohybem (přiláče tak, aby nůž proniknul skrz povlak) uděláte sérii 6-ti rovnoběžných řezů dlouhých přibližně 20 mm



2. Proveďte druhý řez kolmo na první



3. Kartáčem dle ISO odčistěte místo, kde byly řezy provedeny



4. Přiložte a následně odstraňte adhezivní pásku



5. Pomocí lupy porovnejte výsledek s tabulkou v ČSN EN ISO 2409



Proinex Instruments, s. r. o.

zapsán Krajským soudem v Ostravě, oddíl C, vložka 32285

Sídlo společnosti:

Domovská 43, Ostrava-Hrabová, 720 00

tel.: +420 599 509 995

E-mail: info@proinex.cz

IČO: 27297845

DIČ: CZ27297845

Homepage: <http://www.proinex.cz>

2/2

Příloha 9a Technický list použitého odtrhoměru od výrobce Coming Plus, a. s.

COMTEST OP1 P 20

zařízení k měření odtrhové pevnosti v oblasti povrchových úprav

CHARAKTERISTIKA:

Přístroje jsou určeny k měření tahové pevnosti kolmo k povrchu. Používají se ke kontrole kvality podkladu (stanovení kohezni pevnosti) a ke stanovení kvality povrchové úpravy (adhezni pevnost dvou a vícevrstevných systémů) resp. k určení vzájemné přídržnosti jednotlivých nanesených vrstev.

Jejich zatěžovací člen je vybaven indukčním snímačem síly. Přístroje mají ruční zatěžování pomocí zatěžovacího ramene a umožňují plynulé zatěžování až do odtržení zkušební panenky.



Postup odtrhové zkoušky s přístrojem COMTEST®OP1 P 20:

1. Vhodným lepidlem se přilepí na měřené místo na povrchové úpravě zkušební panenka.
2. Povrchová úprava se prořízne až do základního materiálu ruční frézou. Tím je zajištěna (definována) přesná měřená plocha.
3. Po vytvrzení lepidla se připojí ke zkušební panence odtrhový přístroj COMTEST®OP1 P 20. Otáčením zatěžovacího ramene (vratidla) se zkušební panenka zatěžuje.
4. Měřicí jednotka je vybavena akustickou indikací překročení optimální rychlosti zatěžování. Během zkoušky neustále přepočítává nárůst zatěžovací síly. Při překročení nastaveného limitu (např. 200N/s) informuje zkušební technika zapípáním.
5. Panenka se zatěžuje až do odtržení. Na displeji elektronické měřicí jednotky se odečte maximální dosažené napětí na panence o průměru 20mm.

Technické parametry:

Typ přístroje	COMTEST® OP1 P 20
Rozsah měření	7 kN resp. 19,98 MPa na panence o průměru 20mm
Rozlišení	0,02 MPa
Max. chyba měření	± 1,5% z naměřené hodnoty ± 2 digity
Hmotnost zatěžovací jednotky	1,7 kg
Rozměr zátěžové jednotky.	200 x 85 mm
Provozní/skladovací teplota	0°C až 50°C / -20°C až 60°C
Napájení/kapacita	Baterie 9V typ 6F22 / cca 100 odtrhových zkoušek
Příslušenství – zkušební panenky	20 ks kruhové ocelové panenky o průměru 20mm
Příslušenství k přípravě zkoušky	Ruční frézka s vnitřním průměrem 20,5 mm
Příslušenství k provedení zkoušky	Středící adaptér – pomáhá vycentrovat zatěžovací člen vůči zkušební panence, eliminuje prohnutí podkladu

PŘEHLED NĚKTERÝCH NOREM, KTERÉ PŘÍSTROJ SPLŇUJE:

1. ČSN EN ISO 4624 Nátěrové hmoty – odtrhová zkouška přilnavosti.
2. ČSN EN 311 Desky ze dřeva – přídržnost povrchu – zkušební metoda.
3. BS EN ISO 4624 Paints and varnishes – Pull-off test for adhesion

Proinex Instruments, s. r. o.

zapsán Krajským soudem v Ostravě, oddíl C, vložka 32285

Sídlo společnosti:

Domovská 43, Ostrava-Hrabová, 720 00

Homepage: <http://www.proinex.cz>

tel.: +420 599 509 995

E-mail: info@proinex.cz

IČO: 27297845

DIČ: CZ27297845

1/2



Český metrologický institut

Okružní 31, 638 00 Brno

tel. +420 545 555 111, fax +420 545 222 728, www.cmi.cz



Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s.
Pracoviště: Oblastní inspektorát Praha, Radiová 3, 102 00 Praha 10
Oddělení mechanických zkoušek materiálu, tel. +420 266020111, fax. +420 266020169

KALIBRAČNÍ LIST

1051-KL-10481-13

Datum vystavení: 5.8.2013

List 1 ze 2 listů

Zákazní **COMING PLUS a.s.,**
Nad Kamínkou 1267, 156 00 Praha 5.

Měřidlo: Zkušební stroj pro stanovení odtrhové pevnosti materiálu.
Nejvyšší zatížení.: 7 kN
Zkoušené rozsahy stroje: (0 až 7) kN
Rok výroby: 2013
Měřicí ústrojí : indukční snímač síly

Výrobce: COMING PLUS a.s.

Typ: Mechanický

Výrobní číslo: 12043

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

Datum kalibrace: 5.8.2013

Kalibraci provedl:

Ředitel oblastního inspektorátu:

Jaroslav Městka



Ing Vladimír Peršl

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratore rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

Použité etalony: Typ a výrobní č. Nejistota měření Kalibrační list Platnost do:
Z4/B19885/20 kN $W_{\max} = 0,11 \%$ 8011-KL-F0073-12 30.5.2014

Kalibrační postup: ČMI č. 151-MP-C001

Místo kalibrace: Zkušebna ČMI

Podmínky prostředí: změřená teplota vzduchu $(27,3 \pm 1) ^\circ\text{C}$, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Podmínky kalibrace: teplota vzduchu $(23 \pm 10) ^\circ\text{C}$, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Výsledky kalibrace:

Stroj nebyl seřizován.

rozsah: (0 - 7) kN TAH		rozšířená nejistota měření W %
stupnice stroje kN	chyba q %	
7	0,99	0,6
6	0,31	0,6
5	-0,15	0,6
4	-0,52	0,6
3	-0,50	0,6
2	0,00	0,6
1	-0,52	0,6

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$.

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut
Oblastní inspektorát Praha
Radiová 3
102 00 Praha
-2-

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.