

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

**Využití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly
kvality kompozitních materiálů**

Adam Kohl

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adam Kohl

Zemědělské inženýrství

Inženýrství údržby

Název práce

Využití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů

Název anglicky

Utilization of modern microscopy methods in area of composite materials quality control

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o možnostech a limitách kompozitních materiálů, tj. zejména interakce výztuže a matrice, desintegrace, smáčivost, kontrola kvality výroby. Student zpracuje analýzu možností hodnocení kvality kompozitních materiálů pomocí mikroskopie. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

interakce, kompozitní materiály, matrice, mikroskopie, polymery, technologie výroby, vyztužující fáze

Doporučené zdroje informací

BEAUMONT, P. W. R., SOUTIS, C., HODZIC, A.: The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites: Fifty Years of Progress and Achievement of the Science, Development, and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2017.

BURAGOHAİN, M. K.: Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

Časopis: Composites Part A, B, Journal of Cleaner Production, Polymers, Materials, Manufacturing Technology, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, International Journal of Fatigue, Polymer Degradation and Stability, Wear atd.

JANČÁR, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vydání. Brno: VUT – Brno, 2003.

LAŠ, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.

LENERT, J.: Mechanika kompozitních materiálů. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2002.

MACHEK, V., SODOMKA, J.: Polymery a kompozity s polymerní matricí. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.

MÍŠEK, B.: Kompozity. 1. vydání. Brno: Technický dozorčí spolek Brno, 2003.

SKRBK, B.: Materiály pro konstrukční aplikace. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.

VOJTĚCH, D., ŠERÁK, J., STOLAŘ, P.: Kovové konstrukční materiály II. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999.

1906

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2022

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 2.4.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za odborné rady a poznatky, věcné připomínky, vstřícný přístup a poskytnutí doporučené literatury. Děkuji také mé rodině za podporu a motivaci při studiu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů. Cílem práce je představit a zhodnotit aplikaci mikroskopických technik při hodnocení struktury, složení a vlastností kompozitních materiálů. V kapitole „Kompozitní materiály: Přehled a výrobní procesy“ je charakterizováno složení kompozitů a jejich technologie výroby. V následující kapitole „Moderní metody mikroskopie a jejich využití v kontrole kvality“ jsou popsány základní principy vybraných mikroskopických metod a jejich efektivita v detekci a charakterizaci defektů a poruch v kompozitech, s důrazem na jejich vliv na mechanické vlastnosti kompozitů. Finální kapitola „Výsledky a aplikace“ se zabývá zhodnocením mikroskopických metod v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů.

Klíčová slova: interakce, kompozitní materiály, matrice, mikroskopie, polymery, technologie výroby, vyztužující fáze

Utilization of modern microscopy methods in area of composite materials quality control

Abstract

The bachelor thesis deals with the use of modern microscopy methods in the field of quality control of composite materials. The aim of the thesis is to present and evaluate the application of the most used microscopic techniques in the analysis of the structure, composition and properties of composite materials. In the chapter "Composite materials: Overview and manufacturing processes", the composition of composites and their manufacturing technology are presented. The following chapter, "Modern microscopy methods and their application in quality control," describes the basic principles of selected microscopy methods and their effectiveness in detecting and characterizing defects and failures in composites, with attention to their effect on the mechanical properties of composites. The final chapter "Results and applications" discusses the evaluation of microscopic methods in the field of quality control of composite materials.

Keywords: interaction, composite materials, matrix, microscopy, polymers, production technology, reinforcement phase

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika práce.....	2
4	Kompozitní materiály: Přehled a výrobní procesy	3
4.1	Definice a vlastnosti.....	3
4.2	Matrice	3
4.2.1	Kompozity s keramickou maticí.....	3
4.2.2	Kompozity s kovovou maticí.....	4
4.2.3	Kompozity s polymerní maticí	4
4.3	Vyztužující fáze	5
4.3.1	Částicové kompozity	6
4.3.2	Vláknové kompozity	6
4.3.3	Prepreg	8
4.4	Interakce výztuže a matrice	8
4.4.1	Mezifázové rozhraní	9
4.4.2	Smáčivost	10
4.5	Technologie výroby kompozitů	11
4.5.1	Ruční kladení	12
4.5.2	Lisování v autoklávu.....	13
4.5.3	Reakční vstřikování.....	13
4.5.4	Pultruze	14
4.5.5	Navíjení.....	15
5	Moderní metody mikroskopie a jejich využití v kontrole kvality.....	17
5.1	Mikroskopické metody	17
5.1.1	Optická mikroskopie	17
5.1.2	Elektronová mikroskopie	18
5.1.3	Skenovací akustická mikroskopie.....	20
5.1.4	Tunelová mikroskopie.....	21
5.2	Kontrola kvality	23
5.2.1	Mechanické zkoušky.....	24

5.2.2	Nedestruktivní zkoušky.....	24
5.3	Vady v kompozitních materiálech	25
5.3.1	Delaminace.....	25
5.3.2	Nehomogenita	26
5.3.3	Dutiny, póry a bubliny	27
5.3.4	Mikrotrhliny	29
5.3.5	Korozní praskání	30
6	Výsledky a aplikace.....	32
6.1	Analýza použití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů	32
6.2	Zhodnocení výhod a omezení jednotlivých mikroskopických metod	35
6.3	Zhodnocení možností a limit kompozitních materiálů	36
6.4	Možnosti budoucího vývoje v oblasti mikroskopie a kontroly kvality	37
7	Závěr.....	38
8	Seznam použitých zdrojů.....	40

Seznam obrázků

Obr. 1: Částicový kompozit s plnivem ze skleněných kuliček – SEM [17].....	6
Obr. 2: Krátkovláknový kompozit - optická mikroskopie [20].....	7
Obr. 3: Dlouhovláknový kompozit – SEM [21].....	8
Obr. 4: Mezifázové rozhraní ve vláknovém kompozitu [24]	9
Obr. 5: Uhlíkové vlákno bez povrchové úpravy – SEM [25].....	10
Obr. 6: Uhlíkové vlákno potažené niklem – SEM [25].....	10
Obr. 7: Hodnocení smáčivosti povrchu - kapková metoda [27].....	11
Obr. 8: Schéma technologie výroby - ruční kladení [30]	12
Obr. 9: Schéma lisování v autoklávu [34]	13
Obr. 10: Schéma RTM [37]	14
Obr. 11: Schéma pultruzní linky [38].....	15
Obr. 12: Schéma technologie výroby navíjení [39].....	16
Obr. 13: Rozlišovací schopnost různých metod mikroskopie a lidského oka [44]	17
Obr. 14: Schéma principu optického mikroskopu [46]	18
Obr. 15: Schéma principu SEM [48]	19
Obr. 16: Schéma principu TEM [48].....	20
Obr. 17: Schéma principu SAM [51]	21
Obr. 18: Schéma principu STM [53].....	22
Obr. 19: Schéma principu AFM [56]	23
Obr. 20: Lomová plocha kompozitu – SEM [60].....	24
Obr. 21: Mikrodelaminace – SEM [63].....	25
Obr. 22: Mikrodelaminace – SEM [63].....	26
Obr. 23: Mikrodelaminace – SAM [64]	26
Obr. 24: Struktura nehomogenity – TEM [67]	27
Obr. 25: Struktura nehomogenity - SEM [67].....	27
Obr. 26: Póry, bubliny – optická mikroskopie [69]	28
Obr. 27: Dutiny, póry, bubliny – TEM [69].....	28
Obr. 28: Pórovitost – SEM [70].....	29
Obr. 29: Mikrotrhliny - a) Optická mikroskopie; b) SEM [72].....	30

Obr. 30: Korozní praskání - optická mikroskopie [73]	30
Obr. 31: Zkorodované vlákno - SEM [73]	31

Seznam tabulek

Tab. 1: SWOT analýza mikroskopických metod v oblasti kontroly kvality kompozitů	33
--	----

1 Úvod

Kompozity lze definovat jako materiály, které synergicky kombinují vlastnosti dvou složek – matrice a výztuže. S rostoucím použitím kompozitních materiálů v průmyslu je však nezbytné zajistit vysokou úroveň jejich kvality a spolehlivosti. Mikroskopická analýza kompozitních materiálů umožňuje detailní zkoumání rozhraní mezi matricí a výztuží. Rozhraní mají klíčový vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Studium mikrostruktury poskytuje důležité informace pro porozumění struktury, vlastností a chování kompozitních materiálů a má zásadní význam pro vývoj, výrobu a kontrolu kvality kompozitů.

Pokročilé mikroskopické metody otevírají dveře k studiu procesů poškození a selhání v kompozitních materiálech. Analýza mikrotrhlin, degradace materiálu, delaminace a dalších forem poškození na mikroskopické úrovni poskytuje cenné informace pro vývoj odolnějších a dlouhodobě spolehlivějších kompozitů. Pomocí mikroskopie lze identifikovat iniciaci a propagaci trhlin v kompozitních materiálech pod zatížením, což umožňuje výzkumníkům navrhovat strategie pro zlepšení vazebných vlastností a odolnosti proti mechanickému poškození. Dále mikroskopické studie umožňují sledovat vliv různých výrobních procesů a povrchových úprav na kvalitu a výkonnost kompozitů, což je zásadní pro inovace ve výrobě a aplikaci těchto materiálů. Díky pokročilým mikroskopickým metodám se otevírá nový horizont v oblasti návrhu a využití kompozitních materiálů, čímž se posouvá hranice toho, co je možné dosáhnout v moderním materiálovém inženýrství.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je představit a zhodnotit využití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů. Práce se zaměří na analýzu mikroskopických metod a jejich aplikaci při hodnocení struktury, složení a vlastností kompozitních materiálů. Dále se práce zabývá metodami detekce a charakterizace defektů a poruch v kompozitech s důrazem na jejich vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů.

3 Metodika práce

Za použití odborné literatury v podobě knih, odborných časopisů a dalších zdrojů v tištěné nebo digitální podobě jsou představeny základní informace o kompozitních materiálech a jejich důležitost. Následně je podrobněji prozkoumáno, jaké výhody přináší použití moderních mikroskopických metod v oblasti kontroly kvality těchto materiálů. Důležitým aspektem práce je zhodnocení možností, limit a perspektivy jednotlivých mikroskopických technik v aplikaci na kompozitní materiály.

4 Kompozitní materiály: Přehled a výrobní procesy

4.1 Definice a vlastnosti

Materiály, které jsou tvořeny ze dvou, nebo více složek s rozdílnými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, jsou označovány jako kompozity. Jelikož si tyto jednotlivé složky zanechávají svou strukturu a je mezi nimi výrazné makroskopické rozhraní, nazývají se fáze a tvoří mezi sebou tzv. mezifázové rozhraní [1, 2].

Vhodnou kombinací fází lze získat materiál s podstatně lepšími vlastnostmi ve srovnání s vlastnostmi jednotlivých složek, nebo jejich prostou sumací. Tento efekt je právě unikátní pro materiály, které se definují jako kompozity, nazývá se synergický účinek a lze ho jednoduše reprezentovat vztahem $1+1>2$ [3–5].

Fáze tvořící kompozit označujeme matrice (spojitá fáze), v níž je uložena výztuž (nespojité fáze), tvořená vlákny nebo částicemi [1].

4.2 Matrice

Matrice je jedna z fází kompozitního materiálu, která zastává funkci pojiva výztuže. Její vlastnosti hrají klíčovou roli ve výsledných mechanických, tepelných a chemických parametrech kompozitního materiálu. Úlohou matrice je zajištění:

- geometrické polohy výztuže,
- spojení jednotlivých částic výztuže v celek,
- přenosu namáhání na výztuž,
- ochrany výztuže před vnějšími vlivy,
- výsledného geometrického tvaru výrobku [6].

Základními materiály používanými pro matrice jsou:

- keramika,
- kovy,
- polymery [2].

4.2.1 Kompozity s keramickou maticí

Keramické matrice nacházejí uplatnění při vysokých provozních teplotách [7]. Prosazují se zejména v automobilovém průmyslu na výrobu brzd a výfukových systémů závodních speciálů. V leteckém a kosmickém průmyslu se používají ve výrobě vysokoteplotních částí (výstupní tryska, lopatky turbíny) reakčních a raketových motorů nebo tepelného štítu kosmických lodí.

Předností matrice z keramiky je velmi vysoká tepelná odolnost, vysoká tvrdost a pevnost v tlaku, dobrá chemická inertnost¹ a odolnost vůči creepu² za vysokých teplot [1, 7].

Hlavní nevýhodou je nízká lomová houževnatost (křehkost), která způsobuje náchylnost k poškození při tahovém nebo rázovém zatížení. Mezi další podstatné nevýhody se řadí nesnadná obrobiteľnosť a veľká citlivosť na vnútorné defekty [1, 7].

4.2.2 Kompozity s kovovou maticí

Kompozity s kovovou maticí jsou přímým konkurentem pro jiné technologie zpracování kovů, například práškovou metalurgii³. Kovové matrice jsou využívány v mnoha odvětvích, zejména v automobilovém průmyslu, pro komerčně vyráběné díly, jako jsou písty vyztužené vlákny, brzdové kotouče zesílené částicemi, nosníky vyztužené částicemi [10].

V kompozitním materiálu s kovovou maticí je kov nebo slitina⁴ spojitou fází. Pro kovové matrice se používají lehké kovy – nejpoužívanějšími jsou hliník, hořčík, titan a jejich slitiny [1, 7, 10].

Jejich výhody spočívají v dobré elektrické a tepelné vodivosti, vysoké smykové pevnosti, vysoké provozní teplotě, rozměrové stabilitě, nízké tepelné roztažnosti a odolnosti proti opotřebení. Výhodné jsou také vlastnosti, jako možnost povlakování, spojování a odolnost vůči většině záření (UV, IR, RTG, gama) [1, 7].

4.2.3 Kompozity s polymerní maticí

Polymerní matrice je nejčastěji používaná při výrobě kompozitů kvůli své nízké hustotě, jednoduché zpracovatelnosti, chemické inertnosti, elektroizolačním vlastnostem a nízkým nákladům [1]. Základními surovinami pro výrobu polymerních matic jsou polymery.

Polymery jsou chemické organické látky, které mohou být buď přírodního nebo syntetického původu a jsou složeny z dlouhých řetězců molekul nazývaných makromolekuly. Tyto makromolekuly jsou tvořeny převážně atomy uhlíku, kyslíku, vodíku, chlóru, dusíku a dalších prvků. V procesu výroby se polymery často zahřívají a podrobuje se jim vysoký tlak a teplota, aby se dostaly do kapalného stavu a umožnily tak formování do požadovaných tvarů a získání specifických vlastností pro jejich budoucí použití [12].

¹ Chemická inertnost - odolnost vůči různým vnějším vlivům, např. vůči kyselinám, zásadám, oxidaci, teplotě, vlhkosti, atd.

² Creep - tendence pevného materiálu deformovat se trvale za zvýšených teplot pod vlivem stálého mechanického napětí. Tato deformace se s časem zvětšuje [8].

³ Prášková metalurgie - je metoda výroby dílů z prášků kovů, oxidů a karbidů kovů a nekovových prášků [9].

⁴ Slitina – tavením vzniklá směs kovu s dalšími kovy nebo jinými prvky či sloučeninami, obvykle ve formě pevného roztoku [11].

Polymerní matrice se dělí na:

- reaktoplasty,
- termoplasty [2, 3].

Reaktoplasty vytvářejí malé molekuly zvané monomery, které se spojují chemickými vazbami při polymerizaci, chemickou reakcí za přítomnosti katalyzátoru a iniciátoru. Polymerizace může probíhat za různých teplotních, světelných, tlakových a chemických podmínek. Tím se vytvoří síť polymerů, která drží vlákna pohromadě a poskytuje celkovou strukturální integritu materiálu. Způsob polymerizace výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného produktu. Díky polymerizaci zůstává reaktoplast v pevné fázi i při zvýšených teplotách, což zabraňuje jeho změknutí [2, 3]. Nejvýznamnější a nepoužívanější reaktoplastovou matricí je epoxidová pryskyřice. Dalšími zástupci jsou fenoplasty, aminoplasty, polyesterové pryskyřice a polyuretany [13]. Při velkých nárocích na chemickou odolnost nebo houževnatost kompozitu jsou reaktoplasty nahrazovány termoplasty [14].

Termoplasty jsou polymery, které se chovají plasticky při zahřátí a tuhnou, když se ochladí. Jsou to polymery, které lze opakovaně zahřívát a tvarovat bez trvalé změny jejich chemické struktury [12]. Ačkoli existuje velké množství termoplastových matric, tak 73% z celkového objemu výroby představuje 5 typů plastů, a to polystyren (PS), polypropylen (PP), polyethylen (PE), polykarbonát (PC), polyethylentereftalát (PET) [3, 15].

4.3 Vyztužující fáze

Vyztužující fáze (zkráceně výztuž), neboli plnivo je jedna ze složek kompozitního materiálu, která je uložena v matrici. Primárním úkolem je dodat kompozitu potřebnou tuhost a pevnost a efektivně zajistit přenos převážné části vnějšího zatížení od matrice. Konečné vlastnosti kompozitního materiálu jsou závislé na tvaru, koncentraci a orientaci výztuže [1, 16].

Klíčové vlastnosti výztuže:

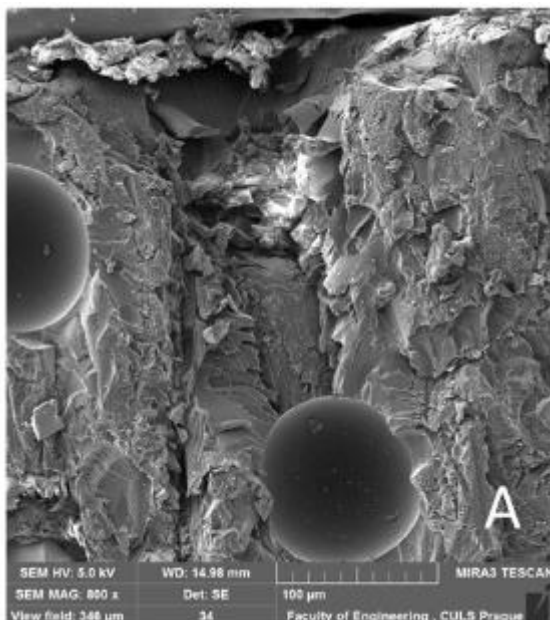
- je primárním nosným prvkem v kompozitním materiálu,
- zajišťuje tuhost kompozitního materiálu,
- zajišťuje tepelnou stabilitu,
- zajišťuje elektrickou a tepelnou vodivost (nebo izolaci) [7].

Základní dělení vyztužující fáze podle geometrického tvaru je na:

- částice,
- vlákna [1].

4.3.1 Částicové kompozity

Částicový kompozit (Obr. 1) je materiál, který se skládá z matrice, v které je dispergované částicové plnivo. Na rozdíl od vláknových kompozitů mají částicové kompozity obvykle horší mechanické vlastnosti, ale jejich výroba je jednodušší a méně nákladná, což je jejich hlavní výhodou [1, 2].



Obr. 1: Částicový kompozit s plnivem ze skleněných kuliček – SEM [17]

Částice lze dle tvaru dělit na:

- izometrické částice,
- anizometrické částice [18].

Izometrické částice mají téměř identické rozměry ve všech prostorových směrech, příkladem to jsou kulové nebo krychlové částice. Zatímco anizometrické částice mají výrazně odlišné rozměry v různých směrech, příkladem to jsou válcové, plátkové, nebo jehlancovité částice [18].

Pojem topologie částic znamená jejich prostorové uspořádání. Optimální interakce částic při zpevňování je dosaženo tehdy, když jsou částice přibližně stejně velké a rovnoměrně rozptýlené [1, 4].

4.3.2 Vláknové kompozity

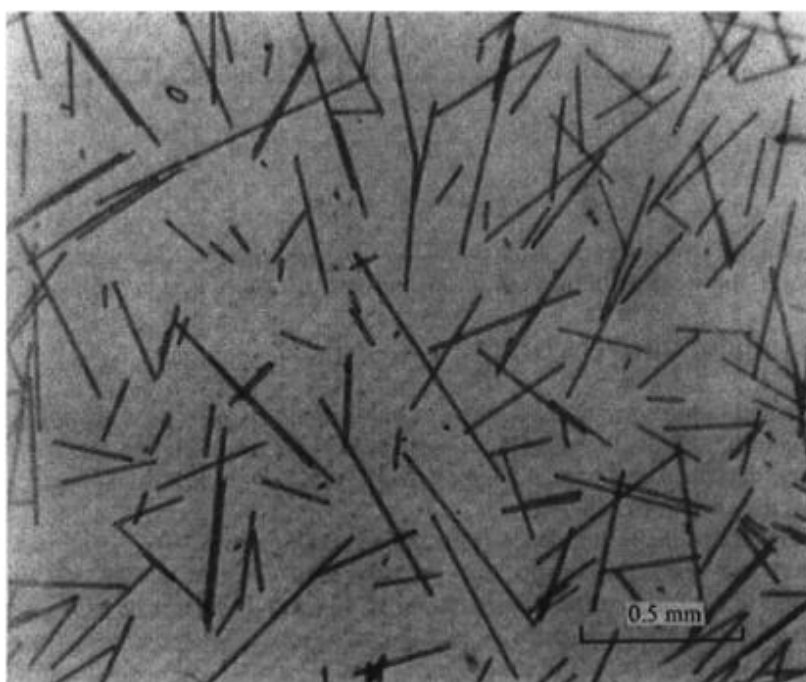
Vláknové kompozity jsou materiály, které mají jako výztuž vlákna válcového tvaru, jejichž pevnost v tahu působící ve směru osy vlákna je výrazně vyšší, než ve směru kolmém k jejich ose [2].

Jednou z klíčových charakteristik vláknových kompozitů je jejich vynikající poměr pevnosti a tuhosti k hmotnosti. Další výhodou vláknových kompozitů je schopnost vytvořit materiál s požadovanými mechanickými vlastnostmi v určených směrech [19].

Vlákna lze rozdělit dle poměru délky k průměru na:

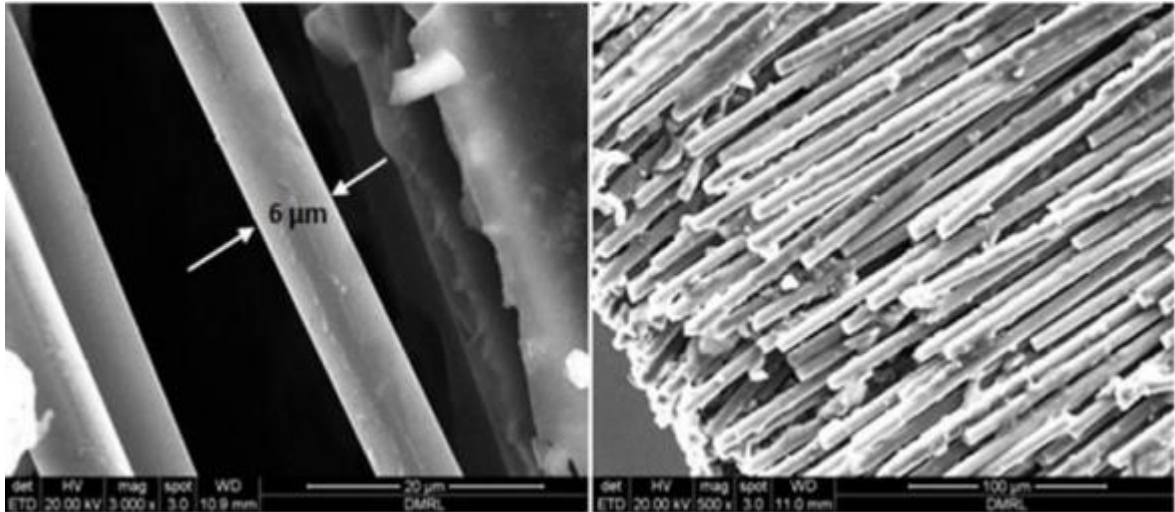
- krátká,
- dlouhá [2, 19].

Krátká vlákna (Obr. 2), označována i jako sekaná vlákna, jsou totiž připravována sekáním pramenů dlouhých vláken – jsou to taková vlákna, jejichž poměr délky k průměru je menší než 100. Při výrobním procesu bývají často vstříkována do formy zároveň s tekutou pryskyřicí, proto jsou ve většině případů orientována nahodile. Z důvodu náhodné orientace vláken je účelné je použít tam, kde nelze spolehlivě určit směr namáhání, nebo kde je namáhání v různých směrech stejné [2, 4, 19].



Obr. 2: Krátkovláknový kompozit - optická mikroskopie [20]

Dlouhá vlákna (Obr. 3) jsou taková vlákna, jejichž poměr délky k průměru je větší než 100 a obvykle prostupují. Orientace dlouhých vláken v kompozitních materiálech lze řídit a hraje klíčovou roli při dosažení požadovaných mechanických vlastností a chování materiálu. Správná orientace vláken při návrhu kompozitního materiálu může maximalizovat pevnost, tuhost a odolnost vůči namáhání. Vlákna umístěná ve směru očekávaného zatížení poskytují maximální pevnost. To je důležité při konstrukci komponent, které jsou vystaveny jednoosému nebo víceosému namáhání [1, 19].



Obr. 3: Dlouhovláknový kompozit – SEM [21]

4.3.3 Prepreg

Prepreg je termín pro výztužnou tkaninu, která je předimpregnována nevytvrzenou matricí [2, 21]. Prepregy jsou obvykle dodávány ve formě válcovaných plátků nebo rolí.

Při výrobě prepregu je na paralelně vedené rovingy⁵ nanášen reaktoplast [14]. Při běžné teplotě má systém nízkou reaktivitu, avšak při zvýšených teplotách se jeho reaktivita zvyšuje. Z tohoto důvodu je nutné prepreg skladovat při nízkých teplotách (v mrazničce). Připravený prepreg lze při výrobě vložit do formy bez nutného přidání jakéhokoliv pojiva. K vytvrzení stačí působení tlaku a tepla pro vytvoření výsledného kompozitu [22].

Výhodou prepregu je, již jeho hotová struktura, která obsahuje vlákna spojená s pojivem. Je připraven k použití ve výrobním procesu bez dalšího impregnování. Velmi často se používá při opravách kompozitních materiálů nebo při výrobních procesech, kde je ručně vrstven výsledný kompozit.

4.4 Interakce výztuže a matrice

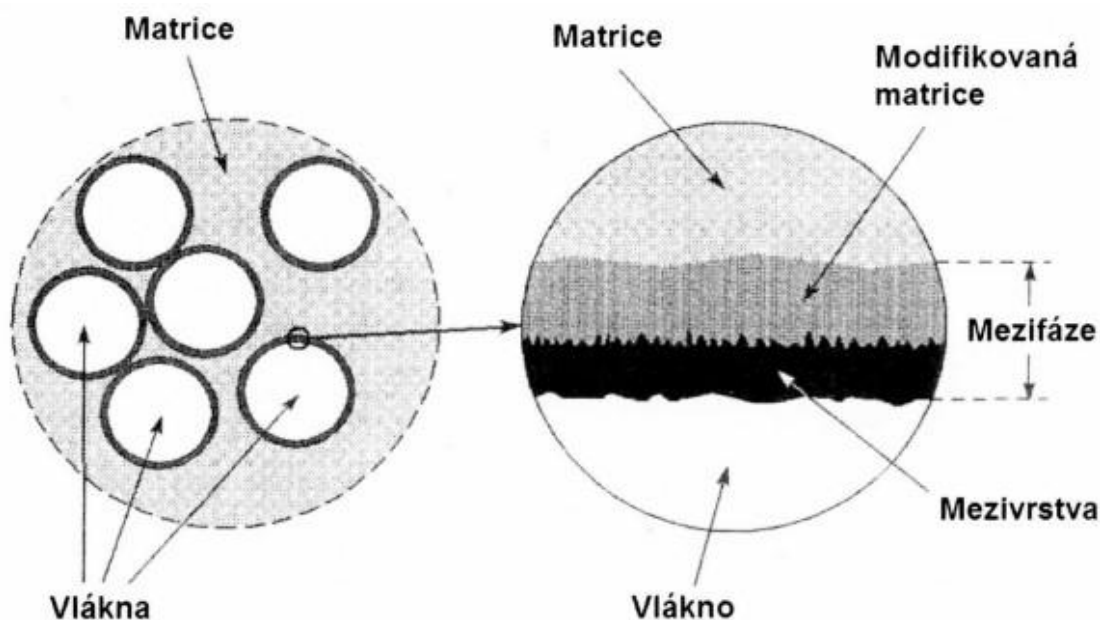
Klíčovým a také náročným problémem, který je třeba vyřešit při výrobě kompozitu je interakce výztuže a matrice. Interakce jednotlivých fází znamená schopnost přenosu zatížení z matrice na výztuž a naopak, jinými slovy soudržnost kontaktu fází [4, 5].

Interakce mezi výztuží a matricí je klíčová pro dosažení požadovaných mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost, odolnost proti únavě a odolnost proti poškození. Oblast, kde interaguje (setkává se) výztuž a matrice, se nazývá mezifázové rozhraní.

⁵ Roving – rovnoběžně seskupené pramence vláken [2].

4.4.1 Mezifázové rozhraní

Mezifázovým rozhraním, jak lze vidět na Obr. 4, je nazývána hraniční vrstva, která dělí setkávající se fáze kompozitního materiálu, jejíž struktura, složení nebo vlastnosti mohou být odlišné od vlastností samotné matrice a plniva [23].

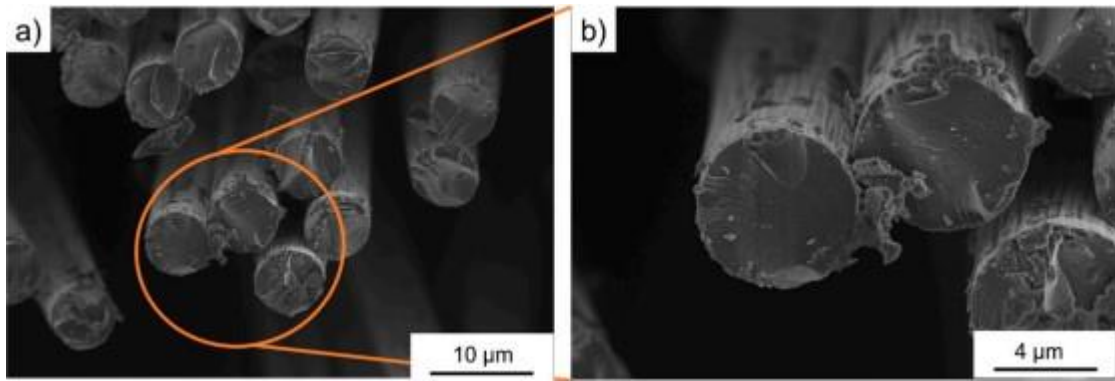


Obr. 4: Mezifázové rozhraní ve vláknovém kompozitu [24]

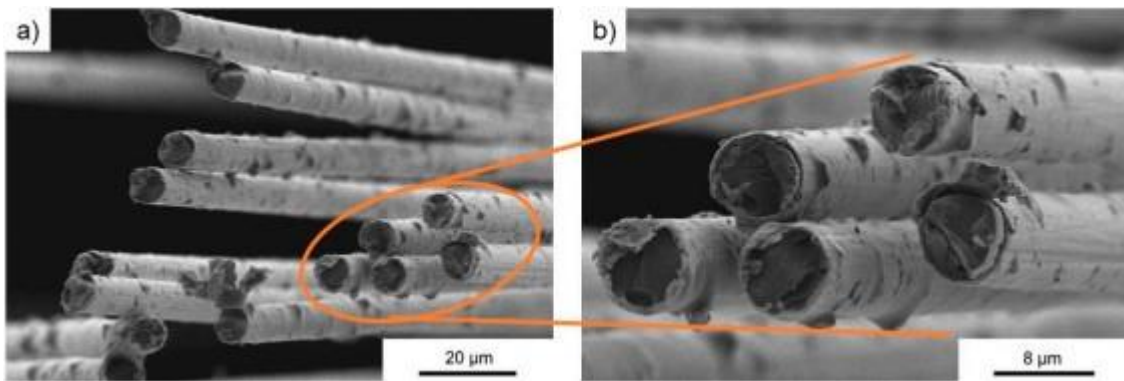
Mezifázové rozhraní je klíčové pro chování kompozitního materiálu, protože na tomto rozhraní dochází k přenosu zatížení, vzniku trhlin a reakcí mezi jednotlivými složkami kompozitu. Mezifáze pomáhá výtuži a matici působit jednotně [7, 23].

Efektivní řízení a optimalizace mezifázového rozhraní může vést k významnému zlepšení vlastností kompozitních materiálů.

Mezifáze lze rozdělit na dva typy, a to řízená a neřízená. Neřízené rozhraní obsahuje pouze plnivo bez povrchové úpravy (Obr. 5). Pro řízené rozhraní je charakteristické nanášení tenké mezivrstvy na povrch plniva (Obr. 6) s cílem zlepšení smáčivosti [23, 24].



Obr. 5: Uhlíkové vlákno bez povrchové úpravy – SEM [25]



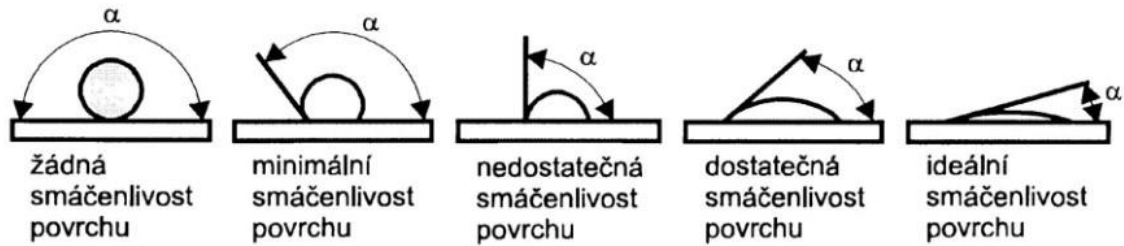
Obr. 6: Uhlíkové vlákno potažené niklem – SEM [25]

Nezbytnou podmínkou pro vysokopevnostní mezifáze je dokonalé smáčení [5].

4.4.2 Smáčivost

Jedna ze základních vlastností povrchu materiálu je schopnost kapaliny udržovat kontakt s pevnou látkou mezimolekulární interakcí adhezivního a kohezního typu. V oblasti kompozitních materiálů lze smáčivost definovat jako schopnost matrice (kapaliny) přilnout k povrchu výztuže (pevné látky). Smáčivost určuje, do jaké míry se matrice rozprostírá mezi výztuží a jak dobře je schopna přenášet mechanické vlastnosti na výztuž [2, 26].

Jedním ze způsobů hodnocení smáčivosti povrchu je tzv. kapková metoda pomocí kontaktního úhlu α . Z Obr. 7 vyplývá, že smáčivá kapalina má kontaktní úhel s pevnou látkou menší než 90° . Nesmáčivý povrch má kontaktní úhel α větší než 90° [26].



Obr. 7: Hodnocení smáčivosti povrchu - kapková metoda [27]

Snížením kontaktního úhlu α lze dosáhnout lepšího smáčení. Snížení lze docílit:

- modifikací chemického složení povrchu výztuže,
- modifikací chemického složení tekuté matrice,
- předehřátím výztuže před smáčením matricí [4].

Významným aspektem je také adheze mezi pojivem a plnivem, která ovlivňuje pevnost a odolnost kompozitu.

Adheze lze charakterizovat jako sílu, pomocí níž jsou dva povrchy přitahovány k sobě. V případě kompozitních materiálů se jedná o vázání matrice s povrchem výztuže. Vázání lze vyjádřit jako druh přitažlivých fyzikálních sil, které jsou označovány jako Van der Waalsovy síly [1, 23, 24].

Dalším významným pojmem v oblasti smáčivosti je koheze (soudržnost).

Koheze je vlastnost materiálu, která se týká jeho schopnosti udržovat jednotlivé částice nebo molekuly pohromadě a odolávat vnitřnímu rozpadu nebo deformaci. Jedná se o sílu přitahující částice stejného materiálu k sobě [23].

Silná koheze na mezifázovém rozhraní je zásadní pro zajištění účinného přenosu zatížení a minimalizaci možnosti delaminace.

4.5 Technologie výroby kompozitů

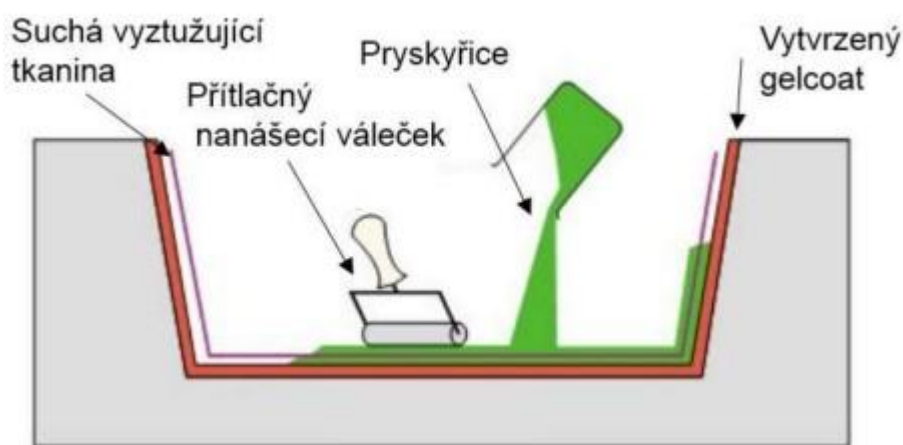
Výroba kompozitních materiálů je proces spojování dvou nebo více odlišných složek s cílem vytvořit nový materiál s vylepšenými vlastnostmi. Každý kompozit musí před samotnou výrobou projít návrhovým cyklem, kde je nutno určit priority funkcí jednotlivých složek. Jednotlivé složky musí být vybrány z hlediska žádaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností i s ohledem na okolní prostředí při využívání tak, aby výztuž i matrice pracovaly spolu v souladu, a to i v extrémním prostředí. Správná charakterizace vlastností je velmi důležitá, když je třeba porovnávat kvality různých materiálů vyrobených různými technologiemi [2, 5].

Technologií výroby kompozitů existuje celá řada. Tyto technologie mohou být kombinovány nebo upravovány podle konkrétních požadavků na vlastnosti a aplikace kompozitních materiálů. Každá z těchto technologií má své výhody a omezení a výběr vhodné metody závisí na specifických požadavcích projektu. V této kapitole jsou popsány ty podstatné z nich.

4.5.1 Ruční kladení

Ruční kladení je jednou z technik výroby kompozitů, která se používá především v malosériových výrobcích, opravách nebo při výrobě složitých tvarů, které jsou obtížně dostupné pro automatizované procesy [28].

Proces (Obr. 8) začíná nanesením separačního činidla na dno formy, pro snadné oddělení výrobku od formy. Další fází je vyložení první vrstvy gelcoatem⁶, který zajistí ochranu povrchu a možnost dokončovacích operací. Následně je rozprostřena výtuz po jednotlivých vrstvách a každá vrstva je pomocí válečku prosycena tekutou pryskyřicí. Klíčovým úkolem je odstranění vzduchových bublin pomocí válečku při nanášení pryskyřice. Tyto bubliny totiž negativně ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného kompozitu [7, 28].



Obr. 8: Schéma technologie výroby - ruční kladení [30]

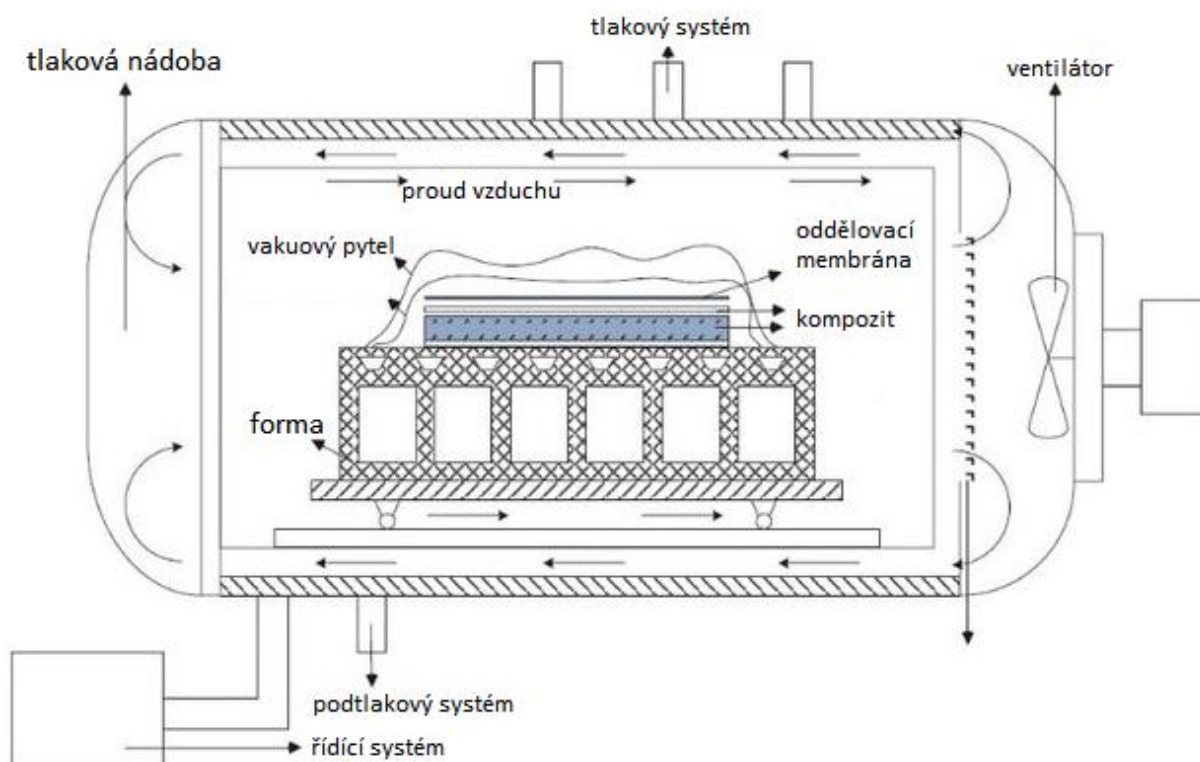
Hlavní výhodou těchto procesů je, že náklady na nástroje a vybavení jsou obecně nízké. Jsou však náročné na práci. Takže konečná kvalita kompozitu je vysoce závislá na individuálních dovednostech [7].

⁶ Gelcoat – tenká vrstva pryskyřice, která se nanáší na povrch kompozitních materiálů k vytvoření esteticky příjemného a odolného povrchu [29].

4.5.2 Lisování v autoklávu

Lisování pomocí vakua a následné vytvrzování v autoklávu je technologie výroby kompozitních materiálů, která se používá především pro kusovou výrobu. Tato technologie je využívána pro velkorozměrové struktury, na které jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu a mechanické vlastnosti kvůli jejich schopnosti vytvářet složité tvary s vysokou přesností a opakovatelností. Především se používá v leteckém a kosmickém průmyslu [31].

Proces (Obr. 9) spočívá ve vrstvení prepregové tkaniny – která je prosykována pryskyřicí – do formy, která je následně zabalena do vakuového pytle, který vytvoří podtlak (30-90 kPa). Následně je kompozit vložen do autoklávu, kde probíhá několik hodin až dní vytvrzování za zvýšené teploty (120-200 °C) a tlaku (cca 600 kPa), což činí tuto metodu časově náročnou. Během cyklu v autoklávu probíhá vytvrzení pryskyřice, což způsobuje, že kompozitní materiál získává svou pevnost a tuhost. Po dokončení procesu vytvrzení se autokláv postupně ochladí a poté je výrobek vyjmut [28, 32, 33].

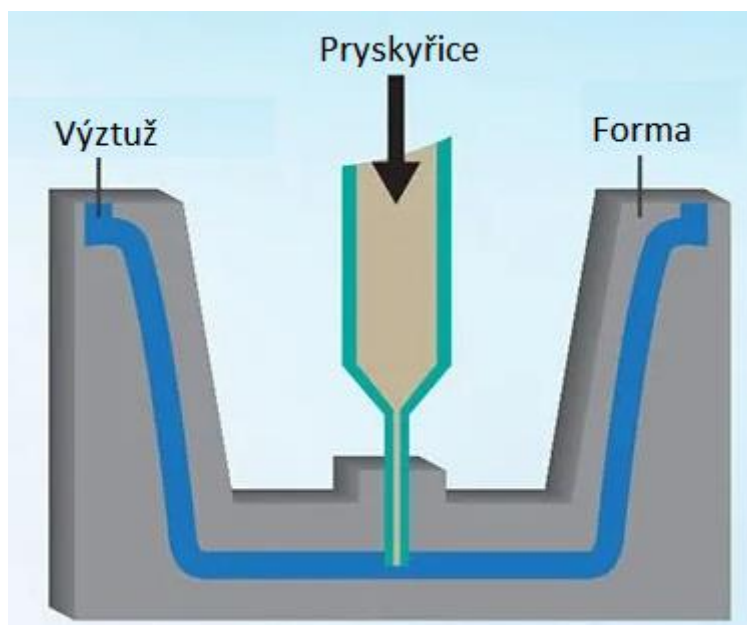


Obr. 9: Schéma lisování v autoklávu [34]

4.5.3 Reakční vstřikování

RTM (Resin Transfer Molding) je jednou z metod výroby kompozitních materiálů, která se často používá pro výrobu geometricky složitých a vysokokvalitních kompozitních dílů [35].

Proces RTM (Obr. 10) začíná tím, že na horní a spodní formu se aplikuje separační činidlo, které zamezí přilnavost pryskyřice ke stěnám formy, aby bylo na konci procesu snadné vyjmout vylisek z formy. Poté je předlisek⁷ umístěn do formy. Následně je forma uzavřena a je do ní vstříknuta pryskyřice při vysoké teplotě pod tlakem 300-690 kPa, dle velikosti a složitosti dílu. Po vytvrzení pryskyřice je kompozitní díl zhotoven a je vyjmut z formy [28, 36].



Obr. 10: Schéma RTM [37]

Mezi výhody RTM se řadí schopnost vytvářet složité tvary s vysokou přesností, povrchovou kvalitou a kontrolou tloušťky stěny, a to vše s relativní snadností a minimální potřebou dokončovacích operací [7].

RTM má i několik nevýhod, jako je delší cyklus výroby, potřeba pečlivé kontroly procesu, aby se zabránilo vadám spojených s kvalitou. Vady vyskytující se při výrobě touto metodou jsou způsobené procesem a nelze je zcela odstranit, např. výskyt dutin nebo nepravidelné rozložení vláken. Důležitým parametrem je počáteční investice do formy [35].

4.5.4 Pultruze

Pultruze je technologie výroby pro výrobu kompozitních profilů kontinuálním procesem, což znamená, že může být snadno automatizován a použit pro sériovou výrobu s vysokou produkční rychlostí a konzistentní kvalitou [7].

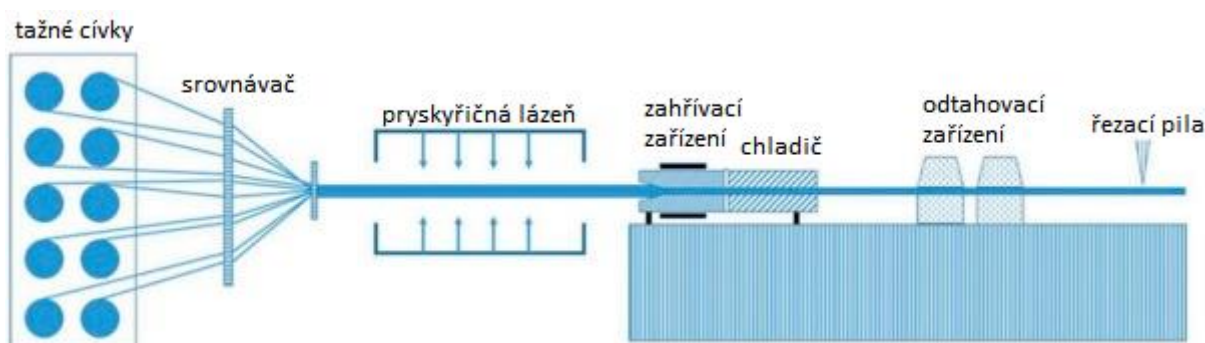
Profily vyráběné pultruzí nelze vyrobit s různým průřezem, případně složitou geometrií. Vyztužující fáze ve formě vláken je primárně pouze v podélném směru. Techniku lze rozvinout

⁷ Předlisek – suchá vlákna uspořádaná do požadované struktury [36].

do procesu tahového navíjení, ve kterém je pultrudovaný jednosměrný profil po vynoření z pultruderu obalen vlákny, která překonávají anizotropii jednosměrné struktury [7, 28].

Pro pultruzi jsou převážně používány matrice na bázi reaktoplastu, avšak termoplastové matrice, které jsou obtížnější na výrobu (z důvodu vyšší viskozity polymerů) mají velkou výhodu, že po zhotovení profilu jsou tvarovatelné [28].

Proces začíná tažením, často skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken (ve formě rovingu nebo rohoží⁸), která vstupují do srovnávače, kde jsou rovnoměrně rozprostřena a správně umístěna a následně postupují skrz pryskyřičnou lázeň. Vlákná impregnována pryskyřicí jsou pak vytlačována do zahřívajícího, následně chladícího a nakonec odtahovacího zařízení, kde probíhá vytvrzování pryskyřice. Následně je profil nařezán řezací pilou na požadovaný rozměr [7, 23]. Schéma pultruzní linky je zobrazeno na Obr. 11.



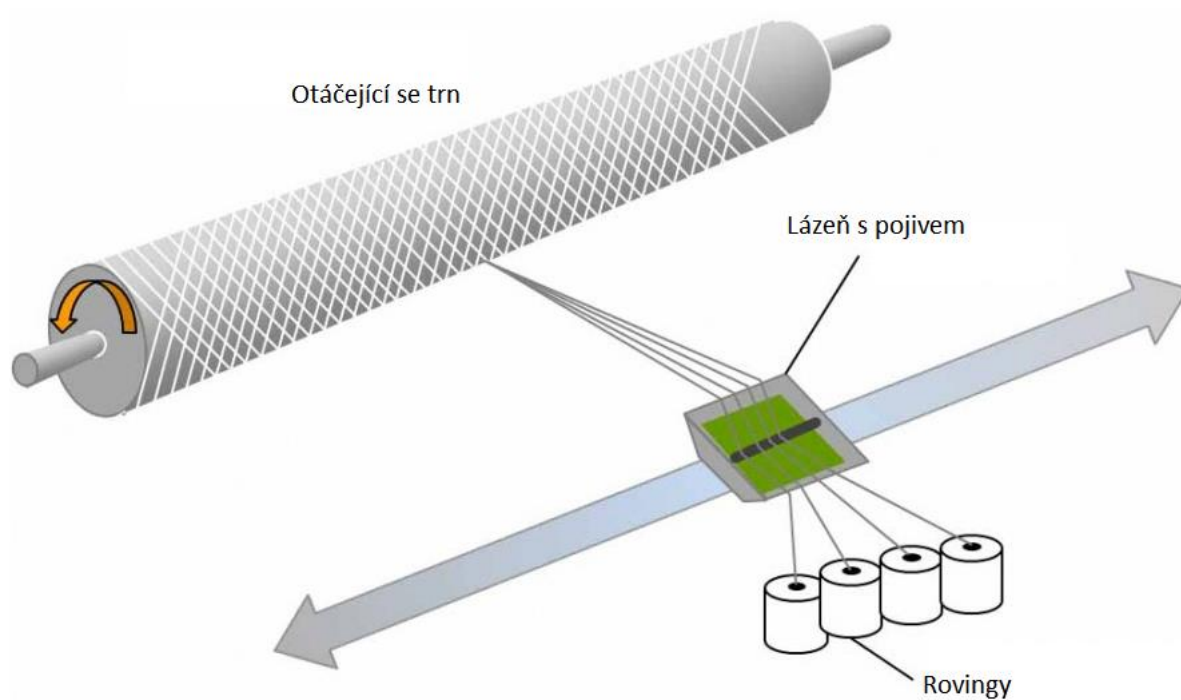
Obr. 11: Schéma pultruzní linky [38]

4.5.5 Navíjení

Navíjení je technologie výroby pro výrobu kompozitních profilů kontinuálním procesem.

Princip navíjení (Obr. 12) spočívá v namotávání vláken (ve formě rovingu) po předem určených trasách na otáčející se trn. Vlákná nejprve prochází lázní, ve které jsou impregnována pojivem. Navinutá vlákna se pro vytvoření pevného kompozitu následně nechají vytvrdnout při pokojové teplotě, nebo dopomocí tepelného nebo chemického procesu. Po vytvrzení se vyjme trn [7, 28].

⁸ Rohož – netkaná textilie, tvořená nahodile uspořádanými sekanými prameny vláken větší délky, které jsou spojeny pojivem [14].



Obr. 12: Schéma technologie výroby navíjení [39]

Výhodou této metody je dokonalá kontrola ukládání vláken, optimální mechanické vlastnosti a nízká pórovitost výsledného kompozitu [40].

Navíjení vláken je proces používaný k výrobě nádrží, tlakových nádob, hnacích hřídelí, trupů letadel a dalších výrobků s kruhovým tvarem, které vyžadují vysoký stupeň strukturální integrity [41, 42].

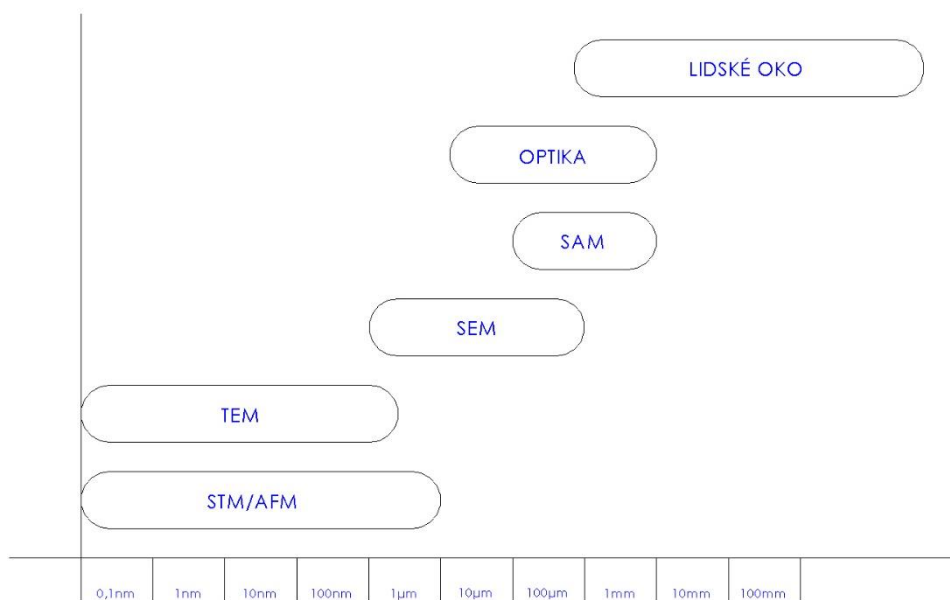
5 Moderní metody mikroskopie a jejich využití v kontrole kvality

5.1 Mikroskopické metody

Mikroskopie je technická oblast použití mikroskopů ke zkoumání mikrostruktury objektů, kterou nelze vidět pouhým okem [43].

Mikroskopické metody poskytují důležité kvantitativní informace o struktuře, mikrostruktuře, složení, vadách a defektech, distribuci fází, velikosti částic, ale také o historii zpracování materiálů [44]. Díky mikroskopii jsme schopni pozorovat věci, které jsou nad rámec rozlišitelnosti našeho oka (Obr. 13), a tedy jsou pro nás běžným okem neviditelné.

Existují různé typy mikroskopů, které využívají různé principy k zvětšení objektů. Kromě optických mikroskopů, které používají viditelné světlo a čočky k zvětšení, existují také elektronové mikroskopy, které využívají svazky elektronů k vytvoření obrazu s mnohem vyšším rozlišením, než je možné dosáhnout s optickými mikroskopy. Dalšími typy mikroskopů jsou akustické mikroskopy, které využívají zvukové vlny k vytvoření obrazu, a tunelové mikroskopy, které mohou snímat povrchovou strukturu materiálů na atomární úrovni.

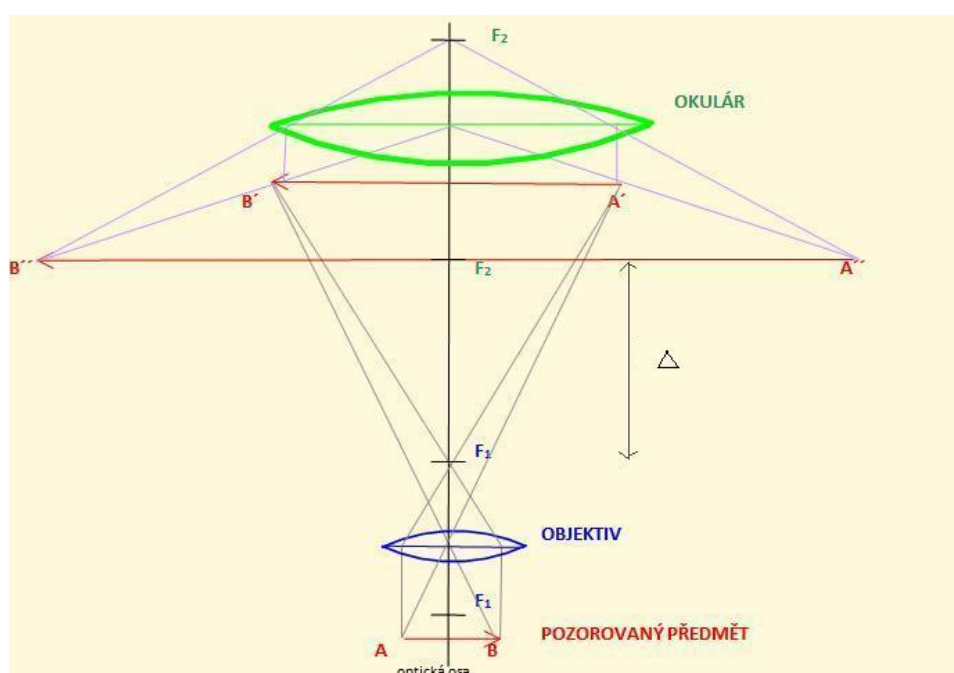


Obr. 13: Rozlišovací schopnost různých metod mikroskopie a lidského oka [44]

5.1.1 Optická mikroskopie

Optická mikroskopie je technika zobrazování, která využívá světelných paprsků k prohlížení a získávání detailních informací o mikroskopických objektech. Tato technika umožňuje zvětšení objektů až na úroveň, která není viditelná pouhým okem [45].

Princip zobrazení zvětšeného obrazu (Obr. 14) je zprostředkován pomocí soustavy čoček – objektivu a okuláru – které mají společnou optickou osu. Sledovaný předmět je umístěn blíže k objektivu. Předmět umístěný těsně před ohnisko objektivu (F_1) je zobrazen objektivem do vzdálenosti, která je větší než dvojnásobná ohnisková vzdálenost objektivu. Tento obraz předmětu je převrácený, skutečný a zvětšený. Okulár je optický prvek, který je blíže k oku. Skutečný obraz vytvořený objektivem okulár posouvá dále od oka, abychom mohli předmět dobře zaostřit okem. Obraz vytvořený objektivem je promítán mezi okulár a jeho ohnisko (F_2). Vzhledem k tomu, že oko se minimálně namáhá, pozoruje-li obraz předmětu v nekonečno, je okulár umístěn tak, aby se obraz vytvořený objektivem nacházel v ohnisku okuláru. Konečný obraz předmětu je zvětšený, neskutečný a převrácený [46, 47].



Obr. 14: Schéma principu optického mikroskopu [46]

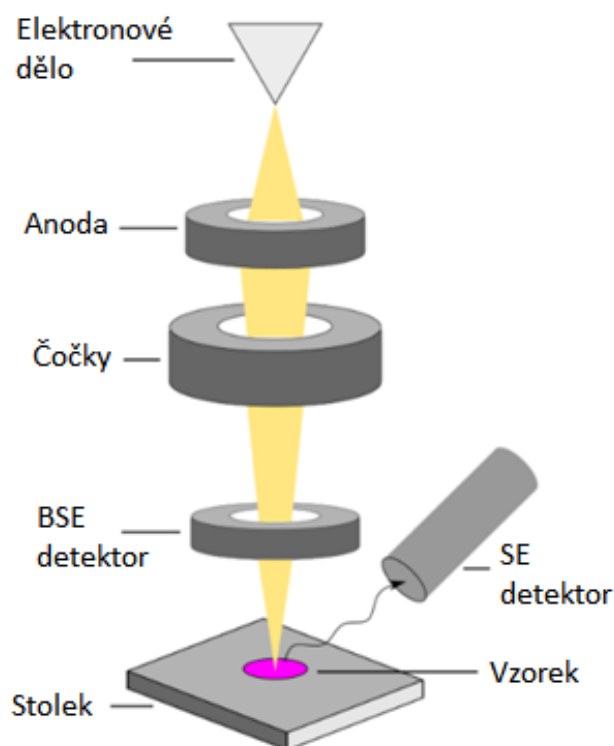
5.1.2 Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop využívá k zobrazování svazek urychlených elektronů místo viditelného světla. Ve srovnání se světelným mikroskopem má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišení zobrazení, jelikož vlnová délka elektronů je mnohem kratší, než vlnová délka viditelného světla [48]. Elektronovou mikroskopii lze rozdělit na:

- skenovací elektronová mikroskopie (SEM),
- transmisní elektronová mikroskopie (TEM) [44].

Skenovací elektronová mikroskopie je v současnosti nejvyužívanější metodou pro studium kompozitních materiálů.

Princip SEM je skenování povrchu vzorku řádek po řádku, pomocí dopadajícího svazku elektronů [44]. Primární elektrony uvolněné ze zdroje poskytují energii atomovým elektronům vzorku, které se pak mohou uvolnit jako sekundární elektrony (SE). Může tak být vytvořen obraz pomocí SE detektoru⁹ sběrem těchto sekundárních elektronů z každého bodu. Primární elektrony jsou urychlovány a usměrňovány pomocí průchodu skrz anodu a elektromagnetické čočky na zkoumaný vzorek. Další možností zobrazení je detekce zpětně odražených elektronů pomocí BSE detektoru¹⁰ [49]. Schéma principu SEM je zobrazeno na Obr. 15.

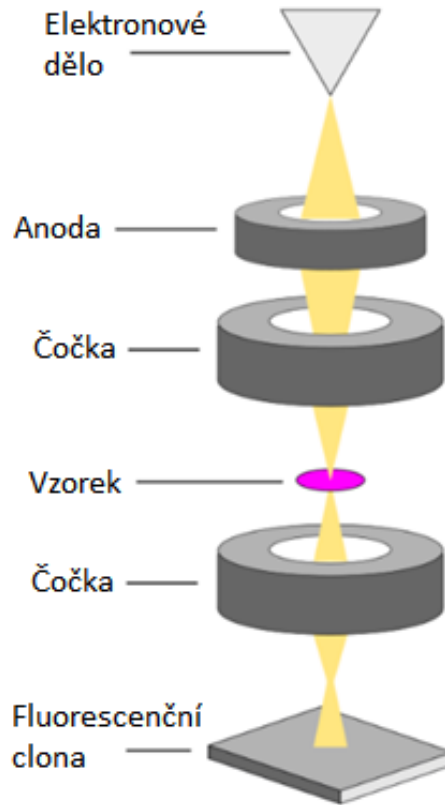


Obr. 15: Schéma principu SEM [48]

Transmisní (prozařovací) elektronová mikroskopie je metoda, která využívá k zobrazení předmětu procházející svazek elektronů [44]. Elektronové dělo produkuje elektrony, které se zaostří na vzorek pomocí kondenzorové čočky. Čočka objektivu zaostřuje část paprsku elektronů, které jsou vyzařovány ze vzorku. Následně je elektronovým paprskem ozářena fluorescenční clona, která emituje fotony, které vedou ke vzniku obrazu [50]. Schéma principu TEM je zobrazeno na Obr. 16.

⁹ SE detektor – detektor zachycující sekundární elektrony [49].

¹⁰ BSE detektor – detektor zachycující zpětně odražené elektrony [49].

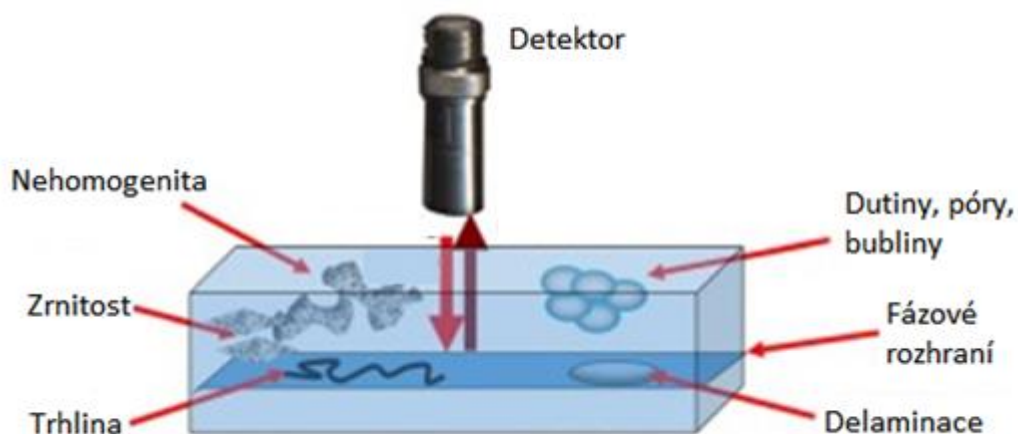


Obr. 16: Schéma principu TEM [48]

5.1.3 Skenovací akustická mikroskopie

Skenovací akustická mikroskopie (SAM) je výkonná, nedestruktivní technika, která dokáže detekovat skryté vady. Touto metodou lze efektivně najít fyzikální vady, jako jsou praskliny, dutiny a delaminace s vysokou citlivostí [51].

Ultrazvukové pulsy jsou generovány piezoelektrickým měničem. Poté, co jsou vygenerovány akustické vlny, je v mikroskopu použit detektor k detekci odražených nebo rozptýlených akustických vln. Na základě zpracovaných dat mikroskop vytváří obraz povrchu vzorku [51]. Schéma principu SAM je zobrazeno na Obr. 17.



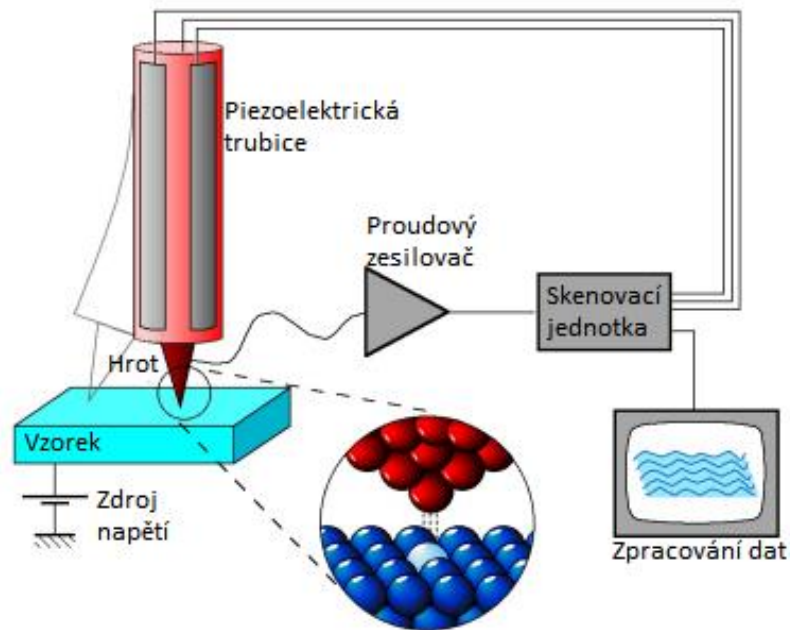
Obr. 17: Schéma principu SAM [51]

5.1.4 Tunelová mikroskopie

Pojem zvětšení nebývá v oblasti tunelové mikroskopie využíván, jelikož získaný obraz je vytvářen na základě elektromechanické interakce sondy se vzorkem a skutečné rozměry je třeba kalibrovat. Tunelové mikroskopy jsou neoptické přístroje, což znamená, že nepoužívají viditelné světlo ani jiné formy elektromagnetického záření. Dle principu funkce lze tunelovou mikroskopii rozdělit na:

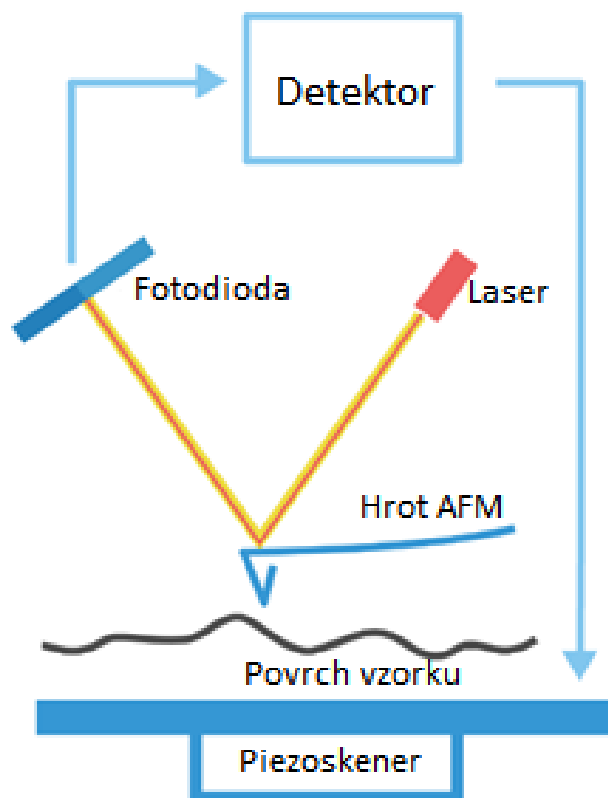
- skenovací tunelová mikroskopie (STM),
- mikroskopie atomárních sil (AFM) [44].

Skenovací tunelový mikroskop je druhem neoptického mikroskopu, který mapuje skenovaný vodivý povrch vzorku pomocí pohybu vodivého hrotu využitím kvantové teorie tunelového jevu [52]. Schéma zařízení je zobrazeno na Obr. 18.



Obr. 18: Schéma principu STM [53]

Mikroskop atomárních sil narozdíl od STM nepotřebuje vodivý vzorek a umožňuje zobrazení téměř jakéhokoli typu povrchu [54]. Namísto použití kvantově mechanického efektu tunelování se k mapování interakce hrot-vzorek používají atomové síly [55]. AFM využívá systém pohybu hrotu nad vzorkem. Tento pohyb je měřen zaostřením laserového paprsku fotodiodou. Hlavním úkolem piezoskeneru je umožnit přesné pohyby hrotu AFM nad povrchem vzorku s extrémní přesností a rychlostí [54]. Schéma zařízení je zobrazeno na Obr. 19.



Obr. 19: Schéma principu AFM [56]

5.2 Kontrola kvality

Kontrola kvality je proces, který se používá k zajištění toho, že výrobky, služby nebo procesy splňují stanovené standardy kvality a požadavky. Proces kvality zahrnuje systematické hodnocení a monitorování všech aspektů výroby či poskytování služeb s cílem minimalizovat chyby, nedostatky nebo odchylky od předem stanovených normativů.

Definicí existuje celá řada, ale jednoduše lze kvalitu popsat takto: „*Kvalita (jakost) je soubor inherentních znaků, která určuje schopnost uspokojit očekávání, požadavky nebo potřeby zákazníka nebo jiné zainteresované strany.*“ [57, 58]

Specifickým znakem jakosti je pojem jakost výrobku, ten je definován takto: „*Jakost výrobku je schopnost výrobku udržet si své vlastnosti i v průběhu používání při určeném provozním zatížení v daném časovém úseku.*“ [58]

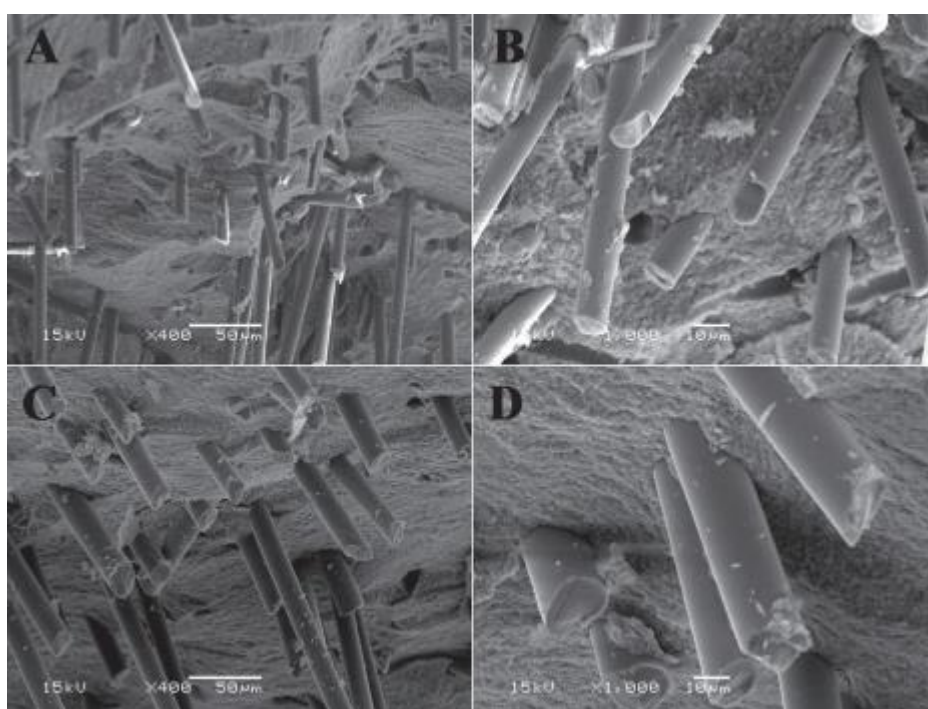
Kontrola kvality kompozitních materiálů je proces, který zahrnuje systematické metody a postupy pro zajištění konzistence, spolehlivosti a bezpečnosti materiálů. Kompozitní materiály jsou složeny z různých složek, jako jsou vlákna a pojiva, a jsou známy svou vysokou pevností a lehkostí. Nicméně kvalita těchto materiálů může být ovlivněna různými faktory, jako jsou výrobní procesy, suroviny a manipulace během výroby a používání.

V rámci hodnocení vlastností materiálů se používají mechanické a nedestruktivní zkoušky, jako cenný nástroj posouzení kvality.

5.2.1 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky jsou prováděny za účelem posouzení mechanických vlastností materiálů, jako je pevnost, pružnost, tvrdost apod. Tyto zkoušky jsou klíčové pro hodnocení výkonnosti materiálů v různých prostředích a pod různými zatíženími. Kontrola kvality pomocí mechanických zkoušek poskytuje informace o tom, zda materiál splňuje stanovené normy a požadavky pro danou aplikaci [59].

Na Obr. 20 je zobrazena lomová plocha kompozitu po ohybové zkoušce. Ve studiu byly zjištěny hodnoty lomové houževnatosti a pevnosti v ohybu kompozitního materiálu s polymerní maticí a skelnými vlákny. Mikroskopická SEM analýza poskytla informace o hodnocení typu lomu – zda proběhl křehce nebo plasticky. Dále poskytla vizualizaci rozložení vláken v matici a interakci matrice a vláken. Výsledné informace jsou vhodné pro optimalizaci materiálového složení, nebo výrobních procesů [60].



Obr. 20: Lomová plocha kompozitu – SEM [60]

5.2.2 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky (NDT, defektoskopie) jsou prováděny bez poškození zkoumaného materiálu. Tyto zkoušky jsou zaměřeny na detekci vnitřních vad, trhlin, nehomogenit a dalších nedostatků, aniž by bylo nutné zničit testovaný materiál. Tím se umožňuje průběžné monitorování kvality v průběhu výroby nebo provozu produktů a

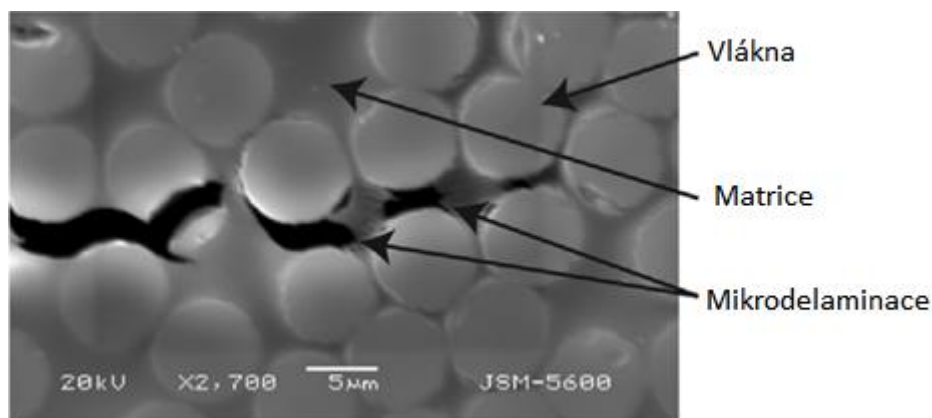
minimalizuje se riziko, že by byly poškozeny již hotové komponenty [59]. Detekce a popis vad kompozitních materiálů pomocí mikroskopie jsou detailněji popsány v následující kapitole 5.3.

5.3 Vady v kompozitních materiálech

Vady v kompozitních materiálech mohou vznikat během výroby nebo zpracování komponent. Zahrnují delaminace, trhliny, díry a poškození vláken, což může snížit pevnost a odolnost materiálu. Správná identifikace a řešení těchto vad je klíčová pro zajištění funkčnosti a trvanlivosti kompozitů [61].

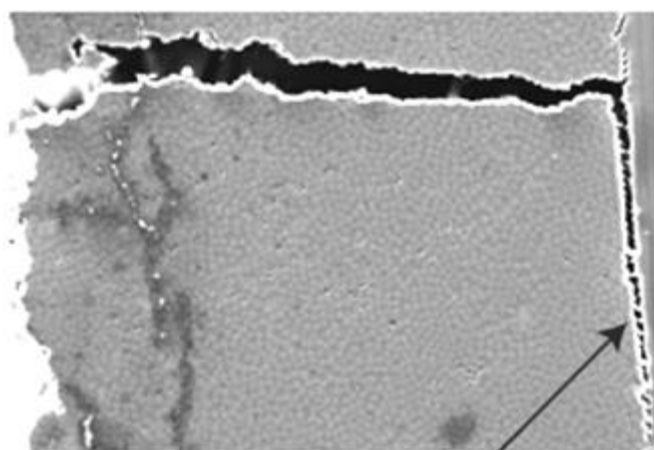
5.3.1 Delaminace

Delaminace a růst příčných mikrotrhlin jsou klíčovými mechanismy selhání v laminátových kompozitních materiálech¹¹, které jsou vzájemně propojené a významně přispívají k degradaci tuhosti materiálu, potenciálně vedoucí ke katastrofálnímu selhání. Příčné trhliny typicky začínají okolo vláken (Obr. 21), spojují se a rozšiřují až k hranicím vrstev, kde začínají mikrodelaminace (Obr. 22, 23). S rostoucím zatížením tyto mikrodelaminace koalescují do makroskopických delaminací, čímž se výrazně snižuje nosná kapacita materiálu [63].



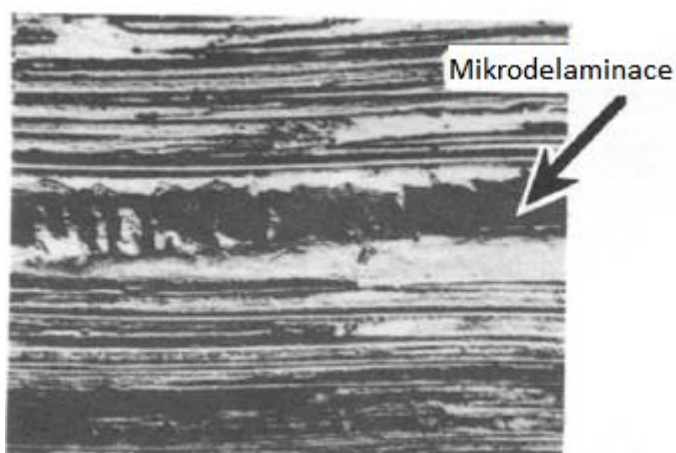
Obr. 21: Mikrodelaminace – SEM [63]

¹¹ Laminát – vrstvený materiál skládající se z více vrstev různých materiálů, které jsou spojeny dohromady, aby poskytovaly vylepšené mechanické vlastnosti [62].



Mikrodelaminace

Obr. 22: Mikrodelaminace – SEM [63]



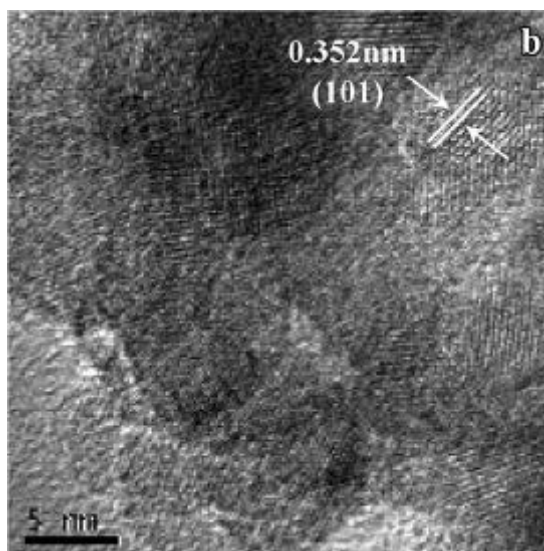
Obr. 23: Mikrodelaminace – SAM [64]

K redukci delaminace kompozitních spojích se využívají techniky jako je vkládání příčných výztuh a použití lepidel s vysokou pružností a odolností, která jsou schopna lépe odolávat nárazům a zvyšovat kompatibilitu s kompozitními materiály [65].

5.3.2 Nehomogenita

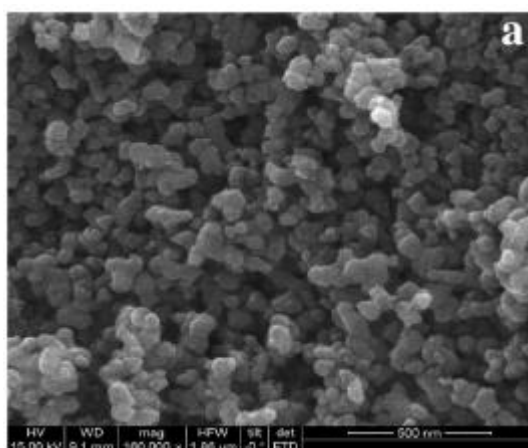
Nehomogenity v prostorovém rozložení je třeba popisovat na různých úrovních délkového měřítka. Podle jejich vlastností lze nehomogenity klasifikovat jako mikroskopickou nehomogenitu a makroskopickou nehomogenitu [66].

Striktně vzato není žádný inženýrský materiál homogenní na mikroskopické úrovni, jak bylo odhaleno mnoha moderními technikami, jako je TEM, viz Obr. 24. Vždy existují různé nehomogenity v mikroregionu [66].



Obr. 24: Struktura nehomogenity – TEM [67]

Technologie TEM poskytuje detailní obrázky a informace o topografii a složení povrchu vzorků. Technologie SEM nabízí informace o vnitřní struktuře, včetně krystalografie, velikosti částic, tvaru a defektů v materiálu. TEM má vyšší rozlišení, než SEM, viz Obr. 25, což umožňuje pozorování atomové struktury materiálů [67].



Obr. 25: Struktura nehomogenity - SEM [67]

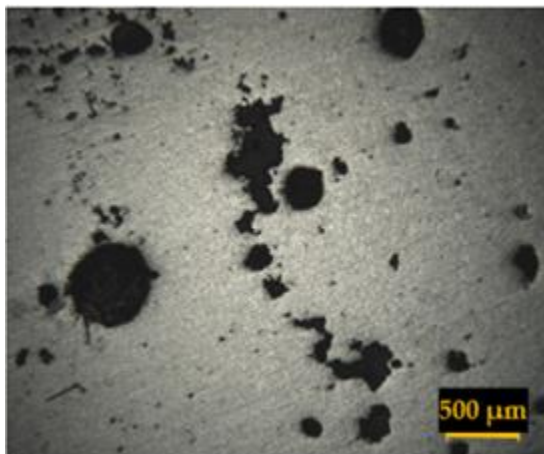
5.3.3 Dutiny, póry a bubliny

Dané vady se vyskytují zejména v maticích na pryskyřicové bázi, kdy matrice je stále kapalná [68].

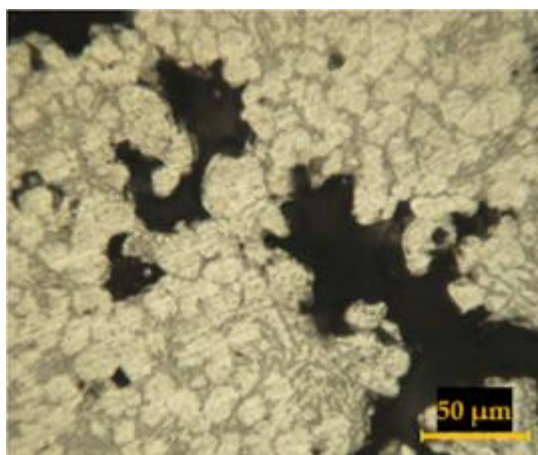
Bublinové póry vznikají často ze špatné kontroly materiálu nebo procesu, z přestárlého materiálu nebo vlhkosti v prepregu. Přestože jsou bubliny obvykle velmi malé a náhodně rozmístěné, vytvářejí lokální koncentrace napětí. Jejich velikost není až tak důležitým faktorem jako jejich koncentrace. Pórovitost zhoršuje tahové, tlakové mezilamelové a nosné vlastnosti kompozitů, zejména však tlakové vlastnosti při zvýšených teplotách. Vliv na pevnost a

únavovou životnost laminátů s převahou matrice je zřejmější. Velmi silná pórovitost přibližně 2 % významně ovlivňuje vlastnosti s převahou matrice [61].

Bubliny a póry v řezu na zkušebním vzorku jsou optickou mikroskopií zobrazené na Obr.26. Na Obr. 27 je zobrazen typický vzhled plynových pórů, dutin a bublin pomocí TEM [69].

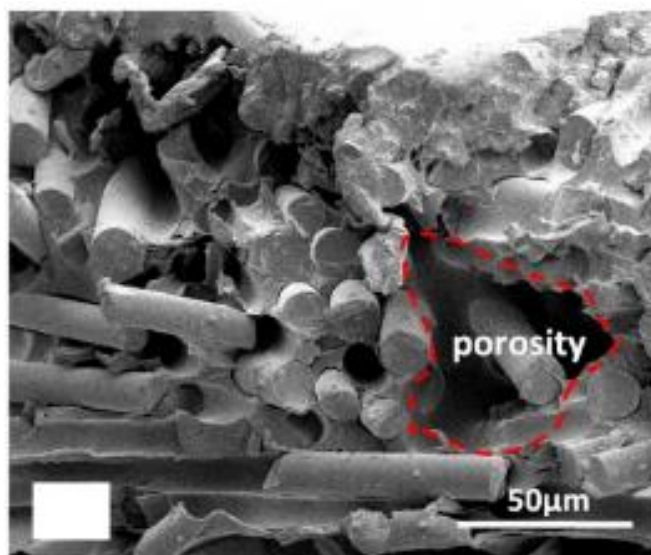


Obr. 26: Póry, bubliny – optická mikroskopie [69]



Obr. 27: Dutiny, póry, bubliny – TEM [69]

Na dalším vzorku kompozitu (Obr. 28), je nalezena taktéž pórovitost technologií SEM. Oblast uvnitř přerušované čáry označuje pórovitost uvnitř kompozitů. Vysoká viskozita matrice vede k nabalování vzduchových bublin uvnitř kompozitu během procesu výroby. Některé vzduchové bubliny se vytvořily i během procesu míchání směsi s uhlíkovými vlákny a fenolovou matricí [70].

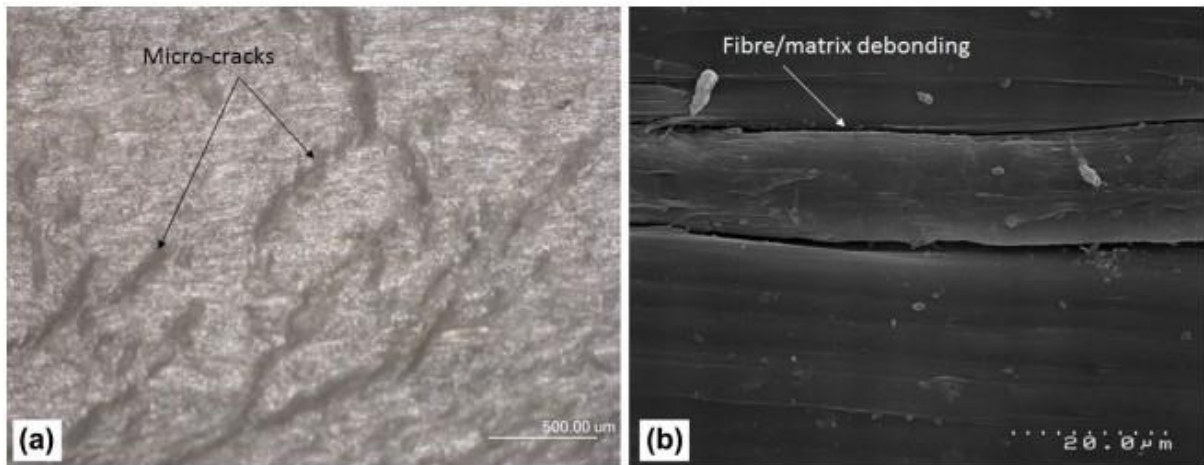


Obr. 28: Pórovitost – SEM [70]

5.3.4 Mikrotrhliny

Mikrotrhliny v kompozitech mohou vznikat z různých příčin, včetně tepelného napětí a mechanické únavy. Trhliny mohou vážně ohrozit strukturální integritu a výkon kompozitů. Například mikrotrhliny způsobené tepelným napětím vznikají kvůli rozdílu v koeficientech tepelné roztažnosti mezi složkami kompozitu. Mechanická únava, další běžná příčina, pramení z cyklického zatížení, které vede k iniciaci a růstu trhlín při napětíových úrovních podstatně nižších, než je napětíová úroveň selhání materiálu při monotonním zatížení [71].

K detekci mikrotrhlín a posouzení poškození kompozitů se používají různé metody nedestruktivního vyhodnocování. Optické metody, včetně vizuální inspekce a optické mikroskopie, se běžně používají pro detekci povrchových a téměř povrchových vad. Pokročilé techniky, jako SEM, která odhaluje povahu a rozsah interních poškození, jako jsou delaminace a mikrotrhliny. Detekce mikrotrhlín různými mikroskopickými metodami je zobrazeno na Obr. 29 [71].

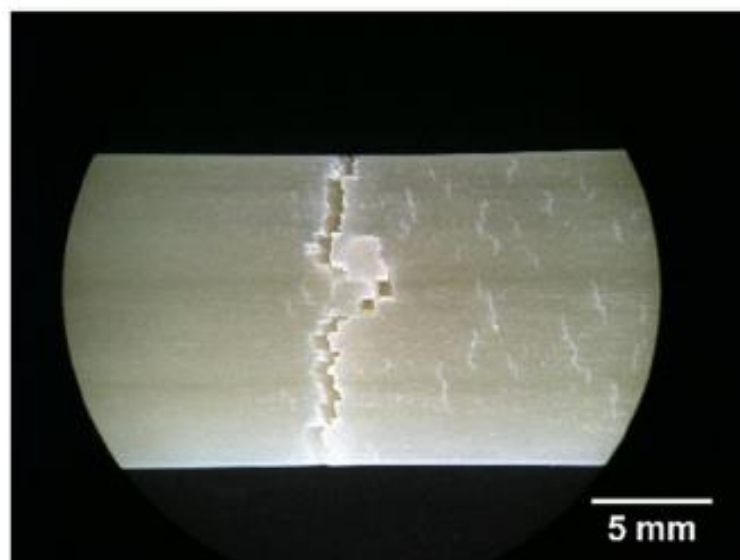


Obr. 29: Mikrotrhliny - a) Optická mikroskopie; b) SEM [72]

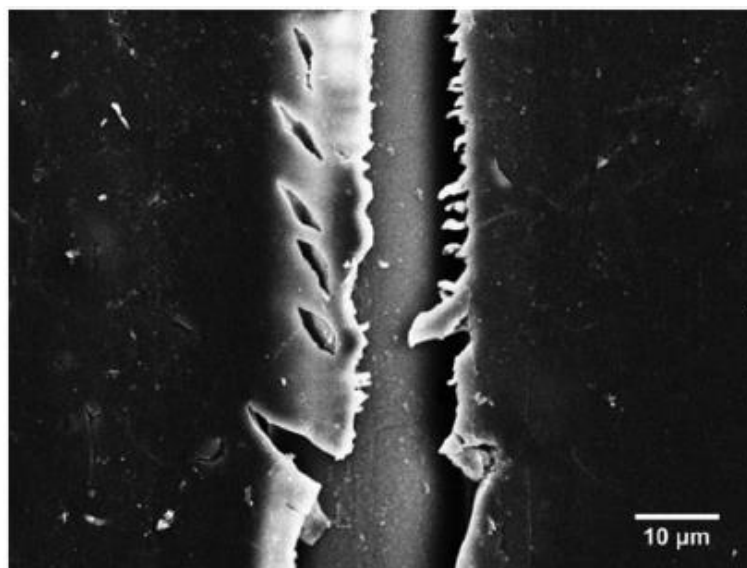
5.3.5 Korozní praskání

Korozní praskání je forma koroze, která vzniká kombinací mechanického napětí a korozního prostředí a vede k tvorbě trhlin v materiálu. Popsaný proces může být způsoben prostředím vyvolávajícím korozní praskání, jako jsou určité chemikálie nebo extrémní teploty, ve spojení s tahovým namáháním materiálu. Trhliny často vycházejí z místa lokálního porušení pasivní vrstvy, jako je například bodová koroze, a mohou se šířit buď po hranicích vláken nebo napříč maticí. Korozní praskání může mít vážné důsledky pro strukturální integritu a bezpečnost aplikací v různých průmyslových odvětvích [73].

Na Obr. 30 je optickou mikroskopií znázorněn vznik korozního praskání v kombinaci agresivního chemického prostředí a mechanického namáhání povrchu kompozitu. Na Obr. 31 je zobrazeno zkorodované vlákno, které způsobí nesoudržnost s maticí pomocí SEM analýzy.



Obr. 30: Korozní praskání - optická mikroskopie [73]



Obr. 31: Zkorodované vlákno - SEM [73]

Studie ukazuje, že kompozity zesílené vlákny E-CR skla¹² vykazují výrazně lepší odolnost vůči koroznímu napětovému praskání v prostředích obsahujících kyselinu dusičnou, vysoké teploty a mechanický stres, než kompozity s vlákny E-CR skla, což zdůrazňuje význam výběru vhodných materiálů pro zvýšení odolnosti kompozitů v korozivních prostředích. Efektivní monitorování a pravidelná kontrola povrchu a mechanických vlastností kompozitů jsou klíčové pro detekci a prevenci poškození [73].

¹² ECR sklo - typ skelného vlákna s vylepšenou chemickou a korozní odolností [73].

6 Výsledky a aplikace

6.1 Analýza použití moderních metod mikroskopie v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů

Mikroskopie k analýze materiálů je důležitý nástroj pro vědecký výzkum, průmyslový vývoj a kvalitu výroby v široké škále odvětví. Pomáhá identifikovat problémy, optimalizovat procesy a vytvářet nové materiály s požadovanými vlastnostmi.

Navzdory rostoucímu počtu inženýrských aplikací strukturních kompozitů však přesná předpověď jejich mechanického chování stále zůstává obtížným úkolem kvůli složitosti mechanismů selhání, zejména na mikroskopické úrovni [62].

Kompozity musí splňovat určité minimální požadavky, pokud jde o jejich pevnost a tuhost, stejně jako jejich schopnost zachovat si požadované vlastnosti v přítomnosti nepříznivých podmínek [59].

Pro přehlednost je za pomoci SWOT analýzy popsáno využití mikroskopických metod v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů.

Mikroskopické metody v oblasti kontroly kvality kompozitních materiálů	
Silné stránky	Slabé stránky
<p>Detailní zkoumání struktury</p> <p>Opakovatelné nedestruktivní zkoumání</p> <p>Odhalitelnost skrytých vad</p> <p>Kvantitativní analýza</p>	<p>Nákladný nákup a provoz zařízení</p> <p>Potřeba odborného personálu a laboratorního prostředí</p> <p>Časová náročnost a nutnost přípravy vzorků</p> <p>Omezení velikosti vzorků</p>
Příležitosti	Hrozby
<p>Integrace s jinými metodami</p> <p>Poptávka kompozitů s důrazem na kvalitu</p> <p>Vývoj a vytváření nových metod</p> <p>Lepší porozumění o struktuře materiálů</p>	<p>Konkurence alternativních metod</p> <p>Technologické omezení</p> <p>Volba nevhodné metody</p> <p>Nedostatečná standartizace</p>

Tab. 1: SWOT analýza mikroskopických metod v oblasti kontroly kvality kompozitů

Detailní zkoumání struktury: Mikroskopické metody poskytují vysokou schopnost rozlišení, což umožňuje detailní analýzu struktury kompozitních materiálů na mikroskopické úrovni.

Opakovatelné nedestruktivní zkoumání: Mikroskopické metody jsou nedestruktivní, což umožňuje opakované měření a zkoumání bez poškození zkoumaného materiálu.

Odhalitelnost skrytých vad: Tyto metody umožňují detekci mikroskopických vad, jako jsou trhliny, poruchy vláken nebo nehomogenity v materiálu, což je klíčové pro kontrolu kvality.

Kvantitativní analýza: Mikroskopické metody umožňují kvantitativní analýzu různých parametrů, jako jsou rozměry, hustota, distribuce velikosti výztuže atd.

Nákladný nákup a provoz zařízení: Pořízení a údržba mikroskopických zařízení může být finančně náročná, což může být překážkou pro menší podniky nebo laboratoře.

Potřeba odborného personálu a laboratorního prostředí: Pro správné použití mikroskopických metod je často zapotřebí odborných znalostí a zkušeností, aby bylo zamezeno chyb při interpretaci výsledků. Dále mikroskopické metody vyžadují speciálně vybavené

laboratorní prostředí, které zahrnuje kontrolu teploty, vlhkosti a čistoty vzduchu. Toto prostředí musí být udržováno na přesné úrovni, aby se minimalizovaly možné rušivé vlivy na mikroskopické analýzy.

Časová náročnost a nutnost přípravy vzorků: Některé mikroskopické metody mohou být časově náročné, zejména pokud je potřeba provést detailní analýzu nebo zobrazování velkého počtu vzorků. Časově náročná je také potřeba přípravy vzorků před samotnou analýzou mikroskopickými metodami, např. před SEM analýzou je nutné, aby byl pozorovaný vzorek vodivý, tudíž nevodivý vzorek je třeba opatřit vrstvou kovového prášku.

Omezení velikosti vzorků: Velikost vzorků, které lze zkoumat mikroskopickými metodami, může být omezená.

Integrace s jinými metodami: Mikroskopické metody mohou být integrovány s jinými metodami kontroly kvality, jako jsou např. rentgenová tomografie nebo ultrazvuková zkouška, což umožňuje získat komplexnější informace o zkoumaném materiálu.

Poptávka kompozitů s důrazem na kvalitu: S rostoucím využitím kompozitních materiálů v průmyslových odvětvích roste i důraz na kontrolu jejich kvality, což může zvýšit poptávku po mikroskopických technologiích.

Vývoj a vytváření nových metod: Neustálé inovace v oblasti mikroskopie mohou vést k vývoji nových technik s ještě větší přesností, rychlostí a snížením nákladů.

Lepší porozumění o struktuře materiálů: Detailní analýza struktury kompozitních materiálů pomocí mikroskopických metod může vést k lepšímu porozumění jejich vlastnostem a chování, což může vést k vylepšení jejich designu a procesu výroby.

Konkurence alternativních metod: Existují i jiné metody kontroly kvality kompozitních materiálů, jako jsou rentgenové techniky, ultrazvukové zkoušky apod., které mohou být v některých případech efektivnější nebo ekonomičtější.

Technologické omezení: Některé kompozitní materiály mohou být obtížně analyzovatelné mikroskopickými technologiemi kvůli jejich složité struktuře nebo vlastnostem, což může představovat technologickou výzvu.

Volba nevhodné metody: Existuje riziko, že při kontrole kvality kompozitních materiálů může být zvolena metoda, která není vhodná pro danou aplikaci nebo specifické potřeby. To může vést k nedostatečné citlivosti, chybné interpretaci výsledků, ztrátě času a nedostatečné spolehlivosti výsledků.

Nedostatečná standardizace: Nedostatek standardizovaných postupů pro mikroskopické metody může vést k rozdílným výsledkům mezi různými laboratořemi a znesnadňovat porovnání výsledků.

6.2 Zhodnocení výhod a omezení jednotlivých mikroskopických metod

Každá mikroskopická metoda má své výhody a omezení a správná volba závisí na konkrétních potřebách a požadavcích na analýzu kompozitních materiálů. Často je vhodné kombinovat více metod pro získání komplexních informací o struktuře, složení a vlastnostech materiálu.

SEM poskytuje vysoké rozlišení a schopnost zobrazit topografii povrchu materiálu. Je ideální pro zkoumání povrchových struktur a morfologie částic v kompozitech. Metoda SEM však vyžaduje, aby byl vzorek vodivý nebo pokrytý vodivou vrstvou, což může ovlivnit jeho původní stav [74].

TEM umožňuje pozorování vnitřní struktury vzorků s atomovým rozlišením. Je vhodná pro studium nanostruktur, krystalové struktury a defektů v materiálech. Vzhledem k tomu, že elektrony procházejí vzorkem, musí být extrémně tenký, což je často technicky náročné [75].

SAM poskytuje informace o mechanických vlastnostech, jako jsou praskliny, delaminace nebo jiné defekty pod povrchem kompozitu. Je méně závislá na elektrických vlastnostech materiálu, což ji činí vhodnou pro studium široké škály materiálů. Metoda SAM však nemá tak vysoké rozlišení jako elektronové mikroskopické techniky [76].

Optická mikroskopie je jednoduchá a přístupná metoda, která umožňuje rychlou inspekci a identifikaci makro- a mikrostruktur. Její rozlišovací schopnost je však omezena difrakčním limitem světla, což ji činí méně vhodnou pro studium nanomateriálů nebo velmi jemných detailů.

Mikroskopické metody, jako je mikroskopie atomárních sil (AFM) a skenovací tunelová mikroskopie (STM), jsou velmi užitečné při zkoumání povrchových vlastností materiálů na atomární a molekulární úrovni. Nicméně pro hodnocení kvality kompozitních materiálů existují některé omezení těchto metod:

- AFM a STM poskytují informace pouze o povrchu materiálu. U kompozitních materiálů mohou být vlastnosti a kvalita materiálu závislé na jeho vnitřní struktuře a rozložení fází, což není viditelné prostřednictvím těchto mikroskopických metod.

- Některé kompozitní materiály mohou být citlivé na interakci s hroty AFM nebo špičkami STM, což může vést k poškození nebo deformaci povrchu.
- Získání dat pomocí AFM a STM může být poměrně časově náročné, což může být nepraktické při hodnocení kompozitních materiálů na velkých plochách.
- Pro hodnocení kvality kompozitních materiálů může být důležitá informace o rozložení fází, kterou tyto metody nemohou poskytnout [77].

6.3 Zhodnocení možností a limit kompozitních materiálů

Kompozitní materiály představují klíčovou oblast inovace a vývoje v mnoha průmyslových odvětvích díky svým výjimečným vlastnostem, které často kombinují lehkost, pevnost a odolnost. Jedním z klíčových faktorů úspěchu kompozitů je kvalitní interakce mezi výztuží a maticí. Silná adheze mezi těmito složkami zajišťuje efektivní přenos zatížení, a tím i zlepšenou pevnost a odolnost materiálu.

Vývoj nových povrchových úprav a technik je zaměřen na zlepšení adheze a interakce mezi výztuží a maticí, což přispívá k posílení kompozitních materiálů. Pro dosažení optimální smáčivosti, tedy schopnosti matrice proniknout mezi vlákna výztuže, je nezbytné přesné nastavení procesů impregnace a polymerizace. To v konečném důsledku vede k vytvoření homogenního a pevného materiálu s vylepšenými vlastnostmi.

Nicméně, i přes veškeré úsilí o kontrolu kvality výroby se mohou kompozitní materiály setkat s různými problémy, včetně možné desintegrace. Desintegrace může být způsobena mechanickým namáháním, termálním šokem nebo chemickým poškozením. Proto je neustálý výzkum nových materiálů a výrobních technik zaměřen na zlepšení odolnosti kompozitů vůči těmto různým podmínkám.

Kromě toho je kritické provádět pečlivou kontrolu kvality výrobního procesu. Moderní technologie senzorky, obrazové analýzy a automatizace procesů umožňují detailní monitorování každé fáze výroby, což vede k dosažení konzistence a vysoké kvality kompozitních materiálů.

Vzhledem k neustálému vývoji v oblasti materiálových věd a technologií se očekává, že budoucí inovace povedou k ještě lepším vlastnostem a využití kompozitních materiálů v širokém spektru aplikací. Důležité je nadále provádět pokročilý výzkum a vývoj, spolu s účinnými metodami kontroly kvality, aby bylo dosaženo optimálních výsledků a zlepšilo se porozumění interakcím mezi jednotlivými složkami kompozitů.

6.4 Možnosti budoucího vývoje v oblasti mikroskopie a kontroly kvality

Budoucí vývoj v oblasti mikroskopie a kontroly kvality kompozitních materiálů se zaměřuje na inovace, které by mohly zásadně změnit naše porozumění a využití materiálů. Předpokládá se zlepšení v rozlišení a zpracování obrazů, integraci různých mikroskopických technik pro komplexnější analýzu a využití umělé inteligence pro efektivnější a rychlejší kontrolu kvality. Pokroky slibují hlubší vhled do mikro a nanostruktur materiálů, umožňující přesnější charakterizaci a vývoj materiálů s přesně definovanými vlastnostmi.

S narůstajícím využíváním pokročilých technologií v mikroskopii a analýze materiálů roste i důležitost etického přístupu a zaměření na udržitelnost. Výzkum by měl být vedle zlepšování vlastností materiálů orientován i na minimalizaci jejich dopadu na životní prostředí. Tento trend zahrnuje vývoj recyklovatelných kompozitních materiálů a zlepšení výrobních procesů s ohledem na ekologii. V současné době některé typy mikroskopů, zejména ty s vysokým rozlišením, mohou vyžadovat velké množství energie pro provoz a to také z důvodu potřeby chladících systémů. Proto bude kladen důraz i na energetickou úspornost s ohledem na snížení jejich enviromentálního dopadu.

Výzvy spojené s těmito inovacemi zahrnují nejen technologický rozvoj, ale i potřebu etického a udržitelného přístupu ve výzkumu a vývoji. Spolupráce mezi vzdělávacími institucemi a průmyslem je klíčová pro přípravu nových generací odborníků, kteří budou schopni tyto pokročilé technologie využívat zodpovědně a s ohledem na budoucí generace.

7 Závěr

Kompozitní materiály představují oblast moderního materiálového inženýrství, jejichž vývoj a aplikace překračují tradiční hranice a otevírají nové možnosti pro řadu průmyslových odvětví. S kombinací různých materiálů, které se vzájemně doplňují ve svých vlastnostech, kompozity nabízejí řešení, jež jsou lehčí, pevnější, odolnější vůči korozi a mají lepší tepelné a akustické vlastnosti než jejich jednotlivé složky samostatně.

Důležitost kontroly kompozitů spočívá především v identifikaci a charakterizaci materiálových defektů a poruch, které mohou mít zásadní vliv na mechanické vlastnosti a celkovou životnost produktů. Moderní mikroskopické metody, jako jsou SEM, TEM, SAM a optická mikroskopie, hrají klíčovou roli v tomto procesu, poskytující detailní pohled na interní a externí strukturu kompozitů. Zmíněné techniky umožňují výzkumníkům a inženýrům nejenom odhalit přítomnost defektů, ale také porozumět jejich původu a potenciálním dopadům na funkčnost materiálů.

Práce se zabývala hodnocením čtyř klíčových mikroskopických metod využívaných pro zkoumání kompozitních materiálů: skenovací elektronové mikroskopie (SEM), transmisní elektronové mikroskopie (TEM), skenovací akustické mikroskopie (SAM) a optické mikroskopie. Každá z metod přináší do procesu kontroly kvality své specifické výhody, ale zároveň se potýká s určitými omezeními, které je třeba brát v úvahu při jejich aplikaci.

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) se vyznačuje svou schopností poskytovat vysoké rozlišení a hloubkovou ostrost, díky čemuž je ideální pro detailní analýzu povrchů a detekci mikrostrukturálních defektů. Vakuum, ve kterém SEM operuje, a nutnost předchozího pokrytí nevodivých vzorků vodivým povlakem však mohou být v některých případech limitující.

Transmisní elektronová mikroskopie (TEM) nabízí ještě vyšší rozlišení než SEM a umožňuje vizualizaci až na úrovni atomů. Je extrémně užitečná pro chemickou analýzu a mapování, což je kritické pro porozumění materiálovým vlastnostem na mikroskopické úrovni. Příprava vzorků pro TEM je však technicky náročná a časově náročná, což může být pro některé aplikace limitující.

Skenovací akustická mikroskopie (SAM) představuje vynikající nástroj pro identifikaci vnitřních defektů, jako jsou trhliny a delaminace, které nejsou na povrchu viditelné. Metoda SAM, fungující na principu odrazu ultrazvukových vln, je bezkontaktní a nevyžaduje komplexní přípravu vzorku. Omezení SAM spočívá v nižším rozlišení ve srovnání s elektronovou mikroskopií a v náročnosti na interpretaci získaných akustických obrazů.

Optická mikroskopie, ačkoliv má v porovnání s předchozími metodami omezenější rozlišení, nabízí neocenitelnou flexibilitu pro rychlé a nenarušující pozorování vzorků. Je široce dostupná a umožňuje pozorování v přirozených podmínkách, kde je vyžadována minimální příprava.

Ve výsledku každá z těchto metod přináší do procesu kontroly kvality kompozitních materiálů unikátní přínosy. Výběr vhodné metody závisí na konkrétních požadavcích analýzy, jako je typ materiálu, povaha očekávaných defektů nebo detailnost požadovaných informací. Často se ukazuje, že kombinace více mikroskopických technik může poskytnout komplexnější pohled na zkoumané materiály, což vede k hlubšímu porozumění jejich vlastnostem a chování.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 1. vyd. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 978-80-903386-0-9.
- [2] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu. 4. část, Polymery a kompozity s polymerní matricí*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2003. ISBN 978-80-214-2443-2.
- [4] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [5] PIATTI, G., COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES a ASMECCANICA, ed. *Advances in composite materials*. London: Applied Science Publishers, 1978. ISBN 978-0-85334-770-5.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] BURAGOHAJN, Manoj Kumar. *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. 1st ed. London: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-351-97492-9.
- [8] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *NAUKA O MATERIÁLU*. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [9] Prášková metalurgie. *oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie* [online]. [vid. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/praskova-metalurgie/>
- [10] KAINER, Karl Ulrich. Basics of Metal Matrix Composites. In: Karl U. KAINER, ed. *Metal Matrix Composites* [online]. 1. vyd. B.m.: Wiley, 2006 [vid. 2024-03-09], s. 1–54. ISBN 978-3-527-31360-0. Dostupné z: [doi:10.1002/3527608117.ch1](https://doi.org/10.1002/3527608117.ch1)
- [11] Slitina. *oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie* [online]. [vid. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/slitina/>
- [12] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 978-80-7080-617-3.
- [13] *Reaktoplasty* [online]. [vid. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>
- [14] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. 3. listopad 2021 [vid. 2024-01-15]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [15] *Termoplasty – základní druhy* [online]. [vid. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [16] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. ISBN 978-0-8493-0585-6.

- [17] MÜLLER, Miroslav. Machining of polymeric composites by means of abrasive water-jet technology. In: *16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development* [online]. 2017 [vid. 2024-01-12]. Dostupné z: doi:10.22616/ERDev2017.16.N021
- [18] *Další dělení mikrokompozitů je možné podle materiálu matrice, která může být: polymerní kovová uhlíková skleněná sklokeramická keramická - PDF Free Download* [online]. [vid. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6843510-Dalsi-deleni-mikrokompozitu-je-mozne-podle-materialu-matrice-ktera-muze-byt-polymerni-kovova-uhlikova-sklenena-sklokeramicka-keramicka.html>
- [19] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 978-80-7043-273-0.
- [20] MONFARED, Vahid. Problems in short-fiber composites and analysis of chopped fiber-reinforced materials. In: *New Materials in Civil Engineering* [online]. B.m.: Elsevier, 2020 [vid. 2024-02-11], s. 919–1043. ISBN 978-0-12-818961-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-818961-0.00031-4
- [21] What Are Prepregs? *Fibre Glast Developments Corp* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs>
- [22] Uhlíkové vlákno PREPREG. *CompositesPlaza.com* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://compositesplaza.com/cs/Kategorie-produktu/uhl%C3%ADk/uhl%C3%ADkov%C3%A9-vl%C3%A1kno-prepreg/>
- [23] KOLÁŘ, Viktor. *Technologie přípravy kompozitních materiálů a výzkum jejich vlastností*. Praha, 2020. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [24] KNOB, Antonín. *Povrchové úpravy skleněných vláken pro polymerní kompozity*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [25] BARD, Simon, Florian SCHÖNL, Martin DEMLEITNER a Volker ALTSTÄDT. Copper and Nickel Coating of Carbon Fiber for Thermally and Electrically Conductive Fiber Reinforced Composites. *Polymers* [online]. 2019, **11**(5), 823. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym11050823
- [26] ZHANG, Mingyu, Lei CHU, Jiahua CHEN, Fuxun QI, Xiaoyan LI, Xinliang CHEN a Deng-Guang YU. Asymmetric wettability fibrous membranes: Preparation and biologic applications. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2024, 111095. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2023.111095
- [27] *Lepení plastů* [online]. [vid. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/clanky/lepeni-plastu>
- [28] BUNSELL, A. R. a J. RENARD. *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2005. Series in materials science and engineering. ISBN 978-0-7503-0689-8.
- [29] ELEMENT-SHOP.CZ. Gelcoat. *element-shop.cz* [online]. [vid. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/gelcoat/>

- [30] UDUPI, Sathish Rao a Lewlyn LESTER RAJ RODRIGUES. Detecting Safety Zone Drill Process Parameters for Uncoated HSS Twist Drill in Machining GFRP Composites by Integrating Wear Rate and Wear Transition Mapping. *Indian Journal of Materials Science* [online]. 2016, **2016**, 1–8. ISSN 2314-7490. Dostupné z: doi:10.1155/2016/9380583
- [31] *HAVEL COMPOSITES ESHOP* [online]. [vid. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [32] *Autokláv | PLASTIC* [online]. [vid. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.plastic.cz/technologie-autoklav>
- [33] FERNÁNDEZ, I., F. BLAS a M. FRÖVEL. Autoclave forming of thermoplastic composite parts. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **143–144**, 266–269. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(03)00309-1
- [34] JU, Xiangwen, Jun XIAO, Dongli WANG, Cong ZHAO a Xianfeng WANG. Research on the Manufacturing Quality of Co-Cured Hat-Stiffened Composite Structure. *Materials* [online]. 2021, **14**(11), 2747. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14112747
- [35] HAMIDI, Youssef K. a Cengiz M. ALTAN. 2.5 Process-Induced Defects in Resin Transfer Molded Composites. In: *Comprehensive Composite Materials II* [online]. B.m.: Elsevier, 2018 [vid. 2024-02-22], s. 95–106. ISBN 978-0-08-100534-7. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.09902-1
- [36] *Zpracování kompozitů* [online]. [vid. 2024-02-22]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/18.html>
- [37] EBADI, Nima. A Guide to Resin Transfer Moulding. *Antala Ltd.* [online]. 19. červenec 2021 [vid. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://www.antala.uk/resin-transfer-moulding/>
- [38] MINCHENKOV, Kirill, Alexander VEDERNIKOV, Alexander SAFONOV a Iskander AKHATOV. Thermoplastic Pultrusion: A Review. *Polymers* [online]. 2021, **13**(2), 180. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13020180
- [39] HOW ARE FRP/GRP PIPE FILAMENT WINDING MACHINE WORKING? *Hebei Maple FRP Industry Co.,Ltd* [online]. [vid. 2024-03-19]. Dostupné z: <http://www.frpmachining.com/faqs/frpgrp-pipe-filament-winding-machine>
- [40] Filament Winding Technology. *Connova* [online]. 7. prosinec 2021 [vid. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://www.connova.com/en/competencies/filament-winding-technology/>
- [41] Filament Winding. *Composites One* [online]. [vid. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/process/filament-winding/>
- [42] SAHU, Aman. Winding the Future: An Exploration of Filament Winding Applications. *Addcomposites* [online]. 7. únor 2023 [vid. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/winding-the-future-an-exploration-of-filament-winding-applications>

- [43] What is Microscopy? *The University of Edinburgh* [online]. 27. září 2018 [vid. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.ed.ac.uk/clinical-sciences/edinburgh-imaging/for-patients-study-participants/tell-me-more-about-my-scan/what-is-microscopy>
- [44] ČECH BARABASZOVÁ, Karla, Kateřina MAMULOVÁ KUTLÁKOVÁ, Sylva HOLEŠOVÁ, Michal RITZ a Gražyna SIMHA MARTYNKOVÁ. *Vybrané instrumentální metody analýzy materiálů a nanomateriálů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012. ISBN 978-80-7204-810-6.
- [45] *Mikroskopické metody* – WikiSkripta [online]. [vid. 2024-03-17]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Mikroskopick%C3%A9_metody
- [46] SR, MEFANET, síť lékařských fakult ČR a. *Princip zobrazení optickým mikroskopem* – WikiSkripta [online]. [vid. 2024-03-17]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Princip_zobrazen%C3%AD_optick%C3%BDm_mikroskopem
- [47] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [vid. 2024-03-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/501-princip-cinnosti-mikroskopu>
- [48] Electron Microscopy. *AnaPath* [online]. [vid. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://anapath.ch/electron-microscopy-2/>
- [49] AKHTAR, Kalsoom, Shahid Ali KHAN, Sher Bahadar KHAN a Abdullah M. ASIRI. Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization. In: Surender Kumar SHARMA, ed. *Handbook of Materials Characterization* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [vid. 2024-03-18], s. 113–145. ISBN 978-3-319-92954-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-92955-2_4
- [50] B.SC, Deborah Fields. What is Transmission Electron Microscopy? *News-Medical* [online]. 20. prosinec 2016 [vid. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Transmission-Electron-Microscopy.aspx>
- [51] YU, Hyunung. Scanning acoustic microscopy for material evaluation. *Applied Microscopy* [online]. 2020, **50**(1), 25. ISSN 2287-4445. Dostupné z: doi:10.1186/s42649-020-00045-4
- [52] FRANK, Luděk. a Jaroslav KRÁL. *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*. Praha: Academia, 2002. ISBN 978-80-200-0594-6.
- [53] GRUBER, Manuel. Electronic and magnetic properties of hybrid interfaces. From single molecules to ultra-thin molecular films on metallic substrates. nedatováno.
- [54] SINHA RAY, Suprakas. Techniques for characterizing the structure and properties of polymer nanocomposites. In: *Environmentally Friendly Polymer Nanocomposites* [online]. B.m.: Elsevier, 2013 [vid. 2024-03-18], s. 74–88. ISBN 978-0-85709-777-4. Dostupné z: doi:10.1533/9780857097828.1.74
- [55] *Atomic Force Microscopy | Nanoscience Instruments* [online]. [vid. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/atomic-force-microscopy/>

- [56] *What is AFM? Learn about Atomic Force Microscopy! - NanoAndMore* [online]. [vid. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.nanoandmore.com/what-is-atomic-force-microscopy>
- [57] HRUŠKA, Karel a Petr FRANK. *Zajišťování jakosti. Sv. 2, Kontrola jakosti a zkušebnictví*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-303-3.
- [58] PISKÁČEK, Bedřich, Jiří. ZMATLÍK a Vlasta KAŠOVÁ. *Řízení jakosti*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 2001. ISBN 978-80-01-02276-4.
- [59] FAWAZ, Z. Quality control and testing methods for advanced composite materials in aerospace engineering. In: *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* [online]. B.m.: Elsevier, 2016 [vid. 2024-01-21], s. 429–451. ISBN 978-0-08-100939-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100037-3.00015-8
- [60] HUANG, Qiting, Wei QIN, Sufyan GAROUSHI, Jingwei HE, Zhengmei LIN, Fang LIU, Pekka K. VALLITTU a Lippo V. J. LASSILA. Physicochemical properties of discontinuous S2-glass fiber reinforced resin composite. *Dental Materials Journal* [online]. 2018, **37**(1), 95–103. ISSN 0287-4547, 1881-1361. Dostupné z: doi:10.4012/dmj.2017-078
- [61] HESLEHURST, Rikard Benton. *Defects and Damage in Composite Materials and Structures* [online]. 0 vyd. B.m.: CRC Press, 2014 [vid. 2024-02-26]. ISBN 978-1-4665-8048-0. Dostupné z: doi:10.1201/b16765
- [62] BEAUMONT, Peter W. R, Constantinos SOUTIS a Alma HODZIC, ed. *The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites: Fifty Years of Progress and Achievement of the Science, Development, and Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017 [vid. 2024-01-12]. ISBN 978-3-319-46118-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-46120-5
- [63] MORTELL, D.J., D.A. TANNER a C.T. MCCARTHY. In-situ SEM study of transverse cracking and delamination in laminated composite materials. *Composites Science and Technology* [online]. 2014, **105**, 118–126. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2014.10.012
- [64] TODOROKI, Akira, Hideo KOBAYASHI a Jong Gi LEE. Image analysis of delamination cracks in carbon-fibre composites by scanning acoustic microscopy. *Composites Science and Technology* [online]. 1994, **52**(4), 551–559. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/0266-3538(94)90038-8
- [65] SHANG, X, Eas MARQUES, Jjm MACHADO, Rjc CARBAS, D JIANG a Lfm DA SILVA. A strategy to reduce delamination of adhesive joints with composite substrates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2018, 146442071880571. ISSN 1464-4207, 2041-3076. Dostupné z: doi:10.1177/1464420718805712
- [66] HUANG, L.J., L. GENG a H-X. PENG. Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal? *Progress in Materials Science* [online]. 2015, **71**, 93–168. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2015.01.002

- [67] WANG, Qiufen, Mingliang WANG, Juan MIAO, Wenyan BI, Hong YANG a Min ZHANG. Fabrication of SiO₂ aerogel supported C/TiO₂ nanocomposite and Li⁺ storage performance. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2019, **30**(16), 14834–14846. ISSN 0957-4522, 1573-482X. Dostupné z: doi:10.1007/s10854-019-01849-1
- [68] JORTNER, Julius. Macroporosity and interface cracking in multi-directional carbon-carbons. *Carbon* [online]. 1986, **24**(5), 603–613. ISSN 00086223. Dostupné z: doi:10.1016/0008-6223(86)90150-8
- [69] RÉGER, Mihály, József GÁTI, Ferenc OLÁH, Richárd HORVÁTH, Enikő Réka FÁBIÁN a Tamás BUBONYI. Detection of Porosity in Impregnated Die-Cast Aluminum Alloy Piece by Metallography and Computer Tomography. *Crystals* [online]. 2023, **13**(7), 1014. ISSN 2073-4352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst13071014
- [70] YU, Qiyong, Yan ZHAO, Anqi DONG a Ye LI. Preparation and Properties of C/C Hollow Spheres and the Energy Absorption Capacity of the Corresponding Aluminum Syntactic Foams. *Materials* [online]. 2018, **11**(6), 997. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11060997
- [71] AWAJA, Firas, Shengnan ZHANG, Manoj TRIPATHI, Anton NIKIFOROV a Nicola PUGNO. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair. *Progress in Materials Science* [online]. 2016, **83**, 536–573. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2016.07.007
- [72] AHMAD SAWPAN, Moyeenuddin, Muhammad Remanul ISLAM, Mohammad Dalour Hossain BEG a Kim PICKERING. Effect of Accelerated Weathering on Physico-Mechanical Properties of Polylactide Bio-Composites. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2019, **27**(5), 942–955. ISSN 1566-2543, 1572-8919. Dostupné z: doi:10.1007/s10924-019-01405-2
- [73] SOLIS-RAMOS, Euripides a Maciej KUMOSA. Synergistic effects in stress corrosion cracking of glass reinforced polymer composites. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2017, **136**, 146–157. ISSN 01413910. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymdegradstab.2016.12.016
- [74] MAZÁČOVÁ, Veronika. SEM. *MATCA* [online]. [vid. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/>
- [75] MAZÁČOVÁ, Veronika. TEM. *MATCA* [online]. [vid. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/tem/>
- [76] PETRONYUK, Y S, V M LEVIN, T B RYZHOVA a E S MOROKOV. Defects in carbon plastics detected by acoustic microscopy. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2020, **1636**(1), 012005. ISSN 1742-6588, 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1636/1/012005
- [77] MAZÁČOVÁ, Veronika. AFM. *MATCA* [online]. [vid. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/afm/>