ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bartošová Jméno: Lucie Osobní číslo: 396494

Zadávající katedra: Katedra mechaniky (k132)

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Plazmatické povrchové modifikace polymerních makro vláken používaných jako výztuž v betonových konstrukcích

Název bakalářské práce anglicky: Plasma Surface Treatment of Polymer Macro Fibers Used as Reinforcement in Concrete Constructions

Pokyny pro vypracování:
1) Zpracujte k danému tématu rešerši ze zdrojů databází vědecké literatury a technické dokumentace výrobců vláken
3) Proveďte plazmatické modifikace vybraných vláken za účelem zvýšení soudržnosti jejich povrchů s cementovou matricí, experimentálně zjistěte základní mechanické a fyzikální vlastnosti vláken před a po provedení plazmatických modifikací
4) Vyrobte betonové vzorky s upravenými vlákny a zjistěte jejich mechanické vlastnosti
5) Shrňte výsledky a porovnejte je jak vzájemně tak i s referenčními hodnotami

Seznam doporučené literatury:
Technická dokumentace výrobců vláken, databáze vědecké literatury (WoS, Scopus), odborná literatura zaměřená na fyziku povrchů pevných látek a chování kompozitních materiálů s vláknitou výztuží

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 24. 2. 2016 Termín odevzdání bakalářské práce: 22. 5. 2016

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

24. 2. 2016
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra mechaniky

Plazmatické povrchové modifikace polymerních makro vláken používaných jako výztuž v betonových konstrukcích

Plasma Surface Treatment of Polymer Macro Fibers Used as Reinforcement in Concrete Constructions

Bakalářská práce

Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Bartošová Lucie

Praha 2016

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma Plazmatické povrchové modifikace polymerních makro vláken používaných jako výztuž v betonových konstrukcích vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Tesárka, Ph.D. a že jsem uvedla veškerou odbornou literaturu a další informační zdroje.

v Praze dne: Lucie Bartošová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za odborné vedení práce. Mé velké poděkování patří Ing. Janu Trejbalovi za odborné konzultace a cenné rady při jejím zpracování.

Dále bych chtěla touto cestou poděkovat Ing. Josefu Fládrovi z Katedry betonových a zděných konstrukcí a pánům Ing. Štěpánu Potockému, Ph.D. a Mgr. Zdeňku Remešovi, Ph.D. z Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR za ochotu a pomoc při zpracování praktické části této práce.

Práce vznikla v rámci řešení projektů Centra pro nanotechnologie ve stavebnictví FSv ČVUT v Praze a Společné laboratoře technologií polymerních nanovláken Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky. Experimentální část práce byla podpořena z prostředků ČVUT v Praze v rámci projektu SGS16/201/OHK1/3T/11 a díky podpoře projektu GA ČR GA15-12420S.

Moc děkuji i mé rodině a přátelům za velkou podporu během studia.

Anotace

Předkládaná práce se zabývá charakterizací změn mechanických a fyzikálních vlastností povrchově modifikovaných polymerních vláken. Vlákna BeneSteel (směs PP a PE) a Concrix (polyolefiny) byla upravena plazmatickým výbojem v kyslíkové atmosféře za účelem zvýšení jejich smáčivosti vodou a soudržnosti s cementovou matricí. Práce na základě studia pramenů pojednává o současném stavu problematiky povrchových úprav polymerních vláken a o plazmatických modifikacích. Na modifikovaných vláknech byly provedeny mechanické a fyzikální experimenty pro odhalení dosažených změn. Přímá optická metoda byla použita pro stanovení změny povrchové smáčivosti. Měřeny byly velikosti kontaktních úhlů na jednotlivých vláknech ponořených ve vodě. Změna morfologie povrchu byla zkoumána elektronovou mikroskopií (SEM). Dále byla vlákna podrobena tahovým zkouškám a zkouškám soudržnosti s cementovou matricí. Konkrétně byly provedeny Pull-out testy vláken z cementové pasty a zkouška pevnosti v tahu za ohybu betonových těles s rozptýlenou vláknitou výztuží. Provedené experimenty prokázaly značně pozitivní vliv na zvýšení soudržnosti vláken s cementovou matricí.

Klíčová slova

Makrovlákna, plazma, smáčivost povrchů, kontaktní úhel, kompozitní materiály

Abstract

Presented bachelor thesis deals with a changes characterization of mechanical and physical properties of plasma surface treated fibers. In order to improve surface wettability by water and cohesion with cement matrix, fibers BeneSteel (composed from PP and PE mixture) and Concrix (polyolefin) were treated by coupled oxygen plasma. Based on theoretical study of science literature, the bachelor thesis discusses the current state of surface treatments and plasma modifications. Mechanical and physical experiments were carried out to determine achieved changes. A direct optical method was used as a proper indicator of fiber surface wettability by water. Contac angles were measured on each fiber submerged into water. Morphology changes were observed by SEM. Next, the fibers were subjected to tensile strength and fiber/matrix cohesion tests. Concretely, fiber pull out tests from cement matrix and bending strength tests of concrete composites reinforced with dispersed fibers were realized. The provided experiments showed the significantly positive influence of fiber/matrix cohesion.

Keywords

Macrofibers, plasma, wettability, contact angle, composites

Obsah

1. Úvod ... 8
2. Současný stav problematiky ... 10
   2.1. Vláknobetony ... 10
   2.2. Typy vláken používaných ve stavebnictví ... 12
   2.3. Polymerní vlákna ... 14
   2.4. Soudržnost vláken s matricí ... 16
   2.5. Povrchové modifikace vláken ... 18
   2.6. Plazma ... 18
   2.7. Vliv plazmatu na vlastnosti vláken ... 19
   2.8. Smáčivost ... 20
   2.9. Metody měření kontaktních úhlů vláken ... 21
3. Praktická část ... 25
   3.1. Použité materiály ... 25
   3.2. Experimentální metody ... 28
4. Výsledky a diskuze ... 37
   4.1. Hmotnostní poměry ... 37
   4.2. Elektronová mikroskopie ... 39
   4.3. Kontaktní úhly ... 42
   4.4. Tahové zkoušky ... 45
   4.5. Pull-out testy ... 46
   4.6. Zkouška pevnosti v tahu za ohybu ... 50
5. Závěr ... 55
Seznam obrázků ... 57
Seznam tabulek ... 59
Seznam literatury ... 60

1. Úvod

Mezi dlouhodobě nejpoužívanější stavební materiály patří jednoznačně beton. Za posledních 50 let jeho spotřeba stoupla téměř 12 krát, ve vyspělých státech připadaná na jednoho obyvatele produkce betonu 1,5 až 3 tuny ročně. Beton je ve stavebnictví prakticky nenahraditelný díky své vysoké pevnosti v tlaku a dlouhé trvanlivosti. Zároveň je to ale velice křehký materiál, jehož pevnost v tahu, v tahu za ohybu a smyku je jen zlomkem pevnosti v tlaku [1].

Pro přenesení tahových sil je nutné beton vyztužovat. Nejčastěji se používají ocelové pruty nebo z nich svařené armovací sítě. Umístění výztuže do průřezu je určeno především vnějším zatížením a statickým schématem konstrukce, dále také předepsanou krycí vrstvou výztuže, kterou ovlivňuje agresivita vnějšího prostředí a návrhová životnost konstrukce. V tažené oblasti zatíženého betonu vznikají trhliny, které mohou snižovat jeho celkovou trvanlivost, protože zvyšují riziko koroze výztuže. Díky trhlinám totiž dochází ke vniknutí agresivních činitelů do vnitřního objemu konstrukce, což má za následek degradaci nejen výztuže, ale i betonu samotného. Velikost vznikajících trhlin lze redukovat rozptýlenou výztuží, a tím zvýšit jak životnost konstrukce, tak i další užitné vlastnosti. Rozptýlená výztuž nebo vlákna doplňují, v některých případech dokonce zcela nahrazují prutovou výztuž. Takový typ konstrukčního betonu se nazývá vláknobeton [2].

Vlákna používaná jako výztuž ve stavebních materiálech mohou mít různé tvary, rozměry a mohou být z různých materiálů. Na trhu se nejčastěji setkáváme s ocelovými, skleněnými, uhlíkovými vlákny a dále s vlákny z polymerních materiálů. Podle velikosti průměru klasifikujeme vlákna na mikrovlákna a makrovlákna. Aby však vlákna v materiálu správně plnila svou funkci, musí spolupůsobit s jeho matricí. Ovlivněno je to především povrchem vlákna a jeho adhezními vlastnostmi. Abychom tyto vlastnosti zlepšili, je možné povrch vláken modifikovat [2, 3].

Povrchové vlastnosti vláken lze modifikovat několika způsoby. Mezi používané metody patří mechanické, chemické a jednou z nejúčinnějších je úprava povrchu plazmatickým výbojem v kyslíkové atmosféře. Mechanické metody většinou spočívají v delším mísení suché betonové směsi s vlákny. Hrany kameniva poškozují povrchy vláken, tato metoda je ovšem nešetrná a navíc obtížně regulovatelná. V mezních

případech může docházet k silnému povrchovému poškození vláken, které způsobuje výraznou ztrátu jejich mechanických vlastností [4]. Mezi chemické metody se řadí především leptání povrchů silnými alkalickými činidly. Alkalické hydrolýzy povrchu polymerních vláken byly zkoumány s úspěšnými výsledky, ale z ekologického pohledu se jedná o metodu nešetrnou k životnímu prostředí. Naopak působení plazmatu je oproti ostatním metodám šetrné k vláknům samotným, nedochází k jejich příliš velikému poškození a díky tomu neztrácejí svou pevnost a další mechanické vlastnosti [5, 6]. Efekt plazmatických modifikací je velmi jednoduše regulovatelný, ekonomicky nenáročný a v určitých případech i technologicky snadno proveditelný.

Předkládaná práce zkoumá povrchové modifikace polymerních makrovláken BeneSteel 55 a Concrix ES za účelem zlepšení jejich soudržnosti s cementovou matricí. Vlákna byla vystavena plazmatickému výboji v kyslíkové atmosféře v sedmi různých časových úsecích. Cílem práce je najít nejvhodnější dobu, po kterou budou vlákna účinkům plazmatu vystavována tak, aby došlo ke zlepšení jejich adhezivních vlastností, ale zároveň nedocházelo k výrazným ztrátám vlastností mechanických.

2. Současný stav problematiky

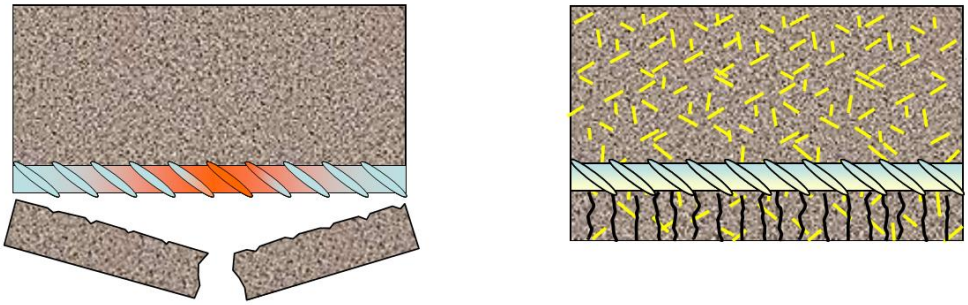
2.1. Vláknobetony

Vláknobetony jsou kompozitní materiály na bázi betonu či cementu s náhodně orientovanými a rozptýlenými vlákny v matrici. Kompozitní materiál se skládá ze dvou a více fází s rozdílnými vlastnostmi [2]. Vlastnosti kompozitů závisí na vlastnostech jednotlivých složek, jejich rozložení, struktuře a především na jejich spolupůsobení. Nejsou však dány pouhým součtem vlastností jeho jednotlivých fází, ale jejich násobkem, který závisí právě na míře jejich interakce. Pokud se změní matrice, materiál vláken, jejich geometrie, množství, rozmístění, orientace a především fyzika povrchu, změní se i struktura a vlastnosti vláknobetonu [7].

Rozptýlená výztuž nebo vlákna byla používána k vyztužování malt už ve starověku. Ke ztužení hliněných cihel tehdy sloužily koňské žíně, lidské vlasy, sláma nebo rákosí [8, 9]. Na obrázku níže (Obrázek 1) je 200 let stará vápenná malta vyztužená lidskými vlasy [10]. Na počátku 20. století byla do betonu používána azbestová vlákna, u kterých se později prokázaly karcinogenní účinky. Snaha zdravotně závadná vlákna nahradit vedla k vytváření a zkoušení nových materiálů [8, 11].

Obrázek 1 - Lidské vlasy v historické vápenné omítce [10].

Rovnoměrně rozptýlená vlákna mohou významně ovlivnit některé vlastnosti betonu, které jsou obvykle považovány za jeho nedostatky. Vláknobetony obecně lépe odolávají tahovým účinkům namáhání a zmírňují obvyklý křehký charakter betonu [2]. Jedná se především o schopnost lépe odolávat objemovým změnám betonu. Objemové změny jsou vyvolány jednak smršťováním, které vzniká při tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi, a dále běžným nebo mimořádným zatížením (především zatížením bodovým a dynamickým). Trhliny od smršťování se objevují v celém objemu konstrukce, a proto je dokáže zachytit jen rozptýlená výztuž. Naproti tomu trhliny od působících zatížení vznikají především v tažených oblastech konstrukce. Jejich rozvoji je většinou bráněno běžnou prutovou výztuží, která je ovšem neumožňuje rozdělit do malých mikrotrhlin [2, 12]. Výsledkem je jednak vystavení konstrukce vůči vlivům okolního prostředí. V krajních případech může dokonce docházet k odpadávání krycí části betonu po jednotlivých segmentech, které po vzniku trhlin nepůsobí kompaktně (Obrázek 2). Vlákna zlepšují i některé další mechanické vlastnosti betonu. Například jeho soudržnost s podkladem (stříkaný beton) a schopnost přenášet část zatížení po překročení mezních stavů únosnosti konstrukce [13].



Obrázek 2 – Vliv vláknité výztuže na kompaktnost tažené části železobetonového prvku [14].

Přidáním vláken do směsi se zhoršuje její zpracovatelnost. Při míchání je doporučeno používat míchačku (tzn. nedoporučuje se ruční míchání) nebo prodloužit dobu míchání, aby nedocházelo ke shlukování vláken (tzv. tvoření hnízd) [15]. Zhoršení zpracovatelnosti lze eliminovat aplikací plastifikátorů nebo použitím vysokého vodního součinitele, čímž ovšem dochází ke ztrátě pevnosti betonu v tlaku. I s ohledem na vysokou cenu vláken je žádoucí jejich obsah ve směsi co nejvíce minimalizovat, čehož lze dosáhnout pouze efektivnějším využitím mechanických vlastností vláken samotných.

Vláknobetony mají ve stavebnictví široké využití. Nejčastěji se používají do stříkaných betonů, pro průmyslové podlahy nebo základové desky. S ohledem na jejich progresivní vývoj jsou využívány stále častěji. Aktuálně jsou vyvíjeny vláknobetonové směsi pro letištní plochy, mostní konstrukce, výstavbu tunelů atd. [2].

2.2. Typy vláken používaných ve stavebnictví

Vlákna používaná ve stavebnictví můžeme rozdělit na anorganická a organická, která se dále dělí podle původu na přírodní nebo syntetická. Výběr typu vláken záleží na požadovaných konečných vlastnostech kompozitů, mechanických vlastnostech vláken nebo také ceně. Různé typy vláken jsou porovnány v tabulce níže (Tabulka 1) [16].

Tabulka 1 – Přehled vláken používaných do betonu [17].

Typ vlákna	Průměr [μm]	Specifická hmotnost [g/cm^3]	Tahová pevnost [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Celkové protažení [%]
Akryl	20–350	1,16–1,18	0,2–1,0	14–19	10–50
Aramid (Kevlar)	10–12	1,44	2,3–3,5	63–120	2–4,5
Carbon (PAN)	8–9	1,6–1,7	2,5–4,0	230–380	0,5–1,5
Carbon (Pich)	9–18	1,6–1,21	0,5–3,1	30–480	0,5–2,4
Nylon	23–400	1,14	0,75–1,0	4,1–5,2	16–20
Polyester	10–200	1,34–1,39	0,23–1,2	10–18	10–50
Polyetylen	25–1000	0,92–0,96	0,08–0,60	5	3–100
Polyolefín	150–635	0,91	275	2,7	15
Polypropylen	20–400	0,9–0,95	0,45–0,76	3,5–10	15–25
Ocel	100–1000	7,84	0,5–2,6	210	0,5 – 3,5
Sklo	14	2,68	3,5	72	–
PVA	14–650	1,3	0,8–1,5	29–36	5,7
Cem. matrice*	–	1,5–2,5	0,003–0,007	10–45	0,02

**Slouží pro porovnání základních materiálových vlastností*

2.2.1. Vlákna anorganická

Mezi anorganická vlákna patří především vlákna skleněná a čedičová. Pro svoje výborné vlastnosti mají širokou škálu použití. Ve stavebnictví se s nimi nejčastěji setkáme u tepelně izolačních materiálů, ale výborně se uplatní i ve výrobě kompozitních materiálů jako výztuž betonových čí maltových směsí. Uplatňují se především u vyztužování velmi tenkých konstrukcí. Mezi přednosti skleněných a čedičových vláken patří vysoký modul pružnosti, nízká hmotnost i cena, či odolnost vůči vodě. Jsou však křehká, špatně odolávají kyselinám a nehodí se do alkalického prostředí [18]. Lze s nimi vytvořit i průsvitný beton neboli LiTraCon. Nový materiál z betonu a skleněných optických vláken se na trhu objevil v roce 2002 a je možné z něj vytvořit až několik metrů silnou zeď, která propouští světlo [19].

Dalším zástupcem anorganických vláken jsou vlákna ocelová. Pro vyztužení betonu, který se pak nazývá drátkobeton. Jsou to nejbežnější a nejpoužívanější vlákna, která se využívají převážně u plochých prvků jako podlah, základových desek nebo chodníků. Dobře se uplatní i v prefabrikátech nebo vodostavebních konstrukcích. Výhodou ocelových vláken je vysoký modul pružnosti, zlepšují houževnatost a pevnost betonů v tahu. Mají výbornou soudržnost s matricí betonových směsí a v určitých případech mohou zcela nahradit použití klasické betonářské výztuže. Ocelová vlákna jsou poměrně drahá a mohou výrazně zvýšit cenu výsledného produktu [2, 3].

Mezi anorganická vlákna můžeme také zařadit vlákna azbestová. V minulosti byla hodně využívána pro jejich vysokou pevnost v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám a většině chemikálií. Azbest ovšem představuje závažné riziko pro zdraví člověka. Jeho mikroskopická vlákna se mohou šířit vzduchem na veliké vzdálenosti a při jejich vdechování hrozí riziko velmi závažného onemocnění, jako je rakovina plic. Po prokázání zdravotní závadnosti azbestu platí od roku 2005 zákaz jeho zpracování pro všechny státy Evropské unie [20]. Jistá zdravotní rizika ovšem představují i vlákna skleněná a čedičová.

2.2.2. Vlákna organická

Vlákna organická dělíme na přírodní a syntetická. Přírodní vlákna se získávají z rostlin nebo živočichů. Jsou tedy ekologicky nejšetrnější a jsou biologicky rozložitelná. Nejpoužívanější jsou vlákna sisalová, jutová nebo konopná. Jejich vlastnosti jsou přímo ovlivněny podmínkami růstu vláken. Vznikají tedy heterogenní materiály, u kterých nelze zajistit jednotné mechanické vlastnosti. Proto nejsou příliš vhodná k použití v konstrukčních materiálech. Vlákna jsou náchylná k degradaci vlivem vlhkosti a bakteriemi, jsou obtížně dostupná a navíc nemají tak dobré mechanické vlastnosti jako vlákna anorganická [21].

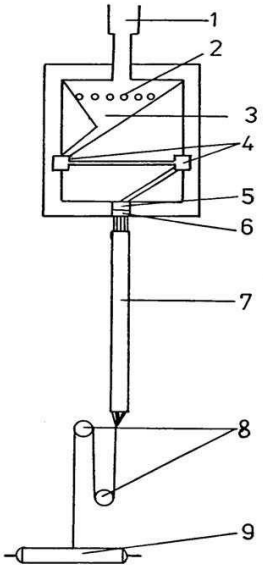
Syntetická, neboli uměle vytvořená, jsou vlákna vyráběná ze syntetických polymerů. Jedná se o nejpoužívanější vlákna ve stavebnictví, proto na našem trhu existuje poměrně široký sortiment těchto vláken. Mohou se vyrábět v různých tvarech, délkách, barvách a s různými vlastnostmi. Patří sem vlákna vyráběna z polyolefinu, polyetylenu, polystyrenu, polypropylenu, polyamidu atd. [22].

2.3. Polymerní vlákna

Přírodní materiály jako dřevo, bavlna, kůže nebo slonovina jsou používány už tisíce let. S vývojem vědy a techniky se lidé začali zajímat o strukturu těchto materiálů a snažili se je nahradit materiály s podobnými vlastnostmi. Na začátku 20. století byl vyroben první umělý syntetický polymer nazývaný bakelit. Pro jeho široké technické využití se řada chemiků začala o polymery zajímat a během následujících desetiletí jich byla vyrobena řada dalších. Brzy se zjistilo, že syntetické polymery dokážou svými vlastnostmi nahradit i keramiku, sklo nebo kovové materiály [23].

Polymery jsou látky z makromolekul charakterizovaných opakováním jednoho nebo více druhů atomů nebo skupin atomů (většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru nebo křemíku) navzájem spojených v tak velikém počtu, že existuje řada vlastností, které se znatelně nezmění přidáním nebo odstraněním jedné nebo několika konstrukčních jednotek. Syntetické polymery vznikají třemi základními reakcemi: polymerací, polyadicí a polykondenzací [22].

Výroba vláken z polymerů se nazývá zvlákňování. Vlákna můžeme získávat z roztoku, z taveniny nebo ze zplastifikovaného vláknotvorného polymeru. Z taveniny se polymery zvlákňují při vysokých teplotách, tento způsob se nejvíce používá k výrobě vláken z polyamidů a polyeterů. Roztavený polymer je vysokým tlakem protlačován malými otvory trysek, získaná vlákna jsou ochlazena a dloužena. Tažením se orientují krystalitové oblasti podél osy vlákna, což jim dodá značnou pevnost v tahu [24]. Schéma výroby vláken z taveniny je zobrazeno na obrázku (Obrázek 3).



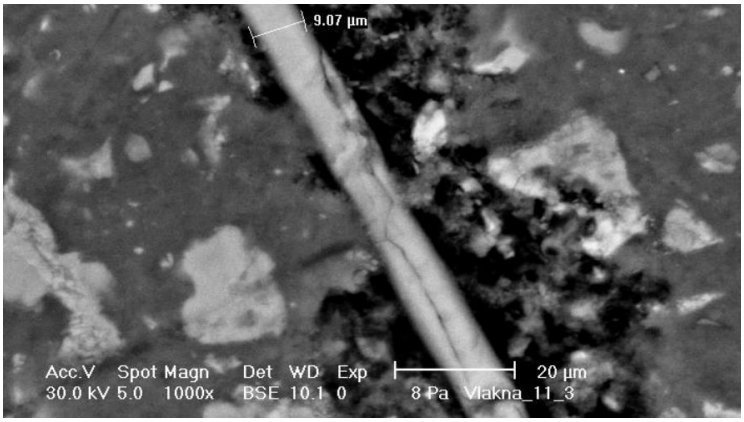
Obrázek 3 – Schéma výroby vláken z taveniny:
1 – násypka, 2 – tavící rošt, 3 – jímka taveniny, 4 – čerpadla, 5 – filtr, 6 – zvlákňovací trysky, 7 – zvlákňovací šachta, 8 – odtahové zařízení, 9 – navíjecí cívka [22].

Pro vyztužování stavebních materiálů se nejčastěji používají vlákna z polypropylenu (PP). Vlákna jsou mechanicky i chemicky odolná, mají vysokou tahovou pevnost a odolnost vůči oděru. Nepodléhají korozi a jsou stabilní v alkalickém prostředí betonu. O něco horší mechanické vlastnosti mají vlákna z polyetylenu (PE), ale na rozdíl od PP mají výbornou odolnost vůči mrazu a nízkým teplotám. Dalším důležitým zástupcem jsou vlákna z polyetylentereftalátu (PET), která se mohou vyrábět z recyklovaných materiálů. Využívají se odpadní lahve a tím se méně zatěžuje životní prostředí. K vyztužování se používají i další vlákna např. z polyolefínu (PO), polyesteru (PES) nebo jejich různé kombinace [22].

Nevýhodou polymerních vláken je jejich hydrofobní povrch, se kterým souvisí nízká smáčivost povrchu vláken vodou. Běžná stavební pojiva (cement, vápno) vodu osahují a v důsledku toho dochází k nedostatečné soudržnosti na rozhraní vlákna a matrice. Proto se tomuto jevu se snažíme předejít různými povrchovými modifikacemi vláken.

2.4. Soudržnost vláken s matricí

Jak již bylo zmíněno výše (kap. 2.1.), vlastnosti kompozitů závisí na vlastnostech jednotlivých složek, jejich rozložení, struktuře, množství a především na jejich interakci. V případě vláknobetonů (a dalších vláknitých kompozitů) tedy hraje klíčovou roli soudržnost vyztužované matrice s povrchy vláken. Adheze je ovšem z důvodu nízké smáčivosti polymerních vláken nedostatečná. V mezifázovém rozhraní mezi matricí a vlákny – v tzv. ITZ zóně (Interfacial Transition Zone) dochází k výskytu pórů právě v důsledku nízké smáčivosti vláken (Obrázek 4) [25, 26]. Vzhledem k tomu, že jsou tahová napětí z matrice distribuována do vláken přes zónu ITZ, je zde nutné výskytu pórů co nejúčinněji zabránit a nahradit je silnými vazbami. Nedostatečné přilnutí matrice k vláknu totiž při namáhání způsobuje jejich vytahování z matrice materiálu, aniž by byla vyčerpána jejich tahová pevnost. K tomuto jevu nebude docházet, budou-li v zóně ITZ zajištěny silné vazby. Silná vazba je důležitá k vytvoření větší pevnosti, ale i lepší odolnosti kompozitu vůči prostředí [27, 28].



Obrázek 4 – Viditelné póry v ITZ zóně vláknitého kompozitu [29].

2.4.1. Měření soudržnosti vláken s matricí

Soudržnost udává smykovou pevnost spojení dvou různých materiálů (např. oceli a betonu v železobetonových prvcích). Při experimentech se vytváří smykové napětí na rozhraní výztuže s betonem, které vyvolává posun výztuže. Podle normy ČSN 73 1328 je doporučeno ověřování soudržnosti ocelových prutů s betonovým vzorkem dvěma různými způsoby [30].

První způsobem jsou tzv. Pull-out testy, které posuzují odolnost výztuže proti vytahování z betonového hranolu. Výztuž se do vzorku vkládá přesně centricky. Kotevní délka je stanovena s ohledem na průměr výztuže a vyčnívající část prutu musí být dostatečně dlouhá, aby mohla být dobře uchycena v trhacím lisu. Pro jednu zkoušku se zhotoví nejméně tři tělesa a za výsledek se považuje aritmetický průměr zjištěných hodnot. Zkouška je neplatná, pokud jsou rozdíly mezi průměrnou hodnotou a hodnotou jednotlivých vzorků větší než 20 %.

Dalším způsobem měření soudržnosti je ohybová zkouška. Výztuž je zabetonována do zkušebních trámců daných rozměrů a posuzuje se odolnost zabetonovaného prutu proti vytahování z koncových částí trámce, kde dochází k namáhání posouvající silou a ohybovým momentem. Trámec se uloží do zkušebního lisu na dvě podpory. Zatěžování probíhá dvěma břemeny, symetricky umístěnými od svislé osy trámce. Napětí v soudržnosti se vyhodnotí z ohybového momentu vyvolaného zatížením trámce. Zkouška shodně probíhá na třech vzorcích a výsledkem je opět aritmetický průměr naměřených hodnot [30].

Zmíněná metodika je však určena pro stanovení soudržnosti ocelových prutů s cementovou matricí, které jsou v porovnání s vlákny masivní. Nemůže být tedy v plném rozsahu přijata pro testování soudržnosti mezi vlákny a matricí. Pull-out testy sice lze v menším měřítku realizovat popsaným způsobem, ohybové zkoušky však již nikoli. Při nich totiž nelze zaručit jednak polohu jednotlivého vlákna vůči průřezu zkoušeného vzorku a jednak jeho polohou souběžně orientovanou s vektorem tahového napětí. Pro případy zkoušení vzorků s náhodně rozptýlenými vlákny lze tuto metodu alespoň použít pro vzájemné porovnání soudržnosti různých typů vláken se shodnou matricí. Porovnáván je model chování testovaných vzorků (zejména mez pružnosti, vznik trhlin a tuhost v plastické oblasti).

2.5. Povrchové modifikace vláken

Pro modifikace povrchů vláken se používají různé metody. Mezi chemické metody patří například alkalická hydrolýza především u polyesterových vláken, při které se na povrchu mohou vytvořit póry. Změna morfologie povrchu zapříčiňuje zlepšení jeho smáčivosti vodou. Další úpravy spočívají v nanášení tenkých vrstev takových látek na povrch vláken, které mají příznivou smáčivost. Například různé pryskyřice nanášené na aramidová vlákna [4, 31, 32]. Chemické úpravy jsou ovšem nešetrné k životnímu prostředí.

Mezi mechanické úpravy patří úmyslné poškozování povrchů vláken, které lze různými způsoby realizovat ještě před jejich aplikací do vyztužovaného materiálu. Provádí se především dlouhým mísením směsi za předpokladu, že se povrchy vláken poruší o přítomné kamenivo. Chemické i mechanické metody úprav povrchů jsou ovšem shodně nešetrné k vláknům samotným. Zejména při mechanických úpravách jsou povrchová poškození příliš razantní, což má za následek výraznou ztrátu jejich mechanických vlastností [5, 6].

Pro šetrné zlepšení adheze mezi vláknem a matricí se v poslední době nejlépe jeví úprava plazmatem. Použití plazmatu při opracování materiálu se již v průmyslu značně rozšířilo. Plazma se používá pro ochranu materiálu před vlivy okolního prostředí nebo pro úpravu povrchových vlastností [32 – 35].

2.6. Plazma

S plazmatem, čtvrtým (někdy označovaným též jako prvním) skupenstvím hmoty, se na Zemi setkáváme jen zřídka. Jde například o plamen, blesk, ionizovaný plyn v zářivkách nebo svit polární záře. Odhaduje se, že 99 % hmoty ve vesmíru je v plazmatickém stavu, ale na povrchu Země je nutné příslušnou látku zahřát na vysokou teplotu nebo v ní vytvořit elektrický výboj, aby se do tohoto stavu dostala [36, 37].

Plazma je vysoce ionizovaný plyn. Jedná se o směs elektricky nabitých a neutrálních částic, které na sebe navzájem působí prostřednictvím elektrického pole na vzdálenost, která značně převyšuje jejich rozměr. Zmíněný jev vede ke kvalitativně odlišným vlastnostem plazmatu, lišícím se od vlastností neutrálního plynu. Jedna ze základních vlastností plazmatu je tzv. kvazineutralita.

Kvazineutrální znamená téměř neutrální, neboť záporný náboj elektronů téměř neutralizuje kladný náboj iontů. Kvazineutrální plazma je tedy takové plazma, kde je přibližně stejný počet kladně a záporně nabitých částic [36].

Použití plazmatu nabízí několik druhů ošetření povrchů. Může se použít pro čištění, kde ionty bombardují povrch materiálu a dochází k odprašování nečistot nebo, v závislosti na plynu, dochází i k chemickému čištění a nečistoty jsou odpařovány a odsávány.

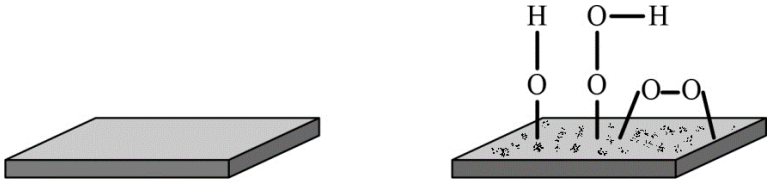
Aktivace povrchu vzniká působením plazmatu na plasty např. kyslíkem. Na površích se vytvoří radikály, které vedou k lepší přilnavosti a smáčivosti povrchu. K leptání povrchu dochází, pokud na něj působí vysoce reaktivní plyn. Odstraněný materiál se odpařuje a odsává, čímž se zvětšuje plocha povrchu. Přivedením vhodného plynu do plazmové komory proběhne plazmatická polymerizace a na povrch modifikovaného materiálu se nanášejí nové, např. ochranné, vrstvy [38].

2.7. Vliv plazmatu na vlastnosti vláken

Vlákna exponovaná určitému typu plazmatu mohou vykazovat požadované zvýšení smáčivosti, ale v některých případech i nepatrnou ztrátu mechanických vlastností (tahové únosnosti). Princip modifikace smáčivosti polymerních vláken plazmatickým výbojem v kyslíkové atmosféře je dvojí – fyzikální a chemický.

Fyzikální princip spočívá v iontovém bombardování povrchu. Osamělé ionty vysokou rychlostí narážejí do povrchu vzorku, který tímto způsobem ve velmi tenké vrstvě mechanicky poškozují. Dochází tak k navýšení kontaktní povrchové plochy účinkem rozprašovacího efektu.

Chemický princip spočívá v nanášení aktivních polárních hydroxylových skupin na povrch vláken. Vysoce reaktivní volné radikály vytváří chemické vazby s nově otevřenými polymerními řetězci (Obrázek 5). Hydroxylové skupiny způsobují polární vazby, které snižují povrchovou energii [28].

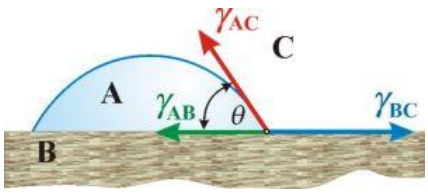


Obrázek 5 – Schéma změny povrchu vláken po plazmatické úpravě [39].

2.8. Smáčivost

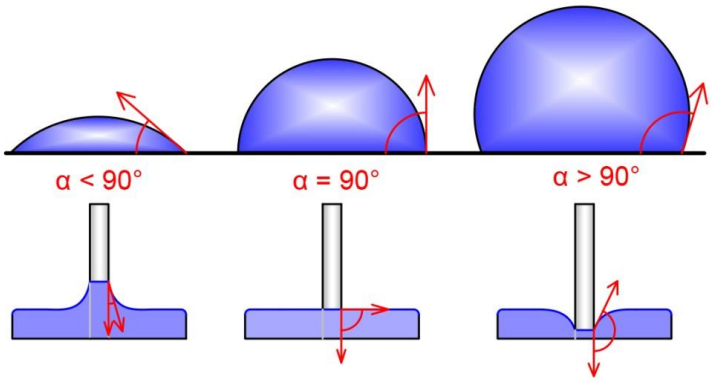
Smáčivost lze charakterizovat jako fyzikální veličinu, která definuje vlastnost kapaliny přilnout k povrchu konkrétní pevné látky. Je určena kontaktním úhlem, který je přímo měřitelný na třífázovém rozhraní pevné látky, kapaliny a plynu. Úhel je měřen mezi průsečíkem, který svírá tečna vedená k povrchu kapaliny v bodě jejího kontaktu s pevnou látkou (Obrázek 6). Vztah mezi úhlem smáčení θ a jednotlivými mezifázovými napětími je dán Yangovou rovnicí (1), kde γ_{AC} představuje povrchové napětí kapaliny, γ_{BC} povrchové napětí tuhého tělesa a γ_{AB} povrchové napětí na rozhraní tuhého tělesa a kapaliny [40].

$$\gamma_{AC} \cdot cos\theta = \gamma_{BC} - \gamma_{AB} \tag{1}$$



Obrázek 6 – Směry působení povrchových napětí [41].

Malé kontaktní úhly lze pozorovat, když se kapalina šíří po povrchu pevné látky, zatímco při velikém kontaktním úhlu zůstávají na povrchu viditelné kapky ve tvaru kuliček. Přesněji řečeno, kontaktní úhel menší než 90° charakterizuje dobrou smáčivost povrchu. Naopak úhel větší než 90° znamená, že smáčivost povrchu není příznivá a kapalina minimalizuje svůj kontakt s pevnou látkou (Obrázek 7). Kontaktní úhly lze měřit jak na styku kapaliny s planární pevnou látkou tak i na vláknu kolmo ponořeném do kapaliny [40].



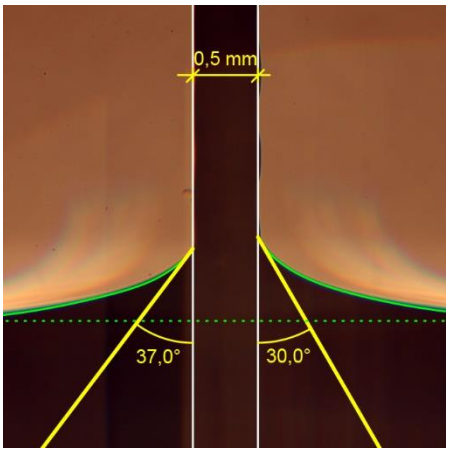
Obrázek 7 – Kontaktní úhly [39].

2.9. Metody měření kontaktních úhlů vláken

Většinu požívaných metod pro měření kontaktních úhlů lze rozdělit do dvou skupin. Jedná se o buď o přímé optické metody, nebo o nepřímé silové metody. Přímé metody spočívají v přímém odečtu velikosti kontaktních úhlů, zatímco nepřímé jsou založeny na měření sil vznikajících při kontaktu zavěšených pevných látek vnořovaných do kapaliny. Pro provedení nepřímých metod je nutná znalost průřezu vlákna a viskozity kapaliny.

2.9.1. Přímá optická metoda

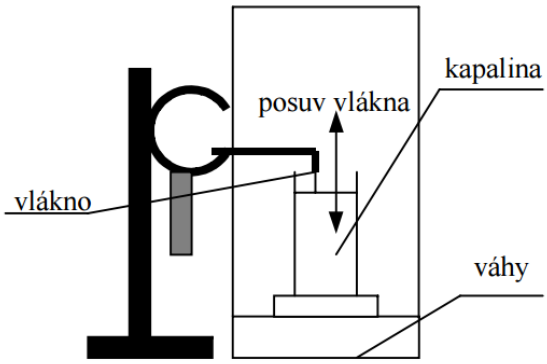
Přímá optická metoda je nejrychlejší a nejjednodušší. Spočívá v zobrazení pevného tělesa, kapaliny i okolního prostředí v horizontální optické soustavě. Pro odečtení kontaktního úhlu musí být zajištěno dostatečné optické zvětšení. Zpracování se provádí obrazovou analýzou. Tato metoda není náročná a stačí pouze malé množství materiálu k určení vlastností vlákna. Měřením vznikají nepřesnosti při odhadu pozice tečny prokládané zakřiveným povrchem kapaliny v místě kontaktu s pevným tělesem (Obrázek 8), proto není možné měřit kontaktní úhly pod 20°. Nelze měřit ani smáčivost vláken hydrofobních (kontaktní úhel nad 90°) [42].



Obrázek 8 – Těleso smáčené kapalinou zobrazené optickou metodou.

2.9.2. Wilhelmyho metoda

Mezi nepřímé způsoby měření velikosti kontaktních úhlů patří Wilhelmyho metoda, která je vhodná pro velmi tenká vlákna. Předpokládá se jejich kruhový průřez. Ve svislé poloze jsou ponořována do kapaliny. Zkoumá se přírůstek hmotnosti kapaliny, která vzlíná po jejich povrchu. Pro měření je nutné pracovat s přesnou měřicí soustavu, protože se pracuje s velmi malými hodnotami. Metoda není vhodná pro lehká ohebná vlákna, která by si při ponoření do kapaliny mohla deformovat o její hladinu. Postup je schematicky znázorněn na obrázku (Obrázek 9). Tíha vzlínající kapaliny se rovná součinu povrchového napětí kapaliny, obvodu vlákna a kosinu kontaktního úhlu [40, 43].

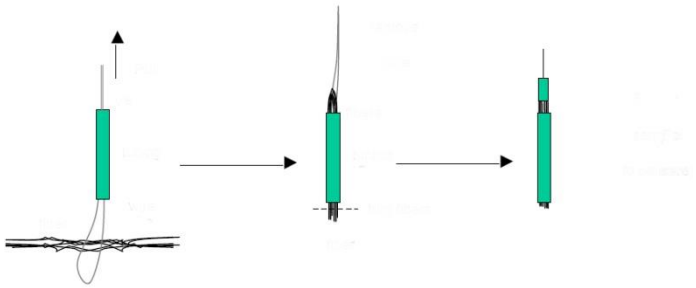


Obrázek 9 – Princip Wilhelmyho metody [41].

2.9.3. Metoda Straw

Dalším nepřímým zástupcem je metoda Straw, která se používá pro měření kontaktních úhlů na více vláknech současně. Vlákna musí být aspoň 50 mm dlouhá a dostatečně ohebná. Svazek vláken je pomocí tenkého drátku protažen skrz teflonovou trubičku přibližné délky 25 mm a vnitřním průměrem asi 1 mm. Spodní přesahy vláken jsou zastřiženy a odstraní se protahovací drátek. Očko z vláken, které vznikne nad horní hranou trubičky, je uchyceno do měřicího zařízení. Vzniklý vzorek má vlastnosti porézní pevné látky s kapilárními póry mezi jednotlivými vlákny. Příprava vláken je zobrazena na obrázku níže (Obrázek 10).

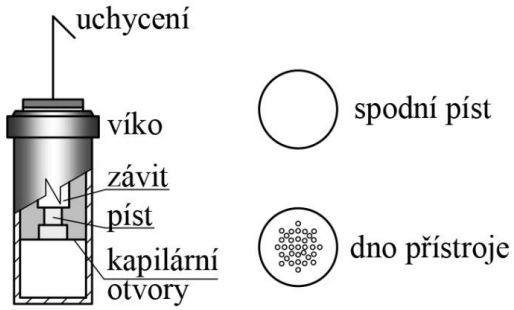
Ponořením vláken do kapaliny dojde k jejímu vzlínání do vzorku. Měří se hmotnost jejího množství. Kontaktní úhel je poté vyjádřen pomocí teorie Washburnovy absorbce, za předpokladu, že bude menší než 90°. K aplikaci této metody je potřeba znát viskozitu, hustotu a povrchové napětí kapaliny, která bude při měření použita [40, 43].



Obrázek 10 – Schéma přípravy vláken pro metodu Straw [43].

2.9.4. Metoda Packed cell

Metoda Packed cell funguje na obdobných principech jako metoda Straw. Používá se v případech, kdy vlákna nejsou dostatečně dlouhá nebo ohebná, aby se protáhla teflonovou trubičkou. Měření se liší v technologické přípravě vzorků a uchycení vláken, výpočet poté už probíhá podle stejných rovnic. Vlákna se umisťují do válce, kde jsou stlačována pístem (Obrázek 11). Podstavou, ve které jsou otvory s průměrem 0,9 mm, prochází kapalina a opět se měří přírůstek její hmotnosti [40].



Obrázek 11 – Schéma válce metody Packed cell [39].