



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra mechaniky**

**Plazmatická modifikace mikrovláknité výztuže za účelem zlepšení soudržnosti
s cementovou matricí obsahující betonový recyklát**

**Plasma modification of microfiber reinforcement to improve adhesion with
cement matrix containing recycled concrete**

diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Pavel Tesárek Ph.D.
Specialista: Ing. Štěpán Potocký Ph.D.

Jakub Ďureje

Praha 2018

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Jakub Ďureje

Název diplomové práce: Plazmatická modifikace mikrovláknité výztuže za účelem zlepšení soudržnosti s cementovou matricí obsahující betonový recyklát

Základní část: Výběr, zkoušení a vyhodnocování vhodnosti plazmatických úprav podíl: 70 %

Formulace úkolů: Zpracovat rešerši na dané téma.

Výběr vhodných vláken pro plazmatickou modifikaci a porovnání vlastností vláken před a po plazmatické úpravě.

Výběr vhodných vláken a jejich užití do cementových matric s využitím mikromletého betonového recyklátu.

Stanovení mechanických vlastností vzorků (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu).

Vyhodnocení výsledků a stanovení optimálního složení cementového kompozitu s ohledem na zlepšení soudržnosti vláken s cementovou matricí.

Podpis vedoucího DP:  Datum: 5.10.2017

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Plazmatické modifikace vláken podíl: 30 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Štěpán Potocký, Ph.D.

Formulace úkolů: Plazmatické modifikace vláken

Podpis konzultanta:  Datum: 5.10.2017

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Abstrakt

Teoretická část diplomové práce obsahuje informace z odborných zdrojů týkající se současného stavu problematiky plazmaticky modifikovaných vláken obsažených v cementových kompozitních materiálech. V experimentální části práce jsou prováděny plazmatické modifikace povrchu polypropylenových (PP) a polyvinylalkoholových (PVA) vláken pomocí kyslíkové nebo vodíkové plazmy za účelem zlepšení vlastností kompozitního materiálu obsahující takto modifikovaná vlákna, cement a recyklát. Pro zjištění efektivity těchto úprav jsou na kompozitních materiálech provedeny nedestruktivní a následně destruktivní zkoušky a naměřené hodnoty jsou porovnány s referenčními vzorky.

Klíčová slova

plazmatická modifikace vláken, modifikace povrchu vláken, vodíková plazma, kyslíková plazma, polypropylenová vlákna, PP vlákna, polyvinylalkoholová vlákna, PVA vlákna

Abstract

The theoretical part of the diploma thesis contains information from professional sources on the current state of the plasma modified fibers contained in cement composite materials. In the experimental part, plasma modifications of the surfaces of polypropylene (PP) and polyvinyl alcohol (PVA) fibers by oxygen or hydrogen plasma are performed to improve the properties of the composite material containing modified fibers, cement and recycle. To determine the effectiveness of these treatments, non-destructive and subsequent destructive tests are performed on composite materials and the measured values are compared with the reference samples.

Key words

plasma fiber modification, fiber surface modification, hydrogen plasma, oxygen plasma, polypropylene fibers, PP fibers, polyvinylalcohol fibers, PVA fibers

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny informační zdroje.

V Praze dne 7. 1. 2018

.....

.....
Jakub Ďureje

Poděkování:

Děkuji Ing. Pavlu Tesárkovi Ph.D. a Ing. Štěpánu Potockému Ph.D. za odborné rady a pomoc při vypracování diplomové práce. Velmi děkuji Ing. Janu Trejbalovi za odborné rady a výpomoc během celé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Proškovi, Ing. Josefu Fládrovi a Ing. Tomáši Trtíkovi za výpomoc s experimenty a odborné rady. Nakonec bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Současný stav problematiky	10
2.1. Cementová matrice.....	10
2.1.1. Problematika cementových kompozitních materiálů	10
2.1.2. Možnosti vyztužení cementové matrice	11
2.1.3. Struktura cementové matrice vyztužené vlákny.....	13
2.2. Vlákna.....	18
2.2.1. Ocelová vlákna	19
2.2.2. Polymerní (syntetická) vlákna	19
2.2.3. Skleněná vlákna.....	21
2.2.4. Keramická vlákna.....	22
2.2.5. Azbestová vlákna.....	23
2.2.6. Vlákna přírodní.....	24
2.3. Modifikace vláken	24
2.3.1. Sizing.....	24
2.3.2. Chemická modifikace vláken	25
2.3.3. Mechanické modifikace vláken	25
2.3.4. Plazmatická modifikace vláken	25
2.4. Metody posuzování povrchu vláken na soudržnost s matricí	27
2.4.1. Smáčivost	27
2.4.2. Měření kontaktního úhlu	30
2.4.3. Pull-out testy	33
2.5. Využití plazmatických úprav v praxi.....	34
3. Cíle diplomové práce	36

4. Praktická část	37
4.1. Optimalizace plazmatických modifikací.....	37
4.1.1. Výběr a vlastnosti vláken	37
4.1.2. Plazmatické modifikace vláken	37
4.1.3. SEM analýza.....	41
4.1.4. Měření smáčivosti vláken.....	44
4.1.5. Výběr vhodných plazmatických modifikací.....	47
4.2. Zkoušky cementových kompozitů s optimálně upravenými vlákny.....	48
4.2.1. Výroba zkušebních vzorků.....	48
4.2.2. Nedestruktivní měření dynamického modulu pružnosti	49
4.2.3. Destruktivní zkoušky	51
4.3. Vyhodnocení vlivu plazmatické modifikace.....	54
5. Závěr	71
6. Seznam použité literatury.....	73
7. Seznam obrázků.....	80
8. Seznam tabulek.....	82

1. Úvod

Cementové kompozitní materiály patří ve stavebnictví k nejpoužívanějším materiálům. Největší nevýhodou těchto materiálů je velmi špatná schopnost přenášet tahová napětí a z tohoto důvodu často obsahují výztužné prvky schopné přenést tahová napětí. Existují různé možnosti vyztužování. V poslední době se díky novým materiálům a technologiím stále více využívají vlákna a to hlavně polymerní.

Vlastnosti cementových kompozitů s vláknitou výztuží závisí na parametrech použitých materiálů, technologii výroby a vzájemném propojení složek. Správné propojení výztužných vláken s cementovou matricí má důležitý vliv na chování celého kompozitu. Významný vliv na propojení těchto složek má povrch vláken.

Jedním ze způsobů úpravy povrchů vláken je možnost využití plazmatické modifikace. Plazmatická modifikace je schopna kombinovat fyzikální účinky procesu (iontové bombardování) a chemické účinky (radikály působící na povrch) a dosáhnout tak vhodnějšího povrchu vzhledem k efektivitě navázání vláken k cementovému pojivu. Účinky plazmatických úprav závisí na době vystavení vlákna plazmatu a procesním parametřům (plyn, tlak, výkon). Po plazmatických úpravách je dále třeba zohlednit stárnutí, tj. dobu mezi plazmatickou modifikací a aplikací do cementového kompozitu.

Diplomová práce se zabývá plazmatickými modifikacemi povrchů polypropylenových (PP) a polyvinylalkoholových (PVA) vláken za účelem získání optimálních vlastností cementových kompozitních materiálů. V práci jsou použity časy plazmatických modifikací od 30 sekund do 480 sekund. Jako pracovní plyn byl použit kyslík a vodík dle poznatků z předchozích prací. Následně jsou na základě výsledků destruktivních a nedestruktivních zkoušek vyhodnoceny neoptimálnější časy a druh plazmy pro daný typ vláken.

Polypropylenová vlákna díky jejich nízké ceně patří k nejpoužívanějším vláknům v cementových kompozitech. Problémem je jejich špatně vodou smáčivý povrch a z toho plynoucí potíže se špatnou soudržností. Polypropylenová vlákna byla modifikována pomocí kyslíkové plazmy v různých časech.

Polyvinylalkoholová vlákna jsou, podobně jako vlákna nylonová, na rozdíl od jiných běžně používaných polymerů (PP, PE, PET) velmi dobře smáčivá vodou. Kvůli dosažení deformačně-zpevňujícího se charakteru vláknových kompozitních materiálů se často olejují

nebo jinak povrchově modifikují tak, aby byla jejich hydrofilicita redukována, respektive aby vlákno při pull-out testu vykazovalo chování bližší slip-hardening (redukce chemické vazby, zvýšení fyzikální vazby). Uvážíme-li, že proces kyslíkové plazmatické terminace má časově-nestabilní charakter, tj., modifikovaná smáčivost se postupně vrací k referenčním hodnotám, ale na druhé straně časově stabilní charakter fyzikální modifikace, jedná se vlastně o ideální typ úpravy. Pro zmíněné tvrzení v odborné literatuře neexistují jasné důkazy. Proto bylo rozhodnuto řešit tuto otázku vlastními experimenty. Vlákná byla modifikována i ve vodíkové plazmě, která u některých materiálů (diamant) vyvolává hydrofobní chování, které by mohlo být spolu s mechanickými modifikacemi ideální pro tato vlákna. Chování povrchu vodíkovou plazmou modifikovaného polyvinylalkoholu ještě nebylo jasně ověřeno a z tohoto důvodu bylo také rozhodnuto chování experimentálně ověřit.

2. Současný stav problematiky

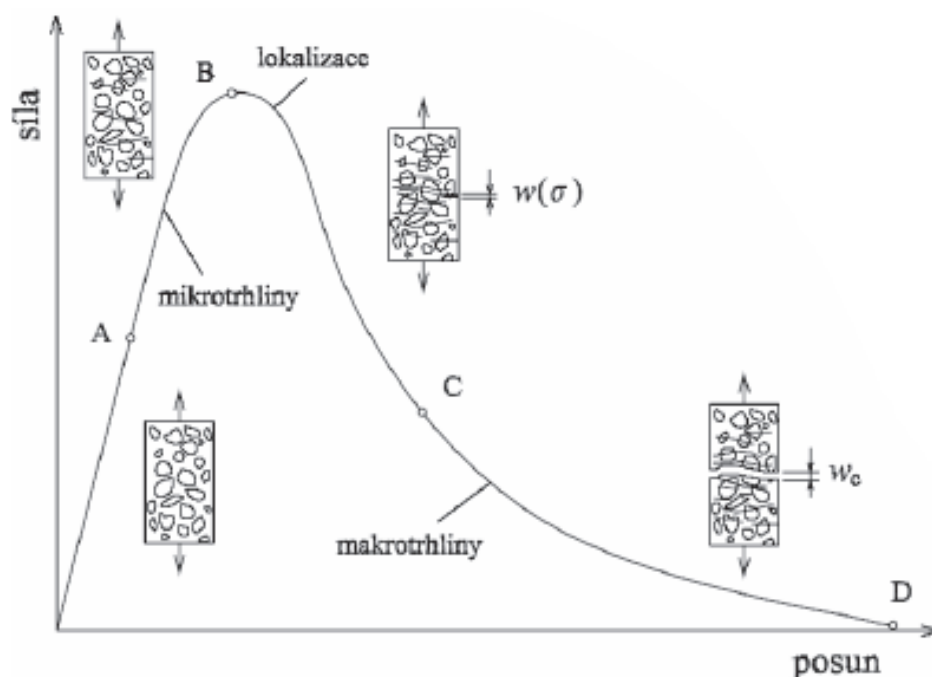
2.1. Cementová matrice

2.1.1. Problematika cementových kompozitních materiálů

Materiály na bázi cementu bez tahových výztužných prvků velmi špatně odolávají tahovému namáhání. Tahová pevnost prostého betonu je přibližně 10 % z pevnosti tlakové. Největším problémem je, že se cementové kompozity při porušení v tahu nebo ohybu téměř nechovají pružně, ale nastává u nich křehký lom. [1,2]

Cementové kompozity mají ze své podstaty objemové defekty. Mezi nejvýznamnější patří póry a smršťovací trhliny. Zatěžováním těchto kompozitů vznikají mikrotrhliny, které spolu se smršťovacími trhlinami a póry významně ovlivňují chování zatěžovaných kompozitů. Z pohledu lomové mechaniky nastává u cementových kompozitů kvazikřehký lom, protože zóna zpevňování je zanedbatelná a poškození přichází náhle po dosažení maximální síly během pružného namáhání. [1]

Na obrázku 1 je typické chování betonového prvku se zářezem při zatížení v tahu/ohybu s konstantním posunem. V oblasti od počátku do bodu A můžeme pozorovat pružné chování. Následuje nelineární část mezi body A-B k dosažení maximálního zatížení



Obrázek 1: Zatížení a posunu betonového vzorku se zářezem v tahu/ohybu. [1]

a část B-C tahového změkčení. Mezi body A-C nastal rozvoj mikrotrhlin v materiálu. Soudržnost v části C-D je způsobena díky zachycování trhlin mezi zrna kameniva a díky třecím silám. [1, 2]

Z těchto důvodů je nezbytné cementové kompozity vyztužovat pomocí vhodných materiálů, aby byly schopny přenášet větší tahové síly a nenastával u nich křehký lom. Vyztužené cementové kompozity mají většinou navíc i vyšší pevnost v tlaku, protože tlakové porušení prvků z těchto materiálů je výhradně způsobeno vznikem tahových trhlin ve směru rovnoběžném ke směru zatěžování.

2.1.2. Možnosti vyztužení cementové matrice

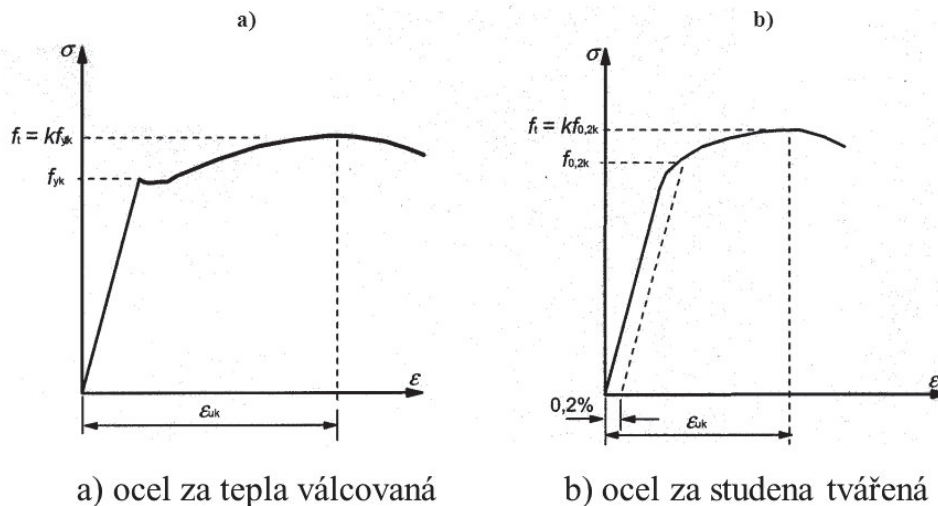
Cementovou matici je možné vyztužit [3]:

- A. betonářskou výztuží,
- B. předpínací výztuží,
- C. kompozitní výztuží,
- D. vlákny, respektive drátky.

Betonářská výztuž

Nejčastěji využívanou výztuží do cementové matrice s kamenivem (beton) je betonářská výztuž. Beton vyztužený betonářskou výztuží se nazývá železobeton. Stavby z železobetonu se začaly hojně budovat od počátku 20. století poté, co v roce 1898 společnost Hennebique & Le Brun postavila první vícepatrovou budovu ze železobetonu ve Velké Británii [4].

U betonářské výztuže při navrhování železobetonových konstrukcí podle norem EN sledujeme její mez kluzu (vyznačenou nebo smluvní), tažnost, ohýbatelnost, soudržnost s betonem, průměr a svařitelnost. Pracovní diagramy oceli jsou na obrázku 2. Za tepla válcovaná ocel má mez kluzu vyznačenou f_{yk} , za studena tvářená ocel má mez kluzu smluvní $f_{0,2k}$. Tažnost betonářské výztuže je zařazena do tříd A, B a C, kde třída A má nejmenší tažnost a třída C nejvyšší. Soudržnost závisí na povrchové úpravě výztuže. Podle normy EN 1992-1-1 je možné použít výztuž jen s žebříkovým povrchem. [5]



Obrázek 2: Pracovní diagram oceli. [5]

Předpínací výztuž

Předpínací výztuž se používá v kombinaci s betonářskou výztuží, takto vyztužený beton se nazývá předpjatý beton. První pokusy o předpínací výztuž byly již na konci 19. století, ale skončily neúspěchem kvůli malému předpětí. Výztuž se napínala na napětí okolo 300 MPa a kvůli dotvarování a smršťování betonu se napětí v průběhu času téměř vytratilo. V roce 1928 Eugene Freyssinet poprvé použil vhodnou předpínací výztuž s předpětím okolo 1000 MPa kde ztráty byly okolo 20 % a tím dal základ skutečnému předpjatému betonu. V Československu se začal hojně používat v polovině 20. století. [6]

Běžně používaná předpínací výztuž má pevnost až 2000 MPa. Pro co nejmenší ztráty předpětí se používají lana s nízkou relaxací. Konstrukce z předpjatého betonu rozdělujeme na předem předpjaté nebo dodatečně předpjaté. Předem předpjaté betonové prvky se předpínají před betonáží a jsou kotveny díky soudržnosti betonu. Dodatečně předpjaté konstrukce se předepínají po ztvrdnutí betonu a jsou kotvené v kotevních blocích. [7, 8]

Kompozitní výztuž

Jedná se o poměrně nový typ výztuže užívaný ve stavebnictví. Je vyráběna z anorganických vláken, které jsou spojeny pryskyřicí. U větších průměrů se vyrábí ve formě tyčí, u menších se navíjí do sviteků (obrázek 3). Vyrábí se v průměru již od 2 mm až po průměry přes 40 mm. Její vlastnosti výrazně závisí na typu použitých vláken. Vyrábí se i s různými

povrchovými úpravami, aby byla dosažena dostatečná soudržnost s betonem. Její použití je vhodné hlavně do míst, kde je běžná betonářská výztuž nevhodná z důvodu koroze. [9]



Obrázek 3: Kompozitní výztuž ze skelných vláken pojených polymerovou pryskyřicí. [12]

Vlákna respektive drátky

Jedná se o rozptýlenou výztuž organického nebo anorganického původu. Rozptýlená výztuž ve stavebnictví byla používána podle odhadů již před 3 500 lety ve formě slámou vyztužených nepálených cihel. Později se používala koňská srst pro vyztužování malt. Na počátku 20. století se začala k vyztužování cementových kompozitů hojně používat vlákna azbestová. Kvůli zjištění jejich zdravotní závadnosti v 50. létech 20. století se začaly hledat její náhrady. Během 70. let 20. století byla přijata ocelová vlákna jako alternativa ke klasickému vyztužování. Ocelová vlákna však mají poměrně vysokou cenu a hmotnost, mohou korodovat a při manipulaci s nimi se můžeme snadno poranit. Z těchto důvodů se začala hledat různá další alternativní vlákna a na počátku 90. let 20. století se začala využívat vlákna syntetická. [10, 11]

2.1.3. Struktura cementové matrice vyztužené vlákny

Vlastnosti cementových materiálů vyztužených pomocí vláken závisí na vlastnostech a struktuře kompozitu. Pro odhad chování takového kompozitu potřebujeme kromě základních mechanických vlastností znát strukturu samotné cementové matrice, tvar a rozmístění vláken a strukturu na rozhraní mezi vláknem a matricí – soudržnost mezi vlákny a matricí. [13]

Matrice

Cementové matrice můžeme podle typu plniva rozdělit na dvě základní skupiny. První skupinou jsou cementové pasty a cementové malty. Cementové pasty obsahují cement a vodu, malty obsahují cement, písek (jemné kamenivo) a vodu. Druhou skupinou jsou betony obsahující cement, písek (jemné kamenivo), štěrk (hrubé kamenivo) a vodu. Pro upravení vlastností mohou dále obsahovat různé přísady a příměsi. [13]

Cementové pasty a malty vyztužené vlákny se používají převážně pro vyztužování tenkých deskových materiálů. Vlákna u takových kompozitů slouží jako primární výztuž. Jsou používána vlákna skleněná a celulózová, dříve se používala vlákna azbestová, než byla zjištěna jejich zdravotní závadnost. Vlákna jsou obvykle dávkována v rozmezí 5 až 15 % objemu kompozitu. [13]

Vláknobetony (betony vyztužené vláknitou výztuží) obsahují vlákna obvykle v nižším než 2% objemu a vlákna slouží pouze jako sekundární výztuž pro redukci trhlin a zlepšení vlastností betonu. Se zvyšujícím se obsahem vláken se zhoršuje zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. Při použití vhodného kameniva a plastifikátorů zlepšující zpracovatelnost čerstvé betonové směsi či superplastifikátorů je možné dávkovat vlákna v objemu 2-6 % krátkých vláken, což už může být vhodné pro efektivní vyztužování. [13]

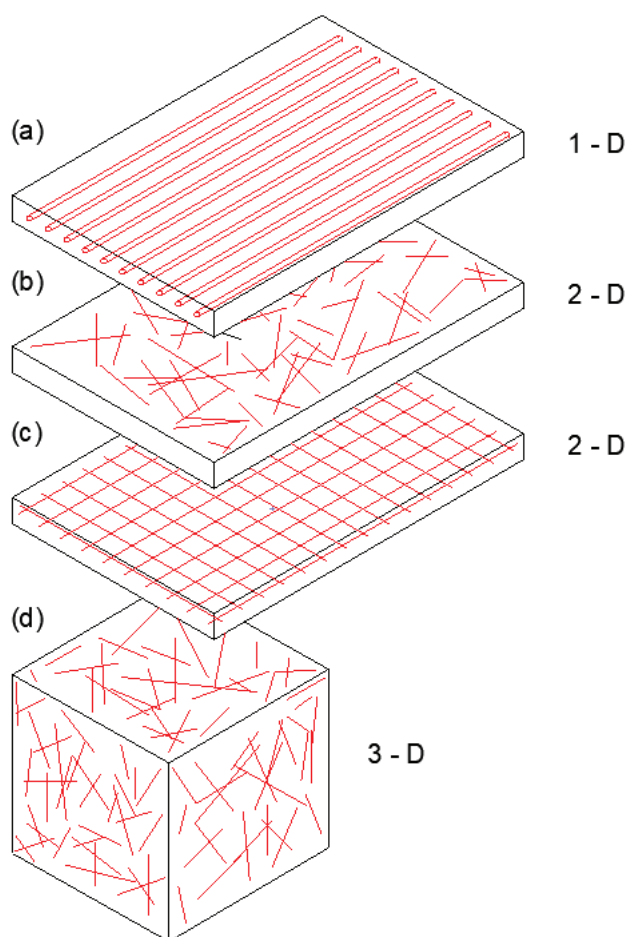
Vlákna

Vlákna v cementové matici mohou mít různé geometrické uspořádání, které zásadně ovlivní vlastnosti cementového kompozitu. Z geometrického hlediska nás zajímá tvar samotného vlákna, jejich povrch a dále rozmístění vláken v cementovém kompozitu. [13]

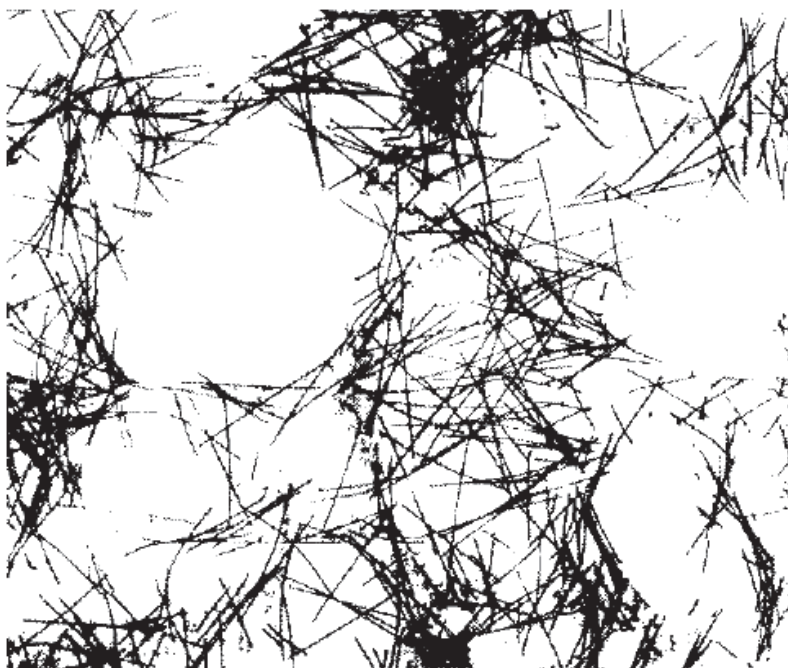
Samotná vlákna mohou být uspořádána dvěma způsoby. Prvním způsobem je samostatné uspořádání, kde je každé vlákno tvořeno z jednoho kusu materiálu. Vlákna uspořádaná tímto způsobem se nazývají monofilamentická a typickým příkladem jsou ocelové drátky. Druhým způsobem je uspořádání do svazků – vlákna fibrilovaná. Svazek vláken je tvořen mnoha vlákny obvykle o průměru 10 µm nebo méně. Fibrilovaně uspořádaná vlákna mohou být neorganická – například skleněná, organická – například uhlíková a nebo přírodní – například konopná. [13, 14]

Rozmístění vláken v matici může být kontinuální nebo náhodné. Při kontinuálním rozmístění jsou dlouhá vlákna uspořádávána v požadovaném směru. Kontinuální rozmístění není příliš často využíváno u vláknobetonů z hlediska jeho složitosti provedení. Naopak často

užívanou metodou u vláknobetonů je náhodně rozmístěná výztuž tvořená vlákny obvykle kratšími než 50 mm (obrázek 4). Poloha vláken respektive drátků není bohužel ideálně náhodná. Vlákna mají tendenci v cementové matrici během míchání vytvářet shluky a při užití ocelových drátků je v blízkosti spodní hrany prvku výrazně větší množství drátků oproti horní hraně prvku kvůli působení gravitační síly. (obrázek 5). [13]



Obrázek 4: Rozmístění vláken v cementovém kompozitu,
(a) – kontinuální rozmístění vláken v matrici v jednom směru,
(b) – krátká náhodně rozptýlená výztuž v plochých prvcích,
(c) – kontinuální rozmístění vláken v matrici ve dvou směrech,
(d) – krátká náhodně rozptýlená výztuž ve všech směrech. [13]



Obrázek 5: Rozmístění ocelových vláken v betonu pozorovaných rentgenem. [13]

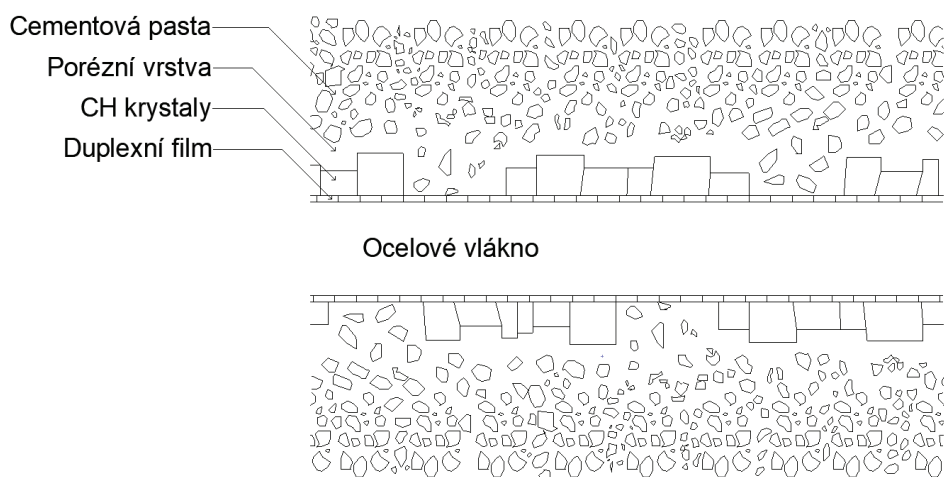
Soudržnost mezi vlákny a maticí

Jedna z nejdůležitějších vlastností u cementových kompozitů je soudržnost vlákna s maticí. Soudržnost je vlastnost závisící na mezifázové přechodové zóně označované zkratkou ITZ (interfacial transition zone). ITZ zónou se přenáší do vlákna tahové napětí. V této zóně je mikrostruktura cementové pasty podstatně odlišná od mikrostruktury mimo tuto zónu.

Matrice je složena z částic cementu o průměrné velikosti přibližně 10 μm , které při hydrataci reagují a tvoří koloidní CSH částičky a větší CH krystaly. Částicová povaha čerstvé směsi má významný vliv na přechodovou zónu, protože při jejím formování vzniká okolo vlákna více prostor naplněných vodou než mimo přechodovou zónu. Způsobeno je to jednak kvůli krvácení a zachycování vody okolo vláken a také kvůli neefektivnímu obalování cementových zrn v zóně 20 až 40 μm od vlákna. Z tohoto důvodu je matrice v ITZ mezifázové přechodové zóně více porézní než mimo ni. Přechodová vrstva závisí také na samotném uspořádání vláken, jedná-li se o samostatná vlákna (nejčastěji ocelové drátky) nebo o svazky vláken – typicky svazky mikrovláken, což je označení pro vlákna s průměrem menším než 0,3mm. [13]

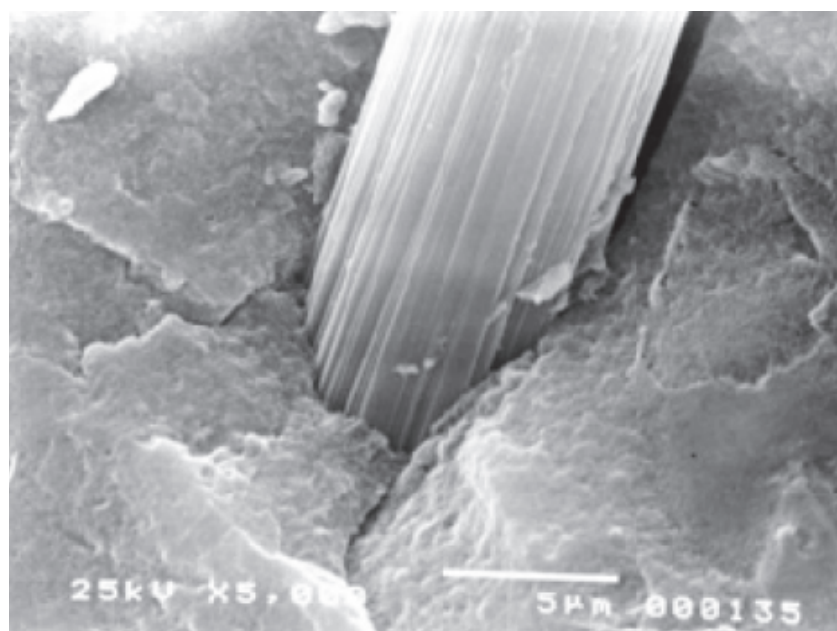
Mikrostruktura okolo samostatných ocelových vláken je bohatá na CH krystaly, které jsou obvykle přímo ve styku s vlákny. CH krystaly vytváří okolo vlákna tenký duplexní film o tloušťce přibližně 1 μm , v některých místech i mnohem širší útvary. Za vrstvou z CH krystalů

následuje porézní přechodová vrstva, která se skládá převážně z pórů mezi CSH a ettringitem (produkt reakce sádrovce s C3A přidávaného ke slínku pro zpomalení hydratace). Schéma je zobrazené na obrázku 6. Je patrné, že slabé spojení se nemusí vždy nacházet přímo na rozhraní povrchu vlákna a cementové pasty. V tomto případě se nachází v porézní vrstvě mezi vrstvou z CH krystalů a cementovou pastou. [13]



Obrázek 6: Schéma mezifázové přechodové zóny u ocelového drátku. [13]

Šířka mezifázové přechodové zóny závisí na zpracování a vlastnostech matrice. Dobré zpracování směsi s jemnými plnidly a použití mikrovláken může způsobit výrazné zmenšení přechodové vrstvy, což způsobí mnohem vyšší soudržnost vlákna s matricí (Obrázek 7).



Obrázek 7: Samostatné uhlíkové mikrovlákno v cementové matrici. [13]

Svazky vláken, nejčastěji mikrovláken, se ve směsi nerozptýlí až na jednotlivá vlákna, ale působí společně. Mezery mezi jednotlivými mikrovlákny jsou velmi malé. Z tohoto důvodu se cementová zrna jen zřídka dostávají mezi vlákna ve svazcích. Mezi vlákny ve svazcích zůstávají mezery a každé vlákno uvnitř svazku se může oproti ostatním vláknům téhož svazku částečně pohybovat. Vlákna na okrajích svazku jsou spojena s matricí lépe než vlákna ostatní. Přenos napětí mezi jednotlivými vlákny ve svazku probíhá pomocí třecích sil a lokálních hydratačních produktů. Pokud je kompozit umístěn ve vlhkém prostředí, může docházet k postupnému vyplňování mezer mezi vlákny hydratačními produkty. [13]

2.2. Vlákna

Podle materiálu můžeme vlákna rozdělit do několika skupin: ocelová vlákna, polymerní (syntetická) vlákna, skleněná vlákna, keramická vlákna, vlákna azbestová (již se nesmí používat) a vlákna přírodní. Obecné vlastnosti těchto vláken jsou uvedeny v Tabulce 1.

druh vlákna	průměr [μm]	objemová hmotnost [kg*m ³]	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]	přetvoření [%]
ocelové	5-500	7840	200	500-2000	0,5-3,5
skleněné	9-15	2600	70-80	2000-4000	2-3,5
azbestové	0,02-0,4	2600-3400	164-196	3100-3500	2-3
polypropylenové	20-400	900-950	3,5-10	450-760	15-25
aramidové (kevlar)	10-12	1440	63-120	2300-3500	2-4,5
uhlíkové (PAN)	8-9	1750-1950	250-390	2500-4000	0,5-1,5
uhlíkové (Pitch)	18	1600	30-32	600-750	2-2,4
jutové	100-200	neuvedeno	26-32	250-350	1,5-1,9
kokosové	100-400	neuvedeno	19-26	120-200	10-25

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti vybraných vláken. [13]

2.2.1. Ocelová vlákna

Ocelová vlákna se mohou vyrábět různě tvarovaná s přípustnými odchylkami pro zlepšení soudržnosti s matricí nebo rovná (obrázek 8). Ocelová vlákna se vyrábí v různých průměrech obvykle 0,1 až 1 mm. Jsou používána jak makrovlákna tak i mikrovlákna. V dnešní době jsou poměrně hojně využívána jako sekundární výztuž nosných prvků či do průmyslových podlah. [17, 18]



Obrázek 8: Různé tvary ocelových vláken. [20]

Ocelová vlákna v cementovém kompozitu zvyšují pevnost v tahu i tlaku. Zvyšují houževnatost kompozitního materiálu, jeho smykovou pevnost a omezují vznik trhlin. Kompozitní materiál skládající se z betonu a ocelových vláken se nazývá drátkobeton. [16, 19, 20]

Ocelová vlákna se dle normy ČSN EN 14889-1 dělí do následujících skupin dle základního materiálu a způsobu výroby [17]:

Skupina I: za studena tažený drát.

Skupina II: vlákna stříhaná z plechu.

Skupina III: vlákna oddělovaná z taveniny.

Skupina IV: vlákna protahovaná z drátu taženého za studena.

Skupina V: vlákna frézovaná z ocelových bloků.

2.2.2. Polymerní (syntetická) vlákna

V posledních letech patří mezi nejvíce zkoumaná a používaná polymerní vlákna (tabulka 2). Základní vlastnosti polymerních vláken se rozdělují podle jejich modulu pružnosti. Polymerní vlákna můžeme rozdělit na vlákna nízkomodulová a vysokomodulová.

Zkratka	Název polymeru
PET	Polyethylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
PP	Polypropylen
PE	Polyethylen
PA	Polyamid
PAN	Polyakrylonitril
PVA	Polyvinylalkohol

Tabulka 2: Základní typy průmyslově používaných polymerních vláken. [24]

Podle normy ČSN EN 14889-2 Vlákná do betonu – Část 2: Polymerová vlákna – Definice, specifikace a shoda musí být polymerová vlákna klasifikována výrobcem podle jejich fyzického tvaru na třídy:

Třída Ia: Mikrovlákna s průměrem < 0,30 mm; jednovláknovitá (monofilamentická).

Třída Ib: Mikrovlákna s průměrem < 0,30 mm; vláknitá (fibrilovaná).

Třída II: Makrovlákna s průměrem > 0,30 mm. [14]

Nízkomodulová vlákna

V dnešní době patří nízkomodulová polymerní vlákna z hlediska jejich dobrých mechanických vlastností a hlavně díky příznivé ceně mezi nejpoužívanější. Díky výzkumu a vývoji se používají nejrůznější druhy polymerních vláken, která mohou být různě modifikována pro dosažení optimálních požadovaných vlastností. Mezi nízkomodulová vlákna patří vlákna nylonová, polyetylenová a nejvíce využívaná vlákna polypropylenová. [23, 25]

Vysokomodulová vlákna

Mezi tato vlákna patří vlákna vyrobená z uhlíku (karbonová vlákna). Vysokomodulová vlákna dosahují nejvyššího modulu pružnosti. Podle způsobu výroby a materiálu je pak dělíme na vlákna pitch a PAN. Pitch vlákna jsou levnější než PAN vlákna ale dosahují nižších modulů pružnosti oproti PAN vláknům. Pitch vlákna jsou vyrobena z ropy a uhelného dehtu. Pan vlákna jsou vyrobena z polyakrylnitrilu. Mezi vysokomodulová vlákna dále patří vlákna aramidová (kevlarová), vlákna akrylová a polyvinylalkoholová (PVA). [25, 26]

2.2.3. Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se používají pro jejich specifické vlastnosti převážně v tenkostěnných prvcích. Jsou používána skleněná vlákna odolná vůči alkalickému prostředí – AR vlákna. Vlákna mohou být efektivně použita v různých obkladových fasádních panelech či dalších různých tenkostěnných prvcích (obrázek 9). Díky jejich odolnosti vůči vysokým teplotám mohou být využity v protipožárních deskách.

Mezi jejich hlavní výhody patří možnost vytvoření mnohem tenčích desek na bázi cementového pojiva než u klasických cementových malt či betonů. Díky tomu je možné vytvořit velice lehké cementové deskové prvky. Další výhodou je poměrně vysoká pevnost v tahu. Z tohoto důvodu jsou desky se skleněnými vlákny flexibilní a odolné proti vznikům trhlin. [13, 27]

Kompozitní materiály na bázi cementového pojiva a skleněných vláken se komerčně vyrábějí způsobem spray-up, premix případně ekonomicky méně nákladnou hybridní technologií. Výroba metodou spray-up je založena na použití speciální stříkácí pistole, která do tekuté cementové směsi přidává a stříhá dlouhá skleněná vlákna z kontinuální cívky. Spray-up metoda vytváří díky vhodné orientaci vláken a jejich délce velice odolný a pevný kompozitní materiál. Nevýhodou je velice vysoká pořizovací cena této technologie. [13, 27]

Výroba pomocí technologie premix nejprve smíchá vlákna do cementové směsi a poté je směs nalita nebo nastříkána do forem. Vlákna jsou oproti technologii spray-up kratší a náhodněji rozmístěná, což způsobuje nižší pevnosti v tahu i ohybu. Pořizovací cena této technologie je nižší než u spray-up, protože není potřeba speciální nanášecí pistole, ale je stále poměrně vysoká. [27]

Pro hybridní metodu je zapotřebí pouze obyčejná nanášecí pistole, kterou je do forem nanesena tenká vrstva cementové směsi bez vláken. Následně je směs s vlákny běžně nalita do této formy. U této technologie je důležité, aby směs na povrchu i výplňová měli stejnou nebo podobnou konzistenci. Hybridní metoda je využívána většinou výrobci deskových materiálů z těchto kompozitů. [27]



Obrázek 9: Miska z cementové pasty vyztužená skleněnými vlákny (průměr 137 cm, cena 2500 \$). [28]

2.2.4. Keramická vlákna

Mezi hlavní výhody keramických vláken patří vysoká odolnost proti agresivnímu prostředí a odolnost proti vysokým teplotám. Některé produkty z čistého hlinitého vlákna odolávají teplotám až 1600 °C. Vlákna byla vyvinuta jako náhražka za karcinogenní azbestová vlákna. Díky jejich odolnosti a nízké tepelné vodivosti se používají jako tepelná izolace u zařízení vyvíjejících vysoké teploty případně se přidávají do tepelně namáhaných kompozitních materiálů (obrázek 10). [29]



Obrázek 10: Keramická tepelná izolace pro izolace kotlů a pecí [38]

2.2.5. Azbestová vlákna

Azbestová vlákna se v Evropské unii nesmí vyrábět ani prodávat, protože byla prokázána jejich zdravotní závadnost. Vlákna mají vysokou teplotní odolnost, proto byla často používána jak v protipožárních nástřících, tak v různých typech protipožárních desek.

Vlákna se přidávala do cementových tenkých deskových kompozitních materiálů, které sloužily jako střešní krytiny, obkladové desky případně i jako podhledy (tabulka 3). V některých případech byla vlákna používána i jako tepelná izolace. V České Republice nedocházelo k častému využití azbestových vláken, neboť jako tepelná izolace se používala čedičová vata. V zahraničí bylo využití azbestových vláken vyšší. [26, 56]

Výrobek	Doplňující údaje	Místo výroby	Ukončení výroby
Střešní šablony Eternit, Beronit	400×400×4 mm, 450×400×4 mm, šedé, černé, červené i jiné barvy, $\rho = 2100 \text{ kg/m}^3$	Beroun, Šumperk, Nitra	1996 (od roku 1912)
Vlnitá střešní krytina typu A a B (podle velikosti „vlny“)	desky šedé, černé, červené, zelené i jiné barvy, různých rozměrů, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$	Beroun, Šumperk, Hranice, Nitra, Púchov	1995
Hřebenáče, tvarovky a střešní větrací prvky	různé doplňky k základním střešním prvkům	Beroun, Šumperk, Hranice, Nitra	1996
Izolační šňůra	$\sigma = 1\text{--}50 \text{ mm}$	Zvěřínek	1990
Netkané textilie NETAS	tloušťka 0,6–1,1 mm	Zvěřínek	1990
Izolační deska ID a IDK	tloušťka 1–6 mm	Zvěřínek	1990
Květinové truhlíky a zahradní doplňky	různá velikost a tvar	Beroun, Nitra	1999
Tlakové a kanalizační roury a tvarovky	$\sigma = 50\text{--}1000 \text{ mm}$, délek 500–5000 mm	Beroun, Hranice, Nitra	1999
Interiérové velkoplošné desky (Dupronit A, B, C, Ezalit A, B, C)	tloušťka 6, 8, 10, 12 mm $\rho = 600 \text{ až } 1800 \text{ kg/m}^3$ v přírodní světle šedé barvě	Beroun, Šumperk Nitra, Púchov	1995 2000
Desky exteriérové a podstřešní (Dekalit, Lignát, Cembalit, Cemboplat, Unicel)	tloušťka 6, 8, 10, 12 mm $\rho = 600 \text{ až } 2000 \text{ kg/m}^3$ v přírodní světle šedé barvě	Beroun, Hranice, Šumperk, Černousy, Púchov, Nitra	1995
Sendvičové desky s pěnovým polystyrenem		Nitra	1995
Desky Pyral	požárně odolné sendvičové desky s vlnitou hliníkovou fólií v jádru	Praha	1992
Desky Izomín, Akumín, Calothermex	thermoizolační desky, $\rho = 250\text{--}400 \text{ kg/m}^3$	Nová Baňa, Banská Štiavnica	1992
Asfaltové desky ASBIT	výrobky s mikromletým azbestem	Brno	1990
Asfaltové pásy – např. Aralebit, Bitagit, Cufolbit, Arabit-S, plastbit	výrobky s mikromletým azbestem	Brno, Hostinné, Bělá pod Bezdězem	1990
Nástřikové hmoty Pyrotherm	protipožární nástřiky zejména na ocelové konstrukce	Praha, Dlhá Ves, Čičajovce, Parchovany	1992

Tabulka 3: Přehled stavebních materiálů s obsahem azbestu, které byly v ČR v minulosti vyráběny. [56]

2.2.6. Vlákna přírodní

Přírodní vlákna se k vyztužování využívají již před mnoha lety. V dnešní době však stále nacházejí své uplatnění. Vlákna jsou ekologická, zanechávají nízkou uhlíkovou stopu a jsou poměrně lehká. Využívají se v hlavně v polymerních kompozitech pro jejich dobré mechanické vlastnosti a nízkou cenu. Materiály se pak snadno dají recyklovat, případně po jejich životnosti podléhají biodegradaci. Hojně je využívají některé automobilové společnosti (tabulka 4) a firmy zabývající se výrobou obalů. [21, 22]

Výrobce	Model	Aplikace
BMW	3,5 a 7 série	Dvevní panely, panely střešních oken, obložení zavazadlového prostoru, opěradla sedadel, zvukově izolační panely
Audi	A2,A3, A4, A4, Avant, A6, A6, Avant, A8, Roadster, Coupe	Zadní části sedadel, dvevní panely, obložení zavazadlového prostoru, obložení u rezervního kola
Ford	Mondeo CD 162, Focus	Dvevní panely, B - sloupky, obložení zavazadlového prostoru
Mercedes-Benz	kamiony	Vnitřní kryty motoru, izolace motoru, izolace interiéru, sluneční clony, nárazníky, střešní kryty
Toyota	Brevis, Harrier, Celsior, RAUM	Zadní části sedadel, dvevní panely, kryt náhradního kola
Volkswagen	Golf, Passat, Variant, Bora, Fox, Polo	Zadní části sedadel, dvevní panely, obložení zavazadlového prostoru

Tabulka 4: Užití přírodních vláken v polymerních kompozitech automobilkami. [21]

2.3. Modifikace vláken

Jak již bylo dříve řečeno, soudržnost mezi vlákny a matricí je velmi důležitá pro vlastnosti výsledného kompozitního materiálu. Pro zvýšení soudržnosti mezi vlákny a matricí se využívají níže zmíněné metody. Je třeba zmínit, že mohou nastat naopak i případy, kdy je zapotřebí soudržnost snížit. Při vhodné modifikaci vláken můžeme dosáhnout lepších mechanických vlastností daného kompozitního materiálu.

2.3.1. Sizing

Průmysloví výrobci vláken většinou používají na své výrobky sizing. Jedná se o různé směsi chemických látek, které jsou většinou rozpuštěné ve vodě a jsou aplikovány na povrch vláken. Každá společnost provádějící sizing má své vlastní postupy aplikace a směsi chemikálií, které jsou jejich know-how. [54, 55]

Díky sizingu můžeme výhodně ovlivnit povrchové vlastnosti vláken a zvýšit tak jejich účinnost v kompozitních materiálech. Pro efektivní sizing je zapotřebí znát požadavky na budoucí využití vláken a následně zvolit správnou chemickou směs a metodu aplikace. Důležitá je časová stabilita povrchu vláken od doby aplikace chemických látek až do doby jejich použití. [54, 55]

2.3.2. Chemická modifikace vláken

Chemická modifikace je možná například u přírodních vláken, která při vhodné chemické modifikaci mohou nahradit polymerní vlákna. Pomocí alkalické modifikace (NaOH) nebo acetylové modifikace (CH₃CO) se nahradí hydroxylové skupiny, které zhoršují soudržnost s matricí. Po těchto chemických úpravách nastane úbytek ligninu a hemicelulózy a zvýší se adheze vláken s matricí. [30]

Pomocí alkalické hydrolýzy je možné upravovat například polyesterová vlákna, ve kterých se vytváří na povrchu póry, mění se jejich morfologie. Dalším způsobem fungují chemické látky, které se nanášejí na povrch vláken za účelem zvýšení jejich smáčivosti. Nevýhodou chemických úprav je často jejich neekologičnost. [31]

2.3.3. Mechanické modifikace vláken

Mechanické úpravy vláken se často provádějí dlouhým mísením vláken se směsí obsahující kamenivo. Kamenivo naruší povrch vlákna, které má pak lepší soudržnost s matricí. Mechanická úprava však není příliš optimální, protože při mísení dochází k příliš vysokému poškození vláken a to má za následek výrazné zhoršení mechanických vlastností samotných vláken. Mezi mechanické úpravy by se daly zařadit různé zakřivení či rozšíření konců u ocelových vláken. [31]

2.3.4. Plazmatická modifikace vláken

Plazma je označována jako čtvrté skupenství látek. Může vznikat v důsledku vysokých teplot, ionizujícího záření nebo vysoké intenzity elektrického pole apod. Lze chápat jistou analogii mezi fázovými přechody ze skupenství pevného dodáním energie vznikne skupenství kapalné, po dalším dodání energie následně plynné. Pokud je do plynu dodáno dostatečné množství energie vznikne plazma, proto je označena jako čtvrté skupenství. Plazma je tvořeno nabitými částicemi a to kladnými ionty a zápornými elektrony a neutrálními částicemi. Vesmír je tvořen z 99 % právě plazmatickým stavem. [34, 35]

Plazma rozdělujeme podle stupně ionizace na silně ionizované plazma a slabě ionizované plazma. Silně ionizovaná plazma obsahuje více nabitých částic než neutrálních částic naopak slabě ionizovaná plazma má zanedbatelný počet nabitých částic oproti neutrálním částicím. [36]

Další dělení vychází z teploty na nízkoteplotní plazma a vysokoteplotní plazma. Vysokoteplotní plazma má střední energii nabitých částic více než 100 eV ($1 \text{ eV} \approx 11600 \text{ K}$), kdy teplota elektronů je srovnatelná s teplotou iontů. Vyskytuje se ve hvězdách nebo při umělých pokusech – oboje je spojeno termonukleární syntézou. S nízkoteplotním plazmatem se můžeme setkat například v zářivkách, výbojkách nebo korónových výbojích (Eliášův oheň), kdy teplota elektronů dosahuje jednotek až desítek eV, teplota iontů však odpovídá pokojové teplotě. Při plazmatických modifikacích vláken se používá nízkoteplotní plazma (obrázek 11) kterému je schopen odolat zpracovávaný materiál. [35, 36]

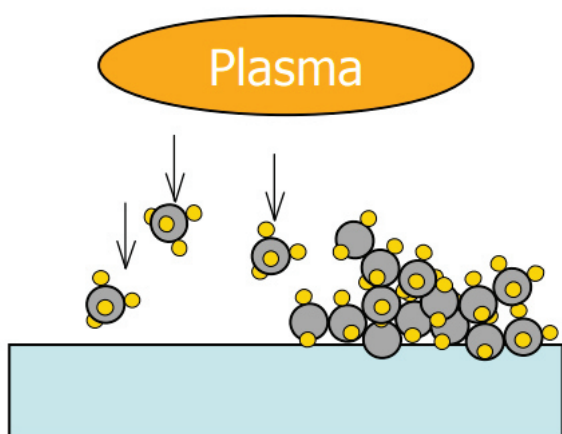


Obrázek 11: Teslův transformátor produkující nízkoteplotní plazmatické médium. [37]

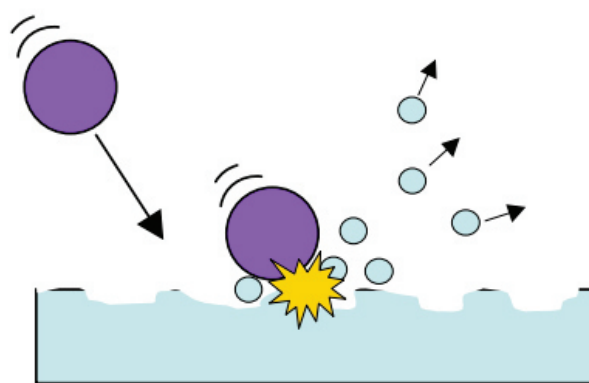
Perspektivní metodou se jeví plazmatická modifikace vláken využívající nízkoteplotního plazmatického plynu. Pomocí plazmatu je specificky upraven povrch vláken za účelem získání vyšší nebo nižší soudržnosti s matricí. Plazma působí na povrch vláken jak mechanicky, tak i chemicky. Čím proces plazmatické modifikace probíhá déle, tím výrazněji se úpravy projevují. Plazmatické modifikace působí zejména na povrch vlákna, čímž dochází k téměř zanedbatelným ztrátám mechanických vlastností samotného vlákna. [32, 33]

Plazmatické modifikace probíhají v důsledku ionizovaných plynů, které jsou vysoce reaktivní. Často se používají modifikace v pracovní směsi kyslíku. Volné elektrony a ionty dopadají na povrch materiálu s dostatečnou energií na rozbití molekulárních vazeb na povrchu vlákna a dále vytvářejí různé funkční chemické skupiny (obrázek 12). Tyto skupiny mají za cíl zlepšit adhezi s matricí. V případě kyslíkového plazmatu vznikají skupiny karbonylové (C=O), karboxylové (HOOC), hydroperoxidové (HOO-) a hydroxylové (HO-). I malé množství těchto reaktivních skupin většinou velmi zvyšuje smáčivost vláken a adhezi k matrici. [32, 33]

Mechanické modifikace probíhají zejména pomocí iontů, které díky své hmotnosti (cca 2000x větší než elektrony) jsou schopny působit na modifikovaný materiál. Energie, s kterou ion narazí do povrchu, může způsobit uvolnění částic z povrchu tělesa (obrázek 13) či narušit jeho strukturu. [32, 33]



Obrázek 12: Chemické modifikace na povrchu vlákna. [33]



Obrázek 13: Mechanické modifikace na povrchu vlákna. [33]

2.4. Metody posuzování povrchu vláken na soudržnost s matricí

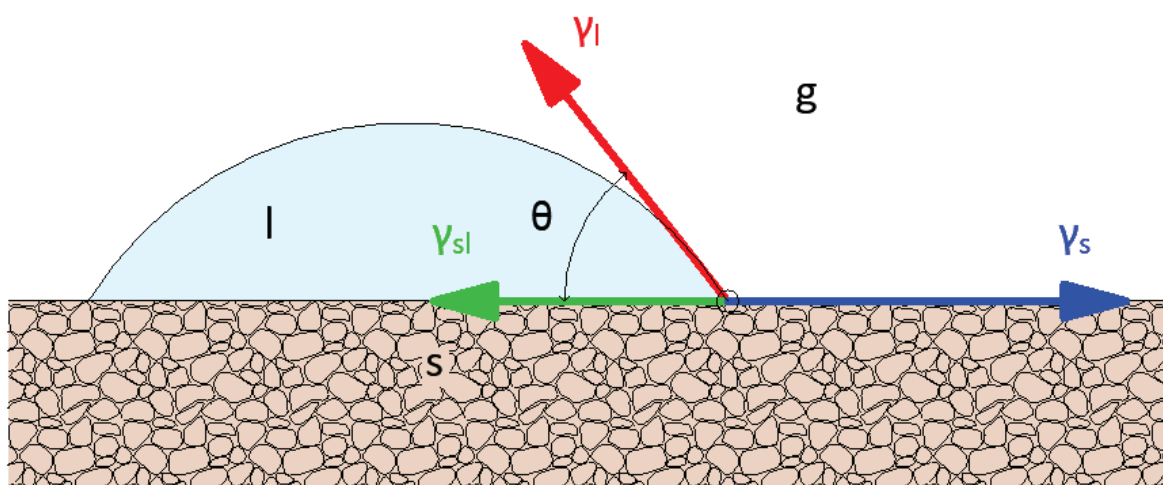
2.4.1. Smáčivost

Pro dosažení dobré adheze vláken s matricí je potřeba optimální spojení povrchu vlákna s matricí na molekulární úrovni. K dobrému spojení povrchu vlákna s matricí je potřeba, aby bylo vlákno dobře smáčivé. U kompozitů můžeme predikovat zvyšující se adhezi mezi

vlákny a maticí pomocí zvyšující se smáčivostí, které dosáhneme vhodnými povrchovými úpravami. [39, 42]

Smáčivost vystihuje chování kapaliny při styku s pevnou látkou. Stupeň smáčivosti je dán projevem adhezních a kohezních sil. Jsou to přitažlivé a odpuzivé síly mezi částicemi na povrchu dvou stýkajících se látek a okolního prostředí. Adhezní a kohezní síly jsou zodpovědné i za další vlastnosti jako je kapilární efekt. [40, 41]

Úhel smáčení (kontaktní úhel) je dán tečnou k povrchu kapky, která je vedena v bodě styku kapky s mezifázovým rozhraním (obrázek 14). Jedná se o hlavní charakteristiku tvaru kapky, která je umístěna na povrchu nerozpustné tuhé látky. [41, 42]



Obrázek 14: Kapka kapaliny na tuhém povrchu. [40]

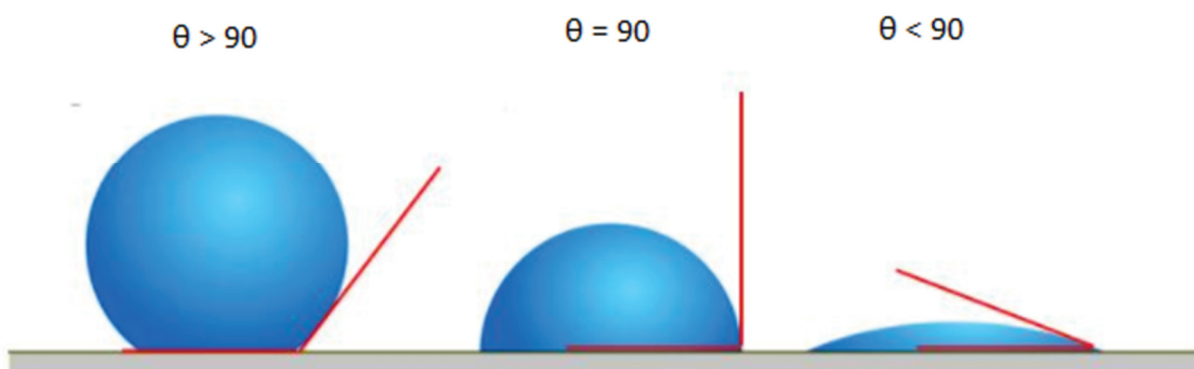
Na rozhraní tří fází (s – pevné, l – kapalné, g – plynné) platí podmínka rovnováhy dle Youngovy rovnice (1):

$$\gamma_l \cdot \cos \theta = \gamma_s - \gamma_{sl} \quad (1)$$

- γ_l je povrchová energie kapaliny,
- γ_s je povrchová energie pevné látky,
- γ_{sl} je mezifázová energie mezi tuhou látkou a kapalinou,
- θ je úhel smáčení. [40]

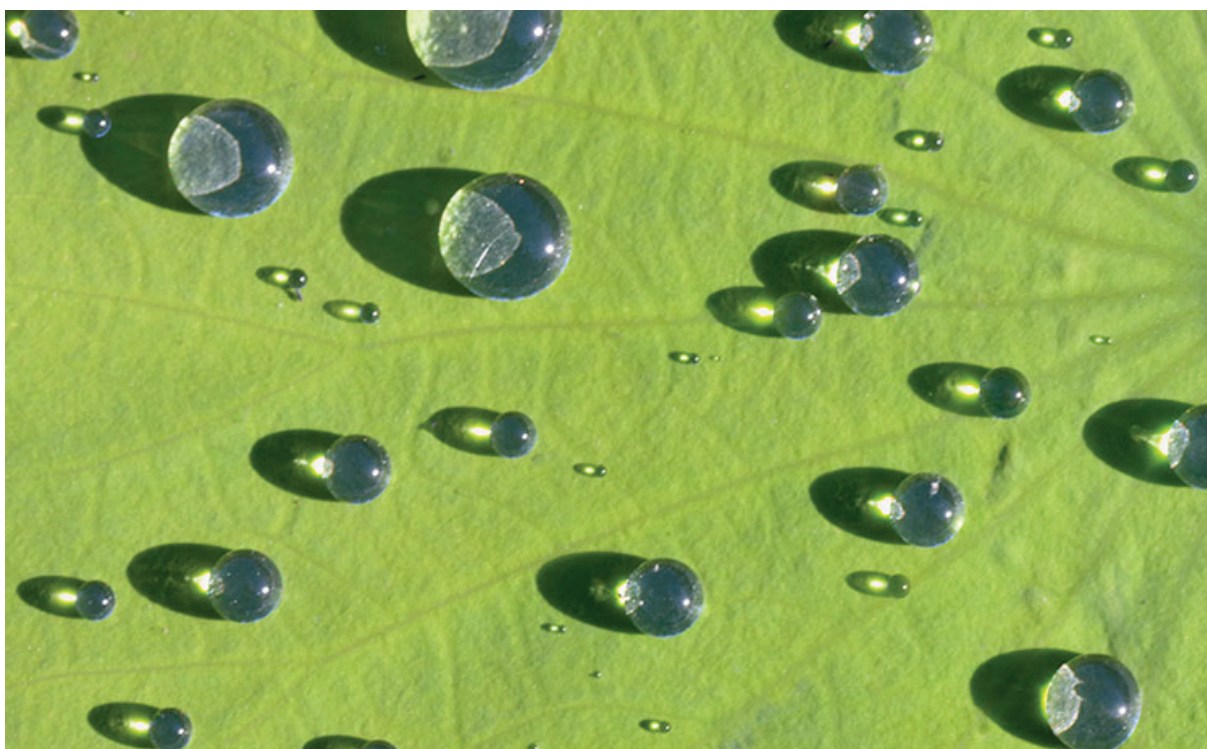
Podle velikosti kontaktního úhlu rozlišujeme, zda je povrch smáčivý či nescháčivý. U kontaktního úhlu, který je menší než 90° se povrch považuje za smáčivý (hydrofilní). U kontaktního úhlu většího než 90° se povrch považuje za nescháčivý (hydrofobní).

U smáčivých povrchů můžeme pozorovat, že se kapalina rozlije po povrchu, naopak u hydrofobních povrchů kapalina na povrchu vytváří kapičky (obrázek 15). [42, 43]



Obrázek 15: Kontaktní úhly. [43]

Povrchy s kontaktním úhlem nad 150° je označují jako superhydrofobní. U těchto povrchů téměř nedochází ke styku mezi kapalinou a povrchem pevné látky. Popisovaný jev se někdy označuje jako lotosový efekt a můžeme se s ním setkat u některých listnatých rostlin. Právě lotosové listy jsou extrémně hydrofobní (obrázek 16). Naopak povrchy s kontaktním úhlem pod 10° jsou označovány za superhydrofilní. U těchto povrchů dochází k vytvoření kontinuálního filmu kapaliny na povrchu pevné látky. [43, 44]



Obrázek 16: Kapky vody na lotosovém listu. [44]

2.4.2. Měření kontaktního úhlu

Měření kontaktního úhlu je možné provádět na základě dvou principů. Může být měřen přímou metodou, která vychází z optického pozorování. Druhým principem jsou měření nepřímá. Nepřímá měření jsou založena na měření veličin, které souvisí se smáčivostí vláken. Na základě těchto měření je možné následně dopočítat kontaktní úhel.

Pro měření přímou metodou je většinou zapotřebí smáčený objekt sledovat zvětšený pomocí optické soustavy, aby bylo možné správně určit kontaktní úhel. U vláken je možné toto měření provádět většinou u makrovláken, ale u mikrovláken, kvůli jejich velmi malému průměru, to možné není.

Přímé měření na kapce

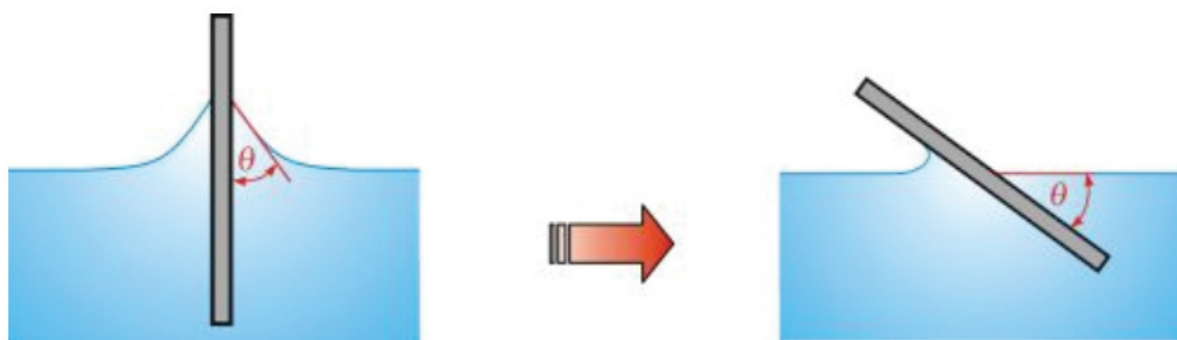
Jednou z možností je provádět přímé měření pomocí teleskopu – goniometru (obrázek 15). Měření je prováděno pomocí této sestavy na styku kapky a rovinné destičky měřeného materiálu. Úhel je opticky přímo odečten na teleskopu s goniometrem, který objekt pozoruje ve vertikální rovině (obrázek 17). Některé sestavy mohou být vybaveny optickým snímačem, u některých sestav je hodnota odečtena přímo pozorovatelem. Při odečítání hodnoty pozorovatelem závisí přesnost měření na přesnosti pozorovatele. První komerční sestava teleskop – goniometr byla sestavena Dr. William Albert Zisman na počátku 60. let 20. století. Podobným principem je možné pozorovat kontaktní úhel vlákna namočeného do kapaliny. [45, 46]



Obrázek 17: Sestava teleskop – goniometr. [45]

Přímé měření na nakloněné desce

Princip této optické metody je založen na pozorování desky ponořené v kapalině. Deska se naklání k jedné straně tak, aby byla kapalina na jedné straně ve styku desky s kapalinou zcela vodorovná. Kontaktní úhel pak odpovídá úhlu, který svírá vodní hladina s nakloněnou deskou. Metoda měření patří mezi nejjednodušší a nejstarší metody měření kontaktního úhlu. Metoda je vhodná pro měření malých úhlů (menších než 10°). [46]



Obrázek 18: Měření úhlu smáčení na nakloněné desce. [46]

Wilhemy metoda

Wilhemy metoda je nepřímá metoda pro měření kontaktních úhlů jednotlivých vláken. Wilhemy metodu nelze použít pro flexibilní vlákna, která se při styku s hladinou kapaliny ohnou. Kontaktní úhel je určen na základě síly, která byla naměřena na vlákně částečně ponořené v kapalině. Vlákna se ponořují do kapaliny ve směru kolmém k povrchu kapaliny. U smáčivých vláken se pro výpočet kontaktních úhlů používají síly získané během ponořování vlákna do kapaliny. U nesmáčivých vláken se pro výpočet kontaktních úhlů používají síly získané během vynořování vlákna z kapaliny (obrázek 19). Kontaktní úhly jsou následně dopočteny z Wilhemy rovnice (2):

$$\cos \theta = \frac{F - F_b}{l \cdot \sigma} \quad (2)$$

θ je úhel smáčení,

l je délka smáčené části vlákna,

σ je povrchové napětí kapaliny,

F je celková síla z vlákna v určité ponořené poloze,

F_b je vztahová síla působící na vlákno v určité ponořené poloze. [47]

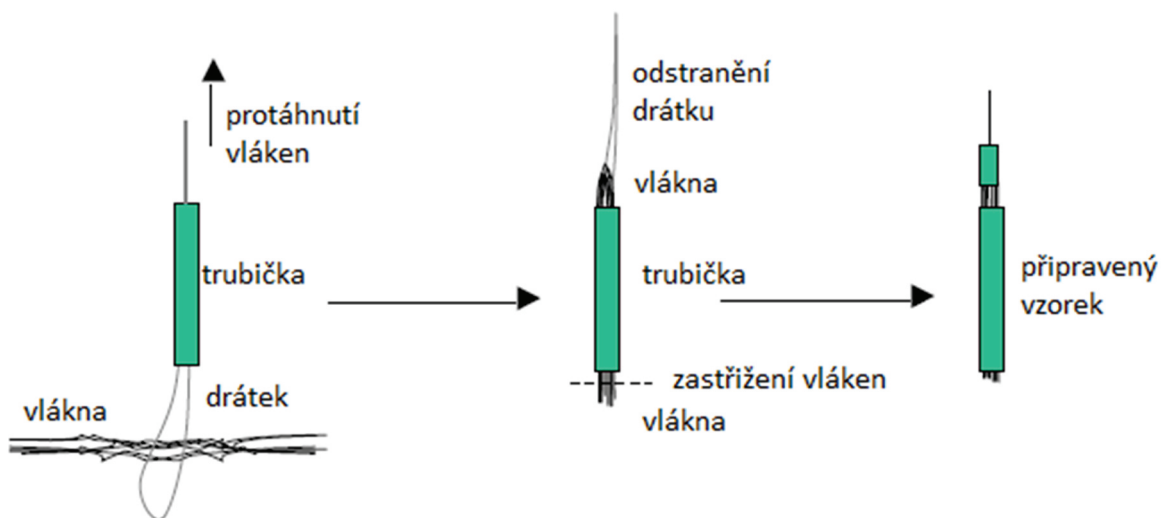


Obrázek 19: Měření kontaktního úhlu-Wilhemy metoda. [47]

Straw metoda

Straw metoda je nepřímá metoda pro určení kontaktních úhlů. Metoda je vhodná pro měření dlouhých ohebných svazků vláken. Použitá vlákna musí mít délku okolo 75 milimetrů. Následně jsou pomocí tenkého drátku dvojitě protažena skrz trubičku (nejčastěji teflonovou) o průměru přibližně 1 milimetru a délce přibližně 25 milimetrů. Na spodní straně se zastříhnou vlákna vyčnívající z trubičky. Následně se odstraní protahovací drátek a vzorek je připraven k zavěšení pro měření (obrázek 20). [47, 48]

Vlákna vměstnaná do hladké trubičky se chovají jako porézní materiál s kapilárami. Póry a kapiláry jsou tvořené mezerami mezi jednotlivými vlákny. Spodní hrana vzorku se umístí do styku s kapalinou a měří se čas a přírůstek hmotnosti vzorku. Následně se vypočte kontaktní úhel. K výpočtu je nutné znát hustotu a viskozitu kapaliny. Měření je možné jen na vláknech, která jsou smáčivá. [47,48]



Obrázek 20: Příprava vzorku pro metodu Straw. [47]

Packed Cell metoda

Packed cell metoda je nepřímá metoda pro měření kontaktních úhlů. Funguje na stejném principu jako metoda Straw, ale oproti ní je možné měřit i krátká vlákna, která by nemohla být měřena metodou Straw. Vlákna jsou umístěna do kulaté nádoby a jsou shora stlačena pístem. Nádobka má perforované dno s otvory průměru 0,9 mm, kterými se mezi vlákna dostává kapalina (obrázek 21). Následně je možné stejným způsobem, jako u metody Straw, dopočítat hodnotu kontaktního úhlu. [31, 47]



Obrázek 21: Vzorek pro metodu Packed Cell. [31]

2.4.3. Pull-out testy

Pro měření soudržnosti vláken s matricí, je možné použít pull-out testy. Pro měření soudržnosti mezi betonářskou výztuží s cementovou matricí je tato metoda běžně používána a je spolu s ohybovou zkouškou pro tyto účely doporučena v normě ČSN 73 1328 – Stanovení soudržnosti oceli s betonem. [49, 50]

Vzorky pro Pull-out testy mají určitou část výztužného prvku spojeného s matricí a část výztužného prvku je volná. Výztužný prvek je zpravidla umístěn kolmo do matrice a volná část musí být dostatečně dlouhá, aby jí bylo možné upnout do testovacího zařízení. [50, 51]

Pull-out testy je možné provádět i na vláknech. Oproti testování soudržnosti betonářské výztuže však nastávají problémy. Kvůli malé velikosti vláken se vzorky hůře vyrábějí a uchytávají do testovacího zařízení. Testy je možné provádět pouze na jednotlivých makrovláknech. U fibrilovaných vláken případně mikrovláken tyto testy postrádají smysl, protože je téměř nemožné správně vytvořit zkušební vzorek a správně určit všechny jeho parametry. [50, 51]

2.5. Využití plazmatických úprav v praxi

Vhodné plazmatické úpravy mají nezanedbatelný příznivý vliv na vlastnosti některých výztužných vláken. V cementových matricích se v dnešní době z ekonomického i praktického hlediska jeví jako nejvhodnější různé druhy polymerních vláken. U některých druhů těchto vláken je však problém se soudržností s cementovou matricí a z tohoto důvodu není zcela využít jejich potenciál. Jednou z možností, jak zlepšit soudržnost mezi vlákny a matricí je využití plazmatických modifikací.

Plazmatické modifikace je možné provádět za sníženého tlaku nebo i za běžných atmosférických podmínek. Pro praktické využití je nezbytné, aby byla použita technologie, kterou lze umístit jako součást výrobní linky. V dnešní době by bylo možné jako nejvhodnější technologii pro plazmatické úpravy v praxi využít systém s plazmatickými tryskami, který pracuje za běžných atmosférických podmínek. Systém s plazmatickými tryskami je relativně levný, má nízké provozní náklady, pracuje automaticky a je šetrný k životnímu prostředí [52, 53].

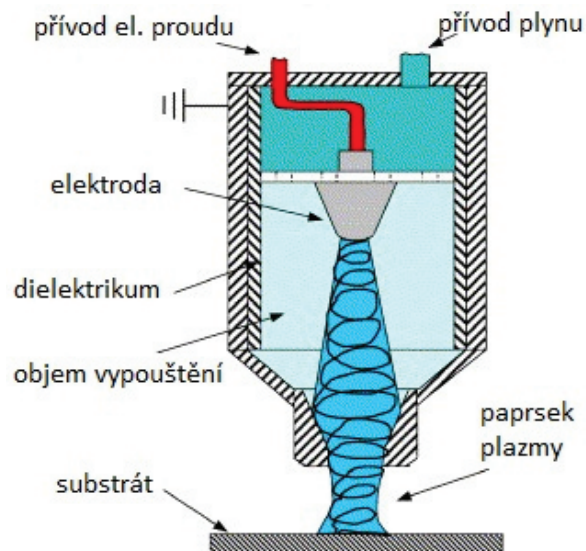
Popisovaný systém byl testován na mnoha druzích polymerních materiálů a úpravy při vhodném nakonfigurování byly úspěšné. U systému s plazmatickými tryskami je zapotřebí zvolit nejen vhodnou dobu úpravy, ale také vhodnou vzdálenost trysky od upravovaného materiálu. [52, 53]

Systémy s plazmatickými tryskami jsou tvořeny jednou nebo i více elektrodami, které jsou obklopeny dielektrickou tryskou. Plazma je usměrněna do paprsku pomocí trysky a následně je aplikována na požadovaný materiál. Teplota plynu bývá jen okolo 30 °C. [52, 53]

Průmyslové využití plazmatických metod za sníženého tlaku využívá technologie roll to roll, či obdobných modifikací, kdy je zpracováván materiál kontinuálně vnášen či je na něj působeno plazmatickým prostředím se sníženým tlakem. Ověření těchto technologií běžně probíhá v jednodušších systémech, kde je upravovaný materiál vložen do vakuové komory, následně dojde k jejímu vyčerpání, plazmatickému působení plynu, zavzdušnění a vyjmutí vzorku.

Plazmatické modifikace, jak již bylo řečeno, mají vliv na mechanickou i chemickou strukturu povrchu vláken. Mechanická modifikace vláken je časově stálá i za běžných podmínek. Chemické modifikace při styku vláken s vodní párou degradují a vlákna postupně o tyto modifikace přicházejí. Vodní pára je obsažena i ve vzduchu a z tohoto důvodu není

vhodné vlákna skladovat ve styku s ním. Plazmaticky modifikovaná vlákna skladovaná v prostředí s evakuovaným vzduchem mají dlouhodobě stabilní mechanické i chemické vlastnosti povrchu. V praxi by bylo možné vlákna skladovat ve vzduchotěsných pytlích s evakuovaným vzduchem. Obaly s evakuovaným vzduchem jsou často používány i na balení potravin, aby se oddálila doba jejich degradace.



Obrázek 22: Plazmatická tryska od společnosti Plasmatrete GmbH (Steinhagen, Germany). [52]

3. Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je vhodně plazmaticky modifikovat povrch polypropylenových (PP) a polyvinylalkoholových (PVA) mikrovláken. Vlákna byla upravována v časových intervalech 30 s, 60 s, 120 s, 240 s a 480 s. Pro zjištění úbytku materiálu z povrchu vlákna a z toho plynoucí změny (zhoršení) mechanických vlastností vláken kvůli zmenšení průřezu byla vlákna zvážena před a po každé plazmatické modifikaci.

Výběr vhodných časů modifikací a druhu plynu probíhal na základě předchozích odborných prací, SEM analýze a smáčivosti vláken. SEM analýza byla použita pro zjištění mechanických změn na povrchu vlákna a pomocí smáčivosti byla predikována soudržnost vláken s ostatními složkami cementové matrice.

Za cílem zjištění soudržnosti vláken s matricí bylo zhotoveno 8 sad zkušebních vzorků (včetně 2 referenčních) po 6 vzorcích s rozměry 150 x 40 x 40 mm. Složení všech vzorků bylo totožné, lišilo se pouze typy použitých vláken (PP nebo PVA) a typem plazmatické úpravy. U vzorků byl průběžně měřen dynamický modul pružnosti pomocí rezonanční metody. Vzorky byly následně testovány destruktivními zkouškami. Nejprve byl proveden tříbodový ohyb a následně na vybraných zbylých polovinách trámečků tlaková zkouška. Na základě těchto zkoušek byly stanoveny mechanické vlastnosti zkoumaných cementových kompozitních materiálů a výsledky byly porovnány s mechanickými vlastnostmi referenčních vzorků.

4. Praktická část

4.1. Optimalizace plazmatických modifikací

4.1.1. Výběr a vlastnosti vláken

Pro plazmatickou modifikaci a následnou výrobu cementového kompozitu byla vybrána polymerní vlákna. Bylo uvažováno, že recyklát je levný materiál (jedná se o odpad), jehož cenu tvoří pouze náklady na jeho zpracování případně přepravu a z tohoto důvodu byla použita cenově dostupná polymerní vlákna.

Byla zvolena vlákna polypropylenová (PP), která patří v současné době k nejpoužívanějším. Problémem těchto vláken je relativně špatná smáčivost s vodou a z toho plynoucí špatná soudržnost s cementovou matricí. Druhým zvoleným typem jsou vlákna polyvinylalkoholová (PVA), které jsou velmi dobře smáčivá s vodou, ale fyzikální vazba s cementovou matricí je u těchto vláken nedostatečná pro dosažení požadovaného deformačně-zpevňujícího se charakteru. Mechanické vlastnosti a výrobci použitých vláken jsou uvedeny v tabulce 5.

Vlákna	Výrobce	Typ	délka [mm]	Průměr [μm]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Objemová hustota [g/cm^3]
PP	Fibrofor	High Grade	19	80	400	4,9	0,91
PVA	Kuraray	REC 15 x 8	8	40	1560	40	1,3

Tabulka 5: Vlastnosti použitých vláken. [57, 58]

4.1.2. Plazmatické modifikace vláken

Plazmatické modifikace kyslíkovou plazmou probíhaly v přístroji Tesla VT 214 (induktivně buzené plazma), plazmatické modifikace vodíkovou plazmou probíhaly v přístroji ROTH&RAU AK 400 (kapacitně buzené plazma). U přístrojů byl použit radiofrekvenční zdroj o výkonu 100 W. Vzorky byly vloženy do komory přístroje (obrázek 23), ze které byl následně evakuován vzduch na tlak nižší než 22 Pa. Následně byl do komory vpuštěn kyslík, respektive vodík a tlak se zvýšil na hodnotu okolo 60 Pa. Dále byl spuštěn radiofrekvenční generátor plazmy v časech 30 s, 60 s, 120 s, 240 s nebo 480 s dle označení modifikace (Tabulka 6).

Teplota substrátu v komoře se během plazmatické modifikace postupně zvyšovala, při nejdelším čase dosahovala teploty okolo 50 °C. Po dokončení plazmatické modifikace byl z komory opět odčerpán pracovní plyn a následně byla zavzdušněna.



Obrázek 23: Komořina pro plazmatické modifikace přístroje ROTH&RAU AK 400

číslo modifikace	označení	délka úpravy [s]	použitý plyn	pořadí modifikace
1	30S1O	30	kyslík (O ₂)	1
2	30S2O	30	kyslík (O ₂)	2
3	60S1O	60	kyslík (O ₂)	1
4	60S2O	60	kyslík (O ₂)	2
5	120S1O	120	kyslík (O ₂)	1
6	120S2O	120	kyslík (O ₂)	2
7	240S1O	240	kyslík (O ₂)	1
8	240S2O	240	kyslík (O ₂)	2
9	480S1O	480	kyslík (O ₂)	1
10	480S2O	480	kyslík (O ₂)	2
11	30S1H	30	vodík (H ₂)	1
12	30S2H	30	vodík (H ₂)	2
13	60S1H	60	vodík (H ₂)	1
14	60S2H	60	vodík (H ₂)	2
15	120S1H	120	vodík (H ₂)	1
16	120S2H	120	vodík (H ₂)	2
17	240S1H	240	vodík (H ₂)	1
18	240S2H	240	vodík (H ₂)	2
19	480S1H	480	vodík (H ₂)	1
20	480S2H	480	vodík (H ₂)	2

Tabulka 6: Značení plazmatické modifikace.

U každého vzorku vláken byla vážena hmotnost před a po jejich plazmatické modifikaci. Hmotnost vláken byla vážena na váze Kern s přesností 0,1 mg (Tabulka 7, 8). Nejvyšší ztráta hmotnosti byla zaznamenána u PVA vláken při plazmatické modifikaci kyslíkem po dobu 480 s. Ztráta byla 0,578 % jejich původní hmotnosti. Ztráta hmotnosti je způsobena bombardováním ionty pracovního plynu a projevuje se změnou mechanických vlastností vláken. Ztráty mechanických vlastností vláken (zmenšení průřezu vlákna) jsou však při měřených ztrátách hmotností téměř zanedbatelné (Obrázek 24).

Plazmatické modifikace vláken kyslíkovou plazmou

vlákna			PP		PVA			
číslo vzorku	označení	délka úpravy [s]	hmotnost vzorku [g]		hmotnost vzorku [g]			
			před úpravou	po úpravě	před úpravou	po úpravě		
1	30S10	30	93,0285	93,0307	83,7418	83,7301		
2	30S20	30	93,0167	93,0157	83,7377	83,7256		
3	60S10	60	93,0349	93,0339	83,7282	83,7155		
4	60S20	60	93,0345	93,0327	83,7272	83,7142		
5	120S10	120	93,0381	93,0362	83,7240	83,7087		
6	120S20	120	93,0381	93,0359	83,7273	83,7130		
7	240S10	240	93,0373	93,0344	83,7276	83,7095		
8	240S20	240	93,0383	93,0337	83,7255	83,7062		
9	480S10	480	93,0391	93,0324	83,7267	83,6929		
10	480S20	480	93,0388	93,0315	83,7246	83,6890		
PP			PVA				PP	PVA
hmotnost vláken [g]		ztráta	hmotnost vláken [g]		ztráta	ztráta	prům. ztráta	prům. ztráta
před úpravou	po úpravě	hmotnosti [g]	hmotnosti [%]	před úpravou	po úpravě	hmotnosti [g]	hmotnosti [%]	hmotnosti [%]
3,9919	3,9941	-0,0022	-0,055	6,0176	6,0059	0,0117	0,194	0,025
3,9801	3,9791	0,0010	0,025	6,0135	6,0014	0,0121	0,201	0,198
3,9983	3,9973	0,0010	0,025	6,0040	5,9913	0,0127	0,212	0,035
3,9979	3,9961	0,0018	0,045	6,0030	5,9900	0,0130	0,217	0,214
4,0015	3,9996	0,0019	0,047	5,9998	5,9845	0,0153	0,255	0,051
4,0015	3,9993	0,0022	0,055	6,0031	5,9888	0,0143	0,238	0,247
4,0007	3,9978	0,0029	0,072	6,0034	5,9853	0,0181	0,301	0,094
4,0017	3,9971	0,0046	0,115	6,0013	5,9820	0,0193	0,322	0,312
4,0025	3,9958	0,0067	0,167	6,0025	5,9687	0,0338	0,563	0,175
4,0022	3,9949	0,0073	0,182	6,0004	5,9648	0,0356	0,593	0,578

hmotnost misek PP [g]

89,0366

Legenda:

hmotnost misek PVA [g]

77,7242

vyřazené hodnoty

Tabulka 7: Ztráty hmotnosti vláken kyslíkovou plazmou

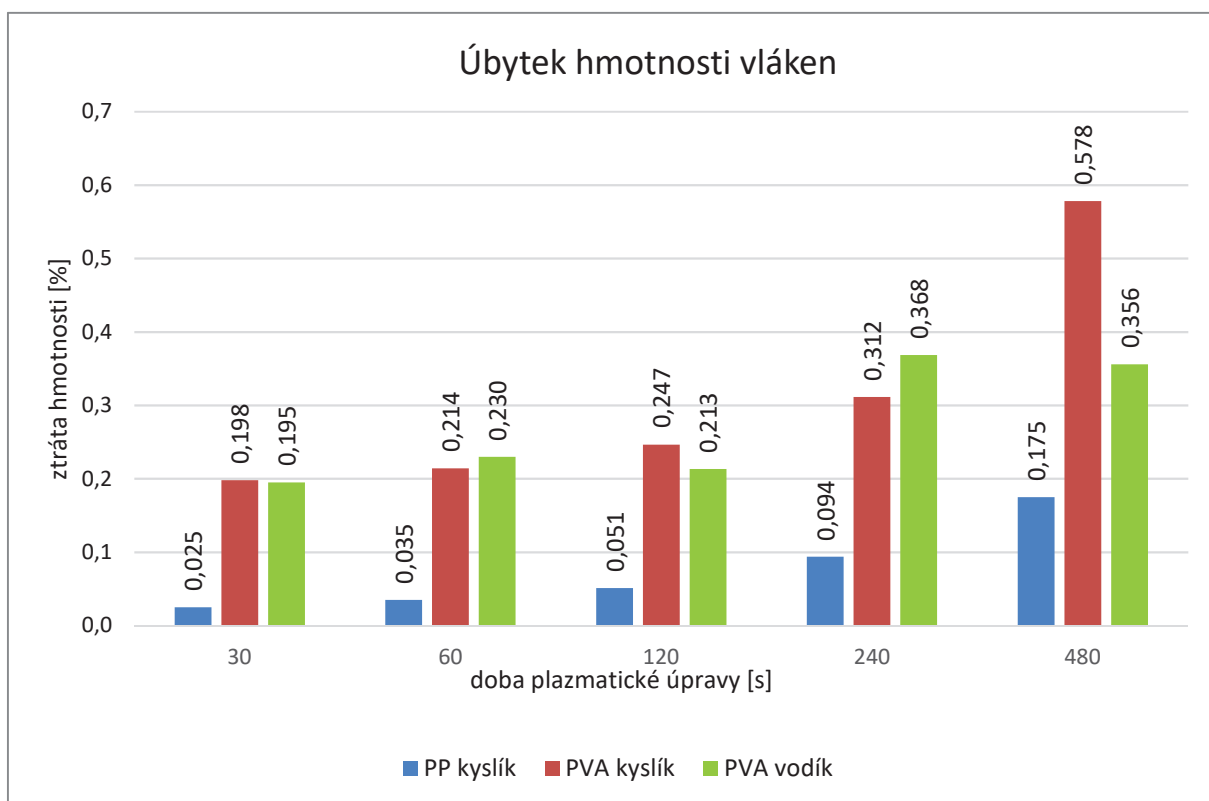
Plazmatické modifikace vláken vodíkovou plazmou

vlákna			PVA		PVA				PVA
číslo vzorku	označení	délka úpravy [s]	hmotnost vzorku [g]		hmotnost vláken [g]		ztráta hmotnosti [g]	ztráta hmotnosti [%]	prům. ztráta hmotnosti [%]
			před úpravou	po úpravě	před úpravou	po úpravě			
11	30S1H	30	54,2099	54,1973	6,0026	5,9900	0,0126	0,210	0,195
12	30S2H	30	54,8821	54,8713	5,9866	5,9758	0,0108	0,180	
13	60S1H	60	54,1930	54,1790	5,9857	5,9717	0,0140	0,234	0,230
14	60S2H	60	54,8837	54,8702	5,9882	5,9747	0,0135	0,225	
15	120S1H	120	54,2055	54,1922	5,9982	5,9849	0,0133	0,222	0,213
16	120S2H	120	54,8995	54,8872	6,0040	5,9917	0,0123	0,205	
17	240S1H	240	54,1992	54,1767	5,9919	5,9694	0,0225	0,376	0,368
18	240S2H	240	54,9033	54,8816	6,0078	5,9861	0,0217	0,361	
19	480S1H	480	54,1880	54,1658	5,9807	5,9585	0,0222	0,371	0,356
20	480S2H	480	54,9383	54,9177	6,0428	6,0222	0,0206	0,341	

hmotnost misek 1 [g] 48,2073

hmotnost misek 2 [g] 48,8955

Tabulka 8: Ztráty hmotnosti vláken vodíkovou plazmou



Obrázek 24: Úbytek hmotnosti vláken kyslíkovou a vodíkovou plazmou.

4.1.3. SEM analýza

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) umožňuje pozorovat povrch vzorků řádově mnohonásobně zvětšený než běžné optické mikroskopy, protože optické mikroskopy jsou limitovány vlnovou délkou snímajících fotonů. U elektronového mikroskopu je toto omezení posunuto využitím snímání pomocí elektronů. Maximální zvětšení je omezeno vlnovou délkou viditelného světla, které jí má řádově větší, než je vlnová délka elektronů. Vzdálenost bodů, kterou je možné pod mikroskopem pozorovat, je polovina vlnové délky. Pro SEM analýzu byl použit elektronový mikroskop Merlin ZEISS, který umožňuje zvětšení pozorovaných objektu až 2 000 000krát (obrázek 25).

Pro pozorování objektů pod elektronovým mikroskopem je potřeba, aby byl povrch vlákna vodivý. Pro získání vodivosti povrchu vláken na něj byla naprášena tenká vrstva zlata. Naprášení probíhalo přístrojem Quorum Q150R ES s tloušťkou Au vrstvy 5 nm.

U polypropylenových (PP) vláken byly pod elektronovým mikroskopem pozorovatelné mechanické změny na povřích vláken v časech plazmatických úprav 120 s, 240 s a 480 s. Na povřích vláken po úpravách 30 s a 60 s nebyly pod elektronovým mikroskopem pozorovány žádné změny oproti referenčním vláknům. U polyvinylalkoholových (PVA) vláken byly pod elektronovým mikroskopem pozorovatelné mechanické změny na povřích vláken v časech plazmatických úprav 240 s a 480 s. Na povřích vláken po úpravách 30 s, 60 s a 120 s nebyly pod elektronovým mikroskopem pozorovány žádné změny oproti referenčním vláknům.

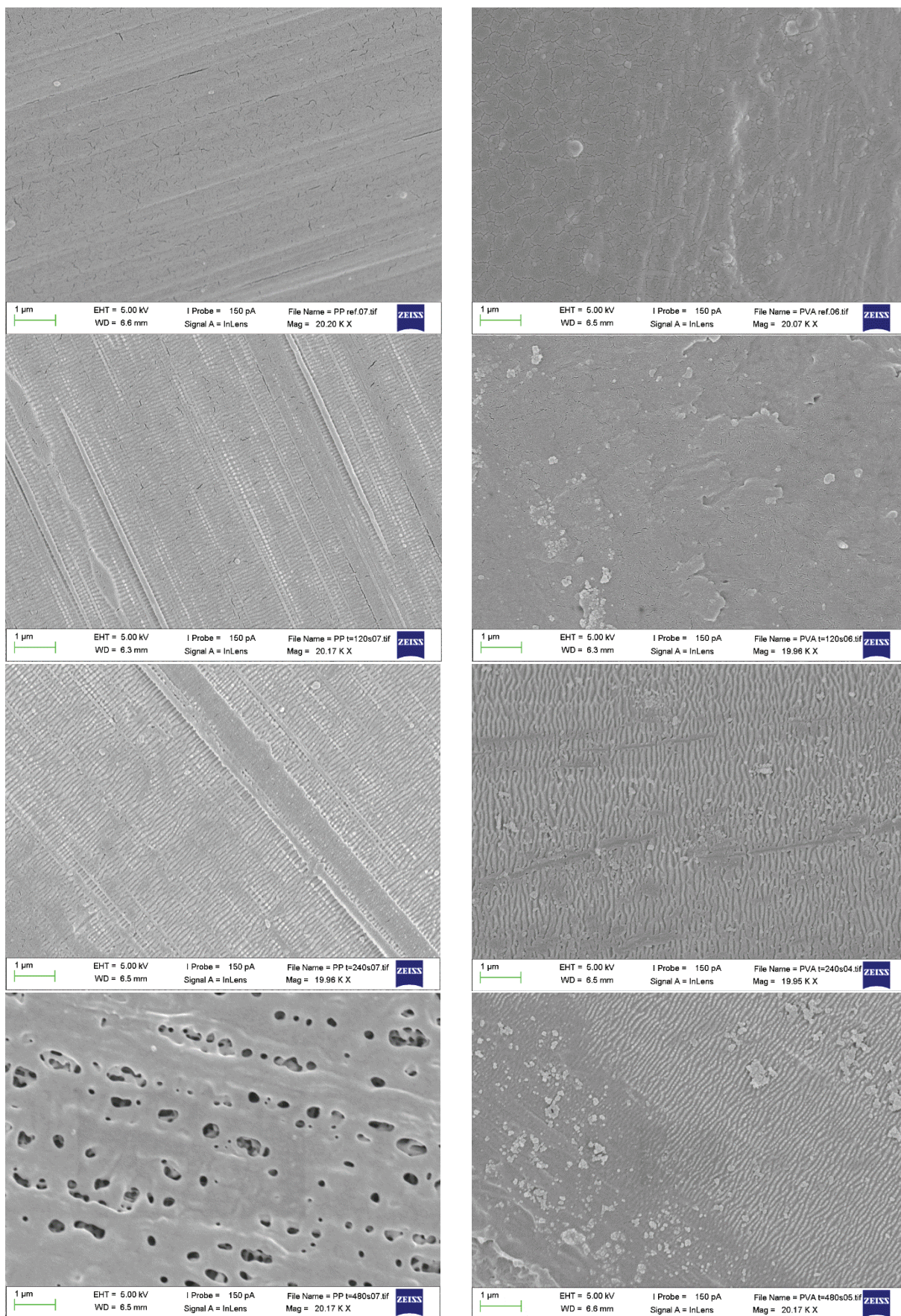
Na obrázku č. 26 můžeme porovnat změny povrchů referenčních a plazmaticky modifikovaných PP a PVA vláken v časech úprav 120 s, 240 s a 480 s. U PP vláken při modifikaci kyslíkovou plazmou po dobu 120 s je na povrchu vlákna pomocí elektronového mikroskopu pozorovatelné jemné rýhování. Pozorované změny povrchů vláken jsou způsobeny zejména nárazem kyslíkových iontů na povrch vláken. Při době úpravy povrchu 240 s kyslíkovou plazmou je rýhování výraznější než při době úpravy 120 s. PP vlákna vystavena kyslíkové plazmatické modifikaci po dobu 480 s mají nejvýrazněji upravený povrch. V povrchu jsou pod elektronovým mikroskopem zřetelně pozorovatelné kaverny.

U PVA vláken při modifikaci kyslíkovou plazmou po dobu 120 s nejsou při pozorování elektronovým mikroskopem na povrchu vláken pozorovány žádné mechanické modifikace. Při době úpravy 240 s kyslíkovou plazmou je na povrchu vláken pozorovatelné rýhování, které je podobně hluboké jako rýhování na PP vláknech při stejné době plazmatické modifikace. PVA

vlákna vystavena plazmatické modifikaci po dobu 480 s mají nepatrně výraznější rýhování než stejná vlákna vystavena plazmatické modifikaci po dobu 240 s. Rýhování je stejně jako u PP vláken způsobeno zejména nárazem kyslíkových iontů na povrch vláken.



Obrázek 25: Mikroskop Merlin ZEISS.



Obrázek 26: SEM snímky.

Vlevo PP vlákna, vpravo PVA vlákna, časy úprav shora: 0 s (referenční), 120 s, 240 s a 480 s.

4.1.4. Měření smáčivosti vláken

Vlákna mají velmi malý průměr, proto nebylo možné použít přímou metodu pro stanovení smáčivosti vláken. Byla použita nepřímá metoda podobná metodě Packed cell. Vlákna byla umístěna do nádoby s perforovaným dnem a jedním otvorem ve víčku. Následně byla vlákna stlačena pomocí olovených závaží. Celá tato soustava byla zvážena na laboratorní váze Kern s přesností 0,1 mg a poté ponořena až po horní okraj do vody po dobu 30 sekund. Následně byla nádoba nechána okapat po dobu 120 sekund a poté zvážena. Byla zvážena i hmotnost samotné nádoby se závažím. Z naměřených údajů byla dopočtena procentuální hmotnost vody oproti hmotnosti vláken podle rovnice 3:

$$m_v = \frac{(m_m - m_n) - (m_s - m_n)}{(m_s - m_n)} \cdot 100 \quad (3)$$

m_v je hmotnost vody oproti hmotnosti vláken [%],

m_m je hmotnost mokrých vláken s nádobkou a závažím [g],

m_s je hmotnost suchých vláken s nádobkou a závažím [g],

m_n je hmotnost mokré nádoby s mokrým závažím [g].

Plazmatické modifikace vláken kyslíkovou plazmou

vlákna			PP		PVA		PP	PVA	
číslo vzorku	označení	délka úpravy [s]	hmotnost vzorku [g]		hmotnost vzorku [g]		hmotnost vody (m_v) [%]	hmotnost vody (m_v) [%]	
			suchý (m_s)	mokrý (m_m)	suchý (m_s)	mokrý (m_m)			
R1	REF 1	0	93,36	103,66	95,30	114,94	273,0	344,1	
R2	REF 2	0	93,44	103,85	95,44	113,89	270,5	315,3	
1	30S10	30	93,43	105,49	95,42	114,10	313,5	320,5	
2	30S20	30	93,42	105,25	95,42	113,97	309,0	318,2	
3	60S10	60	93,36	105,12	95,38	113,31	311,9	310,0	
4	60S20	60	93,42	106,06	95,35	112,95	330,4	305,7	
5	120S10	120	93,41	105,22	95,28	114,13	308,5	331,4	
6	120S20	120	93,48	105,44	95,41	114,73	307,6	332,2	
7	240S10	240	93,29	105,82	95,74	112,79	338,3	277,5	
8	240S20	240	93,50	104,88	95,33	113,79	290,9	321,4	
9	480S10	480	93,38	108,18	95,62	116,64	390,3	348,5	
10	480S20	480	93,46	106,83	95,31	114,76	345,3	339,8	
hmot. nádoby se závažím [g]			89,59						

Tabulka 9: Smáčivost vláken kyslíkovou plazmou měřená nepřímou metodou Packed cell v závislosti na délce plazmatických úprav a typu vláken.

Plazmatické modifikace vláken vodíkovou plazmou

vlákna			PVA		PVA
číslo vzorku	označení	délka úpravy [s]	hmotnost vzorku [g]		hmotnost vody (m_v) [%]
			suchý (m_s)	mokrý (m_m)	
11	30S1H	30	chybí	chybí	
12	30S2H	30	95,32	114,60	336,7
13	60S1H	60	95,46	116,02	350,2
14	60S2H	60	95,48	115,65	342,4
15	120S1H	120	95,44	114,45	325,2
16	120S2H	120	95,44	113,88	315,0
17	240S1H	240	95,47	114,89	330,4
18	240S2H	240	95,53	114,79	323,8
19	480S1H	480	95,39	113,93	319,6
20	480S2H	480	95,49	114,29	318,8
hmotnost nádoby se závažím [g]			89,59		

Tabulka 10: Smáčivost vláken vodíkovou plazmou měřená nepřímou metodou Packed cell v závislosti na délce plazmatických úprav a typu vláken.

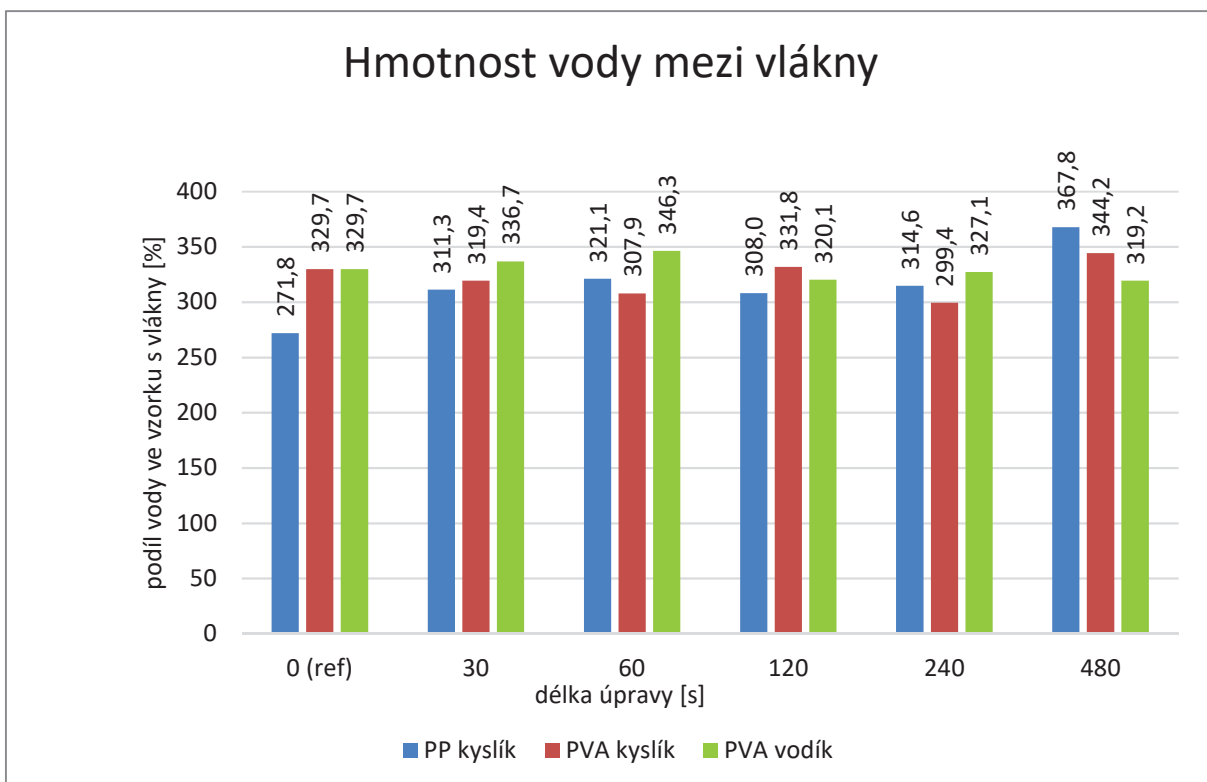
průměrné hodnoty

vlákna	PP kyslík	PVA kyslík	PVA vodík
délka úpravy [s]	hmotnost vody [%]	hmotnost vody [%]	hmotnost vody [%]
0 (ref)	271,8	329,7	329,7
30	311,3	319,4	336,7
60	321,1	307,9	346,3
120	308,0	331,8	320,1
240	314,6	299,4	327,1
480	367,8	344,2	319,2

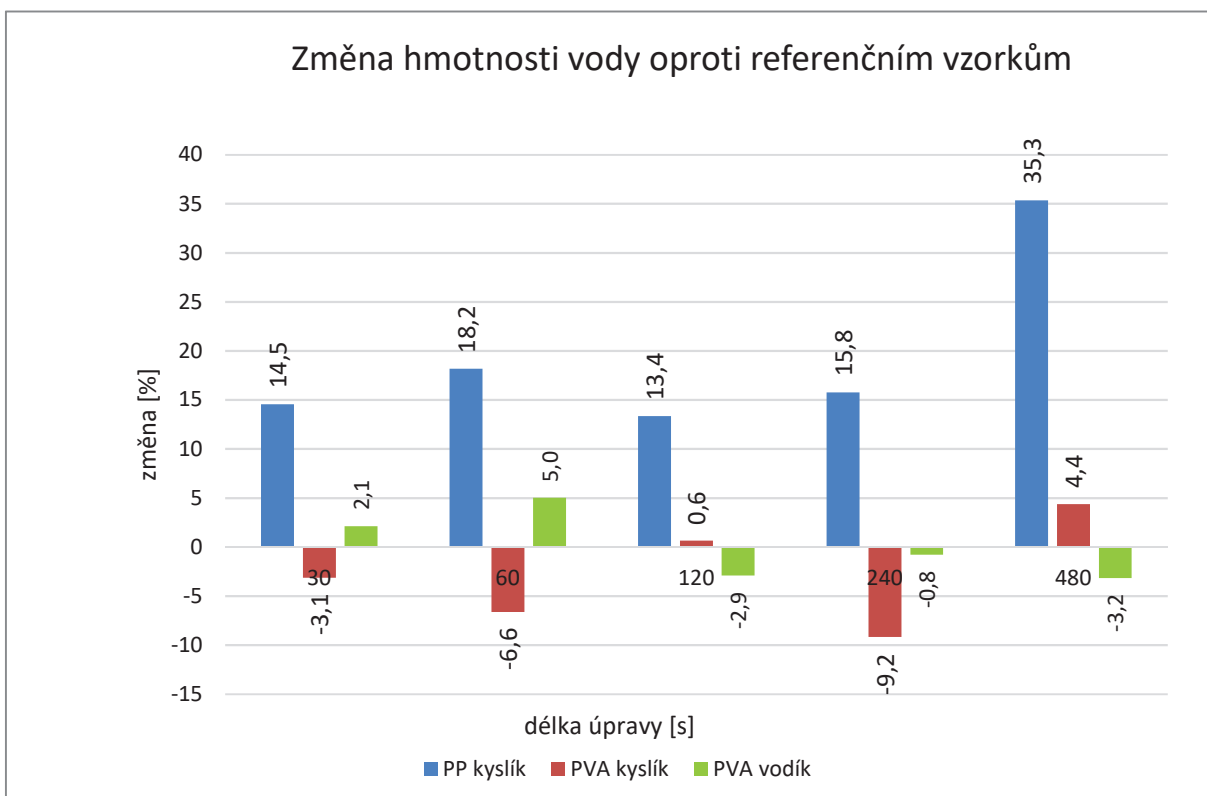
Tabulka 11: Průměrné hodnoty smáčivosti vláken.

vlákna	PP kyslík	PVA kyslík	PVA vodík
délka úpravy [s]	změna [%]	změna [%]	změna [%]
0 (ref)	0,0	0,0	0,0
30	14,5	-3,1	2,1
60	18,2	-6,6	5,0
120	13,4	0,6	-2,9
240	15,8	-9,2	-0,8
480	35,3	4,4	-3,2

Tabulka 12: Změna hmotnosti vody ve vzorku oproti referenčním vzorkům.



Obrázek 27: Průměrné hodnoty smáčivosti vláken v závislosti na délce působení plazmatu, typu pracovního plynu a typu vláken.



Obrázek 28: Změna hmotnosti vody ve vzorku oproti referenčním vzorkům.

4.1.5. Výběr vhodných plazmatických modifikací

Na základě SEM analýzy a smáčivosti byla vybrána polypropylenová (PP) vlákna s časem úpravy 60 s a 480 s v kyslíkové plazmě. U Polyvinylalkoholových (PVA) vláken byla zvolena doba úpravy 480 s v kyslíkové plazmě a 480 s ve vodíkové plazmě. Vlákna byla okamžitě po modifikaci umístěna do sáčků zamezujícím výměnu vzduchu a vybalena byla těsně před výrobou vzorků, aby se omezila degradace chemického vlivu plazmatických modifikací. Dále byla vybrána PP vlákna s časem úpravy 480 s v kyslíkové plazmě a PVA vlákna se stejnou úpravou, obojí byly ponechány 5 dní na vzduchu, aby došlo k degradaci chemického vlivu plazmatických modifikací (tabulka 13).

U vzorků PP vláken v kyslíkové plazmě po dobu 60 s se předpokládá zvýšená soudržnost díky chemickému vlivu plazmatické modifikace a u délky úpravy 480 s se předpokládá zvýšená soudržnost díky chemickému i mechanickému vlivu modifikace. U PP vláken, které mají špatnou smáčivost je vhodný jak chemický, tak mechanický vliv modifikace kyslíkové plazmy. Pro porovnání vlivu chemických a mechanických modifikací na PP vlákna kyslíkovou plazmou byla zvolena ještě úprava vláken po dobu 480 s vystavené stárnutí na vzduchu.

U vzorků PVA vláken v kyslíkové plazmě po dobu 480 s se předpokládá zvýšená soudržnost díky chemickému i mechanickému vlivu modifikace. Zdrsnění povrchu díky plazmatickým modifikacím je požadovaná vlastnost u PVA vláken, ale chemický vliv kyslíkové plazmatické modifikace zvyšuje smáčivost vláken s vodou, což je u těchto vláken nechtěná vlastnost. Proto byla zvolena i vlákna se stejnou dobou úpravy, ale se zdegradovanými chemickými vlastnostmi (stárnutí na vzduchu) a modifikace ve vodíkové plazmě, která zvyšuje drsnost povrchu, ale díky chemickému vlivu modifikace snižuje smáčivost vláken s vodou. Pro PVA vlákna se jeví jako nejvhodnější úprava vodíkovou plazmou z výše popsaných důvodů.

označení	vlákna	čas úpravy	pracovní plyn	uchování
PVA 480 s	PVA	480	kyslík	uzavřené v sáčcích
PVA 480 s old	PVA	480	kyslík	volně na vzduchu
PVA H2 480 s	PVA	480	vodík	uzavřené v sáčcích
PP 60 s	PP	60	kyslík	uzavřené v sáčcích
PP 480 s	PP	480	kyslík	uzavřené v sáčcích
PP 480 s old	PP	480	kyslík	volně na vzduchu

Tabulka 13: Zvolené plazmatické modifikace pro výrobu zkušebních těles.

4.2. Zkoušky cementových kompozitů s optimálně upravenými vlákny

4.2.1. Výroba zkušebních vzorků

Bylo zhotoveno celkem osm sad zkušebních trámek o rozměrech 40x40x160 mm po šesti zkušebních vzorcích. Všechny vzorky mají stejné složení, liší se použitými vlákny a jejich plazmatickými modifikacemi. V tabulce č. 14 je složení a označení použitých sad vzorků, množství je uvedené pro jeden zkušební trámeček.

Označení směsi	PVA ref	PVA 480 s	PVA 480 s old	PVA H2 480 s	PP ref	PP 60 s	PP 480 s	PP 480 s old
Číslo	1	2	3	4	5	6	7	8
Cement [g]	400	400	400	400	400	400	400	400
Recyklát [g]	100	100	100	100	100	100	100	100
Voda [g]	205	205	205	205	205	205	205	205
V/(C + R)	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Vlákna	PP	PP	PP	PP	PVA	PVA	PVA	PVA
Vlákna [%] objemu	2	2	2		2	2	2	2
Vlákna [g]	7,32	7,32	7,32	7,32	5,13	5,13	5,13	5,13

Tabulka 14: Složení zkušebních vzorků.

Výroba zkušebních těles probíhala v souladu s normou ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušení pevnosti. Všechny suché složky cementového kompozitu byly nejprve pečlivě promíchány pomocí elektrického míchadla a následně byla přidávána voda a opět byla směs pečlivě promíchána. Čerstvá směs byla uložena do ocelových laboratorních forem a byla řádně zhutněna. Následující den byly vzorky odbedněny a uloženy pod vodu. Teplota se pohybovala po celou dobu tvrdnutí okolo 22 °C. [59]

4.2.2. Nedestruktivní měření dynamického modulu pružnosti

U zkušebních těles byl průběžně měřen dynamický modul pružnosti pomocí rezonanční metody a byl sledován jeho vývoj v čase. Před destruktivními zkouškami bylo provedeno měření dynamického modulu pružnosti i pomocí ultrazvukové metody.

Rezonanční metoda

Na měření rezonanční metodou byla použita aparatura od společnosti Brüel & Kjær skládající se z měřící jednotky Brüel & Kjær type 3560-B-120 připojené k počítači, akceleračního senzoru Brüel & Kjær type 4519-003 a impulzního kladívka Brüel & Kjær type 8206. Princip rezonanční metody je založen na zjištění vlastních frekvencí zkoušeného materiálu. Pro výpočet dynamického modulu pružnosti rezonanční metodou byla použita následující rovnice (4):

$$E_{rez} = \frac{4 \cdot L}{t \cdot b} \cdot m \cdot f^2 \cdot 10^{-9} \quad (4)$$

E_{rez} je modul pružnosti získaný rezonanční metodou [GPa],

L je délka měřeného vzorku [m],

t je výška měřeného vzorku [m],

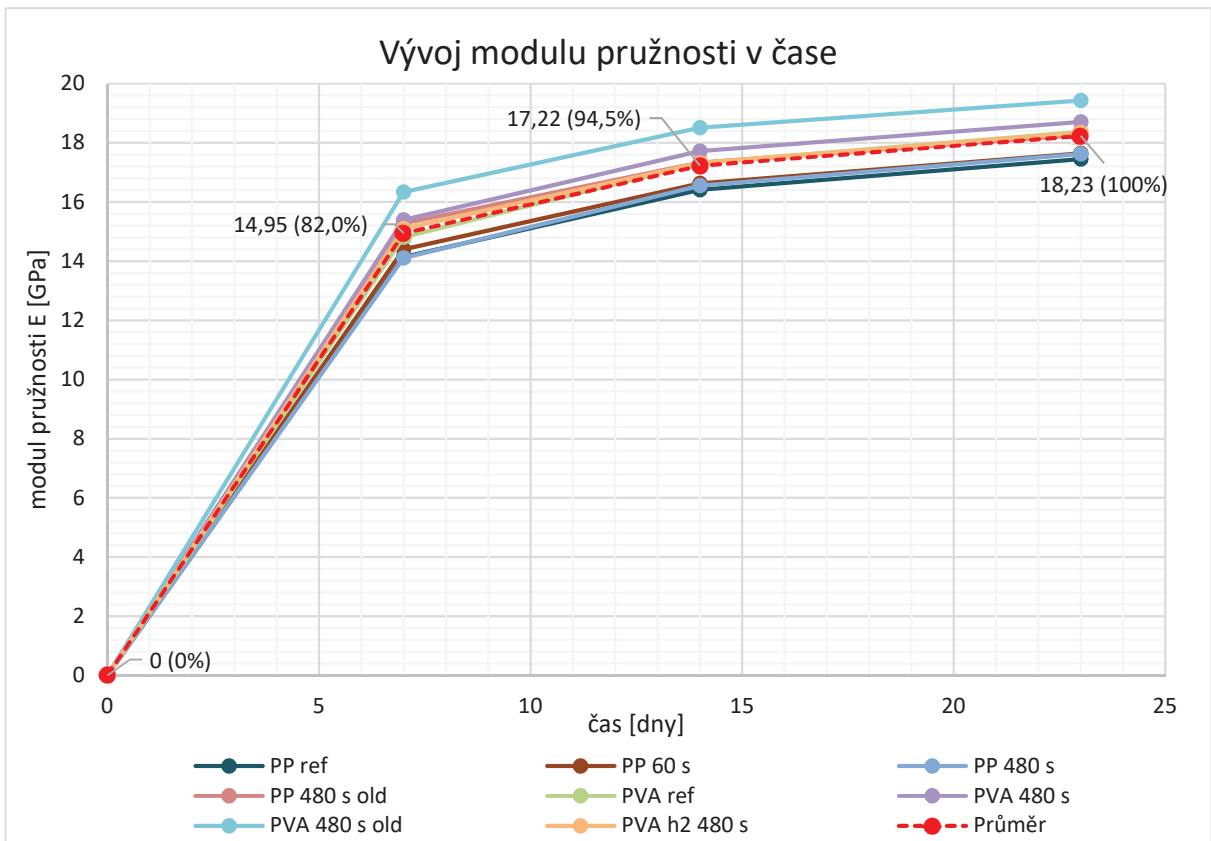
b je šířka měřeného vzorku [m],

m je hmotnost měřeného vzorku [g],

f je první vlastní frekvence měřeného vzorku v podélném směru [g].

Na obrázku č. 29 je zakreslen vývoj modulu pružnosti v čase. Na grafu je znázorněn nárůst modulu pružnosti v čase měřený rezonanční metodou. Z každé sady bylo měřeno šest vzorků. Graf zachycuje průměrné hodnoty z každé sady vzorků v časech 7, 14 a 23 dní od výroby zkušebních těles.

Nejvyšší nárůst modulu pružnosti nastal v prvním týdnu po výrobě vzorků. Po sedmi dnech vzorky dosahují průměrně 82,0 % modulu pružnosti po dvaceti tří dnech. Po čtrnácti dnech dosahují už 94,5 %. Mezi čtrnáctým a dvacátým třetím dnem je nárůst modulu pružnosti pouze 5,5 %. Z uvedených výsledků lze předpokládat, že nárůst modulu pružnosti v dalších dnech by byl zanedbatelný a je možné vzorky považovat za ztvrdlé.



Obrázek 29: Vývoj modulu pružnosti v závislosti na čase.

Rezonanční metoda

Na měření ultrazvukovou metodou byla použita aparatura pundit lab od společnosti proceq. Princip ultrazvukové metody je založen na měření rychlosti průchodu ultrazvukového vlnění zkoušeným materiálem. Měření probíhalo přiložením snímačů k protější stranám vzorku a následně byl měřen čas průchodu ultrazvukového vlnění přes délku zkušební tělesa. Pro dosažení perfektního styku mezi hranou zkušební tělesa a ultrazvukového snímače byl použit sonografický gel Vita. Pro výpočet dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou metodou byla použita následující rovnice (5):

$$E_{ult} = \rho \cdot \frac{L^2}{t^2} \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-9} \quad (5)$$

E_{ult} je modul pružnosti získaný ultrazvukovou metodou [GPa],

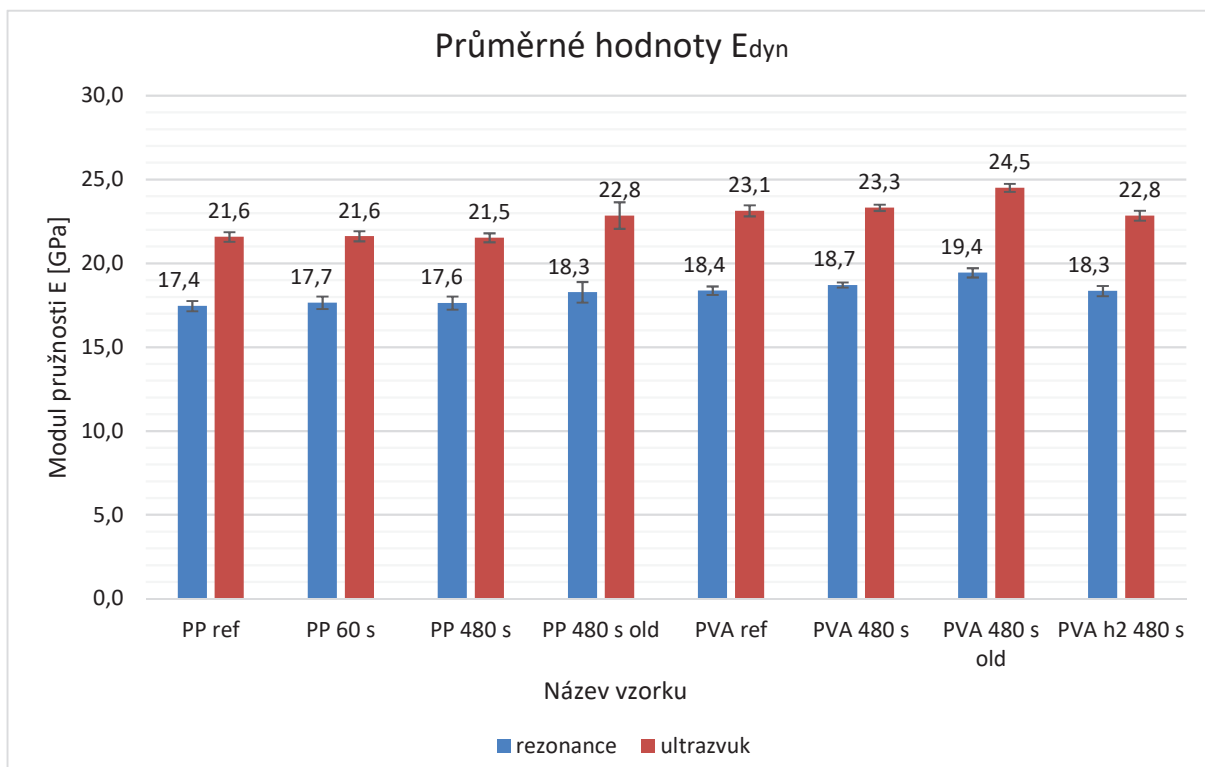
ρ je objemová hmotnost měřeného vzorku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

L je délka měřeného vzorku [m],

t je čas průchodu ultrazvukového vlnění přes délku vzorku [s],

k je koeficient rozměrnosti prostředí [-].

Výsledky průměrných dynamických modulů pružnosti ve stáří 23 dní jsou zobrazeny na obrázku č. 30. Nejvyšší směrodatná odchylka 0,79 je u sady vzorků PP 480 s old u měření modulu pružnosti ultrazvukovou metodou.



Obrázek 30: Průměrné hodnoty E_{dyn} ve stáří 24 dnů.

4.2.3. Destruktivní zkoušky

Zkouška v tahu ohybem

Vzorky byly testovány v tahu ohybem s tříbodovým uspořádáním ve stáří 24 dní. Vzorky byly zatěžovány řízeným posunem v hydraulickém lisu Heckert model FP100. V první fázi byl vzorek zatěžován rychlostí 1 mm za minutu do síly 200 N. V této fázi došlo k dosednutí zkušebního zařízení na vzorek. Následně byl vzorek zatěžován rychlostí 0,4 mm za minutu do průhybu 2 mm, nakonec byla rychlost zvýšena na 0,6 mm za minutu až do průhybu 5 mm a poté byla zkouška ukončena. Během zkoušky byla zaznamenávána síla působící na vzorek a posun.

Zkouška probíhala v souladu s normou ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Z maximální přenesené síly a rozměrů zkušebního tělesa byla dopočtena pevnost v tahu ohybem dle následující rovnice (6):

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (6)$$

f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa],

F je maximální zatížení [N],

l je vzdálenost mezi podpěrami (v našem případě 100 mm) [mm],

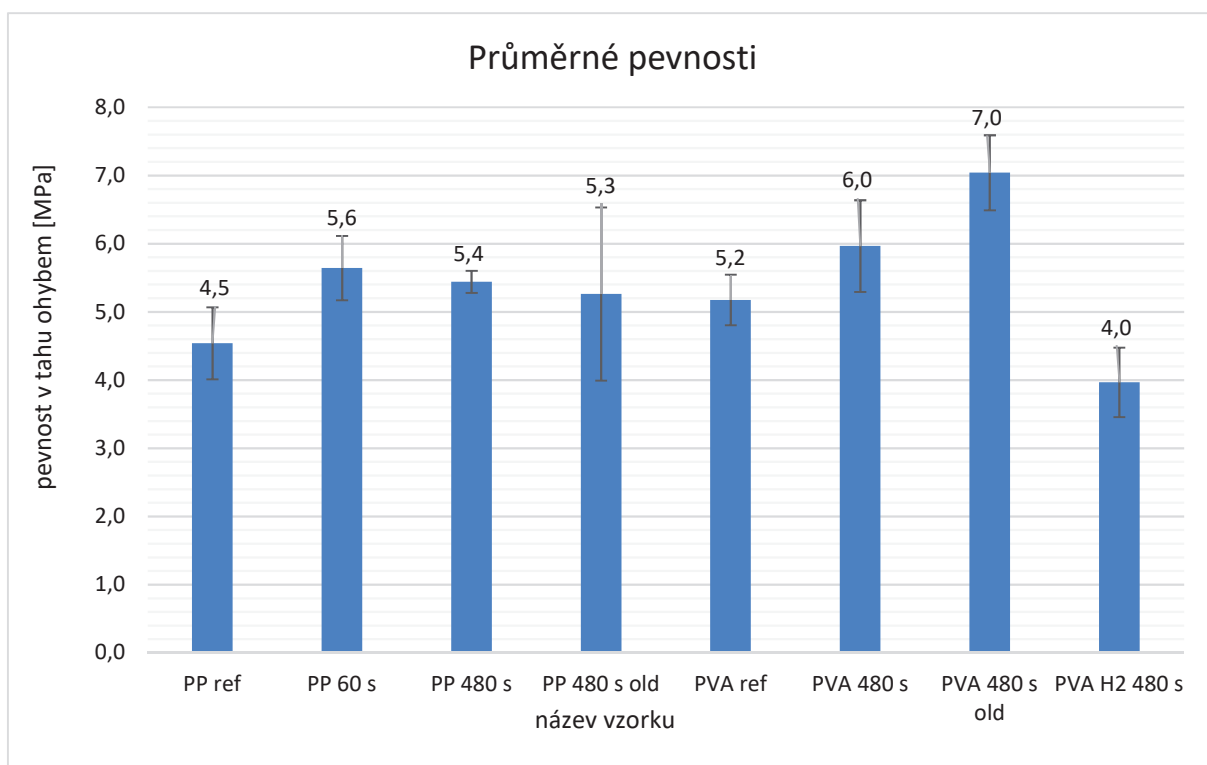
d_1 je šířka měřeného vzorku [mm],

d_2 je výška měřeného vzorku [mm]. [60]

V tabulce č. 15 jsou uvedeny průměrné objemové hmotnosti a pevnosti v tahu ohybem. Z tabulky a obrázku č. 31 je patrné, že se pevnost vzorků po úpravě kyslíkovou plazmou zvýšila, při úpravě vodíkovou plazmou se naopak snížila.

označení vzorku	PP ref	PP 60 s	PP 480 s	PP 480 s old
objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	1841	1854	1875	1869
pevnost v tahu ohybem [MPa]	4,5	5,6	5,4	5,3
směrodatná odchylka	0,53	0,47	0,16	1,27
označení vzorku	PVA ref	PVA 480 s	PVA 480 s old	PVA H2 480 s
objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	1888	1883	1913	1859
pevnost v tahu ohybem [MPa]	5,2	6,0	7,0	4,0
směrodatná odchylka	0,37	0,67	0,55	0,51

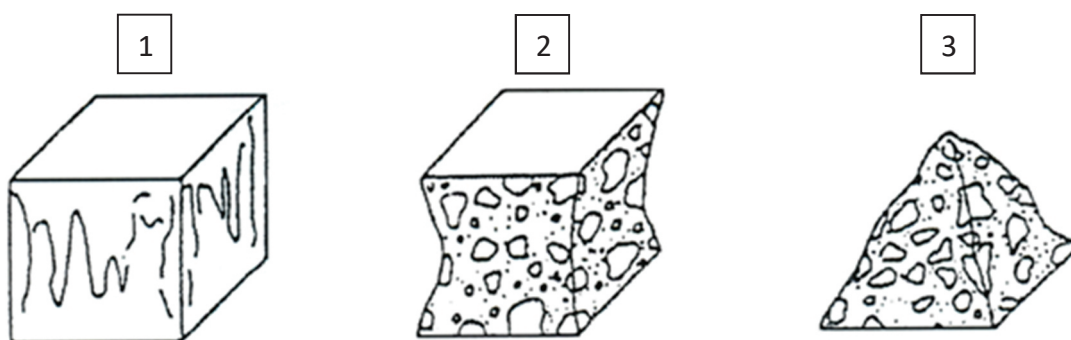
Tabulka 15: Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti v tahu ohybem.



Obrázek 31: Průměrné pevnosti v tahu ohybem

Zkouška v tlaku

Na tlak bylo testováno pět polovin při zkoušce v tahu ohybem rozlámaných zkušebních trámečků. Zkoušené vzorky byly z referenčních sad PP ref a PVA ref, ze sady PP 480 s a ze sady PVA H2 480 s. Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Porušení zkušebních těles této normě odpovídalo, nastalo porušení č. 1 na obrázku č. 32, které je typické pro cementové kompozitní materiály vyztužené vláknitou výztuží. [61]



Obrázek 32: Vyhovující způsoby porušení zkušebních těles při zkoušce v tlaku. [61]

Z maximální přenesené síly a rozměrů desky lisu tlačící na zkušební vzorek byla dopočtena pevnost v tlaku dle následující rovnice (7):

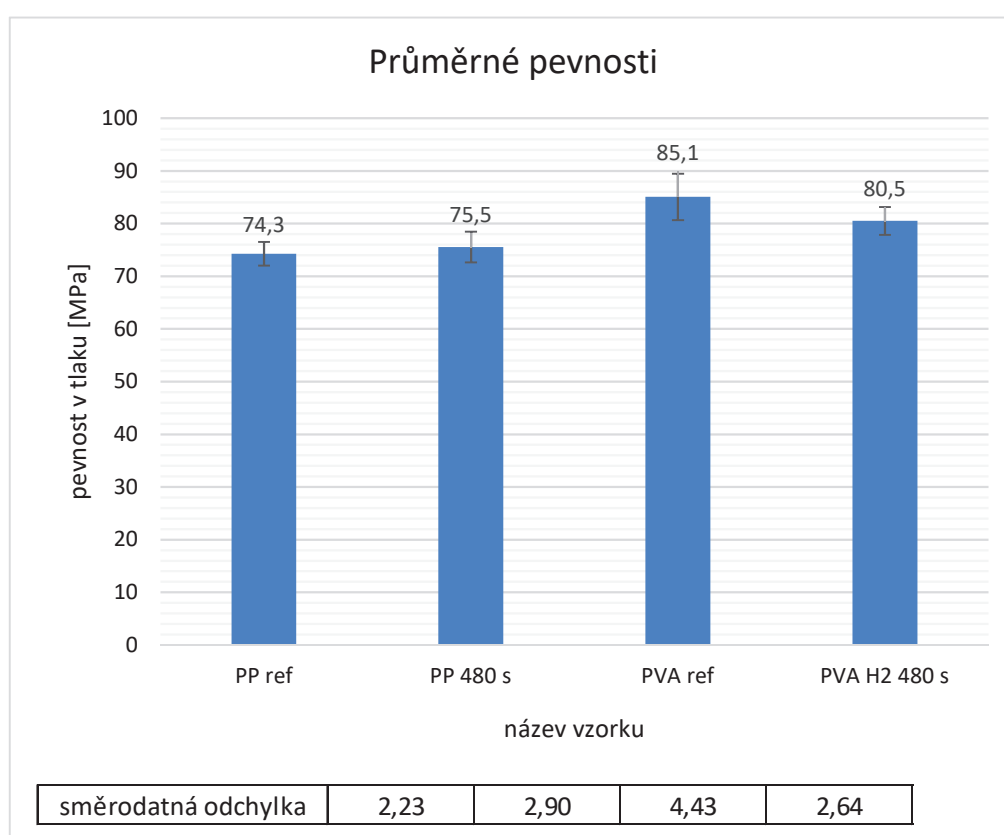
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (7)$$

f_c je pevnost v tlaku [MPa],

F je maximální zatížení [N],

A_c je plocha desky lisu tlačící na vzorek (v našem případě 40 x 40 = 1600 mm²) [mm²]. [61]

Výsledky průměrných pevností v tlaku a směrodatné odchylky jsou zobrazeny na obrázku č. 33.

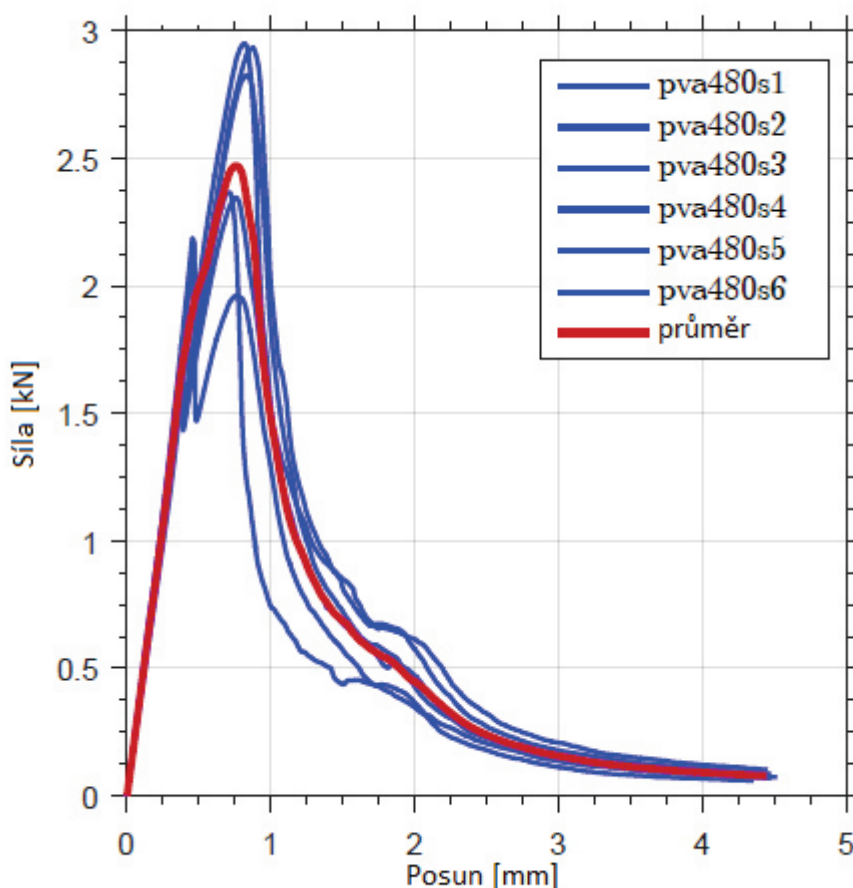


Obrázek 33: Průměrné pevnosti v tlaku

4.3. Vyhodnocení vlivu plazmatické modifikace

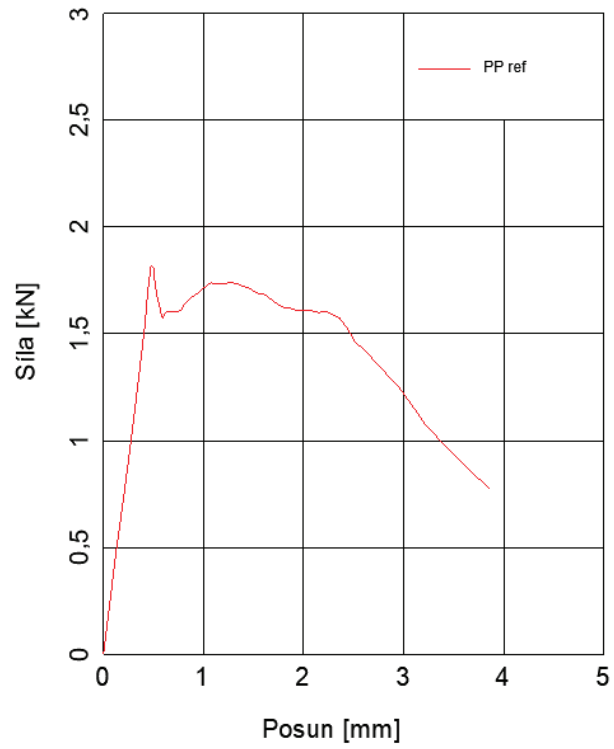
Pro porovnání chování mezi vzorky s referenčními a plazmaticky modifikovanými vlákny byly zhotoveny grafy závislosti síla-posun. Grafy byly vykresleny na základě dat získaných z destruktivních zkoušek v tahu ohybem z hydraulického lisu Heckert model FP100. Grafy byly zhotoveny pomocí software DiPro, který umožňuje provést zprůměrování hodnot. Z průběhu

závislosti síla-posun byl odstraněn vliv dosedání čelistí, který se v grafu projevoval před pružným chováním vzorku. Průběhy vzorků z každé sady byly následně zprůměrovány. Průměrování bylo uskutečněno ze všech hodnot platných zkoušek po svislé ose. Výstup ze softwaru DiPro je zobrazen na obrázku č. 34. Modré křivky znázorňují průběhy závislosti síly na posunu jednotlivých zkušebních těles. Červená křivka znázorňuje zprůměrované hodnoty z modrých křivek.

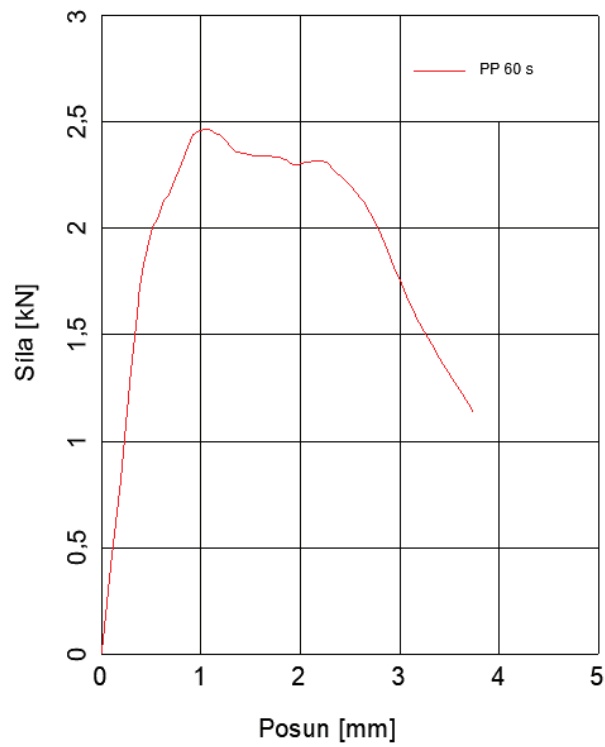


Obrázek 34: Závislost síly na posunu jednotlivých vzorků a jejich průměrná hodnota.

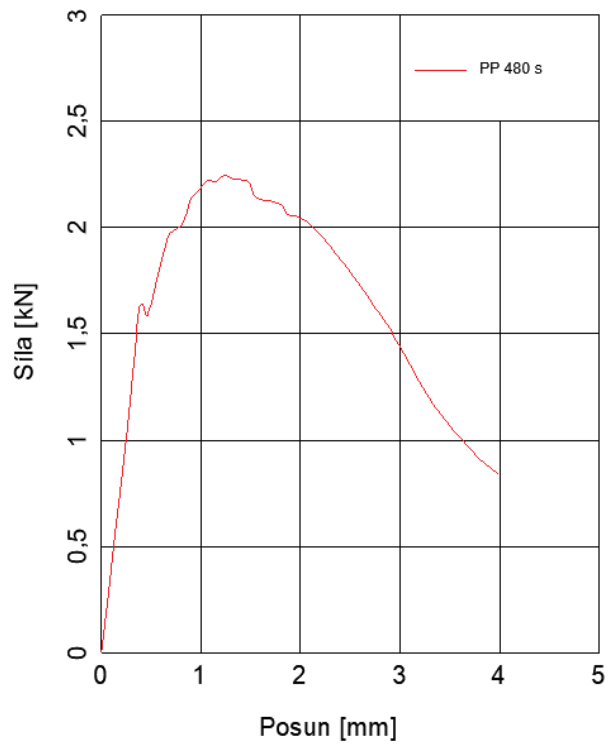
Následně byly grafy převedeny do odpovídajícího měřítka, aby se daly mezi sebou porovnávat a byly graficky přehledněji upraveny v programu ArchiCAD. Průběhy jednotlivých sad vzorků jsou znázorněny na následujících obrázcích č. 35 – 42. Na obrázku č. 43 je porovnání průběhů závislostí síla-posun PP vláken mezi sebou a na obrázku č. 44 je porovnání průběhů závislostí síla-posun PVA vláken mezi sebou.



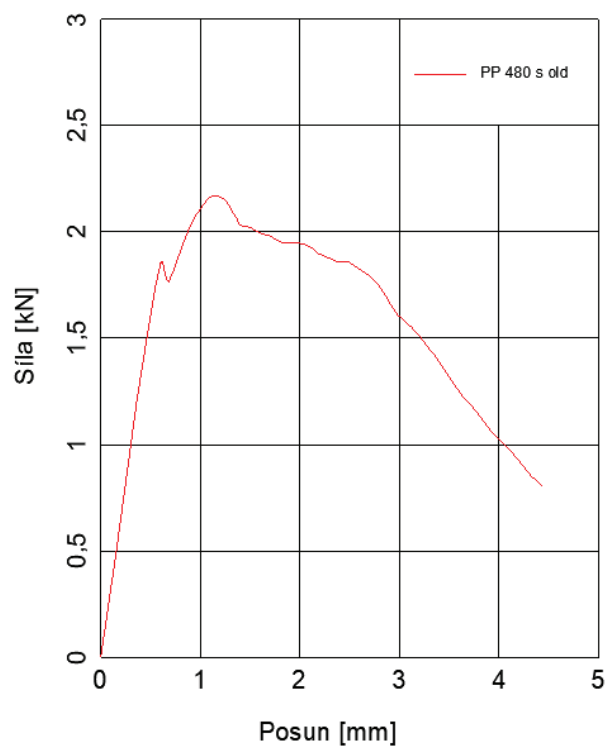
Obrázek 35: Graf závislosti síla-posun sada PP ref.



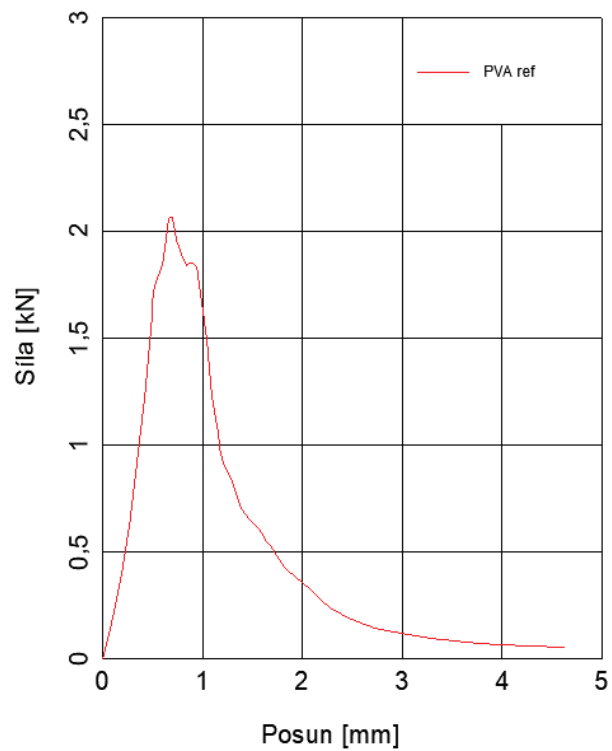
Obrázek 36: Graf závislosti síla-posun sada PP 60 s.



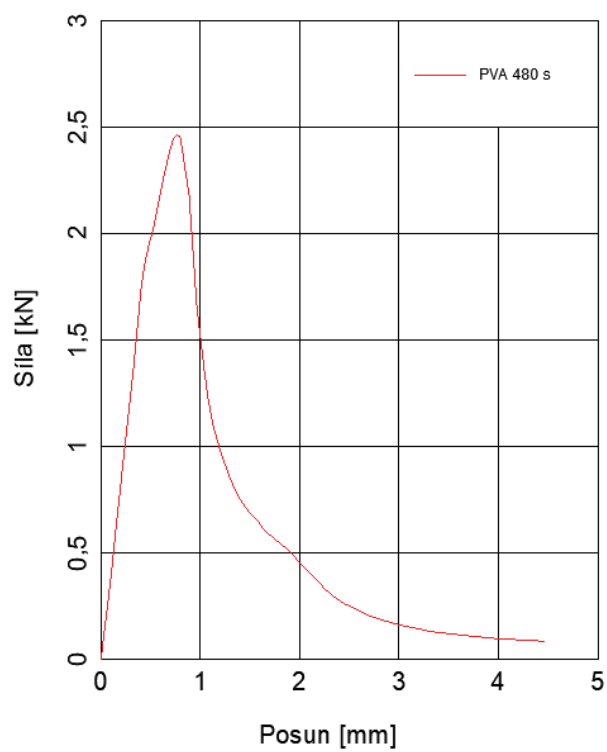
Obrázek 37: Graf závislosti síla-posun sada PP 480 s.



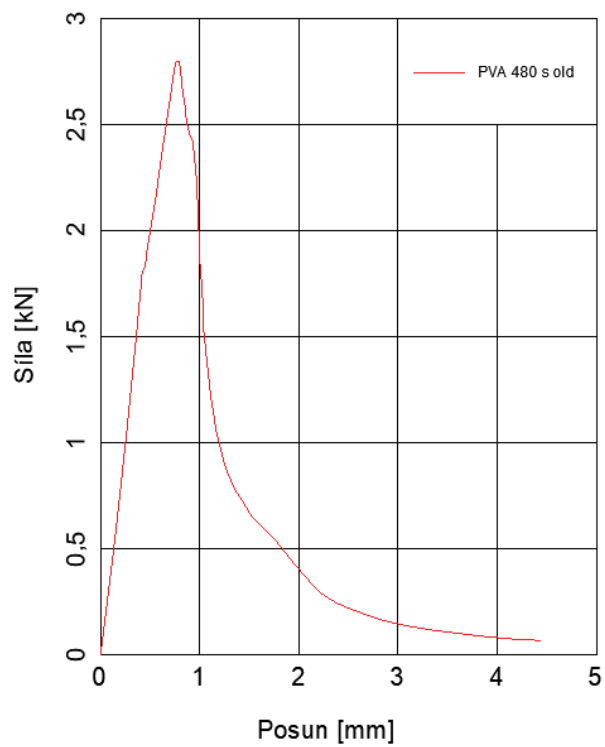
Obrázek 38: Graf závislosti síla-posun sada PP 480 s old.



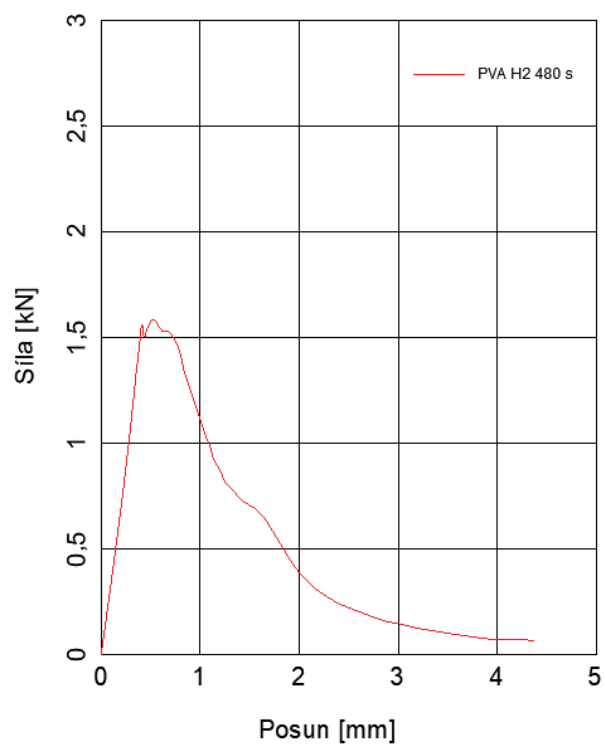
Obrázek 39: Graf závislosti síla-posun sada PVA ref.



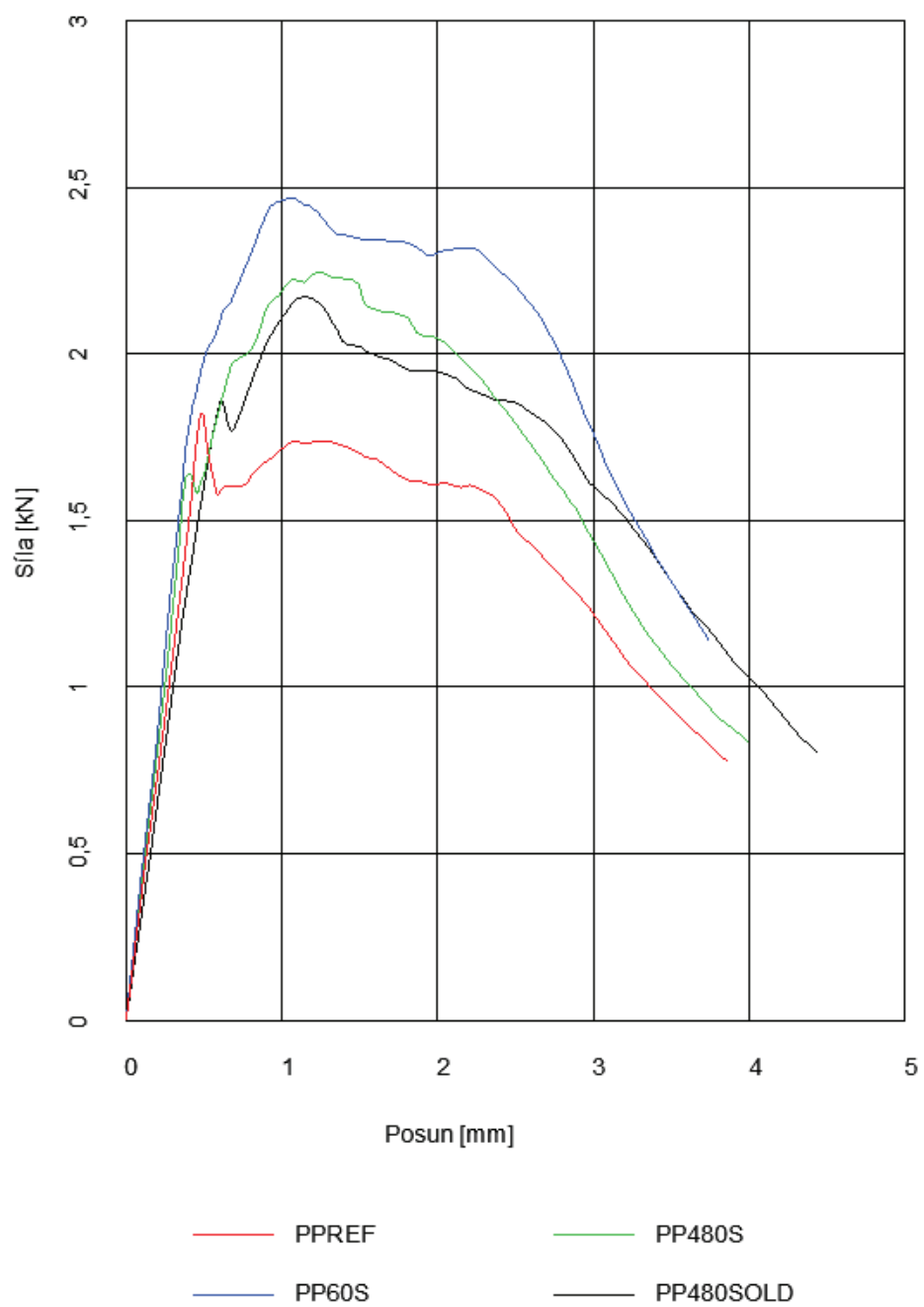
Obrázek 40: Graf závislosti síla-posun sada PVA 480 s.



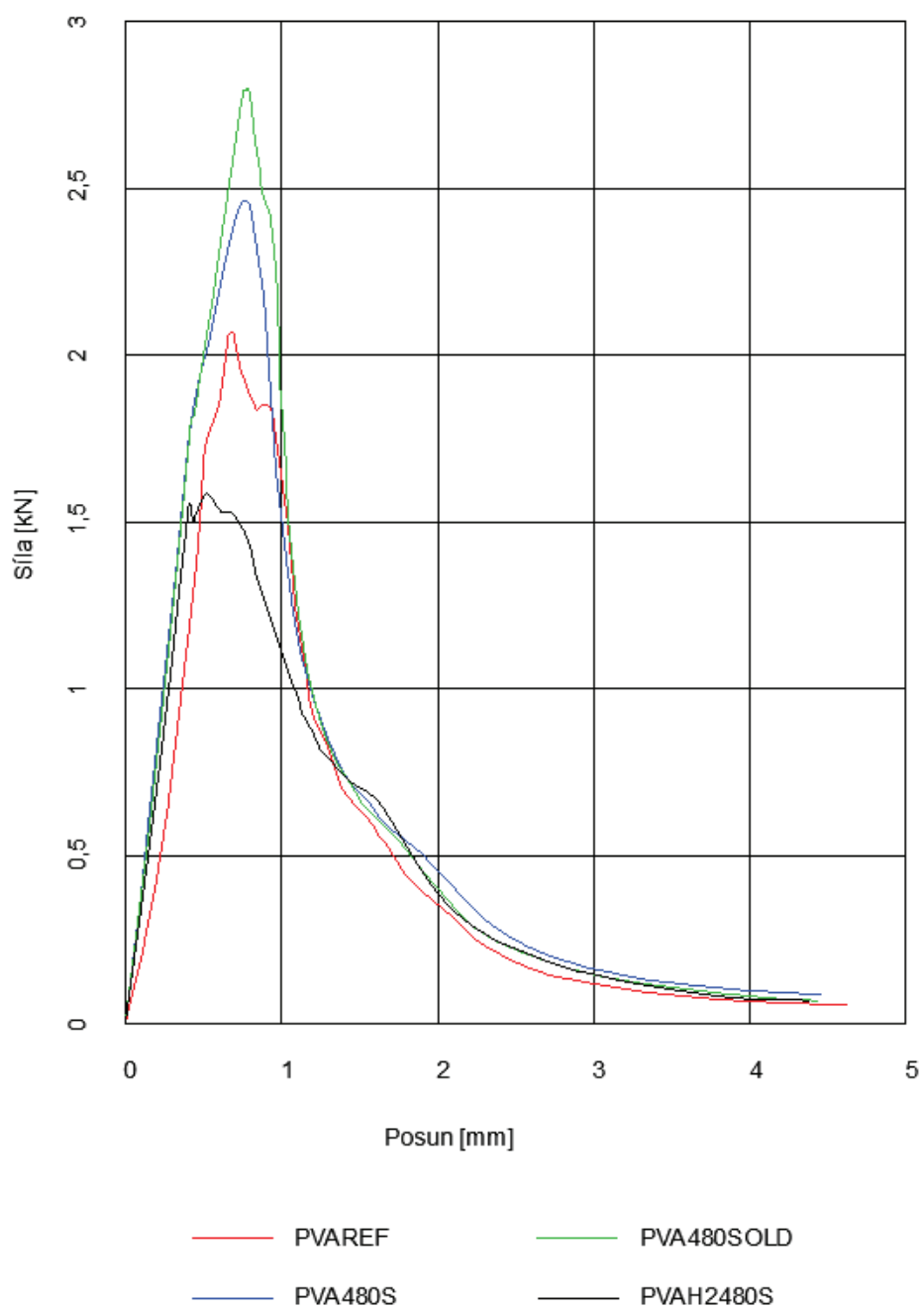
Obrázek 41: Graf závislosti síla-posun sada PVA 480 s old.



Obrázek 42: Graf závislosti síla-posun sada PVA H2 480 s.



Obrázek 43: Graf závislosti síla-posun PP vláken.



Obrázek 44: Graf závislosti síla-posun PVA vláken.

Z grafů závislosti síla-posun je patrný vliv plazmatických modifikací na polypropylenová (PP) i polyvinylalkoholová (PVA) vlákna. U plazmatických modifikací pomocí kyslíkové plazmy došlo ke zvýšení soudržnosti u PP i PVA vláken.

Na základě výsledků sady vzorků s PP vlákny s dobou úpravy 60 sekund pomocí kyslíkové plazmy a porovnáním s referenční sadou PP vzorků můžeme usoudit, že chemický vliv plazmatické modifikace má hlavní vliv na zvýšení tahové únosnosti po vzniku první trhliny zkoušeného kompozitního materiálu, protože pomocí provedené SEM analýzy nejsou při maximálním zvětšení jasně pozorovatelné mechanické modifikace vláken po úpravě kyslíkovou plazmou po dobu 60 s, ale vzorky dosahují lepších výsledků než vlákna upravená 480 s. V sestupující části grafu, kdy dochází k vytahování vláken z matrice se projevuje spíše mechanický, než chemický vliv modifikace a nepatrně zvyšuje pevnosti v sestupné části grafu. Z experimentů můžeme usoudit, že doba plazmatické modifikace pro časy od 60 s po 480 s při zvoleném nastavení přístroje pro plazmatickou modifikaci má podobné účinky na PP vlákna. Z naměřených hodnot sady vzorků PP 480 s old skladovaných pět dní na vzduchu je patrné, že chemické modifikace při skladování PP plazmaticky modifikovaných vláken na vzduchu v běžných podmínkách při teplotě okolo 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu okolo 50 % se degradace projevují relativně pomalu. Na tlakové pevnosti se plazmatické modifikace u PP vláken neprojevují, protože PP vlákna mají nízký modul pružnosti a na zvýšení tlakové pevnosti nemají téměř význam.

Na základě výsledků plazmaticky modifikovaných PVA vláken je možné usoudit, že stejně jako u PP vláken se projevuje hlavně chemický vliv plazmatických modifikací, protože v sestupné části grafu síla-posun nastává jen nepatrný nárůst únosnosti plazmaticky modifikovaných vzorků oproti vzorkům referenčním. Z naměřených hodnot sady vzorků PVA 480 s old skladovaných pět dní na vzduchu je patrné, že chemické modifikace při skladování PVA plazmaticky modifikovaných vláken na vzduchu v běžných podmínkách při teplotě okolo 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu okolo 50 % se degradace téměř neprojevují, naopak u sady vzorků PVA 480 s old je vyšší tahová pevnost než u sady vzorků PVA 480 s. Popisovaný jev nemá z fyzikálního ani chemického hlediska žádné opodstatnění. Z tohoto důvodu bylo usouzeno, že se jedná o odchylku měření, protože podle průměrné objemové hmotnosti a naměřených dynamických modulů pružnosti tato sada vykazuje nepatrně vyšší hodnoty oproti ostatním sadám vzorků.

Sada vzorků PVA H2 480 s vykazuje naopak nižší tahové pevnosti oproti referenčním vzorkům. Dosažení nižších tahových pevností prokazuje, že chemický vliv plazmatické modifikace pomocí vodíkové plazmy hydrofobizuje povrch PVA vláken stejně jako povrch diamantu, na němž byly prováděny modifikace vodíkovou plazmou v jiných odborných pracích. Na základě průběhu grafu závislosti síla-posun je možné potvrdit, že chemické modifikace mají hlavní vliv na dosažení maximální pevnosti v tahu ohybem, naopak v sestupné části grafu mají hlavní vliv mechanické modifikace, které se projevují při zvoleném nastavení přístroje pro plazmatickou modifikaci a časech úprav jen nepatrně. Tlaková zkouška potvrzuje méně hydrofilní chování vláken snížením vazby vláken s matricí a dosažením nižší tlakové pevnosti.

Pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku sad vzorků jsou zobrazeny v tabulce č. 15 včetně jejich procentuálního porovnání oproti referenčním sadám vzorků. V tabulce č. 16 jsou dynamické moduly pružnosti sad vzorků včetně jejich procentuálního porovnání oproti referenčním sadám vzorků. Z tabulky je patrné, že všechny sady vzorků dosahují téměř stejných dynamických modulů pružnosti a objemové hmotnosti.

označení vzorku	pevnost v tahu ohybem		pevnost v tlaku	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
PP ref	4,5	100%	74,3	100%
PP 60 s	5,6	124%	-	-
PP 480 s	5,4	120%	75,5	102%
PP 480 s old	5,3	116%	-	-

Tabulka 16: Pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku vzorků a procentuální porovnání.

označení vzorku	pevnost v tahu ohybem		pevnost v tlaku	
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
PVA ref	5,2	100%	85,1	100%
PVA 480 s	6,0	115%	-	-
PVA 480 s old	7,0	136%	-	-
PVA H2 480 s	4,0	77%	80,5	95%

Tabulka 17: Pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku vzorků a procentuální porovnání.

označení vzorku	dynamický modul pružnosti				objemová hmotnost ρ	
	rezonance E_{rez}		ultrazvuk E_{ult}			
	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]
PP ref	17,4	100%	21,6	100%	1841	100%
PP 60 s	17,7	101%	21,6	100%	1854	101%
PP 480 s	17,6	101%	21,5	100%	1875	102%
PP 480 s old	18,3	105%	22,8	106%	1869	102%

Tabulka 18: Dynamické moduly pružnosti vzorků a procentuální porovnání.

označení vzorku	dynamický modul pružnosti				objemová hmotnost ρ	
	rezonance E_{rez}		ultrazvuk E_{ult}			
	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[%]
PVA ref	18,4	100%	23,1	100%	1888	100%
PVA 480 s	18,7	102%	23,3	101%	1883	100%
PVA 480 s old	19,4	106%	24,5	106%	1913	101%
PVA H2 480 s	18,3	100%	22,8	99%	1859	98%

Tabulka 19: Dynamické moduly pružnosti vzorků a procentuální porovnání.

V bakalářské práci pana Jana Havrdy (2016) byl zkoumán význam plazmatických modifikací na povrch uhlíkových mikrovláken. Zkoumaná vlákna měla mez pevnosti v tahu 5100 MPa a modul pružnosti v tahu 245 GPa. [24]

Bylo zjištěno, že při nejdelší provedené modifikaci kyslíkovou plazmou ve stejném a stejně nastaveném přístroji pro plazmatickou modifikaci jako byl použit v této práci po dobu 240 s nebylo oproti referenčním výsledkům dosaženo lepších výsledků. Podle ostatních provedených měření bylo predikováno zlepšení soudržnosti s cementovou maticí při delších časech plazmatické modifikace. Modul pružnosti upravovaných uhlíkových vláken se při době úpravy 240 s snížil přibližně o 30 %. Na mez pevnosti vláken neměla plazmatická modifikace vliv. [24]

Na základě porovnání této diplomové práce s výše převzatými výsledky je patrné, že krátkodobé kyslíkové plazmatické modifikace, které se u PVA i PP vláken projevují zvýšením soudržnosti s cementovou maticí zejména díky chemickému významu plazmatické modifikace, se u výše specifikovaných uhlíkových vláken zvýšením soudržnosti s cementovou maticí neprojevují. Za předpokladu stejného účinku mechanického vlivu plazmatické

modifikace na PP, PVA i uhlíková vlákna se pro získání lepší soudržnosti uhlíkových vláken s cementovou maticí musí prodloužit doba plazmatické modifikace.

V diplomové práci byl prokázán nepatrný vliv mechanické modifikace kyslíkovou plazmou na zvýšení soudržnosti PP i PVA vláken při době úpravy 480 s. Budeme-li uvažovat, že mechanické modifikace pomocí kyslíkové plazmy by mohli začít mít nezanedbatelný vliv při dvojnásobné době úpravy, pak by uhlíková vlákna musela být upravována aspoň čtyřikrát déle. Problémem je snižování modulu pružnosti u uhlíkových vláken, které bylo při době úpravy 240 s poměrně výrazné. Prodloužení této doby na čtyřnásobek by nejspíš mělo za následek vysokou ztrátu modulu pružnosti. Vysoký modul pružnosti je jednou z hlavních předností uhlíkových vláken a jeho významné snížení je nežádoucí. Na základě uvedených výsledků lze predikovat nevhodnost plazmatické modifikace uhlíkových vláken pro použití v cementových kompozitních materiálech, ale predikci by bylo nutné experimentálně ověřit.

V bakalářské práci Lucie Bartošové (2016) byl zkoumán význam plazmatických modifikací na povrch dvou produktů z polymerních makrovláken. Byla zkoumána směs vláken polypropylenu (PP) a polyetylenu (PE) s udávanou pevností v tahu 610 MPa a modulem pružnosti 5,17 GPa a dvouvrstvá vlákna z polyolefinů s udávanou pevností v tahu 600 MPa a modulem pružnosti 11 GPa. Plazmatické modifikace byly provedeny v časech od 5 s do 480 s. [31]

Bylo zjištěno, že již při modifikaci po dobu 5 s bylo u obou produktů z polymerních vláken dosaženo významného zlepšení smáčivosti, která se s rostoucím časem plazmatických modifikací téměř neměnila. Tento výsledek potvrzuje, že u krátkodobých plazmatických modifikací mají chemické změny na povrchu vlákna důležitý význam, ale mechanické ho mají jen zanedbatelný, protože ztráty hmotnosti vyšší než jedno procento oproti referenčním vzorkům se projeví až u dob kyslíkových plazmatických modifikací 240 s a 480 s. [31]

Z úbytku hmotnosti během plazmatické modifikace je patrné, že popisovaná vlákna při delších časech plazmatických modifikací dosahují vyššího mechanického zdrsnění povrchu oproti PP a PVA vláknům zkoumaných v této diplomové práci. Především směs polypropylenových a polyetylenových vláken dosahovala přibližně dvojnásobných ztrát hmotnosti, která byla při době úpravy 480 s téměř 5 %, oproti vláknům z polyolefinů. Jelikož nejvyšších ztrát hmotnosti dosahovala směs polypropylenových a polyetylenových vláken a polypropylenová vlákna zkoumána v této diplomové práci dosahovala při stejné modifikaci jen zanedbatelných ztrát hmotnosti, pak právě polyetylenová vlákna dosáhla nejvyšších ztrát

hmotnosti z čehož vyplývá, že měla nejvíce zdrsňený povrch. Pro kyslíkovou plazmatickou modifikaci byl použit stejný přístroj se stejným nastavením jako byl použit v této diplomové práci. [31]

Další zkoušky byly provedeny na vláknech s dobou plazmatické modifikace 30 s. Z pull-out testů byla zjištěna o 20 % vyšší soudržnost modifikovaných vláken z polyolefinů oproti referenčním vláknům, u směsi vláken z polypropylenu a polyetylenu byla soudržnost modifikovaných vláken oproti referenčním jen zanedbatelně vyšší. V ohybových zkouškách byla naopak prokázána jen u směsi vláken z polypropylenu a polyetylenu vyšší zbytková pevnost u modifikovaných vláken oproti vláknům referenčním. U vláken z polyolefinů byla zbytková pevnost v tahu ohybem jen zanedbatelně vyšší u modifikovaných vláken oproti vláknům referenčním. [31]

U PP i PVA vláken v této diplomové práci došlo ke zvýšení nejen zbytkové tahové únosnosti pomocí kyslíkové plazmatické modifikace oproti referenčním vláknům, ale i ke zvýšení maximální pevnosti v tahu ohybem. Ohybové zkoušky obou prací nelze přímo porovnávat, protože byly použity jiné matrice i rozdílné typy vláken. Vlastnosti a vliv kyslíkové plazmatické modifikace na vlákna z vybraných odborných prací jsou znázorněny v tabulkách 19 – 21.

autor práce	vlákna	mez pevnosti [MPa]	modul pružnosti [GPa]
Jakub Ďureje (2018)	PP (mikro)	400	4,9
Jakub Ďureje (2018)	PVA (mikro)	1560	40
Jan Havrda (2016)	uhlíková (mikro)	5100	245
Lucie Bartošová (2016)	PP + PE (makro)	610	5,17
Lucie Bartošová (2016)	polyolefiny (makro)	600	11

Tabulka 20: Vlastnosti vláken vybraných odborných prací. [24, 31]

vlákna	ztráta hmotnosti v % při kyslíkové plazmatické modifikaci po dobu				
	30 s	60 s	120 s	240 s	480 s
PP (mikro)	0,025	0,035	0,051	0,094	0,175
PVA (mikro)	0,198	0,214	0,247	0,312	0,578
uhlíková (mikro)	-	-	-	-	-
PP + PE (makro)	0,158	0,414	0,85	1,88	4,553
polyolefiny (makro)	0,109	0,28	0,527	1,025	2,339

Tabulka 21: Ztráty hmotnosti vláken vybraných odborných prací kyslíkovou plazmou. [24, 31]

vlákna	metoda měření smáčivosti	změna hmotnosti vody v % oproti referenčním vzorkům				
		30 s	60 s	120 s	240 s	480 s
PP (mikro)	Packed-cell	14,5	18,2	13,4	15,8	35,3
PVA (mikro)	Packed-cell	-3,1	-6,6	0,6	-9,2	4,4
uhlíková (mikro)	Packed-cell	-	20,2	45,5	161,4	-
PP + PE (makro)	optická metoda	55,3	55,5	49,9	55,4	58,2
polyolefiny (makro)	optická metoda	52,2	48,7	56,7	51,1	53,3
		snížení kontaktního úhlu v % oproti referenčním vzorkům				

Tabulka 22: Změna smáčivosti vláken modifikovaných kyslíkovou plazmou oproti referenčním vláknům u vybraných odborných prací. [24, 31]

Přímé porovnání výsledků odborných prací zabývajících se plazmatickými modifikacemi je obtížné, protože při tomto procesu je mnoho proměnných parametrů. Vhodně plazmaticky upravený povrch vláken má často nezanedbatelný vliv při následné aplikaci vláken.

Judith Moosburger-Will, Matthias Bauer, Fabian Schubert a jejich tým zkoumali ve své odborné práci (2017) plazmatickou modifikaci kontinuálního uhlíkového fibrilovaného vlákna skládajícího se z 50 000 jednotlivých vláken označovaného 50 k tow. Cílem výzkumu bylo chemicky upravit povrch uhlíkového 50 k tow kontinuálního vlákna pomocí plazmatické trysky. [62]

Pro generování plazmy byl použit radiofrekvenční zdroj o výkonu 600 W a pracovním plynem byl vzduch. V druhém zařízení byl odpařen methyltrimethoxysilane (MTMS) při teplotě 100 °C, který byl přidáván do proudu plazmy v trysce. Chemický vliv plazmatické modifikace na povrchu vlákna byl zkoumán rentgenovou fotoelektronovou spektroskopií, mechanické vlastnosti byly ověřeny tahovými zkouškami a povrch vláken byl zkoumán elektronovým mikroskopem.

Na základě měření bylo zjištěno, že se na povrch vlákna po celé jeho délce (1 200 m) podařilo nanést vrstvu funkčních chemických skupin obsahující křemík. Uhlíkové vlákno opatřené touto úpravou je vhodné pro aplikaci do epoxidových pojiv. Dále bylo zjištěno, že během modifikace nebyly zhoršeny mechanické vlastnosti vlákna a ani nebyl poškozen povrch oproti referenčnímu vláknu. [62]

V diplomové práci (2016) zkoumal Roman Pulíček vliv plazmatického dielektrického bariérového výboje (DBD) za atmosférického tlaku na netkanou textilii z polypropylenových (PP) vláken. Cílem práce bylo zajistit hydrofilní chování povrchu PP vláken za účelem umožnění barvení a lepení textilie. [63]

Plazma DBD je generováno mezi dvěma elektrodami, které jsou na povrchu opatřeny dielektrickou vrstvou. Do jedné elektrody je přivedeno střídavé elektrické napětí a druhá je uzemněna. Pracovní plyn byl vzduch. Kontinuální netkaná textilie byla touto technologií modifikována v časech 0,5 až 5 sekund. Čas modifikace byl upravován rychlostí posunu textilie mezi elektrodami. Smáčivost byla měřena ponořením textilie do vody nebo do alkalických roztoků. Zlepšená smáčivost s vodou se projevovala již od 0,5 s a následně v závislosti na čase lineárně narůstala až do času 5 s. Zlepšená smáčivost s alkalickými roztoky se projevovala již od 0,5 s a v závislosti na čase prudce lineárně narůstala do času 2 s. Následně narůstala smáčivost jen mírně až do času 5 s. Při čase 5 s se textilie začínala tavit, proto byl tento čas a časy přesahující tuto dobu označeny jako nevhodné. K modifikaci DBD plazmou pro dosažení hydrofilního povrchu za účelem barvení, lepení a dalšího zpracování textilie byly při daném nastavení přístroje zvoleny časy modifikace od 1 do 3 sekund, kdy je povrch už dostatečně hydrofilní ale ještě nedochází k tavení vláken. [63]

V odborné práci se B. N. Barra, S. F. Santos a jejich tým zabývali plazmatickou modifikací povrchu sisalových vláken za účelem zvýšení odolnosti v alkalickém prostředí. Sisalová vlákna jsou z hlediska mechanických vlastností vhodná k vyztužování tenkostěnných cementových kompozitních materiálů, ale z hlediska trvanlivosti je nutné zvýšit jejich odolnost v alkalickém prostředí. Sisalová vlákna byla modifikována metanovou plazmou v komoře s evakuovaným vzduchem. Přístroj generující nízkoteplotní plazma byl nastaven na výkon 45 W a doba modifikace byla 600 s. [64]

Na základě měření mechanických i chemických změn na povrchu vláken byla u modifikovaných vláken prokázána vyšší chemická odolnost v alkalickém prostředí oproti

referenčním vláknům. I přes zvýšení hydrofobie vláken byla pomocí pull-out testů naměřena vyšší soudržnost. [64]

V odborné práci se Eung-seok Lee, Choong-hyun Lee a jejich tým zabývali vyztužováním polyetherimidových (PEI) kompozitních materiálů. K vyztužení bylo použito objemových 30 % uhlíkových vláken. Vlákná byla plazmaticky modifikována vodíkovou nebo kyslíkovou plazmou. Výsledky byly porovnány s referenčními vzorky obsahující stejné množství vláken bez plazmatické modifikace. Plazmatická modifikace probíhala v komoře s evakuovaným vzduchem po dobu jedné hodiny s generátorem plazmy o příkonu 450 W. [65]

Následně byl zkoumán povrch vláken a mechanické vlastnosti vyztužených PEI kompozitních materiálů. Pevnost v tahu u vzorku obsahující vlákna modifikovaná kyslíkovou plazmou se oproti referenčním vzorkům zvýšila jen o 7 %. Pevnost v tahu u vzorku obsahující vlákna modifikovaná vodíkovou plazmou se oproti referenčním vzorkům zvýšila o 42 % ze 169 MPa na 239 MPa. U modifikovaných vláken se zvýšil i modul pružnosti z 16,2 GPa na 22,9 GPa u vláken modifikovaných kyslíkovou plazmou, respektive na 25,0 GPa u vláken modifikovaných vodíkovou plazmou. Na základě naměřených dat se plazmatická modifikace vodíkovou plazmou uhlíkových vláken pro vyztužování PEI kompozitních materiálů jeví jako účinná. [65] V tabulce 23 jsou porovnány výsledky výše uvedených odborných prací.

hlavní autor práce	vlákna	plazmatické modifikace			výsledek
		pracovní plyn	čas [s]	výkon generátoru [W]	
Jakub Ďureje	PP	kyslík	60	100	Vlákna se podařilo vhodně modifikovat pro aplikaci do cementových kompozitních materiálů. Kompozitní materiál dosahoval vyšší pevnosti v tahu ohybem.
Jakub Ďureje	PVA	kyslík	480	100	Cementové kompozitní materiály s modifikovanými vlákny dosahují vyšší pevnosti v tahu ohybem, ale nebylo dosaženo požadovaného deformačně zpevňujícího se charakteru.
Jakub Ďureje	PVA	vodík	480	100	Vlákna se podařilo hydrofobizovat, ale nebylo dosaženo dostatečného mechanického zdrsnění povrchu pro deformačně-zpevňující se chování.
Jan Havrda	uhlíková	kyslík	240	100	Smáčivost s vodou byla zvýšena ale po aplikaci vláken do cementového kompozitního materiálu nebylo dosaženo vyšší pevnosti v tahu ohybem. U zkušebních těles s modifikovanými vlákny došlo ke snížení modulu pružnosti. [24]
Lucie Bartošová	PP + PE	kyslík	30	100	Smáčivost s vodou byla zvýšena. Po aplikaci vláken do cementové matrice nebylo při pull-out testech dosaženo lepších výsledků oproti referenčním vzorkům. U zkoušky v tahu ohybem bylo dosaženo vyšší zbytkové pevnosti. [31]
Lucie Bartošová	polyolefiny	kyslík	30	100	Smáčivost s vodou byla zvýšena. Po aplikaci vláken do cementové matrice bylo při pull-out testech dosaženo lepších výsledků oproti referenčním vzorkům. U zkoušky v tahu ohybem nebylo dosaženo lepších výsledků. [31]
Judith Moosburger-Will	uhlíková	vzduch + MTMS	-	600	Kontinuální vlákno se podařilo vhodně modifikovat pro aplikaci do epoxidových pojiv. U vláken nebyly zhoršeny mechanické vlastnosti. [62]
Roman Pulíček	PP	vzduch	1 - 3	100	Netaknou textilií se podařilo vhodně modifikovat za účelem nanášení barev a lepidel na její povrch. [63]
B. N. Barra	sisalová	metan	600	45	U vláken se podařilo zvýšit odolnost v alkalickém prostředí za účelem aplikace vláken do cementových tenkostěných kompozitních materiálů. [64]
Eung-seok Lee	uhlíková	vodík	3600	450	Vlákna se podařilo vhodně modifikovat pro aplikaci do polyetherimidových (PEI) kompozitních materiálů. Bylo dosaženo vyšší tahové pevnosti i vyššího modulu pružnosti oproti referenčním vzorkům. [65]

Tabulka 23: Porovnání výsledků vybraných odporých prací zabývajících se plazmatickou modifikací povrchů vláken.

5. Závěr

Plazmatické modifikace vláken mají nezanedbatelný vliv na vlastnosti použitého kompozitního materiálu. Bylo zjištěno, že během plazmatických modifikací ani při nejdelší zkoušené době 480 s a výkonu radiofrekvenčního zdroje nízkoteplotní plazmy 100 W téměř nedochází ke zhoršení mechanických vlastností vláken. Ztráta hmotnosti při této úpravě nepřesáhla hodnotu 0,6 % hmotnosti.

Na základě informací z předchozích odborných prací, SEM analýzy a smáčivosti byla k aplikaci do cementové matrice s recyklátem zvolena vlákna polypropylenová (PP) s dobou plazmatické modifikace kyslíkovou plazmou 60 s, 480 s a 480 s ponechaná pět dní na vzduchu v běžných podmínkách při teplotě okolo 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu okolo 50 %. U polyvinylalkoholových (PVA) vláken byla zvolena doba plazmatické modifikace kyslíkovou plazmou 480 s a 480 s ponechaná pět dní na vzduchu v běžných podmínkách při teplotě okolo 22 °C a relativní vlhkosti vzduchu okolo 50 % a modifikace vodíkovou plazmou po dobu 480 s. Všechna vlákna, kromě vláken ponechaných pět dní na vzduchu, byla okamžitě po modifikaci umístěna do sáčků zamezujícím výměnu vzduchu a vybalena byla těsně před výrobou vzorků, aby se omezila degradace chemického vlivu plazmatických modifikací. Všechny tyto sady vzorků byly porovnány s referenčními sadami vzorků obsahující PP respektive PVA vlákna bez plazmatické modifikace a shodnou matrici.

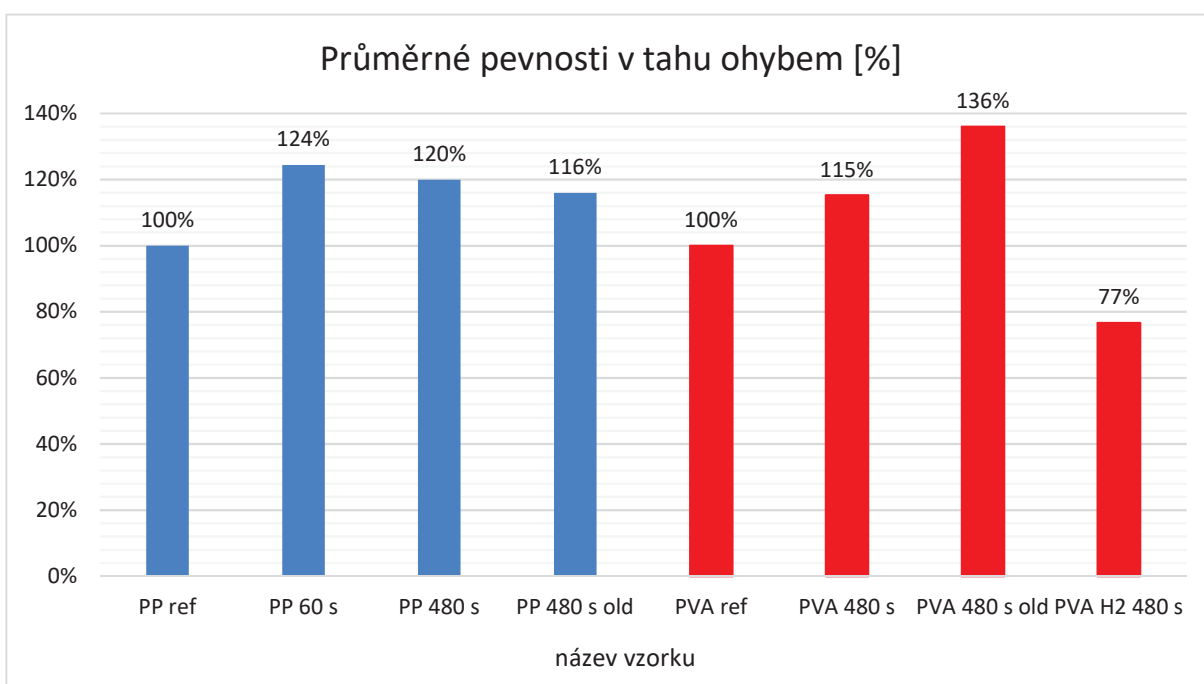
Z výsledků je patrné, že modifikace kyslíkovou plazmou zvyšují pevnost v tahu ohybem u vzorků s PP i PVA vlákny přibližně o 20 % (obrázek 45). Na zvýšení tahové pevnosti se podílí hlavně chemický vliv plazmatické modifikace. Mechanický vliv plazmatické modifikace při zvoleném příkonu přístroje pro plazmatickou modifikaci 100 W a době úpravy 60 s nebo 480 s se u PP vláken projevuje minimálně a u PVA vláken již není téměř patrný.

U PVA vláken modifikovaných vodíkovou plazmou po dobu 480 s bylo prokázáno jejich hydrofobní chování vzniklé chemickým vlivem této modifikace. Mechanický vliv modifikace se stejně jako u kyslíkové plazmatické modifikace u těchto vláken téměř neprojevuje a ztráta tahové pevnosti po dosažení maxima je téměř stejná jako u referenčních vláken.

Jako optimální plazmatická modifikace se u PP vláken při použití stejného nastavení radiofrekvenčního zdroje nízkoteplotní plazmy jeví délka úpravy 60 s pomocí kyslíkové plazmy. Pro dosažení optimálního deformačně-zpevňujícího se charakteru PVA vláken by mohlo být

vhodné použití vodíkové plazmy díky jejímu hydrofobizujícímu chemickému vlivu, ale je zapotřebí vhodným způsobem výrazně zvýšit mechanický vliv vodíkové plazmatické modifikace. Zvýšení tohoto vlivu by mohlo nastat zvýšením příkonu radiofrekvenčního zdroje nízkoteplotní plazmy případně prodloužením doby plazmatické modifikace.

U obou druhů vláken byla prokázána dostatečná časová stabilita plazmatických modifikací vláken na vzduchu, ale pro dlouhodobé skladování takto modifikovaných vláken by bylo zapotřebí zamezit styku vlhkosti s povrchem vláken například zabalením do vakuových obalů či obalů s interním plynem.



Obrázek 45: Průměrně pevnosti v tahu ohybem oproti referenčním vzorkům v %.

6. Seznam použité literatury

1. KERŠNER, Zbyněk. *Křehkost a lomová mechanika cementových kompozitů*. Brno, 2005. Habilitační práce. VUT v Brně.
2. Beton. *Ebeton* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/beton>
3. Druhy betonu. *Ebeton* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/druhy-betonu>
4. EARCH.CZ. *Z historie užití betonu* [online]. 2005 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z:
<http://www.earch.cz/cs/z-historie-uziti-betonu>
5. ŠMEJKAL, Jiří a Jaroslav PROCHÁZKA. BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ – EVROPSKÉ TRENDY. *Beton TKS* [online]. 2008, **2008**(5) [cit. 2017-10-31]. Dostupné z:
http://statika-plzen.cz/wp-content/uploads/2014/01/BETON_5-08_Vyztuz.pdf
6. VRÁBLÍK, Lukáš. *Principy předpjatého betonu, historie, materiály*. 2015. Přednáška. ČVUT v Praze.
7. VRÁBLÍK, Lukáš. *Technologie předem předpjatého betonu*. 2015. Přednáška. ČVUT v Praze.
8. VRÁBLÍK, Lukáš. *Technologie dodatečně předpjatého betonu*. 2015. Přednáška. ČVUT v Praze.
9. PROCHÁZKA, Miroslav. *Kompozitní výztuž do betonu* [online]. 2017 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/16273-kompozitni-vyztuz-do-betonu>
10. BRIATKA, Peter a Daniel KRATOCHVÍLA. *Vývoj vláken do vláknobetónu*[online]. 2013 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/stavebne-materialy/beton/vyvoj-vlakien-do-vlaknobetonu>

11. BHARATHI, D. *The history of fibre reinforcement*[online]. 2015 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/history-fibre-reinforcement-bharathi-d>
12. Kompozitní výztuž. In: *Armastek* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.armastekcz.eu/produkty/>
13. BENTUR, Arnon. a Sidney. MINDESS. *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd ed. New York: Taylor, 2007. ISBN 978-020-3088-722.
14. ČSN EN 14889-2 (723434) *Vlákna do betonu: Část 2: Polymerová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
15. *Beton TKS* [online]. 2010, **2010**(2) [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/BETON_TKS_2010-02.pdf
16. ČSN EN 14845-1 (723433) *Zkušební metody pro vlákna v betonu: Část 1: Referenční betony*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
17. ČSN EN 14889-1 (723434) *Vlákna do betonu: Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
18. BRANDT, Andrzej M. *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering* [online]. 2008 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/223360114_Fibre_reinforced_cement_based_FRC_composites_after_over_40_years_of_development_in_building_and_civil_engineering
19. Ocelová vlákna do betonu. *Ebeton* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/ocelova-vlakna-do-betonu>
20. *Flexural Response of Concrete Structures* [online]. 2017 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://www.ukessays.com/essays/construction/flexural-response-concrete-structures-2378.php>

21. OMRANI, Emad, Pradeep L. MENEZES a ROHATGI. *State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world* [online]. 2016 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861500172X#bbib0170>
22. WAMBUA, Paul, Jan IVENS, Ignaas VERPOEST a . *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?* [online]. 2003 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353803000964>
23. VACL, Jiří. *Polymerní vlákna, jejich aplikace, výroba a vlastnosti*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.
24. HAVRDA, Jan. *Povrchové modifikace uhlíkových mikro vláken a jejich vliv na soudržnost s cementovou maticí*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
25. MICHNIAK, Bc. Radomír. *Možnosti využití rozptýlené výztuže pro konstrukční betony*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT v Brně.
26. ĎUREJE, Jakub. *Výroba vláknobetonu v domácích podmínkách*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
27. GIRAD, Jeff. *Introduction to GFRC (Glass Fiber Reinforced Concrete)* [online]. 2013 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.concretecountertopinstitute.com/blog/2013/04/introduction-to-gfrc-glass-fiber-reinforced-concrete/>
28. Black premium concrete bowl. In: *Stardust* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://www.stardust.com/concrete-bowl-planter.html>
29. National Research Council. *Ceramic fibres and coatings: Advanced materials for the twenty-first century*. Washington, DC: The National Academies Press, 1998. ISBN 0-309-56903-6.
30. KABIR, M.M., H. WANG, K.T. LAU a F. CARDONA. *Effects of chemical treatments on hemp fibre structure* [online]. 2013 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433213004054>

31. BARTOŠOVÁ, Lucie. *Plazmatické povrchové modifikace polymerních makro vláken používaných jako výztuž v betonových konstrukcích*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
32. SABREEN, Scott R. *Cold Gas Plasma Surface Modification – Optimize Plastics Bonding Adhesion* [online]. 2012 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.adhesionbonding.com/2012/04/30/cold-gas-plasma-surface-modification-optimize-plastics-bonding-adhesion/>
33. CHRYSOSTOMOU, Demetrius, PhD a . *Plasma surface modification for the biomedical industry*. California, 2009. Prezentace.
34. ROSE, Margaret. *Definition Plasma* [online]. 2017 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://whatis.techtarget.com/definition/plasma>
35. *Co je to plazma?* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/iono/definice.html>
36. Extreme Lab. *Plazma - čtvrté skupenství hmoty* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://m.extremelab.webnode.cz/drruce/plasma-ctvrte-skupenstvi/>
37. Teslův transformátor 2. In: *Megapixel* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.megapixel.cz/foto/1282>
38. Vysokoteplotní Izolace Keramické. In: *Ccc-insulation* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://cz.ccc-insulation.com/ceramic-fiber/waterproof-fireproof-high-temperature-insulati.html>
39. ČECH, Vladimír. Povrchové úpravy vláken pro polymerní kompozity. *Ústav chemie materiálů - Technika, technologie* [online]. 2006, **2006**(26) [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=5396&cid=6.html>
40. *Úhel smáčení* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html
41. *Youngova rovnice* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/youngova_rovnice.html

42. HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin*. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT v Brně.
43. Contact Angle platform. *FMPS* [online]. 2014 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://fmeps.fbk.eu/contact-angle-platform>
44. DOMKE, Henry. Water Drops on a Lotus leaf. In: *Pgtnaturegarden* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://pgtnaturegarden.org/2011/05/water-drops-on-a-lotus-leaf/>
45. Contact Angle and Wetting Properties. *Surface Science Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, , 3-34. Springer Series in Surface Sciences. DOI: 10.1007/978-3-642-34243-1_1. ISBN 978-3-642-34242-4. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-34243-1_1
46. *Měření úhlu smáčení* [online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_uhlu_smaceni.html
47. RULISON, Christopher, Ph.D. *Contact angle determinations by the Straw method and Packed cell method: Good alternatives arduous single fiber contact angle experiments*. Hamburg: KRUSS GmbH.
48. *Technical Note Force Tensiometer – K12* [online]. Hamburg [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: https://www.kruss.de/fileadmin/user_upload/website/literature/kruss-tn302-en.pdf
49. ČSN 73 1328 (731328) *Stanovení soudržnosti oceli s betonem*. Praha: Český normalizační institut, 1972.
50. SØRENSEN, B.F. a H. LILHOLT. *Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test - analysis and modelling* [online]. 37th Risø International Symposium on Materials Science, 2009 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/139/1/012009/pdf>
51. DIFRANCIA, Célene, Thomas C. WARD a Richard O. CLAUS. *The single-fibre pull-out test. 1: Review and interpretation* [online]. 1996 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359835X9500069E>

52. NOESKE, Michael, Jost DEGENHARDT, Silke STRUDTHOFF a Uwe LOMMATZSCH. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. Germany, 2004 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749603001246#!>
53. CHENG, Cheng, Zhang LIYE a Ru-Juan ZHAN. *Surface modification of polymer fibre by the new atmospheric pressure cold plasma jet* [online]. Hefei, China, 2005 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897205010868>
54. MCMICAN, Roxana. *Sizing stability is a key element for glass fibre manufacturing* [online]. 2012 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/sizing-stability-is-a-key-element-for-glass-fibre/>
55. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion. *Applied Surface Science* [online]. 2011, **15**(257), 6980-6985 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433211004004>
56. STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV. *Azbest (azbestové materiály) aplikované ve stavebnictví – obecný přehled* [online]. **2012** [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/8828-azbest-azbestove-materialy-aplikovane-ve-stavebnictvi-obecny-prehled>
57. *Kuraray* [online], [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: <http://www.kuraray.co.jp/kii/english/07.html>
58. *Tecons* [online], [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: http://www.tecons.cz/vlakna-do-betonu/vlakna-beton-dokumenty/KL_Fibrofor_High_Grade.pdf
59. ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušení pevnosti. (2009). Praha: Český normalizační institut.
60. ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. (2009). Praha: Český normalizační institut.
61. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. (2009). Praha: Český normalizační institut.

62. MOOSBURGER-WILL, Judith, Matthias BAUER, Fabian SCHUBERT, et al., Methyltrimethoxysilane plasma polymerization coating of carbon fiber surfaces. *Surface and Coatings Technology* [online]. (2017), 223-230 [cit. 2018-01-06]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.017>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897217300178?via%3Dihub>
63. PULÍČEK, Roman, 2016. *Optimalizace procesu hydrofilizace polypropylenového textilu pomocí DBD atmosférické plazmy*. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
64. BARRA, B.N., S.F. SANTOS, P.V.A BERGO, C. ALVES, K. GHAVAMI a H. SAVASTANO, *Residual sisal fibers treated by methane cold plasma discharge for potential application in cement based material* [online]. **2015** [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015302764#!>
65. EUNG-SEOK, Lee, Lee CHOONG-HYUN, Chun YOON-SOO, Han CHANG-JI a Lim DAE-SOON, Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites. *Composites Part B* [online]. **2016** [cit. 2018-01-06]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.088>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816312227>

7. Seznam obrázků

Obrázek 1: Zatížení a posunu betonového vzorku se zářezem v tahu/ohybu. [1].....	10
Obrázek 2: Pracovní diagram oceli. [5].....	12
Obrázek 3: Kompozitní výztuž ze skelných vláken spojených polymerovou pryskyřicí. [12]	13
Obrázek 4: Rozmístění vláken v cementovém kompozitu,	15
Obrázek 5: Rozmístění ocelových vláken v betonu pozorovaných rentgenem. [13].....	16
Obrázek 6: Schéma mezifázové přechodové zóny u ocelového drátku. [13]	17
Obrázek 7: Samostatné uhlíkové mikrovláknko v cementové matrici. [13]	17
Obrázek 8: Různé tvary ocelových vláken. [20].....	19
Obrázek 9: Miska z cementové pasty vyztužená skleněnými vlákny (průměr 137 cm, cena 2500 \$). [28]	22
Obrázek 10: Keramická tepelná izolace pro izolace kotlů a pecí [38].....	22
Obrázek 11: Teslův transformátor produkující nízkoteplotní plazmatické médium. [37]	26
Obrázek 12: Chemické modifikace na povrchu vlákna. [33]	27
Obrázek 13: Mechanické modifikace na povrchu vlákna. [33]	27
Obrázek 14: Kapka kapaliny na tuhém povrchu. [40]	28
Obrázek 15: Kontaktní úhly. [43].....	29
Obrázek 16: Kapky vody na lotosovém listu. [44]	29
Obrázek 17: Sestava teleskop – goniometr. [45]	30
Obrázek 18: Měření úhlu smáčení na nakloněné desce. [46].....	31
Obrázek 19: Měření kontaktního úhlu-Wilhemy metoda. [47].....	32
Obrázek 20: Příprava vzorku pro metodu Straw. [47].....	32
Obrázek 21: Vzorek pro metodu Packed Cell. [31].....	33
Obrázek 22: Plazmatická tryska od společnosti Plasmatrete GmbH (Steinhagen, Germany). [52]	35
Obrázek 23: Komora pro plazmatické modifikace přístroje ROTH&RAU AK 400	38
Obrázek 24: Úbytek hmotnosti vláken kyslíkovou a vodíkovou plazmou.....	40
Obrázek 25: Mikroskop Merlin ZEISS.	42
Obrázek 26: SEM snímky.	43

Obrázek 27: Průměrné hodnoty smáčivosti vláken v závislosti na délce působení plazmatu, typu pracovního plynu a typu vláken.	46
Obrázek 28: Změna hmotnosti vody ve vzorku oproti referenčním vzorkům.	46
Obrázek 29: Vývoj modulu pružnosti v závislosti na čase.	50
Obrázek 30: Průměrné hodnoty E_{dyn} ve stáří 24 dnů.	51
Obrázek 31: Průměrné pevnosti v tahu ohybem	53
Obrázek 32: Vyhovující způsoby porušení zkušebních těles při zkoušce v tlaku. [61].....	53
Obrázek 33: Průměrné pevnosti v tlaku	54
Obrázek 34: Závislost síly na posunu jednotlivých vzorků a jejich průměrná hodnota.	55
Obrázek 35: Graf závislosti síla – posun sada PP ref.	56
Obrázek 36: Graf závislosti síla – posun sada PP 60 s.	56
Obrázek 37: Graf závislosti síla – posun sada PP 480 s.	57
Obrázek 38: Graf závislosti síla – posun sada PP 480 s old.	57
Obrázek 39: Graf závislosti síla – posun sada PVA ref.....	58
Obrázek 40: Graf závislosti síla – posun sada PVA 480 s.....	58
Obrázek 41: Graf závislosti síla – posun sada PVA 480 s old.....	59
Obrázek 42: Graf závislosti síla – posun sada PVA H2 480 s.	59
Obrázek 43: Graf závislostí síla – posun PP vláken.....	60
Obrázek 44: Graf závislostí síla – posun PVA vláken.	61
Obrázek 45: Průměrně pevnosti v tahu ohybem oproti referenčním vzorkům v %.	72

8. Seznam tabulek

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti vybraných vláken. [13].....	18
Tabulka 2: Základní typy průmyslově používaných polymerních vláken. [24].....	20
Tabulka 3: Přehled stavebních materiálů s obsahem azbestu, které byly v ČR v minulosti vyráběny. [56].....	23
Tabulka 4: Užití přírodních vláken v polymerních kompozitech automobilkami. [21]	24
Tabulka 5: Vlastnosti použitých vláken. [57, 58]	37
Tabulka 6: Značení plazmatické modifikace.....	38
Tabulka 7: Ztráty hmotnosti vláken kyslíkovou plazmou	39
Tabulka 8: Ztráty hmotnosti vláken vodíkovou plazmou	40
Tabulka 9: Smáčivost vláken kyslíkovou plazmou měřená nepřímou metodou Packed cell v závislosti na délce plazmatických úprav a typu vláken.....	44
Tabulka 10: Smáčivost vláken vodíkovou plazmou měřená nepřímou metodou Packed cell v závislosti na délce plazmatických úprav a typu vláken.....	45
Tabulka 11: Průměrné hodnoty smáčivosti vláken.	45
Tabulka 12: Změna hmotnosti vody ve vzorku oproti referenčním vzorkům.....	45
Tabulka 13: Zvolené plazmatické modifikace pro výrobu zkušebních těles.	47
Tabulka 14: Složení zkušebních vzorků.	48
Tabulka 15: Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti v tahu ohybem.	52
Tabulka 16: Pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku vzorků a procentuální porovnání. ...	63
Tabulka 17: Pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku vzorků a procentuální porovnání. ...	63
Tabulka 18: Dynamické moduly pružnosti vzorků a procentuální porovnání.....	64
Tabulka 19: Dynamické moduly pružnosti vzorků a procentuální porovnání.....	64
Tabulka 20: Vlastnosti vláken vybraných odborných prací. [24, 31].....	66
Tabulka 21: Ztráty hmotnosti vláken vybraných odborných prací kyslíkovou plazmou. [24, 31]	67
Tabulka 22: Změna smáčivosti vláken modifikovaných kyslíkovou plazmou oproti referenčním vláknům u vybraných odborných prací. [24, 31].....	67
Tabulka 23: Porovnání výsledků vybraných odporných prací zabývajících se plazmatickou modifikací povrchů vláken. [24, 31, 62-65]	70