

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební



Pevnost vláknocementových kompozitů a
jejich rozhraní za zvýšené teploty

Strength of fibre-reinforced cementitious
composites and their interface at elevated
temperature

HABILITAČNÍ PRÁCE

Ing. Josef Novák, Ph.D.

Praha 2023

Název habilitační práce:

Pevnost vláknocementových kompozitů a jejich rozhraní za zvýšené teploty

Název habilitační práce anglicky:

Strength of fibre-reinforced cementitious composites and their interface at elevated temperature

Autor: Ing. Josef Novák, Ph.D.

Pracoviště: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7,166 29 – Praha 6 Dejvice

Obor: Teorie stavebních konstrukcí a materiálů

Rok: 2023

Místo: Praha

Poděkování

Mé poděkování patří kolegům, kteří mi během mé vědecké kariéry umožnili podílet se na výzkumných projektech a zároveň mě obohatili o své rozsáhlé zkušenosti a neocenitelné rady při řešení pracovních úkolů. Mimořádné poděkování si zaslouží i má rodina, zejména manželka a obě dcery, které mi byly během zpracování habilitační práce neocenitelnou oporou.

Myšlenky a poznatky prezentované v habilitační práci by nevznikly bez podpory grantových agentur, které svými finančními prostředky podpořily následující projekty:

- GACR 17-23067S – Charakterizace chování betonu vystaveného výbuchu a následnému požáru (2017-2019)
- GACR 15-19073S – Modely ocelobetonových sloupů s rozptýlenou výztuží při požáru (2015-2017)
- TH03010172 – Výzkum a vývoj 3D tiskárny pro použití ve stavebnictví (2018-2020)
- TH01030746 – Vývoj technologické linky pro materiálové využití odpadních termoplastů a stavebních recyklátů ve výrobě stavebních prvků z polymerbetonu (2017-2019)
- TH02010375 – Vývoj prefabrikovaných dílců určených pro výstavbu montovaných letištních drah (2017-2019)
- SGS19/034/OHK1/1T/11 - Numerické modelování požáru a výbuchu a jejich vlivu na betonové konstrukce (2019)
- SGS18/038/OHK1/1T/11 - Softwarová podpora pro analýzu betonových konstrukcí zatížených běžným i mimořádným zatížením (2018)
- SGS15/136/OHK1/2T/11 - Modely chování betonových kompozitů při silovém a nesilovém zatížení (2015 – 2016)
- SGS13/120/OHK1/2T/11 - Cementové kompozity v extrémních podmínkách (2013 – 2014)

Abstrakt

Habilitační práce se věnuje problematice chování vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty. V úvodu podává ucelený přehled o reakci základních složek betonu na zvýšenou teplotu, aby si čtenář mohl vytvořit představu o jejich možné synergie a interakci. Následuje souhrn informací k různým režimům testování s důrazem na způsoby ohřevu a ochlazení, které se využívají při přípravě zkušebních těles. Hlavní část práce se věnuje studii dopadu vláken na pevnost za zvýšené teploty a residuální pevnost cementových kompozitů. Formulované hypotézy, tvrzení a závěry se opírají o data z odborných publikací a vlastní zkušenosti získané z dlouhodobého bádání zaměřeného na nedostatečně objasněné oblasti řešené problematiky. Shromážděné spektrum experimentálních dat umožnilo validovat vztahy vyvinuté pro predikci pevnosti vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty. V neposlední řadě se práce zabývá i pevností rozhraní vrstev zhotovených aditivní technologií, která postupně nachází své uplatnění v praxi. Aby se dosáhlo spolehlivého návrhu tištěných prvků, podrobná znalost chování rozhraní za různých podmínek bude v budoucnu zcela klíčová. Závěry práce mohou být přínosné při návrhu složení vláknocementových kompozitů a posuzování jejich chování za zvýšené teploty.

Klíčová slova

Pevnost, zvýšená teplota, rozhraní, vláknocementový kompozit, ohřev

Abstract

The habilitation thesis deals with the behaviour of fibre-reinforced cementitious composites at high temperatures. In the introduction, it presents a comprehensive overview of the fire response of basic concrete components to high temperatures so that a reader can get a view about their possible synergy and interaction. Subsequently, the summary of information is provided on various testing regimes with an emphasis on the heating and cooling methods used during the preparation of test specimens. The main part is focused on the study of the impact of fibres on strength at elevated temperatures and the residual strength of cementitious composites. Formulated hypotheses, statements and conclusions are based on data from technical publications and the author's experience gained from long-term research focused on unexplained topics in that field. The broad spectrum of experimental data enabled the author to validate the relationships developed for the prediction of the strength of fibre-reinforced cementitious composites at elevated temperatures. Last but not least, the thesis also deals with the interface strength of cement-based layers made with additive technology whose popularity is slowly increasing in practice. To achieve a reliable structural design of printed structures, detailed knowledge of the behaviour of the interface under different conditions will be crucial in the future. The conclusions drawn in the thesis can be beneficial for the composition design of fibre-reinforced cementitious composites and the assessment of their behaviour at elevated temperatures.

Key words

Strength, elevated temperature, interface, fibre-reinforced cementitious composite, heating

Nomenklatura

FITZ	<i>Mezifázová přechodová zóna vláken (angl. fibre interfacial transition zone)</i>
HSC	<i>Vysokopevnostní beton (angl. high strength concrete)</i>
HVFA	<i>Vysoký objem fluidního popílku (angl. high volume fly ash)</i>
ITZ	<i>Mezifázová přechodová zóna (angl. interfacial transition zone)</i>
LITS	<i>Přetvoření od teploty při silovém přitížení (angl. load induced thermal strain)</i>
NSC	<i>Beton běžných pevností (angl. normal strength concrete)</i>
PITS	<i>Tečný prostor od účinků pórového tlaku (angl. pressure-induced tangential space)</i>
PP	<i>Polypropylen</i>
PVA	<i>Polyvinylalkohol</i>
UPV	<i>Rychlost šíření ultrazvuku (angl. ultrasonic pulse velocity)</i>

Seznam symbolů

d	<i>Průměr vlákna</i>
f	<i>Pevnost za běžné teploty</i>
f_0	<i>Počáteční zatížení</i>
f_T	<i>Pevnost za vysoké teploty</i>
L	<i>Délka vlákna</i>
M_z	<i>Modul zásaditosti</i>
T	<i>Teplota</i>
t_1	<i>Čas dosažení požadované (cílové) teploty na povrchu tělesa</i>
t_2	<i>Čas dosažení teplotní rovnováhy na tělese při ohřevu</i>
t_3	<i>Čas dosažení pokojové teploty na povrchu tělesa</i>
t_4	<i>Čas dosažení teplotní rovnováhy na tělese při ochlazení</i>
t_0	<i>Čas zahájení ohřevu</i>
T_0	<i>Požadovaná teplota (cílová teplota)</i>
V_f	<i>Objemový podíl vláken ve směsi</i>

Obsah

1 Úvod	1
2 Složky betonu	3
2.1 Pojivo.....	3
2.1.1 Nasycený stav.....	4
2.1.2 Nenasycený stav.....	5
2.2 Kamenivo.....	6
2.3 Voda.....	9
2.4 Přísady.....	10
2.5 Příměsi.....	11
2.5.1 Inertní příměsi.....	12
2.5.2 Aktivní příměsi.....	12
3 Metodika testování	15
3.1 Režim testování.....	15
3.2 Metodika ohřevu a ochlazení.....	17
3.2.1 Laboratorní zařízení.....	18
3.2.2 Ohřev.....	19
3.2.3 Ochlazení.....	23
3.2.4 Ztráta teploty těles zkoušených za vysoké teploty.....	25
3.3 Kvazistatické zkoušky.....	26
4 Pórový tlak	28
4.1 Vývoj pórového tlaku.....	29
4.1.1 Opatření pro snížení pórového tlaku.....	30
5 Pevnost cementových kompozitů	33
5.1 Nevztužené cementové kompozity.....	33
5.1.1 Chemické a fyzikální jevy za zvýšené teploty.....	33
5.1.2 Mechanické vlastnosti.....	37
5.1.2.1 Pevnost v tlaku.....	37
5.1.2.2 Pevnost v tahu.....	40
5.1.3 Vliv ochlazení.....	41
5.2 Residuální pevnost vláknocementových kompozitů.....	42
5.2.1 Cementové kompozity ztužené syntetickými vlákny.....	42
5.2.1.1 Pevnost v tlaku.....	49
5.2.1.1.1 <i>Krychelná pevnost</i>	49
5.2.1.1.2 <i>Válcová pevnost</i>	51

5.2.1.2	Pevnost v tahu	53
5.2.2	Cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny	56
5.2.2.1	Krychlená pevnost v tlaku.....	56
5.2.2.2	Válcová pevnost v tlaku	63
5.2.2.3	Pevnost v tahu	65
5.2.3	Cementové kompozity s hybridním vyztužením	67
5.2.4	Cementové kompozity ztužené alternativními vlákny	73
5.3	Pevnost vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty.....	74
5.3.5	Vliv pórového tlaku	78
5.4	Vztahy pro predikci pevnosti.....	81
5.4.1	Residuální pevnost	83
5.4.2	Pevnost za zvýšené teploty	88
6	Rozhraní tištěných vrstev.....	92
6.1	Časově závislá pevnost za běžné teploty	94
6.1.1	Namáhání tištěných stěnových prvků	94
6.1.2	Metodika zkoušení.....	96
6.1.2.1	Zkušební tělesa.....	96
6.1.2.2	Tištěná zkušební tělesa.....	97
6.1.2.3	Normovaná zkušební tělesa.....	98
6.1.3	Zkoušky pevnosti v tahu	99
6.1.3.1	Zkouška v osovém tahu	99
6.1.3.2	Zkouška v příčném tahu	100
6.1.3.3	Zkouška přídržnosti (pull-off test)	101
6.1.3.4	Zkouška v tahu za ohybu.....	101
6.1.4	Zkoušky pevnosti ve smyku	102
6.2	Časově-závislá pevnost za běžné teploty.....	102
6.2.5	Opatření pro zvýšení pevnosti	103
6.3	Časově závislá pevnost za zvýšené teploty	105
7	Závěr	107

Požár osmi patrové budovy Hengzhou v Číně v roce 2003 trval tři hodiny, než došlo k částečnému kolapsu budovy. Příčinou bylo odprýskávání betonu a rapidní pokles únosnosti železobetonových sloupů prvního podlaží, kde došlo k intenzivnímu rozvoji požáru. Ten dosahoval místy až 1 300°C zejména díky skladu chemických látek, které umocnily sílu požáru. V okamžiku, kdy byla dosažena únosnost sloupů prvního podlaží, došlo k jejich kolapsu a pádu vrchní stavby. Neštěstí si vyžádalo smrt dvaceti hasičů a dalších šestnáct bylo zraněno.



Jeden z největších požárů v Brazílii nastal v roce 1987 ve výškové administrativní budově CESP v Sau Paulu, která se skládala ze dvou bloků. Po dvou hodinách od okamžiku, kdy se objevil požár v druhém bloku, došlo ke kolapsu jeho železobetonové nosné konstrukce. Příčinou pádu bylo protažení průvlaků vyvolané vysokou teplotou od požáru a pokles mechanických vlastností betonu a betonářské výztuže. Výsledkem bylo porušení podpůrných sloupů, které vedlo k progresivnímu kolapsu konstrukce. I přes relativně rychlý průběh se celá mimořádná událost obešla bez ztrát na životech.

V roce 2008 byla Fakulta Architektury na Universitě technologie v Delftu, Holandsku, vystavena požáru, který trval sedm hodin a vedl ke kolapsu hlavní části železobetonové konstrukce. Za vznikem požáru stojí zkrat kávovaru, který se nacházel v šestém podlaží objektu. Hlavní příčinou pádu železobetonové konstrukce bylo odprýskávání a ztráta pevnosti betonu včetně betonářské výztuže. Při neštěstí došlo k bezpečné evakuaci všech osob a rozsáhlý požár si nevyžádal vážná zranění nebo dokonce ztráty na lidských životech.



1 Úvod

Požární odolnost nosných konstrukcí se odvíjí od reakce samotného materiálu (výrobku) na oheň a jeho chování za zvýšené teploty. V tomto směru je beton považován za nehořlavý výrobek, který nijak nepřispívá k požáru. Tato skutečnost může vyvolat dojem, že zabývat se chováním betonu za zvýšené teploty nedává příliš velký smysl. Podrobné studie požáru však ukázaly na problémy, které jsou ve značné konfrontaci s touto domněnkou. Jedná se především o tendenci cementových kompozitů k odprýskávání vyvolaném pórovým tlakem, který vzniká při ohřevu konstrukce. Důležitou roli hrají i mechanické vlastnosti, které se v závislosti na teplotě a složení směsi mění.

Předložená práce se věnuje problematice pevnosti cementových kompozitů ztužených vlákny za vysoké teploty. Prezentované závěry a hypotézy se opírají o zahraniční studie zařazené v podobě odborných publikací a článků ve vědeckých databázích a především o vlastní zkušenosti získané při řešení vědeckých úkolů. V úvodu se pozornost soustředí na popis dosavadních poznatků a zkušeností s chováním základních složek betonu za zvýšené teploty. Čtenář si tak může vytvořit představu o možné interakci a synergii jednotlivých složek betonu, díky čemuž může predikovat chování směsi na cementové bázi za vysoké teploty, anebo identifikovat příčiny takového chování.

Následně se práce zaměřuje na chování cementových kompozitů ztužených vlákny. Nejprve jsou podrobně objasněny režimy testování využívané při zkoušení mechanických vlastností v kombinaci s ohřevem těles. Důraz se klade na zkoušku residuální pevnosti bez přitížení, které patří k hojně využívaným ve vědecké sféře z důvodu nižších požadavků na laboratorní vybavení. Nedílnou součástí je i popis procesu ohřevu a ochlazení těles, kterým lze do určité míry ovlivnit výsledné vlastnosti testovaných kompozitů.

Analýza dat z experimentálních zkoušek cementových kompozitů s rozptýlenou výztuží je rozdělena do dvou ucelených částí zaměřených na pevnost za zvýšené teploty a residuální pevnost po ohřevu. Pozornost se především věnuje problematice měření pevnosti za zvýšené teploty, které může být ovlivněno pórovým tlakem s ohledem na typ a množství uplatněných vláken. V neposlední řadě je zkoumán vliv množství syntetických vláken, které se častokrát využívají v nekontrolovaném množství pro snížení rizika odprýskávání. Jejich obvykle nízká teplota tání má vliv na strukturu materiálu, kterou po svém vyhoření oslabují a tím i přispívají k rychlejší dehydrataci cementového kamene.

Široké spektrum experimentálních dat sloužilo pro validaci vztahů vyvinutých pro predikci pevnosti vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty. Zde se ukazuje, že v současné době lze využít převážně elementární vztahy vycházející z lineární regrese analýzy. Pokročilejší vztahy, které by zohledňovaly vliv vláken, příměsí nebo dalších důležitých aspektů prozatím chybí.

Závěr práce nabízí zběžný pohled do problematiky chování rozhraní vrstev zhotovených v krátkém časové odstupu za zvýšené teploty. Jedná se o zcela novou oblast betonových konstrukcí, které bude nezbytné věnovat zvýšenou pozornost, zejména s uplatněním aditivní technologie pro výstavby menších objektů. Reakce rozhraní na vysokou teplotu jako kritické oblasti tištěných konstrukcí bude patřit ke klíčovým faktorům z hlediska požární odolnosti konstrukce.

2 Složky betonu

Pro porozumění chování betonu a jeho reakce na zvýšené teploty je důležité se seznámit se základními poznatky o mikrostruktuře materiálu. Nejedná se ovšem o snadnou úlohu, protože beton se považuje za kompozitní stavební materiál, který se skládá z pojiva, plniva, vody, přísad, příměsí a případně i rozptýlené výztuže. Při působení zvýšené teploty dochází ke změnám vlastností jednotlivých komponentů, které díky synergii a vzájemné interakci ovlivňují konečné vlastnosti kompozitu. Složení a stejně tak výroba betonové směsi proto představuje zásadní roli z hlediska chování materiálu za požáru.

V současné době trh nabízí široké spektrum materiálů, které lze využít pro výrobu betonu. Stále se primárně využívají materiály získané z přírodních zdrojů, ale tlak na uplatnění druhotných surovin získaných z odpadního materiálu sílí. Betonové směsi se proto mohou skládat z různých komponentů, které na zvýšenou teplotu reagují odlišně, a navíc se vzájemně mohou ovlivňovat. Přesně predikovat chování betonu za zvýšené teploty lze proto považovat za složitou úlohu. I přes to, při dodržení určitých zásad a znalosti reakce jednotlivých složek betonu na oheň, lze navrhnout takové směsi, které budou disponovat lepší odolností proti zvýšeným teplotám [1].

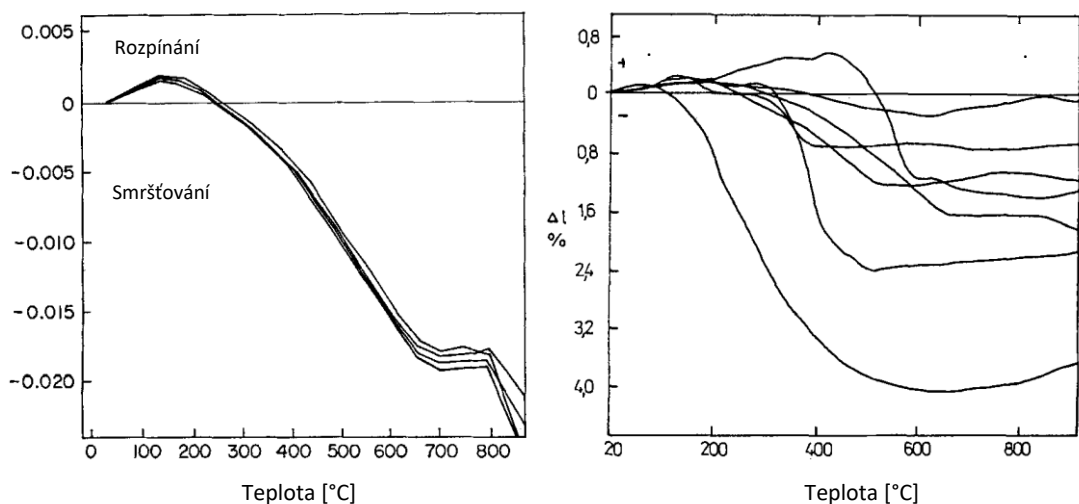
2.1 Pojivo

V dnešní době se lze setkat s různými typy betonů, které se odlišují použitým pojivem. Tato práce se výhradně soustředí na betony a malty na cementové bázi (obecně cementové kompozity), které se hojně využívají v betonovém stavitelství. Při hodnocení chování cementových kompozitů za zvýšené teploty hraje důležitou roli teplotní roztažnost a chemické procesy probíhající v cementu při ohřevu. Pozornost se věnuje především kompozitům na bázi portlandského cementu. Speciální hlinitanové cementy, které se využívají pro žáruvzdorné betony [2], se v práci rozebírají pouze okrajově.

Ačkoliv se na první pohled zdá zcela evidentní, že se cement bude s rostoucí teplotou lineárně rozpínat, není tomu tak. Důvodem je voda a vlhkost, která se v cementovém kameni přirozeně vyskytuje a s ohledem na její množství více či méně ovlivňuje přetvoření kamene. Při ohřevu dochází ke dvěma souběžným jevům [3], které souvisí s migrací vodní páry ve struktuře cementového kamene. U nevyzrálého cementového kamene může nastat situace, kdy nezhydratovaná cementová zrna přijdou do kontaktu se zkondenzovanou vodní párou nebo zvýšenou vlhkostí. Výsledkem je dodatečná hydratace cementového kamene, díky které dochází k jeho rozpínání. Tento proces lze spatřit zejména v počáteční fázi ohřevu. Druhý jev je spojován s úbytkem vody obsažené v cementovém kameni [4]. Ta se vlivem zvýšené teploty postupně odpařuje skrz pórovitou strukturu cementového kamene, u kterého následně dochází ke smršťování. Sloučením obou jevů se získá výsledná hodnota přetvoření (Obr.1). Z vývoje přetvoření vyplývá, že v počáteční fázi ohřevu do cca

250 °C dochází u cementového kamene zejména k jeho rozpínání (v porovnání s původním stavem) a následně při dalším růstu teploty převládá smršťování od vysychání cementového kamene, v obou případech v řádu jednotek promile.

Při zahřívání cementového kamene dochází k uvolnění vodní páry, která se ve formě vody přirozeně nachází v cementovém kameni. Ačkoliv primárně odchází přes povrch tělesa ven z materiálu, díky teplotnímu gradientu na průřezu proudí pára rovněž i do studeného jádra prvku, kde dochází k její kondenzaci. S ohledem na vlhkost a permeabilitu cementového kamene, rychlost ohřevu a velikost prvku mohou při ohřevu nastat dva typy hygro-termálního vývoje – nasycený stav (angl. saturated state, sealed state) a nenasyčený stav (angl. unsealed state), které ovlivňují reakci cementu na zvýšenou teplotu včetně jeho mechanických vlastností [5].



Obr. 1 Vývoj přetvoření cementového kamene (vlevo) [4] a jeho minerálů v závislosti na teplotě (vpravo) ¹ [3]

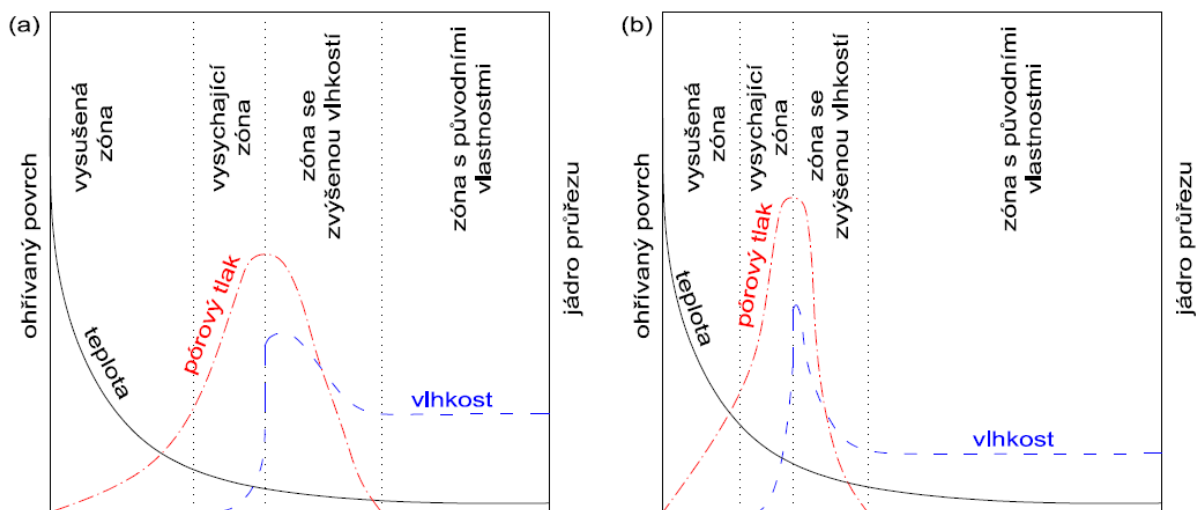
2.1.1 Nasycený stav

Riziko nasyceného stavu hrozí zejména u masivních konstrukcí, cementového kamene s nízkou permeabilitou, vysokou rychlostí ohřevu a zvýšenou vlhkostí. Všechny tyto aspekty negativně ovlivňují migraci vodní páry z materiálu. Vodní pára se postupně kumuluje uvnitř cementového kamene až do okamžiku, kdy vznikne vodní clona (angl. moisture clog). Ta funguje jako bariéra při transportu vodní páry a zároveň v její blízkosti dochází k nárůstu pórového tlaku, který může vést až k porušení zahřívajícího prvku (Obr.2).

Na druhou stranu může vodní clona pozitivně ovlivnit vývoj mechanických vlastností cementu za zvýšené teploty. Zamezuje totiž progresivnímu vysušení cementového kamene, který se tím udržuje v hydratovaném stavu. U částečně zhydratovaného cementového kamene může následně nastat dodatečná hydratace zbylých

¹ (1) C_3H , (2) β - C_2S , (3) C_3A , (4) C_4AF , (5) cementový kámen, (6) $Ca(OH)_2$, (7) etringit

nezhydratovaných zrn. Při dostatečné vlhkosti, optimální úrovni pórového tlaku a vhodném C/S poměru, tedy poměru oxidu vápenatého CaO a oxidu křemičitého SiO₂, [5] se může za zvýšené teploty vytvářet tobermorit, který se považuje za hlavní minerál přispívající k lepším mechanickým vlastnostem cementového kompozitu [6]. Nárůst pevnosti lze zaznamenat v počáteční fázi zahřívání při teplotě nad 100 °C zejména u cementů s nízkým C/S poměrem menším než jedna. Naopak zhoršení mechanických vlastností lze očekávat u cementů s poměrem C/S vyšším než 1,5 [5, 7], kdy místo tobermoritu vznikají slabé C₂S hydráty mající negativní vliv na mechanické vlastnosti.



Obr. 2 Typický vývoj pórového tlaku a vlhkosti na ohřivaném průřezu z běžného betonu (a) a vysokopevnostního betonu (b) [5]

2.1.2 Nenasycený stav

Při ohřevu cementového kamene s vyšší permeabilitou, případně nižší počáteční vlhkostí nebo rychlostí ohřevu, dochází k efektivní migraci vodní páry mimo těleso. Podmínky, ve kterých se cementový kámen nachází, se proto výrazně liší od nasyceného stavu. Místo možné dodatečné hydratace tak u cementového kamene dochází k jeho rychlé dehydrataci a rozkladu. Degradace se projevuje již při nižších teplotách, kdy se odpařuje zbylá volná voda, ale zejména při vyšších teplotách, kdy se postupně ztrácí voda fyzikálně a chemicky vázaná [4].

V mezních případech může dekompozice cementového kamene spojená se ztrátou chemicky vázané vody započít již za teploty 80 °C a probíhat v různé míře až do teploty 850 °C, kdy lze proces dekompozice považovat za ukončený. Během procesu dochází k rychlejší degradaci a ztrátě pevnosti, kdy se s rostoucí teplotou vypařuje chemicky vázaná voda a tobermorit se rozkládá na Belit (β -dikalciumsilikát β C₂S) a β -wollastonit (β CS), přičemž β C₂S je schopen reagovat při ochlazení materiálu za přítomnosti vlhkosti a obnovit původní vazby [2]. Při odpařování chemicky vázané

vody za teploty 400 °C rovněž dochází k rozkladu CaOH_2 (hašené vápno, vápenný hydrát) na CaO (pálené vápno) a H_2O , který kulminuje okolo teploty 500 °C a probíhá až do teploty 600 °C. Při následném ochlazení a kontaktu s vodou navíc dochází k hašení vápna, které s sebou přináší významné nabývání na objemu až v desítkách procent [5, 8]. Výsledkem může být zvýraznění degradace cementového kamene způsobené napjatostí uvnitř jeho struktury.

2.2 Kamenivo

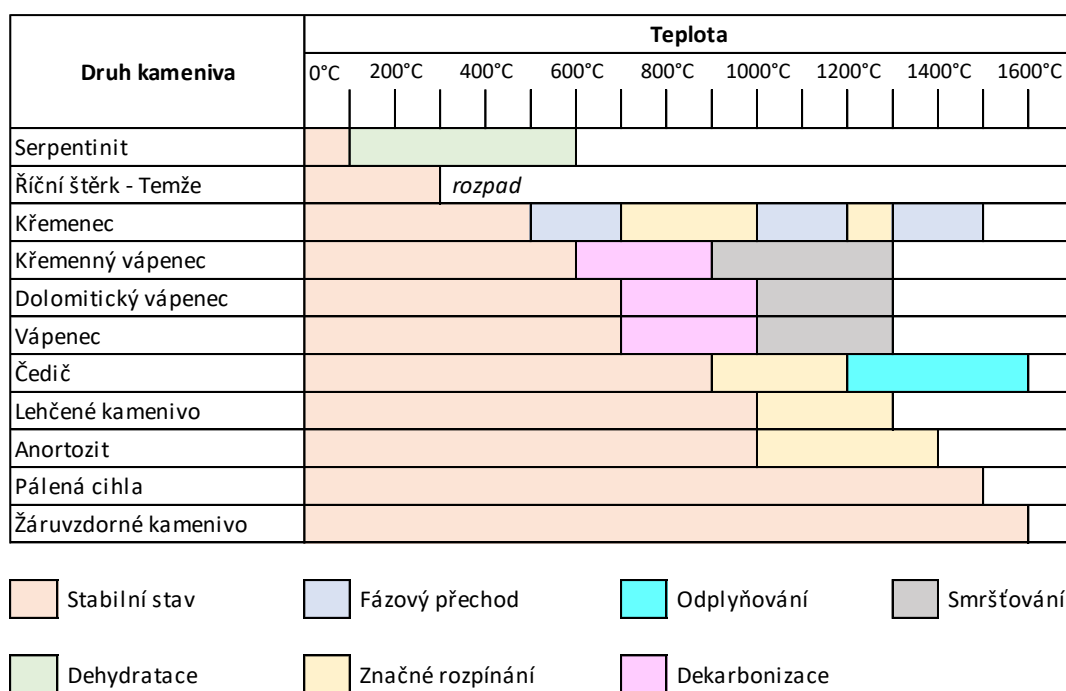
Chování betonu za zvýšené teploty se rovněž odvíjí od zastoupeného kameniva. Důvodem je skutečnost, že kamenivo tvoří 50–75 % objemu materiálu [9]. Ve stavebnictví se v současné době stále nejvíce využívá přírodní kamenivo, které lze rozdělit do dvou základních skupin – křemičité kamenivo a vápencové kamenivo [10]. V určitých případech se rovněž používá umělé kamenivo a stále větší tlak je na to, aby se v maximální možné míře využívalo kamenivo recyklované. Při volbě kameniva pro betony s rizikem zatížení od účinků teploty v podobě požáru nebo obecně vyšších teplot je zapotřebí zohlednit několik faktorů. Kamenivo musí mít optimální tvar, drsnost povrchu a reaktivní oxid křemičitý pro lepší spojení s cementovým kamenem. Navíc musí být stabilní při vyšších teplotách a mít nízký součinitel teplotní roztažnosti, aby byla při vyšších teplotách v co největší míře zachována teplotní roztažnost s cementovým kamenem [1, 2].

V betonovém průmyslu se převážně využívá křemičité kamenivo, mezi které patří křemenec, žula (granit), pískovec a flint (pazourek). Tato skupina kameniva má horší teplotní stabilitu, protože obsahuje vysoké množství oxidu křemičitého SiO_2 (křemene), u kterého při zahřívání dochází k výrazným fyzikálním změnám (Tab.1). Stabilní zůstává do teploty 575 °C, při které dochází ke změně krystalové soustavy, kdy se nižší křemen (α - křemen) mění na vyšší křemen (β - křemen). Tato změna je doprovázena nárůstem objemu kameniva až o 5,7 % [5].

Za další ucelenou skupinu lze považovat vápencové kamenivo, do kterého lze zařadit především vápenec a dolomit. Jedná se o skupinu kameniva, která je tepelně stabilní i při vyšších teplotách. K prvním změnám dochází až okolo teploty 700 °C, kdy dochází k termickému rozložení uhličitanu vápenatého (CaCO_3) za vzniku oxidu vápenatého (CaO) a oxidu uhličitého (CO_2). Vysoké množství plynu CO_2 , které obvykle při celém procesu vzniká, může v rozmezí teplot 700 °C a 900 °C zvýšit pórový tlak uvnitř struktury. Chemický proces simuluje dobře známé pálení vápna, které se považuje za endotermickou reakci. Při ní dochází ke spotřebě tepla a zpomalení ohřevu materiálu [11]. Doba, po kterou je materiál schopen odolávat vyšší teplotě, se tím prodlužuje. Ve fázi ochlazování ovšem volné vápno reaguje s okolní vlhkostí, čímž dochází ke vzniku hašeného vápna $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a zhoršení původních vlastností materiálu [5].

Z hlediska chemické a fyzikální stability za vysoké teploty se nabízí využívat umělé lehčené kamenivo získané z průmyslových odpadů (např. expandovaná struska) nebo přímo vyráběné (např. Liapor dříve Keramzit) pro uplatnění v betonovém stavitelství. Výroba takového kameniva probíhá za vysoké teploty převyšující 1 000 °C, což přispívá k nízké teplotní roztažnosti, tepelné vodivosti a lepší tepelné odolnosti [5]. Lehčené kamenivo disponuje ovšem vysokou pórovitostí a nasákavostí v řádu desítek procent [12]. Tato skutečnost může pozitivně ale i negativně ovlivnit vývoj pórového tlaku ve struktuře betonu. Při uplatnění takového kameniva je proto důležité dbát zvýšené opatrnosti.

Tab. 1 Tepelná stabilita vybraného kameniva včetně procesů vznikajících při zahřívání [5]



Speciální skupinou je žáruvzdorné kamenivo, které se nepoužívá pro výrobu běžných cementových kompozitů. Disponuje obvykle výbornou tepelnou stabilitou i při teplotách okolo 1 000 °C. Za žáruvzdorné kamenivo lze považovat především různé druhy umělého kameniva, např. liapor, pálené cihly, šamot nebo korund [13]. Ty se obvykle využívají v kombinaci se speciálními cementy (např. hlinitanové cementy) při výrobě žáruvzdorných cementových kompozitů.

Stále více se hovoří o využití recyklovaného kameniva do betonu, které by mělo přinést snížení negativních dopadů z výroby betonu na životní prostředí a zároveň omezit spotřebu postupně ubývajících přírodních zdrojů. Limitujícím aspektem ve využití druhotného kameniva získaného z odpadu je ovšem fakt, že se jeho vlastnosti významně liší v závislosti na kvalitě původního materiálu a prostředí, kterému byl vystaven.

Tab. 2 Pevnost a nasákavost vybraných druhů kameniva [14]

Hornina	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Nasákavost [hm. %]
Vyvřelé horniny			
Žula	120 – 240	10 - 35	0,2 – 1,2
Diorit	135 - 215	20 - 40	0,2 – 0,7
Gabri	150 - 225	25 - 60	0,2 – 0,5
Syenit	150 – 200	10 – 20	0,2 – 0,5
Čedič	250 – 400	15 – 25	0,1 – 0,3
Trachyt	60 – 70	5 – 7	1,0 - 2,0
Diabas	120 – 220	20 – 45	0,1 – 0,8
Pofyr, porfyrit	70 - 210	15 – 30	0,2 - 1,5
Usazené horniny			
Pískovec	30 – 80	3,8	4,0 – 8,5
Vápenec	40 -180	10 – 25	0,2 – 0,6
Dolomit	100 - 200	12 – 25	0,2 – 0,6
Břidlice	100 - 190	30 – 100	0,3 – 1,5
Přeměněné horniny			
Rula	120 - 250	24 – 50	0,1 – 1,2
Křemenec	300	-	0,5
Amfibolit	170 – 280	-	0,1 – 0,4
Mramor	75 – 145	12 – 26	0,2 – 1,0
Serpentinit	60 - 140	10 - 23	0,1 – 2,0

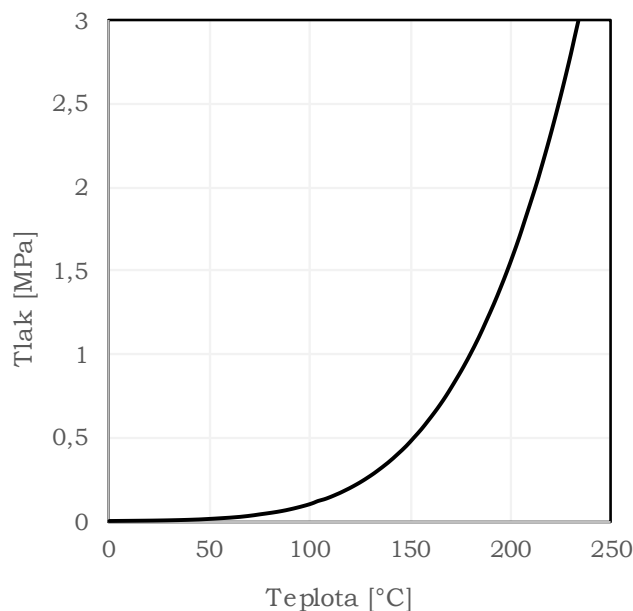
Důležitým hlediskem je i způsob a kvalita recyklace. Obecně lze konstatovat, že recyklované betonové kamenivo má v porovnání s přírodním kamenivem horší mechanické vlastnosti a zejména vyšší nasákavost z důvodu přítomného cementového kamene [15]. Ta se pohybuje v rozmezí od 2 % do 14 % hmotnosti v závislosti na velikosti zrna kameniva, přičemž s nižší velikostí roste nasákavost [16]. Určitým příslibem může být kamenivo z cihelného recyklátu, které disponuje dobrou teplotní stabilitou za vysoké teploty. Stejně jako v případě betonového recyklátu ovšem vykazuje zhoršené mechanické vlastnosti a vysokou nasákavost v řádu desítek procent (až 25 % hm.). Zvýšené množství volné vody v recyklovaném kamenivu následně může negativně ovlivnit vývoj pórového tlaku v cementovém kompozitu [17].

Významný vliv na chování cementových kompozitů za zvýšené teploty má i nasákavost kameniva [2]. V tomto ohledu se přírodní kamenivo téměř neliší, kdy se

jeho nasákavost pohybuje v desetinách procent (Tab. 2). Výjimkou je pouze pískovec, jehož nasákavost dosahuje až 8,5 %. Vysokou nasákavost v řádu desítek procent obecně vykazují lehčené kamenivo. Důležitým hlediskem je i chemicky vázaná voda obsažená v krystalové mřížce vybraných druhů kameniva. Typickým příkladem je kamenivo (Serpentinit, Limonit), které se obvykle používá pro svůj vysoký obsah vázané vody pro výrobu betonů pohlcujících radiaci. Při vyšších teplotách, např. v případě požáru, může dojít k progresivnějším zhoršení vlastností z důvodu dehydratace a narušení krystalové mřížky.

2.3 Voda

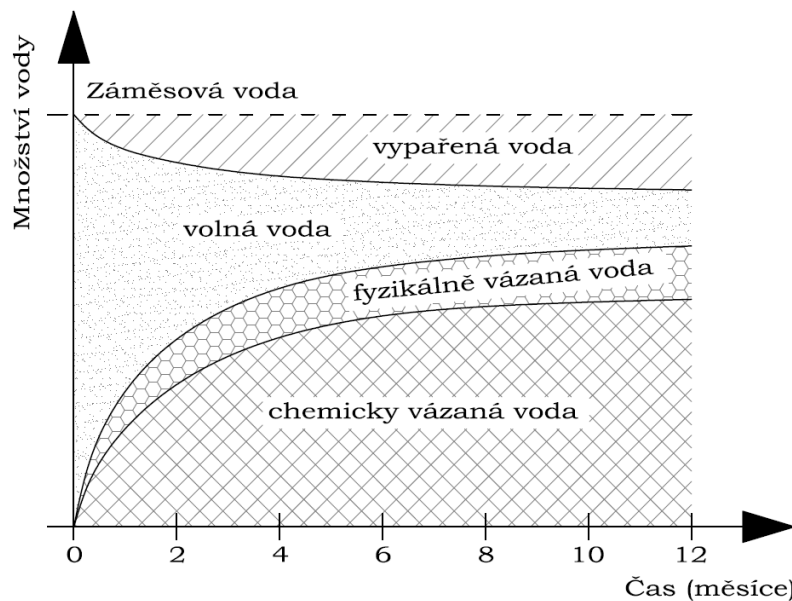
Skutečnost, že voda mění své vlastnosti v závislosti na teplotě, má zásadní vliv na chování betonu. Její objem se s rostoucí teplotou zvyšuje, kdy při ohřevu z pokojové teploty na teplotu 100 °C může dojít ke zvýšení objemu o téměř 2 % [18]. Důležitější roli hraje vztah mezi teplotou nasycené vodní páry a tlakem (Obr. 3), který exponenciálně roste. Tlak při teplotě 250 °C dosahuje hodnoty rovnající se pevnostem v tahu běžných betonů. Z hlediska požáru hraje důležitou roli i v jaké formě se voda ve struktuře betonu vyskytuje.



Obr. 3 Vztah mezi teplotou nasycené vodní páry a tlakem [19]

Záměsová voda se po smísení s cementem mění na vodu volnou, vodu fyzikálně vázanou a vodu chemicky vázanou [20, 21, 22]. Volnou vodu lze považovat za přebytečnou vodu, která nebyla spotřebována při hydrataci. Nachází se v pórech a její množství postupem času kolísá v závislosti na sorpci vlhkosti a odpařování vody ze struktury betonu. Ve většině případů její množství ovšem klesá (Obr. 4) a v okamžiku, kdy dojde k výraznému úbytku volné vody, započne odpařování vody

fyzikálně vázané [21]. Ta se nachází na povrchu hydratačních produktů díky kapilárním silám a povrchovému napětí. Během procesu hydratace se minerální fáze cementu přeměňuje na hydratační produkty (nové sloučeniny), které obsahují chemicky vázanou (krystalovou) vodu. Ta může být odstraněna pouze destrukcí materiálu doprovázenou změnou chemické struktury, a proto se při nižších teplotách běžně neodpařuje. Množství chemicky vázané vody roste se stářím [20].



Obr. 4 Schéma rozdělení vody v betonu v závislosti na čase [21]

2.4 Přísady

V dnešní době se přísady do betonu těší vysoké oblibě. Považují se za efektivní a cenově dostupný nástroj, jakým lze docílit lepších vlastností a chování cementových kompozitů v čerstvém i vytvrzeném stavu. Ačkoliv neexistují přísady primárně vyvinuté pro zlepšení reakce cementových kompozitů na zvýšenou teplotu, z podstaty působení běžně užívaných přísad lze usoudit jejich dopad na chování cementových kompozitů za zvýšené teploty. Poznatků o cementových kompozitech a jejich chování za vysoké teploty s uvažováním různého typu použité přísady není mnoho a spíše se jedná o ojedinělé studie. Vždy je ovšem nutné zvážit nejenom typ použité přísady, ale i její množství.

Hojně využívanými přísadami do betonu jsou superplastifikátory, popř. plastifikátory, které umožňují snížit množství záměsově vody při zachování zpracovatelnosti čerstvé směsi. Tím lze získat cementový kompozit s hutnější strukturou a nižším množstvím volné vody, která zůstává ve struktuře výsledného kompozitu. Z hlediska mechanického chování nelze ovšem jednoznačně určit, zda uplatnění plastifikátorů přinese výhody za zvýšené teploty stejně jako za běžné teploty. Hutnější struktura nemusí disponovat takovým množstvím kapilár a pórů

nezbytných pro efektivní odvod vodní páry z materiálu. Riziko spojené s kumulací vodní páry ve struktuře cementového materiálu a následným odprýskáváním tím roste. Na druhou stranu nižší množství volné vody v materiálu nemusí vyžadovat vysokou permeabilitu materiálu pro to, aby došlo ke kontrolovanému úniku vodní páry z materiálu.

Při výrobě cementových kompozitů se častokrát využívají i provzdušňovací přísady, které vytváří uzavřené póry rovnoměrně rozložené ve struktuře materiálu. Důležitým hlediskem při hodnocení efektivnosti provzdušnění je velikost vytvořených pórů, které by měly mít průměr v rozmezí 25 až 300 μm . Neméně důležitým aspektem je i vzájemný odstup vzduchových pórů, který je charakterizovaný součinitelem prostorového rozložení vzduchových pórů. Jeho hodnota by neměla přesáhnout 0,25 mm [23]. Přítomné póry ve struktuře materiálu tvoří volný prostor pro rozpínající se led a krystaly solí (rozmrazovací sůl, mořská sůl) při působení mrazu nebo slané vody [24]. Stejně tak mohou vzduchové póry tvořit prostor pro expanzi vodní páry za zvýšené teploty. Nezodpovězenou otázkou však zůstává, jakou míru provzdušnění musí cementové kompozity vykazovat, aby byl prostor pro expanzi vodní páry dostatečný. Rovněž je zapotřebí mít na paměti i skutečnost, že provzdušněním se získávají převážně uzavřené póry, které nevytváří všesměrné spojitě cestičky v podobě kapilár uvnitř struktury materiálu. Na jednu stranu má vodní pára prostor pro svoji expanzi, ale zároveň efektivita jejího odpaření mimo prostor materiálu se nezlepšuje. Při nízkém provzdušnění tak může nastat kritická situace, kdy každý uzavřený pór bude fungovat jako tlaková nádoba, ve které se s rostoucí teplotou bude rapidně zvyšovat pórový tlak až do okamžiku, kdy nastane odprýskávání betonu.

V menší míře se využívají hydrofobní přísady, které zlepšují schopnost betonu odpuzovat vodu působící pod nízkým tlakem (smáčením deštěm, absorpce vzdušné vlhkosti). Aplikací přísady dochází k vytvoření hydrofobní vrstvy na stěnách pórů a na povrchu cementového kompozitu, čímž se snižuje velikost a množství pórů včetně kapilár a tím i permeabilita cementové kompozitu [25]. Proces přirozeného odpařování a absorpce vlhkosti se zpomaluje. S ohledem na chování hydrofobní přísady lze usuzovat, že v době požáru bude cementový kompozit disponovat vyšším množstvím volné vody a nižší permeabilitou, což povede ke zvýšení pórového tlaku včetně rizika odprýskávání. Zvýšený pórový tlak může rovněž urychlit rozvoj mikrotrhlin ve struktuře materiálu a degradaci mechanických vlastností. Na druhou stranu celý proces dehydratace cementového kamene se zpomaluje tím, že odchod vodní páry přes hydrofobní strukturu materiálu je umožněn až při určité úrovni pórového tlaku.

2.5 Příměsi

V současné době existuje celá řada příměsí, které lze využít jako částečnou náhradu cementu bez toho, aniž by zásadně ovlivnily vlastnosti čerstvé směsi a vytvrzeného cementového kompozitu. Ve většině případů je toto tvrzení ale podmíněno tím, že

hodnota náhrady cementu bude dosahovat maximálně 5 % až 10 % hmotnosti cementu. Rozdělit je lze na příměsi inertní (typ I) a aktivní příměsi (typ II) [26].

2.5.1 Inertní příměsi

Hlavní úlohou inertních příměsí je zvýšit hutnost struktury cementových kompozitů bez toho, aniž by se zásadně podílely na procesu hydratace [27]. Tomu odpovídá jejich chemické a mineralogické složení, které neumožňuje významně se podílet na chemických reakcích a tím přispět k tuhnutí a tvrdnutí cementového kamene [26]. Spíše se jedná o jemné příměsi (např. kamenná moučka), které vhodně doplňují granulometrii ostatních složek betonu, čímž zlepšují konečné vlastnosti cementových kompozitů. Obvykle vysoký měrný povrch jemných příměsí vyžaduje větší množství záměsové vody nebo použití plastifikátorů při zachování původní zpracovatelnosti. V kombinaci s hutnější strukturou a nižší permeabilitou se zvyšuje riziko odprýskávání betonu a míra degradace materiálu působením vysokého pórového tlaku za vysoké teploty.

2.5.2 Aktivní příměsi

Naopak aktivní příměsi disponují takovým složením, které umožňuje aktivně se podílet na vývoji pevnosti cementového kamene. Z hlediska chování a způsobu působení se rozlišují příměsi latentně hydraulické a pucolánové [27], přičemž v jejich rozdělení hraje roli zastoupení minerálů [28]. V obou případech se využívají jako částečně náhrada cementu při zachování nebo dokonce zlepšení vlastností konečného cementového kompozitu. Mezi aktivní příměsi se řadí především křemičitý úlet, popílek a vysokopecní struska.

Křemičitý úlet (silika, mikrosilika a nanosilika) vzniká jako vedlejší produkt při výrobě křemíkových kovů nebo ferro-křemičitých slitin v elektrických obloukových pecích. Používá se jako příměs druhu II pro výrobu betonu, které se považují za latentně hydraulické a při reakci s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tvrdnou ve vodním prostředí. Jedná se o velmi jemnou příměs s mimořádně vysokým měrným povrchem a obsahem amorfního SiO_2 (Tab. 3), obzvláště v případě nanosiliky [23]. Díky své jemnosti vyplňuje prostor mezi zrny cementu [29] a tím zhutňuje cementový kámen [23]. Díky své přítomnosti snižuje pórovitost mezifázové přechodové zóny mezi kamenivem a cementovým kamenem (ITZ) a zároveň ji tím zpevňuje. Z důvodu vysokého měrného povrchu vyžaduje zvýšené množství záměsové vody, případně plastifikátoru, při zachování shodné zpracovatelnosti. Kombinace vyššího množství záměsové vody a nižší permeability může ale negativně ovlivnit vývoj pórového tlaku za vysoké teploty a s tím i riziko odprýskávání [30] a míru degradace uvnitř struktury materiálu [31].

Další významnou příměs představují popílky, které lze na základě mineralogického složení využít jako aktivní příměs (typ II) podle specifikace ČSN EN 450-1 [32], anebo i inertní příměs (typ I) v podobě fileru podle ČSN EN 12620+A1 [33]. Obecně se jedná o zplodinu vznikající při spalování pevných, zpravidla jemně mletých, paliv v

uhelných elektrárnách. Zachycuje se z kouřových plynů v mechanických a elektrických odlučovačích. Při spalování za vysoké teploty v rozmezí 1 400 °C – 1 600 °C lze obvykle získat popílek s pucolánovou aktivitou, a naopak při nižší teplotě spalování mezi 700 °C – 900 °C vzniká popílek s vyšším zastoupením CaO a SO₃ (fluidní popílek), které podle normativních doporučení umožňuje využít příměs pouze jako filer [174]. Popílky s pucolánovou aktivitou, která se projevuje schopností reagovat s oxidem vápenatým CaOH₂, přispívají především k dlouhodobému růstu pevnosti, který probíhá i po 28 dnech tvrdnutí. V menším zastoupení může příměs přispět ke zvýšení residuální pevnosti materiálu po tepelné expozici, zejména v případě vysokého zastoupení křemene (SiO₂), který za zvýšené teploty reaguje s vápencem (CaO) a společně tvoří tobermorit [31].

Tab. 3 Základní složení a vlastnosti příměsí v porovnání s cementem [23, 26, 34]

Látka/vlastnost	Cement	Popílek	Mikrosilika	Nanosilika	Struska
SiO ₂ [%]	18-24	40-60	80-99	100	30-43
Al ₂ O ₃ [%]	4-8	23-24	0,5-3,0	0	5-18
Fe ₂ O ₃ [%]	1-5	2-16	0,1-5,0	0	0,2-3
CaO [%]	61-69	0,8-8,5	0,7-2,5	0	0,6-8,5
Střední průměr zrn [μm]	10-20	10-30	0,1-0,3	0,01-0,04	-
Měrný povrch [m ² /g]	0,3-0,6	0,3-0,8	16-22	30-300	0,35-0,45
Měrná hmotnost [kg/dm ³]	3,1-3,13	2,15-2,45	2,22-2,40	2,2	-

Mezi hojně využívané příměsí patří vysokopeční struska. Ta vzniká z odpadové taveniny při výrobě železa ve vysokých pecích, přičemž její vlastnosti a mineralogické složení se odvíjí od způsobu ochlazení. Přirozeným ochlazením odpadové taveniny na vzduchu se získá objemově stálý inertní materiál, který se po drcení a třídění využívá jako běžný zásypový materiál nebo lehčené kamenivo do betonu. Naopak prudkým ochlazením vodou se zamezí krystalizaci taveniny a tím se stabilizuje její sklovitý charakter [26]. Vzniká granulovaná struska se zrny bohatými na hluboké otevřené póry. Následným semletím granulátu na směs s podobným měrným povrchem jako má cement lze získat latentně hydraulické vlastnosti. Rozhodujícím aspektem pro určení latentní hydraulicity je hmotnostní podíl získaný z následujícího vztahu (1),

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_2} \quad (1)$$

který zohledňuje mineralogické složení výsledné směsi, přičemž struska jako příměs s hydraulickou aktivitou vykazuje hodnoty M_z vyšší než jedna [26]. Cementové kompozity s příměsí v hmotnostním poměru s cementem do 40 % vykazují zvýšenou dlouhodobou pevnost v tlaku, lepší odolnost vůči smršťování, chloridům a vůči kyselinám [35]. Příměs rovněž přispívá k vyšší hutnosti cementového kompozitu a jeho odolnost za zvýšené teploty. Na druhou stranu se s vyšší hutností zvyšuje hodnota pórového tlaku a riziko vzniku nežádoucích mikrotrhlin ve struktuře materiálu, které mohou mít vliv na pevnost materiálu [31].

3 Metodika testování

Volba přístupu k testování cementových kompozitů za vysoké teploty je daleko složitější než za běžné teploty. Důvod spočívá v rozmanitosti prostředí, ve kterém se konstrukce, tedy i materiál, může během požáru nacházet. Nezbytné je proto rozlišovat mezi chováním ohřátého materiálu přímo v době požáru a chováním vychladlého materiálu po požáru. Z hlediska zkoušení hraje důležitou roli i okolnost, zda je materiál v době požáru vystaven napjatosti od silového zatížení (např. svislé nosné konstrukce). Při testování cementových kompozitů za zvýšené teploty je proto nezbytné zvolit vhodný režim (způsob) testování, který umožní získat poznatky o chování materiálu za konkrétních podmínek.

3.1 Režim testování

Již na konci 20.století byly ustáleny základní skupiny režimu testování pro zjištění mechanických vlastností cementových kompozitů za vysoké teploty. Hlavní rozdíl obou skupin spočívá v postupu zatěžování a ohřevu zkušebních těles [36, 37, 38, 2]. Z hlediska režimu testování lze rozdělit zkoušky do následujících dvou skupin:

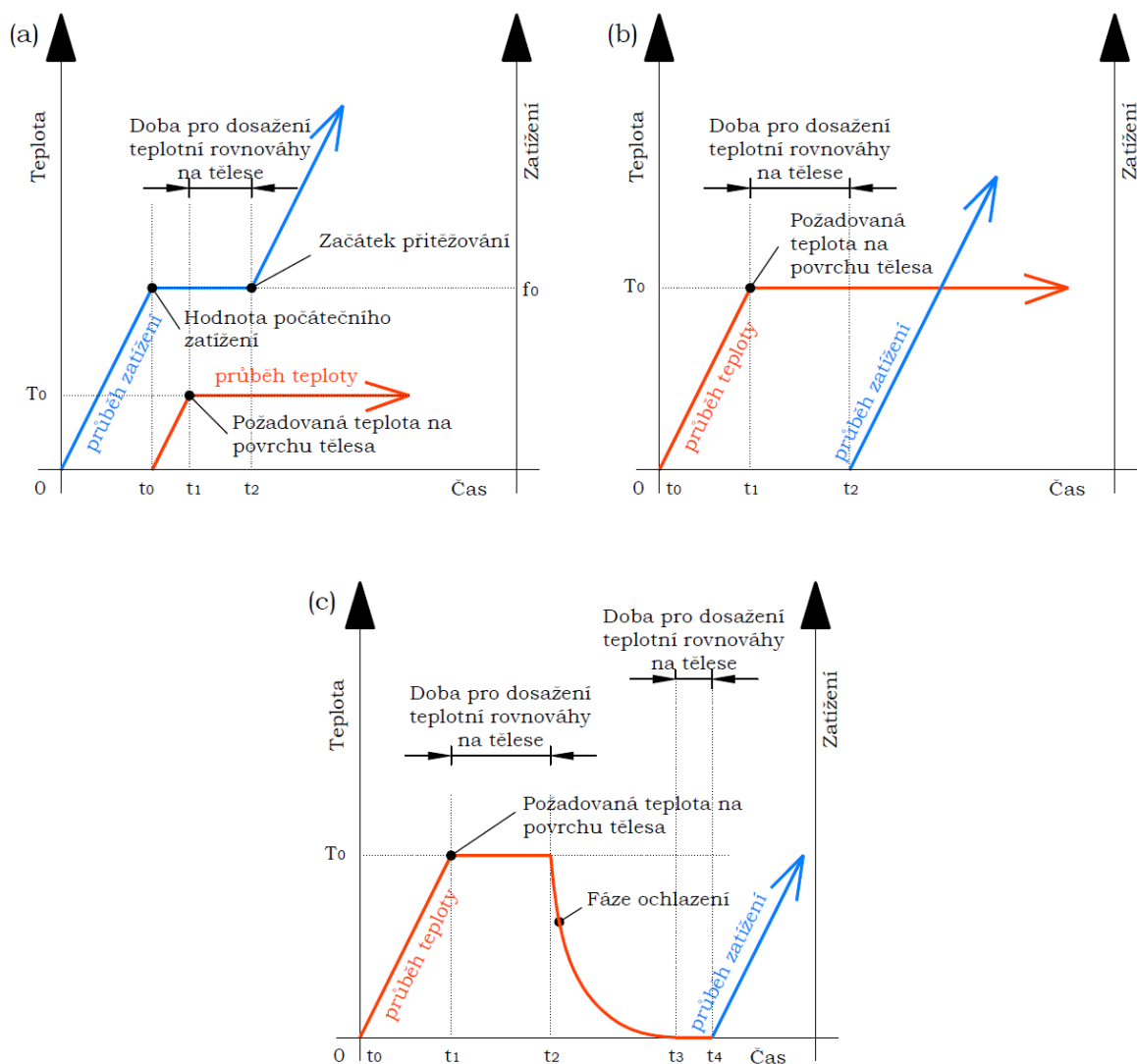
- 1) Zkoušky v ustáleném teplotním stavu (angl. steady-state tests). Jedná se o zkoušky, které se využívají pro stanovení chování a mechanických vlastností materiálu na tělesech v ustáleném teplotním stavu. V prvním kroku se těleso ohřeje na požadovanou teplotu. Ta je nedíve dosažena na povrchu tělesa, kde se následně drží konstantní až do okamžiku, kdy nastane teplotní rovnováha na tělese. V druhém kroku se na rovnoměrně ohřátém tělese, případně na tělese vychladlém na pokojovou teplotu, provede kvazi-statická zkouška, která může být řízena deformací nebo zatěžovací silou. Výsledkem zkoušky je závislost mezi napětím a přetvořením materiálu za konkrétní teploty.
- 2) Zkouška v přechodném teplotním stavu (angl. transient-state tests). Princip takových zkoušek spočívá v tom, že chování a mechanické vlastnosti materiálu se sledují na tělesech přitížených před samotným ohřevem. V počáteční fázi zkoušek se na těleso aplikuje zatížení, které vyvodí napětí odpovídající určité procentuální úrovni pevnosti testovaného materiálu za běžné teploty. Síla (napětí), alternativně deformace (přetvoření), na tělese se následně drží konstantní, zatímco probíhá ohřev tělesa konstantní rychlostí. S rostoucí teplotou dochází k degradaci materiálu a zhoršení jeho mechanických vlastností. Ukončení zkoušky nastává v okamžiku, kdy degradace mechanických vlastností testovaného materiálu dojde do takového stádia, že těleso není schopné dále odolávat počátečnímu silovému zatížení.

Uplatněním tohoto režimu testování lze simulovat spíše reálné chování konstrukcí než reakci samotného materiálu na oheň [38]. Zejména se jedná o svislé nosné prvky, které jsou v době požáru vystavené zatížení podporované nosné konstrukce. Významnou překážkou v uskutečnění zkoušek v

přechodném teplotním stavu jsou vysoké požadavky na technické vybavení, které musí být schopné souběžně provádět kvazi-statické zkoušky a ohřev tělesa.

S postupem času se pro testování cementových kompozitů za zvýšené teploty ustálily tři konkrétní zkoušky [39], které vychází z uvedených skupin režimů testování, přičemž podstata zkoušek je následující:

- 1) Zkouška s přitížením (angl. stressed test) probíhá způsobem, kdy se na těleso aplikuje silové zatížení, přičemž hodnota zatížení se obvykle volí v rozmezí od 10 % do 40 % pevnosti betonu za běžné teploty. Následně se počáteční zatížení (f_0) drží na konstantní hodnotě, zatímco probíhá ohřívání tělesa (Obr. 5a). Dosažením požadované teploty (T_0) na povrchu tělesa započne fáze rovnoměrného ohřívání tělesa. V okamžiku dosažení teplotní rovnováhy na tělese započne další přitěžování, které probíhá až do fáze porušení tělesa. S ohledem na průběh lze říci, že se jedná o zkoušku vhodnou pro ověření reálného chování materiálu v konstrukci. Vysoké požadavky na technické vybavení, které musí být schopné souběžně provádět kvazistatické zkoušky se samotným ohřevem ovšem limitují častější využití.
- 2) Zkouška bez přitížení (angl. unstressed test) se skládá pouze ze dvou fází. Nejdříve probíhá ohřev zkušební tělesa na požadovanou teplotu (T_0). Po jejím dosažení na povrchu tělesa se drží konstantní tak dlouho, dokud nenastane teplotní rovnováha na tělese. Následně se přímo na zahřátém tělese uskuteční kvazistatické zkoušky s cílem stanovit mechanické vlastnosti testovaného materiálu. Získané výsledky popisují chování materiálu přímo za požáru bez zohlednění počáteční napjatosti způsobené vnějším silovým zatížením. Stejně jako v předchozím případě se jedná ovšem o zkoušku, která se využívá spíše sporadicky z důvodu složitého způsobu testování.
- 3) Zkouška residuální pevnosti bez přitížení (angl. unstressed residual strength test) lze považovat za nejrozšířenější zkoušku z důvodu snadné proveditelnosti a relativně nízkých požadavků na technické vybavení. V první fázi se tělesa ohřejí stejným způsobem jako v předchozích případech, kdy se požadovaná teplota (T_0) drží na konstantní hodnotě tak dlouho, dokud nenastane na tělese tepelná rovnováha. Následně se těleso nechá přirozeně nebo řízeně ochladit na pokojovou teplotu a provedou se kvazistatické zkoušky na tělesech o pokojové teplotě po tepelné expozici. Tento způsob testování umožňuje popsat chování materiálu po požáru. Nikterak však nezohledňuje počáteční napjatost materiálu způsobenou silovým zatížením.



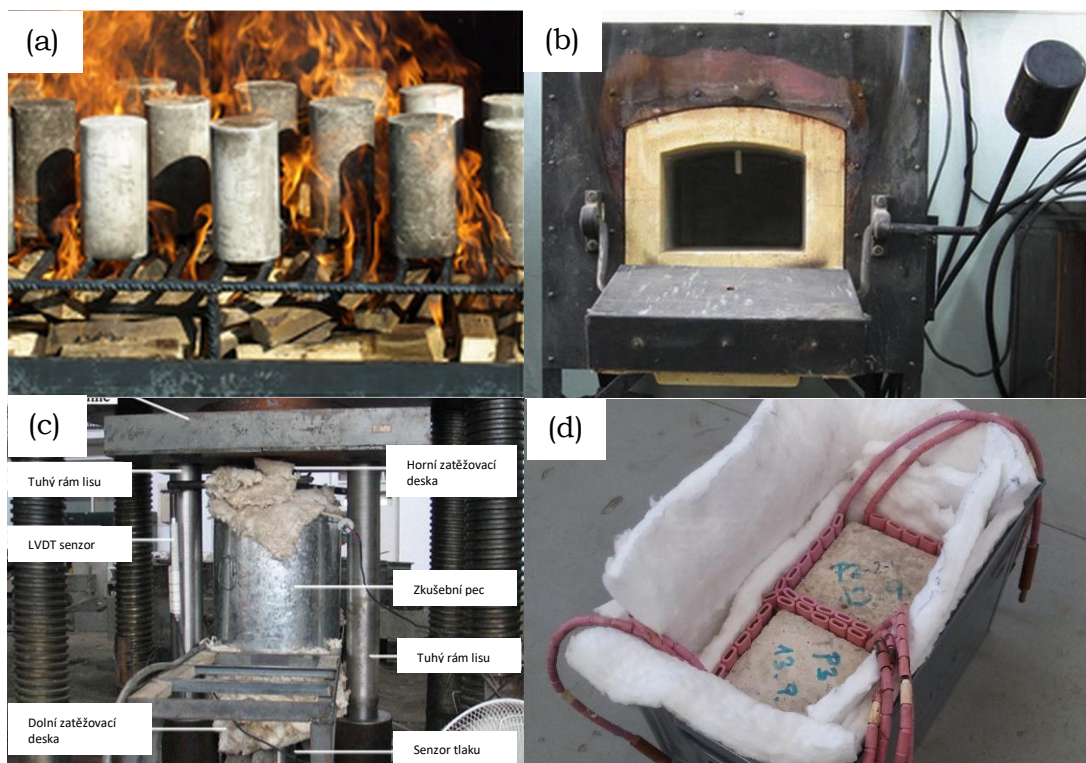
Obr. 5 Schéma průběhu zkoušek: (a) zkouška pevnosti s přitížením, (b) zkouška pevnosti bez přitížení, (c) zkouška residuální pevnosti bez přitížení

3.2 Metodika ohřevu a ochlazení

Nedílnou součástí testování termomechanických vlastností cementových kompozitů je ohřev tělesa. V této fázi experimentu může i drobné pochybení zásadně ovlivnit konečné výsledky. Proto je vždy důležité sledovat rozložení teploty na tělese a vývoj teploty v závislosti na čase. U řady experimentů lze silně polemizovat o tom, zda byla na tělesech dosažena teplotní rovnováha na požadované teplotní úrovni. Pokud se kvazistatické zkoušky provádí na vychladlých tělesech po předchozím ohřevu, důležitým faktorem při hodnocení mechanických vlastností je i způsob ochlazení tělesa.

3.2.1 Laboratorní zařízení

Hlavní nevýhoda ohřevu zkušebních těles v laboratorních podmínkách spočívá v nedostatečně výkonném zařízení, které by bylo schopné simulovat rychlý vývoj teploty při požáru [40]. Výjimkou jsou pouze velké sofistikované pece nebo menší, častokrát uměle vytvořené, pece [41, 42], které ohřívají tělesa na otevřeném ohni živěném plynem nebo tuhým palivem (Obr. 6a). Ačkoliv lze tímto způsobem docílit stejných podmínek jako při požáru, konkrétně vývoje teploty v závislosti na času, kontrola teploty a obecně řízení ohřevu jsou velmi obtížné. Tento způsob ohřevu se proto nabízí využít pro sledování tendence směsi k odprýskávání, která se odvíjí od teplotního gradientu na tělese a nevyžaduje dosažení teplotní rovnováhy na tělesech, jak je tomu při zkoušení mechanických vlastností.



Obr. 6 Příkladů ohřevu těles: (a) ohřev přímým ohněm [41], (b) elektrická pec [43], (c) lis propojený s elektrickou pecí [44] a (d) ohřev elektrickými keramickými dečkami [45]

Pro testování mechanických vlastností cementových kompozitů za zvýšené teploty se naopak nabízí využít elektrické pece [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] [55, 43, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63] [44, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72] [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81] menších velikostí, které umožňují jednoduše kontrolovat a regulovat vývoj teploty. Teplo se přenáší prouděním (konvekci) a sáláním (radiací), přičemž tělesa jsou ohřívána rovnoměrně ze všech stran. Tím lze snadno dosáhnout teplotní rovnováhy na tělese. Nicméně i elektrické pece disponují řadou omezení, na které je zapotřebí pamatovat. Typickým příkladem je rychlost ohřevu těles, která je obvykle limitována hodnotou $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a nedosahuje nárůstu teploty při skutečném požáru. Nelze proto plnohodnotně ověřit tendenci testované směsi k odprýskávání a

míru degradace materiálu spojenou s teplotním gradientem na tělese. Malé pece navíc umožňují souběžně ohřívat pouze menší množství těles a větší pece už jsou naopak velmi nákladné. Největší omezení ovšem spočívá v tom, že ohřev probíhá v izolovaném zařízení, a tudíž neumožňuje provádět zkoušky s přitížením (angl. stressed test), při kterých je těleso vystaveno napjatosti od vnějšího silového zatížení a zároveň zahříváno. Rovněž zkoušky bez přitížení prováděných na zahřátých tělesech (angl. unstressed test) nelze při uplatnění izolované pece jednoduše uskutečnit. Určitým řešením se jeví varianta, kdy se na zahřátých tělesech okamžitě po jejich vyjmutí z pece provedou kvazistatické zkoušky. Tento způsob ovšem vyžaduje nebezpečnou manipulaci s horkým tělesem při jeho umístění do lisu a rychlé provedení zkoušek, aby nedošlo k nadměrnému ochlazení tělesa. Během procesu hrozí i poškození lisu zvýšenou teplotou nebo explozivní porušení tělesa párovým tlakem ohrožující lidské zdraví. Speciálním typem zařízení jsou sofistikované lisy s připojenou elektrickou pecí [44, 65, 66]. Ty umožňují souběžně provádět ohřev a zatěžování tělesa bez většího rizika ohrožení lidského zdraví.

Výjimečně se lze setkat s alternativními přístupy k ohřevu zkušebních těles. Příkladem jsou plynové infrazářiče [82], které jsou cenově přijatelné. Další možností je využití elektrických keramických deček, které jsou součástí sofistikovaného systému [45, 83, 84, 85, 86]. Ten umožňuje připojit v jeden okamžik několik deček a efektivně řídit jejich ohřev včetně ochlazení s rychlostí až 1 000 °C/hod v případě systému Mannings HTC 70 kW [83]. Lze jím provádět ohřev i větších konstrukcí [87], což je nespornou výhodou tohoto přístupu k ohřevu. Tím, že se teplo mezi tělesem a keramickou dečkou přenáší kondukcí, musí být vždy mezi oběma komponenty přímý kontakt.

3.2.2 Ohřev

I přes to že rychlost a průběh ohřevu zkušebních těles patří k nejdůležitějším krokům při sledování mechanických vlastností cementových kompozitů za zvýšené teploty, v technické literatuře lze dohledat pouze ojedinělá doporučení a pravidla pro způsob ohřevu. Mezinárodní organizace RILEM vydala soubor předpisů určených pro experimentální stanovení mechanických vlastností betonů za zvýšené teploty. Doporučené hodnoty rychlosti a průběhu ohřevu (platí i pro ochlazení) se odvíjí od typu zkoušky, velikosti tělesa a stavu události (Tab. 4). Za základní stav se pro tyto účely považuje situace, kdy je konstrukce dlouhodobě vystavena nižší teplotě do cca 200 °C (např. reaktory) a za mimořádný stav, kdy je konstrukce krátkodobě vystavena výrazně vyšším teplotám (např. požár) [88]. Předpisy výhradně doporučují používat tělesa tvaru válce, a proto je rychlost ohřevu vždy vztažena k průměru válcového tělesa. Samotný ohřev těles probíhá ve dvou etapách. Nejdříve se těleso ohřeje na požadovanou teplotu zvolenou rychlostí ohřevu. Jakmile je požadovaná teplota na povrchu tělesa dosažena, započne fáze temperování. Během ní se teplota na povrchu

tělesa udržuje konstantní, zatímco na tělese plynule dochází k tepelné rovnováze. Ta nastane v okamžiku, kdy je teplota ve všech částech tělesa shodná.

Tab. 4 Doporučený způsob ohřevu pro různé zkoušky podle RILEM

Zkouška		Průměr válce [mm]	Rychlost [°C/min]	Temperování [min]
Pevnost v tlaku [89]		150	≤ 0,5	60 ± 5
		100	≤ 1,0	
		75	≤ 2,0	
		50	≤ 4,0	
Pevnost v tahu [90]		150	≤ 0,25	60 ± 5
		100	≤ 0,5	
		80	≤ 1,0	
		60	≤ 2,0	
Modul pružnosti [91]		150	≤ 0,5	60 ± 5
		100	≤ 1,0	
		80	≤ 2,0	
		60	≤ 4,0	
Teplotní roztažnost [92], dotvarování v přechodném teplotním stavu [93], dotvarování v ustáleném teplotním stavu [94], smršťování [95], omezení napětí [96] a relaxace [97]	Základní podmínky	150, 100	0,1	-
		80, 60	0,1	
	Mimořádné podmínky	150, 100	0,5	
		80, 60	2,0	

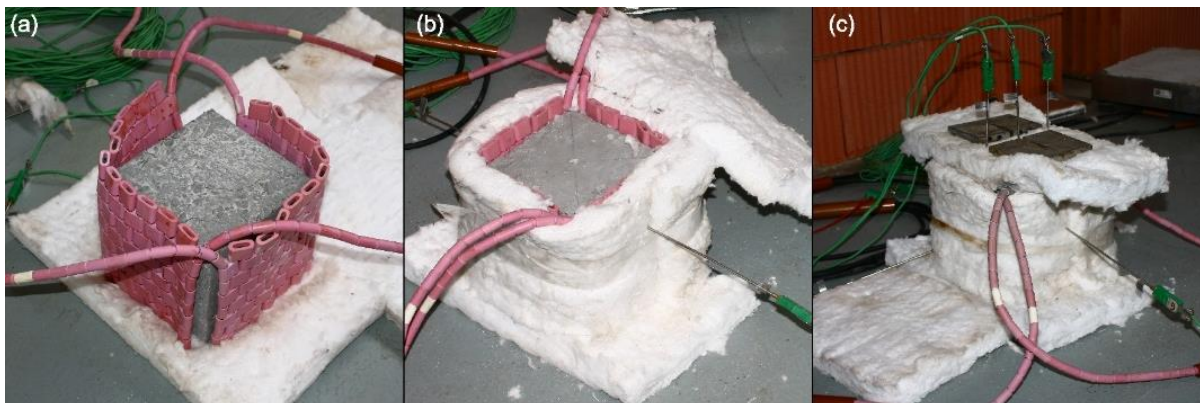
Ačkoliv jsou doporučení od organizace RILEM zcela jasná a přímočará, jejich využití pro vědecké experimenty není tak rozšířené. Jako hlavní důvod se nabízí velmi nízké rychlosti ohřevu, díky kterým může ohřev objemnějších těles na vysokou teplotu trvat několik hodin [48]. V případě válců s průměrem 150 mm a výškou 300 mm určených pro zkoušky pevnosti v tlaku může ohřev na 600 °C při respektování doporučení trvat 21 hodin včetně temperování.

Řada uskutečněných studií se proto zakládá na odlišné rychlosti ohřevu a době temperování, které se odvíjí od předchozí zkušenosti nebo numerických simulací. Při volbě konstantní rychlosti ohřevu hraje roli i výkon ohřívacího zařízení, a především riziko odprýskávání [78], které se zvyšuje s rostoucím teplotním gradientem. Běžně používaná hodnota rychlosti ohřevu se pohybuje v rozmezí od 2 °C/min [53, 63, 65] do 10 °C/min [49, 71] s dobou temperování od 60 min [49, 79, 81] do 180 min [54, 66, 69]. Existuje i řada případů [49, 51], u kterých se lze domnívat, že rychlost ohřevu

a doba temperování byly nastaveny takovým způsobem, který neumožnil dosáhnout tepelnou rovnováhu na tělese [57, 61].

Výjimečně lze narazit na studie, které pro ohřev využívají skokové změny teploty v okolí tělesa [98, 83]. Podstatou takového přístupu je na určitých teplotních úrovních vytvořit časový prostor pro odchod naakumulované vodní páry z materiálu a tím snížit riziko odprýskávání. Zároveň je snahou aplikovat co největší rychlost ohřevu, která se bude přibližovat reálnému vývoji teploty při požáru. Doba, po kterou se teplota udržuje konstantní na každé úrovni, se odvíjí od zkušenosti s materiálem a jeho reakce na ohřev, zejména se vizuálně kontroluje míra evaporace vodní páry z testovaného tělesa. Následně vzniká ovšem otázka, jakým způsobem stanovit potřebnou dobu ohřevu pro dosažení tepelné rovnováhy na tělese.

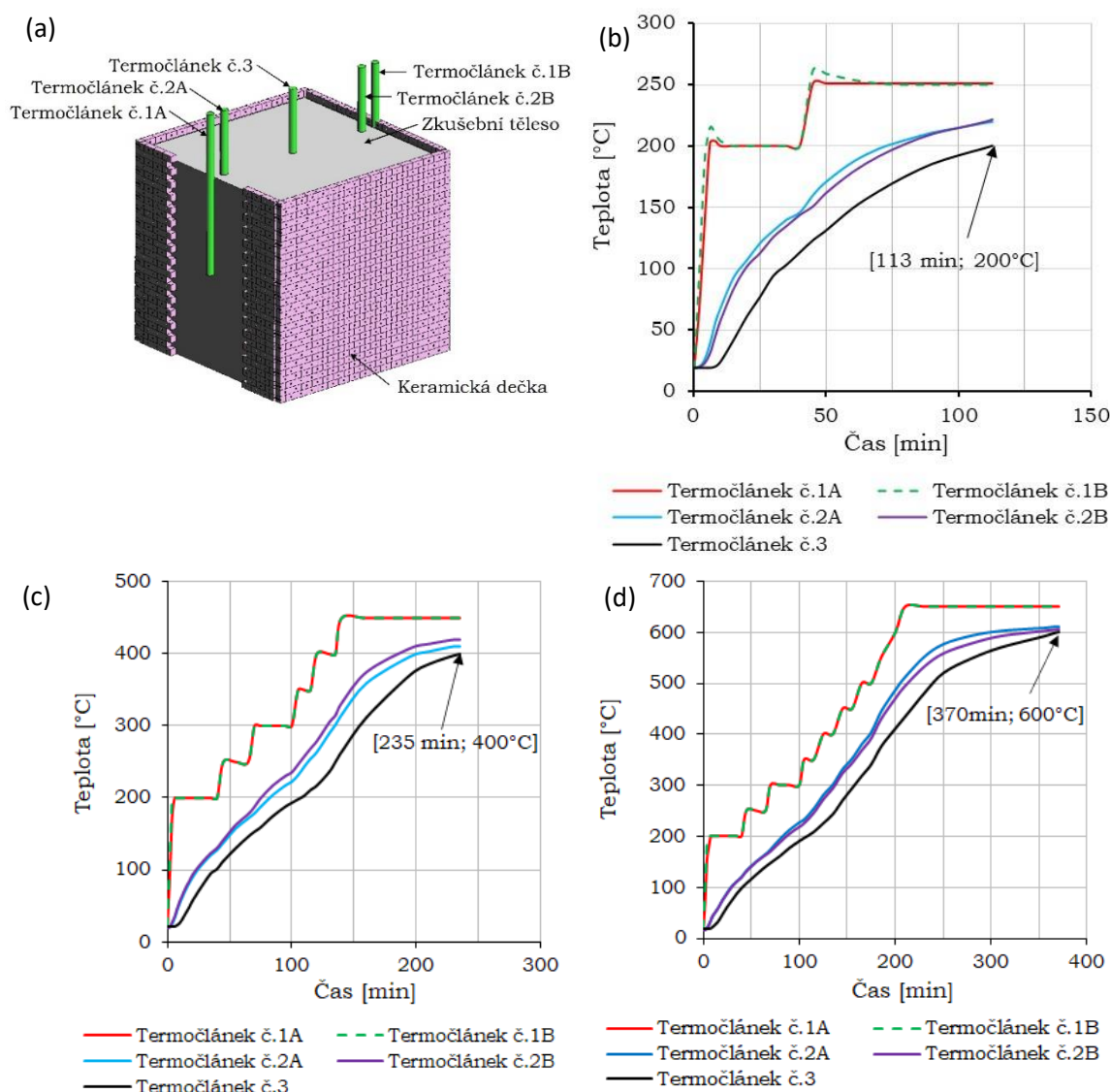
Relevantní výsledky lze získat z jednoduché zkoušky přestupu tepla na referenčním tělese, jak lze vysvětlit na příkladu krychle ohrané 150 mm ohříváné elektrickými keramickými dečkami (Obr. 7). Při zkoušce se sleduje vývoj teploty v definovaných bodech v závislosti na době ohřevu. Získaná data umožní graficky znázornit vývoj teploty na tělese a určit dobu nezbytnou pro dosažení tepelné rovnováhy na tělese při skokovém navyšování okolní teploty a ohřevu na 200 °C, 400 °C a 600 °C (Obr. 8).



Obr.7 Příprava tělesa na zkoušku přestupu tepla při ohřevu elektrickými keramickými dečkami: (a) obalení tělesa keramickými dečkami, (b) opláštění tělesa izolací, (c) umístění termočlánků do připravených otvorů

Nejdříve se tělesa připraví pro osazení termočlánků. V pozicích, kde se bude měřit teplota, se vyvrtají svislé otvory, přičemž alespoň jeden musí být ve svislé ose tělesa. Průměr vyvrtaného otvoru musí odpovídat termočlánku, aby mezi vloženým termočlánkem a otvorem nevznikly velké vzduchové mezery, které by negativně ovlivnily měřené teploty. Délka otvoru by měla odpovídat polovině výšky tělesa, aby konec termočlánku mohl snímat teplotu v těžišti tělesa. Následně se na připravených tělesech s vloženými termočlánky provede zkouška přestupu tepla, během které se zaznamenává doba ohřevu a vývoj teploty na tělese. Na sledované krychli se měřila teplota na pěti místech – dvakrát na ohříváném povrchu tělesa (termočlánek 1A, 1B), dvakrát 2 cm od ohříváného povrchu (termočlánek 2A, 2B) a v těžišti tělesa

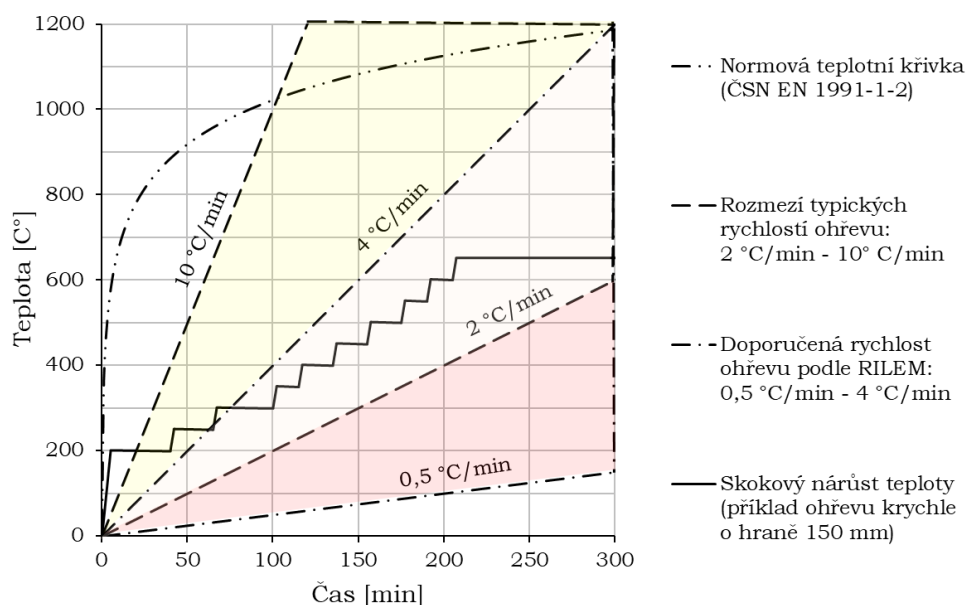
(termočlánek č.3). Z grafů vývoje teploty na tělese je patrné, že teplota na povrchu tělesa (termočlánek č.1A a 1B) byla skokově zvyšována až do okamžiku, kdy byla dosažena teplota o 50°C vyšší než cílová teplota 200°C (Obr. 8b), 400°C (Obr. 8c) a 600°C (Obr. 8d). Důvodem je fakt, že bez navýšení by teplota jádra tělesa (termočlánek č.3) dosáhla cílové hodnoty až po dlouhotrvajícím ohřevu v řádu desítek hodin, zejména v případě teploty 600 °C. Na druhou stranu v okamžiku ukončení ohřevu nelze tvrdit, že bylo dosaženo dokonalé tepelné rovnováhy na tělese, protože teplota oblasti u povrchu tělesa je v porovnání s teplotou jádra tělesa mírně vyšší. S ohledem na namáhání tělesa a způsob porušení při kvazistatických zkouškách lze však předpokládat, že tato vědomá chyba zásadně neovlivní získané výsledky.



Obr. 8 Vývoj teploty na ohřivaném tělese: (a) schéma umístění termočláneků, (b) ohřev na 200 °C, (c) ohřev na 400 °C, (d) ohřev na 600 °C

Na závěr je důležité zdůraznit skutečnost, že ani jeden z výše uvedených přístupů není schopen simulovat skutečný vývoj teploty při požáru (Obr.9) charakterizovaný

např. normovou teplotní křivkou. Běžně volené rychlosti ohřevu (žlutá oblast) a doporučené rychlosti ohřevu (červená oblast) pro výzkum reakce cementových kompozitů na vyšší teploty se výrazně liší od normové teplotní křivky, která popisuje vývoj teploty při požáru. Lze se tedy domnívat, že míra degradace materiálu způsobená teplotním gradientem neboli nerovnoměrným ohřátím během experimentu je v porovnání se skutečnou hodnotou nižší. Experimentálně zjištěné mechanické vlastnosti materiálu proto mohou být vyšší než u konstrukce zasažené požárem. Rovněž poznatky ohledně odprýskávání jsou s velkou pravděpodobností značně zkreslené, protože vyšší teplotní gradient při požáru znamená vyšší riziko odprýskávání betonu. Jediný způsob, který se z hlediska podmínek vyrovná požáru, je ohřev otevřeným plamenem. Tímto způsobem lze velice efektivně zkoumat tendenci cementového kompozitu k odprýskávání, ale zcela jistě se nejedná o vhodný způsob přípravy zkušebních těles pro měření mechanických vlastností. Důvod spočívá v horší kontrole vývoje teploty v okolí tělesa a schopnosti dosáhnout teplotní rovnováhy na tělese.



Obr.9 Rychlost ohřevu

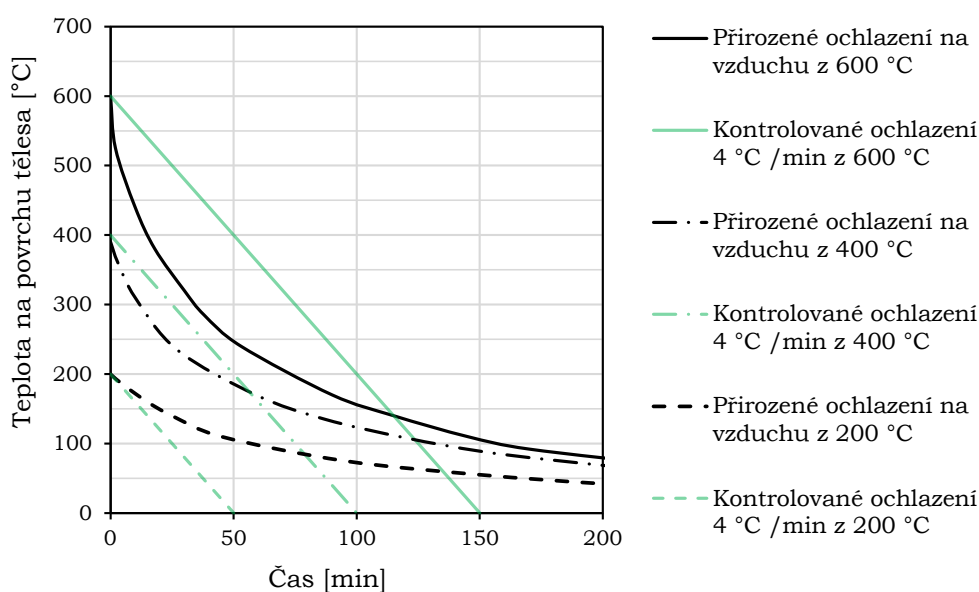
3.2.3 Ochlazení

Při přípravě těles pro kvazistatické zkoušky se vysoká pozornost věnuje především způsobu ohřevu. Stále je zapotřebí mít na paměti alo to, že samotným způsobem ochlazení tělesa se mohou docílit významné změny ve struktuře materiálu a ovlivnit konečné mechanické vlastnosti. Extrémní způsoby ochlazení mohou zapříčinit nerovnoměrné ochlazení tělesa a vnitřní napjatost od vysokého teplotního gradientu, kterému může odolávat již značně degradovaný materiál po ohřevu. Při experimentech se proto simulují různé režimy ochlazení, které v určité míře mohou během požáru nastat.

Způsob ochlazení, který se nejvíce liší od skutečného požáru z hlediska podmínek, je řízené ochlazení předepsané organizací RILEM. Ta doporučuje používat pro ochlazení stejné rychlosti jako pro ohřev tělesa (Tab. 4). Proces obvykle probíhá v elektrických pecích, kde dochází ke kontrolovanému lineárnímu poklesu teploty doporučenou rychlostí [79]. Při nízkých hodnotách rychlosti u tělesa nedochází k teplotnímu šoku spojenému s výraznou napjatostí uvnitř struktury materiálu a míra degradace materiálu se snižuje. Z praktického hlediska se ovšem jedná o proces lišící se od skutečných podmínek požáru. Proto se řada studií přiklání spíše k odlišným způsobům ochlazení.

Za nejvíce využívaný způsob ochlazení se považuje přirozené ochlazení, které probíhá na vzduchu umístěním ohřátého tělesa do prostředí s pokojovou teplotou [46, 49, 57, 52, 53, 56, 62, 42], anebo v uzavřené peci po vypnutí ohřevu [57, 48, 66, 63]. Oba případy probíhají bez nutnosti lidské nebo strojní obsluhy a zároveň daleko přesněji simulují reálné podmínky konstrukce za požáru v porovnání s předchozím způsobem (Obr. 10). Ačkoliv ochlazení povrchu na pokojovou teplotu trvá relativně dlouhou dobu, v počáteční fázi na průřezu vzniká vysoký teplotní gradient, díky kterému se může prohloubit degradace materiálu způsobená během ohřevu. Riziko především hrozí u těles zahřátých na vysokou teplotu přes 400°C.

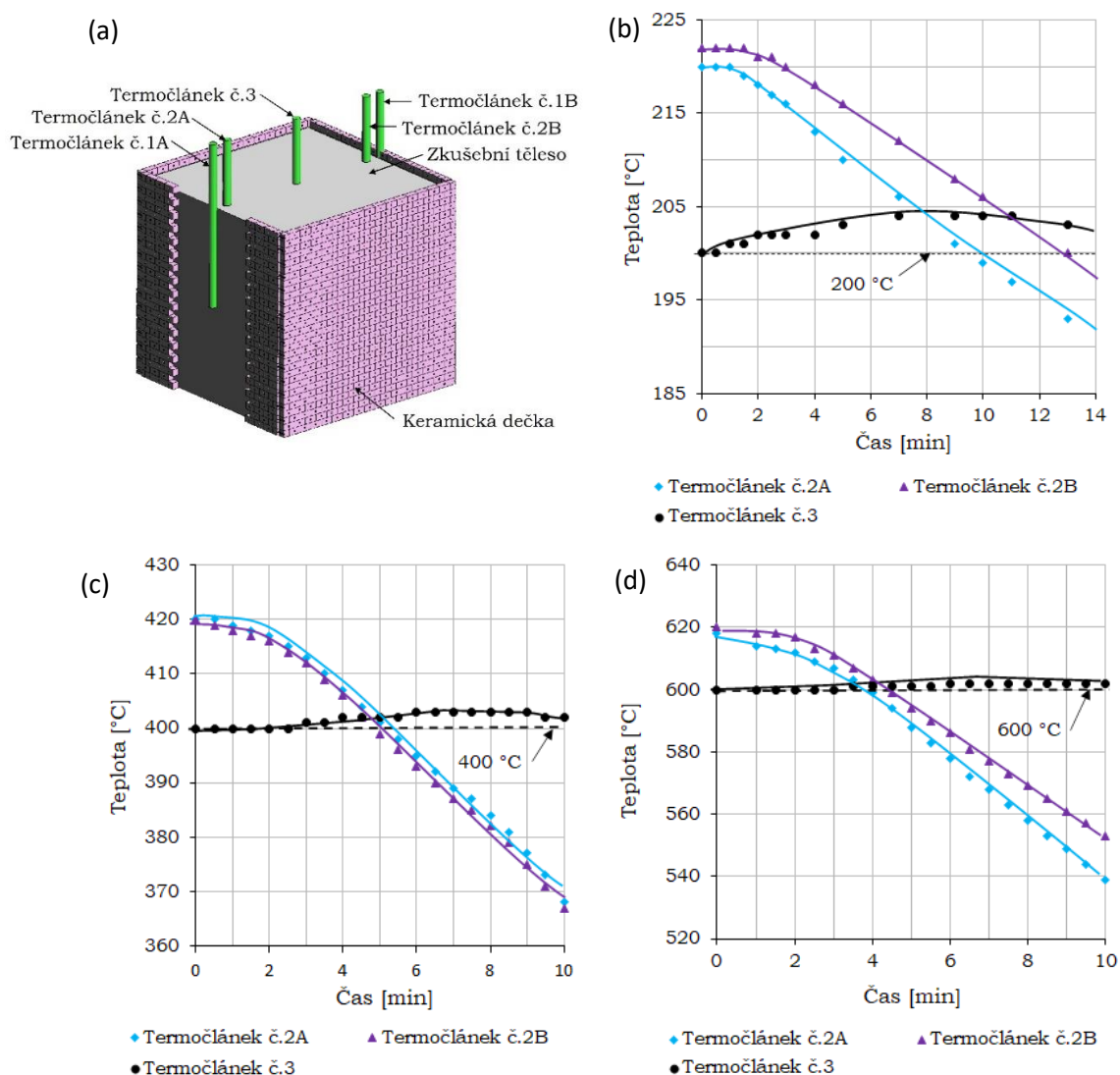
Stále častěji se v poslední době při experimentálních studiích uplatňují extrémní způsoby ochlazování, které mají simulovat proces hašení skutečného požáru. Používá se postřik vodou [99, 100, 101, 102, 103], chlazení pod proudem vody [104], ale i vodní lázeň [105, 99, 106, 107, 100, 108, 109, 101, 110, 102]. Ve všech případech dochází při ochlazování ke značnému teplotnímu šoku a vnitřnímu prnutí materiálu, přičemž míra jevů se zvyšuje s teplotou tělesa, při které započne ochlazování.



Obr. 10 Průběh kontrolovaného a přirozeného ochlazení pro různé teploty povrchu tělesa

3.2.4 Ztráta teploty těles zkoušených za vysoké teploty

Pokud se provádí kvazistatické zkoušky přímo na zahřátých tělesech v sofistikovaném lisu s instalovanou elektrickou pecí, tak problematika ztráty teploty není tak zásadní. Specifický případ, kdy je důležité mít dostatečné znalosti o průběhu ochlazení, představují zkoušky na zahřátých tělesech, jejichž ohřev probíhá v izolovaném zařízení mimo zatěžovací lis. Jakmile se dosáhne tepelné rovnováhy, ohřátá tělesa se vyjmou např. z elektrické pece a okamžitě se umístí do zatěžovacího lisu, kde se provede kvazistatická zkouška. Přesun, umístění tělesa a samotná zkouška se musí provést v takovém čase, během kterého nedojde k významnému ochlazení. Rychlost ochlazení tělesa a tím i nejzazší dobu pro uskutečnění celého procesu lze určit experimentálně na referenčním tělese (Obr. 11).



Obr. 11 Vývoj teploty po ukončení ohřevu: (a) schéma umístění termodlanek, (b) těleso zahřáté na 200 °C, (c) těleso zahřáté na 400 °C, (d) těleso zahřáté na 600 °C

Stejně jako v předchozí kapitole si lze průběh ochlazení ukázat na krychli o hraně 150 mm, která obsahuje pouze tři z pěti předchozích termočlánků. Oproti ohřevu se pro sledování vývoje ochlazení (Obr. 11) využily oba termočlánky umístěné 2 cm od povrchu tělesa (termočlánky č. 2A a 2B) a termočlánek snímající teplotu v jádru krychle (termočlánek č. 3). Ochlazení probíhalo přirozeně za pokojové teploty, přičemž postranní strany tělesa byly obaleny izolační vatou pro snížení tepelných ztrát. I přes to od okamžiku ukončení ohřevu tělesa došlo k progresivnímu poklesu teploty, zejména u tělesa zahřátého na cílovou teplotou 600 °C (povrch tělesa vystaven teplotě 650 °C). Tento pokles se týká oblastí u povrchu vystaveného pokojové teplotě, které jsou snímány termočlánky č. 2A a 2B. Jejich odlišné průběhy jsou patrně zapříčiněné odchylkami v pozici termočlánků vůči povrchu tělesa. Naopak v jádře tělesa lze paradoxně zaznamenat krátkodobý růst teploty, což je dáno teplejší oblastí okolo jádra krychle. Experimentální data ukazují vhodný čas pro uskutečnění kvazistatických zkoušek, který by neměl přesáhnout 10 minut od ukončení ohřevu.

3.3 Kvazistatické zkoušky

Pro určení mechanických vlastností cementových kompozitů ztužených vlákny za zvýšené teploty se používají běžná pravidla pro standardní kvazistatické zkoušky [111, 112, 113, 114], přičemž se obvykle používají menší tělesa, která nesplňují normativní doporučení. Rovněž ale existuje soubor předpisů určených přímo pro testování cementových kompozitů za zvýšené teploty [89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96], které vydala mezinárodní organizace RILEM. Ten shrnuje doporučení a pravidla pro výrobu těles včetně jejich ošetřování, způsob ohřevu a ochlazení, požadavky na zkušební zařízení a postup různých kvazistatických zkoušek.

Pro měření mechanických vlastností se využívají běžné destruktivní zkoušky, přičemž většina experimentálních výzkumů se zabývá sledováním pevnosti v tlaku [46, 53, 40, 55, 57, 59, 65, 66, 83, 77]. Od okamžiku, kdy došlo k praktickému využívání cementových kompozitů ztužených vlákny pro prvky bez betonářské výztuže, se ve větší míře začaly provádět i zkoušky v příčném tahu [48, 57, 65, 83, 73] a v tahu za ohybu [40, 52, 73]. Výjimečně se lze setkat i se zkouškami modulu pružnosti [48, 40, 53, 56, 58, 73], osovým tahem na specifických tělesech tvaru kosti [60, 67, 71, 78] a sledováním lomové energie [49].

V poslední době se stále více objevují studie, které pro zjišťování vlastností materiálu využívají různé nedestruktivní zkušební metody. Tím lze na jednu stranu získat více měření a výsledků, ale hlavním důvodem je snaha najít korelaci mezi výsledky zjištěnými destruktivními a nedestruktivními metodami. S postupem času se tak může ustanovit efektivní přístup založený na nedestruktivním testování, který by s dostatečnou přesností umožnil určit míru degradace a residuální pevnost materiálu konstrukce po požáru.

Hojně využívanou nedestruktivní metodou při měření termomechanických vlastností je ultrazvuková impulsová metoda [115], kterou lze využít pro měření dynamického modulu pružnosti [64, 68, 73], anebo pevnosti betonu v tlaku [81]. Zásadní nedostatek této metody ovšem spočívá ve způsobu měření, který se zakládá na stanovení rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v materiálu, kdy ultrazvuk je definován jako zvuk nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha a jeho šíření obecně souvisí s hustotou prostředí. Díky tomu může u výrazně poškozených těles mikrotrhlinami od působení vysoké teploty dojít k neúspěšnému měření nebo získání vágních hodnot.

V určitých případech se lze rovněž setkat s tvrdoměrnou metodou zkoušení [116], kterou lze uplatnit při zkoušení zahřátých cementových kompozitů [86] ale i po jejich ohřevu. V současné době ovšem není zcela jasně objasněno to, zda lze metodou získat spolehlivé výsledky. Jednak se zkouší materiál s výrazně poškozenou strukturou v podobě mikrotrhlin, které mohou ovlivnit lokální měření, a zároveň je testovaný povrch tělesa obvykle vystaven vyšší teplotě, než je cílová teplota (Obr. 8), aby byla dosažena teplotní rovnováha na tělese v rozumném časovém období.

4 Pórový tlak

Při ohřevu cementových kompozitů dochází ke vzniku vodní páry uvnitř struktury materiálu. Ta se tvoří díky přítomnosti volné, fyzikálně vázané a chemicky vázané vody, které se v cementových kompozitech přirozeně nachází a při ohřevu se mění v plynné skupenství. V závislosti na míře pórovitosti materiálu dochází k postupnému uvolňování vodní páry. Zároveň se ale vodní pára kumuluje uvnitř struktury materiálu a způsobuje vznik pórového tlaku. Ten v kombinaci se silovými účinky od změny teploty (teplotní gradient uvnitř struktury materiálu) vyvoluje přídatná tahová namáhání způsobující vznik trhlin a odprýskávání betonu (angl. thermal spalling, concrete spalling, fire-induced spalling) [117, 118] v podobě odlupování povrchových vrstev, odštěpování kusů materiálu nebo dokonce celkového poškození prvku (Obr.12).



Obr.12 Forma odprýskání betonu: odštěpování kusů materiálu (vlevo) a celkové poškození (vpravo)

Predikovat nebo dokonce jednoznačně stanovit riziko odprýskávání betonu lze považovat za velmi složitou úlohu. Existuje totiž mnoho parametrů, které ovlivňují vývoj a velikost pórového tlaku ve struktuře betonu. Většina z nich se navíc vzájemně ovlivňuje. Jedná se především o:

- Pevnost betonu – s vyšší pevností betonu (za zvýšené teploty) roste odolnost materiálu vůči tahovým namáháním od účinků pórového tlaku a teplotního přetvoření. Na druhou stranu cementové kompozity s lepšími mechanickými vlastnostmi obvykle mají kompaktní strukturu s nízkou propustností.
- Složení betonu – určité složky betonu (syntetická vlákna, ocelová vlákna, provzdušňovací přísady, lehčené kamenivo ad.) pozitivně ovlivňují propustnost materiálu a tím i vývoj pórového tlaku. Negativně ovšem mohou ovlivnit mechanické vlastnosti betonu za běžné a zvýšené teploty.
- Vlhkost – vyšší zastoupení volné a fyzikálně vázané vody v betonu může zvýšit množství kumulované vodní páry ve struktuře betonu a pórový tlak. S rostoucím množstvím záměsové vody (vodní součinitel) se zvyšuje propustnost cementového kompozitu, ale zároveň se zhoršují mechanické vlastnosti betonu.

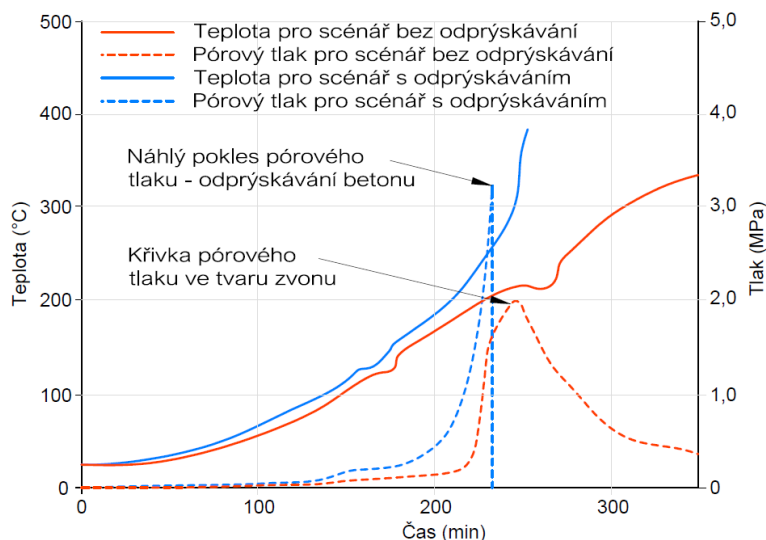
- Teplotní gradient – obecně s vyšším teplotním gradientem roste riziko odprýskávání betonu [117]. Existují ovšem i případy, kdy při malém teplotním gradientu nastalo odprýskávání betonu.
- Propustnost – vyšší propustnost cementového kompozitu přispívá ke snížení pórového tlaku, ale zároveň negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti.

4.1 Vývoj pórového tlaku

K prvním změnám ve struktuře betonu dochází v rozmezí teplot 50 °C – 150 °C [119]. V tomto okamžiku postupně nastává uvolnění volné vody ve formě páry [120, 121]. Ta, v určitém poměru, jednak odchází do okolního prostředí přes otevřené póry a kapiláry a současně se kumuluje uvnitř struktury materiálu, kde díky tlakovému gradientu migruje různými směry [122]. Naopak, v uzavřených pórech a otevřených mikro-pórech dochází k pomalému nebo dokonce žádnému uvolňování par, což vede k nárůstu pórového tlaku a tím i vzniku přídatných namáhání, vůči kterým je materiál vystaven [123]. V případě snížení rizika odprýskávání betonu je snaha o to, aby množství nahromaděné vodní páry uvnitř materiálu bylo co nejnižší a tím se snížila velikost pórového tlaku. Ideální stav nastane v okamžiku, kdy se vodní pára uvolní ze struktury betonu v takovém množství, při kterém pórový tlak nikterak nenaruší celistvost betonové konstrukce. V opačném případě může pórový tlak růst až do okamžiku, kdy dojde k překročení tahové pevnosti betonu a nastane odprýskávání [124, 3].

Odprýskávání nevyztuženého betonu lze očekávat zejména u konstrukcí zhotovených z vysokopevnostních betonů (Obr. 13), které oproti běžným betonům disponují kompaktnější strukturou bez většího zastoupení pórů a kapilár [122]. Bez použití alternativních opatření, např. v podobě použití syntetických vláken (viz dále), u takových typů betonu rychle dochází k hromadění vodní páry uvnitř struktury materiálu. Kapiláry a póry umožňující migraci vodní páry se postupně zaplňují a vzniká saturovaná zóna tzv. vlhkostní clona (angl. moisture clog), která vytváří bariéru pro únik vodní páry z materiálu [122, 118]. Následně dochází k ohřevu nasycené vodní páry a exponenciálně se zvyšuje pórový tlak až do okamžiku, kdy nastane odprýskávání betonu. K jevu obvykle dochází mezi teplotami 200 °C a 400 °C. V tomto rozmezí pórový tlak dosahuje takových hodnot, které v kombinaci s dalšími vlivy vyvolají namáhání dosahující pevnosti cementového kompozitu v tahu. Konkrétní teplota se odvíjí od teplotního gradientu, degradace mechanických vlastností kompozitu a vývoje pórového tlaku.

Oproti tomu běžné pevnostní třídy betonu disponují vyšší pórovitostí, která je zapříčiněná užitím vyššího vodního součinitele. Evaporace vodních par z materiálu je daleko efektivnější, pórový tlak se snižuje a riziko spojené s odprýskáváním betonu klesá. I přes to se důrazně doporučuje využívat některé z opatření, která umožní zvýšit propustnost betonu, zejména u nevyztužených betonů.



Obr. 13 Typický vývoj teploty a pórového tlaku [122]

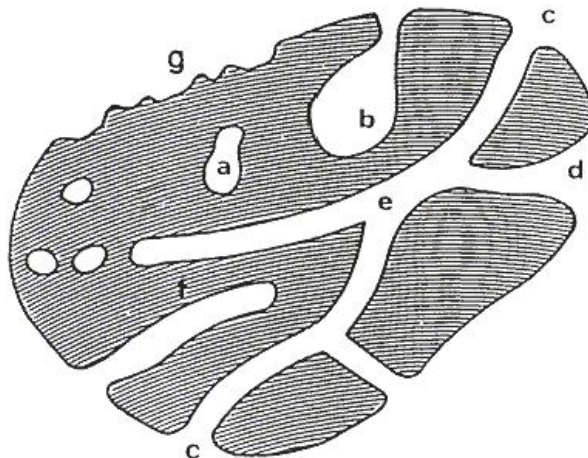
4.1.1 Opatření pro snížení pórového tlaku

Podstata opatření spočívá ve zvýšení pórovitosti cementového kamene, který je následně méně náchylný ke vzniku vysokého pórového tlaku. Uplatnění syntetických vláken, zejména vláken z polyethylenu PE a polypropylenu PP, která mají nízký bod tání (150 °C – 170 °C), představuje způsob, který se v dnešní době hojně využívá a považuje se za velmi efektivní. V okamžiku nárůstu vyšší teploty a pórového tlaku se vlákna začínají tavit, čímž vytváří síť kanálků přispívajících k odvodu vodní páry z materiálu. Při dostatečném množství vláken a dokonalém rozmístění v cementové matici dochází k efektivnímu odvodu páry, pomalejšímu nárůstu pórového tlaku a snížení maximální hodnoty pórového tlaku. Navíc i samotná přítomnost vláken může mírně přispět ke snížení pórového tlaku. Podle určitých hypotéz lze usuzovat, že vyšší pórovitost je spojena s mikro-kanálky (angl. pressure-induced tangential space – PITS), které se vytváří mezi cementovým kamenem a hydrofobními vlákny [117]. V obou případech se efektivita opatření odvíjí od velikosti a množství zastoupených vláken. V tomto ohledu se ovšem stále vedou vědecká bádání, která se snaží najít optimální kombinaci obou parametrů.

Aplikace syntetických vláken s sebou ovšem přináší i určité nevýhody. Tím je především oslabení struktury materiálu, obzvláště po vyhoření vláken. Za běžné teploty vlákna sice přispívají ke ztužení struktury materiálu, ale mírně obvykle zhoršují pevnost betonu v tlaku. Nezodpovězenou otázkou ovšem zůstává, do jaké míry vlákna ovlivňují mechanické vlastnosti za zvýšené teploty. Vlákna svoji přítomností mohou přispívat k menšímu rozvoji trhlin ve struktuře betonu z důvodu nižšího pórového tlaku a tím zachovat celistvost struktury. Zároveň svým shořením ale výrazně oslabují strukturu materiálu.

Mezi nevýhody syntetických vláken patří i kouř vznikající při požáru, který zhoršuje viditelnost prostředí a může svoji toxicitou ohrozit lidské zdraví. V takovém případě

se nabízí uplatnění provzdušňujících přísad, které se běžně používají v betonovém stavitelství. Po smísení s ostatními složkami betonu vytváří v čerstvé směsi velké množství vzduchových pórů, které přispívají k lepší mrazuvzdornosti a odolnosti proti CHRL. Vzniklé póry se rovněž nabízí využít i jako prostor pro expanzi vodní páry [85, 84]. Jedná se tedy o slibné opatření, které ovšem nebylo dostatečně probádáno a na první pohled má určité omezení. To spočívá v dostupnosti pórů vzhledem k okolnímu prostředí (Obr. 14). Běžné provzdušňující přísady vytváří velké množství uzavřených vzduchových pórů rovnoměrně distribuovaných ve struktuře betonu. Jedná se tedy o póry, který neumožňují přímé spojení s okolním prostředím, jak je tomu u otevřených pórů. Lze se proto domnívat, že při rostoucí teplotě dochází ke kumulaci vodní páry v uzavřených pórech a odvod páry je zajištěn pouze v případě, že se mezi póry nachází kapiláry např. způsobené teplotním gradientem uvnitř struktury materiálu.



Obr.14 Schématické rozdělení pórů vzhledem k jejich dostupnosti: (a) – uzavřený pór, (b, f) – uzavřený pór na jednom konci, (c, d, g) – otevřené póry, (e) – póry otevřené na obou koncích [125]

Zajímavou alternativou k syntetickým vláknům představují vlákna přírodní. Příkladem jsou cementové kompozity s přírodními vlákny z juty, která na sebe při výrobě vážou vodu, čímž dochází k jejich nabývání [119]. Následně se za zvýšené teploty voda ze saturovaných vláken odpařuje a vlákna se výrazně smršťují v porovnání s přetvořením ostatních složek cementového kompozitu. Výsledkem je, že dochází k výraznému narušení mezifázové přechodové zóny mezi cementovým kamenem a vlákny, čímž vzniká ve struktuře materiálu okolo vláken soustava kapilár, která zvyšuje efektivitu odpaření vody [119]. Ta se navíc výrazně zvyšuje v okamžiku, kdy je dosažena teplota tání materiálu vláken. Na druhou stranu dochází k oslabení struktury v podobě mikrotrhlin v blízkosti vláken, a proto lze očekávat zhoršení mechanických vlastností.

Určitý přínos z hlediska odvodu vodní páry a vývoje pórového tlaku mají i vlákna ocelová, která přispívají ke snížení pórového tlaku tím, že v oblastech okolo vláken vznikají mezifázová přechodová zóna (ITZ). Ty mají obvykle vyšší pórovitost, než vykazuje cementový kámen, a zároveň na jejich rozhraní s vlákny mají tendenci vznikat mikrotrhliny díky horší přilnavosti [126], které mohou ve formě drobných kapilár (tzv. PITS) přispět k odvodu vodní páry mimo strukturu materiálu. Za přínos z hlediska snížení pórového tlaku lze považovat i odlišnou teplotní roztažnost vláken v porovnání s cementovým kamenem. Zatímco ocelová vlákna mají tendenci se rozpínat s rostoucí teplotou, cementový kámen nabývá pouze v počátku ohřevu do teploty 250 °C (Obr.1) a následně se při dalším růstu teploty smršťuje. Díky tomu v ITZ na rozhraní vláken a cementového kamene vzniká napjatost a případně i mikrotrhliny. Z hlediska pórového tlaku se uplatnění ocelových vláken nepovažuje za velmi efektivní řešení, protože i přes jejich vyšší zastoupení v cementových kompozitech dochází k odprýskávání betonu [127]. Nespornou výhodou ovšem zůstává, že při odprýskávání nedochází k celkovému porušení těles nebo nebezpečnému odtržení jeho částí, protože vlákna disponují vysokou teplotou tání, a tudíž si zachovávají svoji funkci i při vyšších teplotách.

5 Pevnost cementových kompozitů

Ačkoliv lze beton považovat za nehořlavý materiál, jeho mechanické vlastnosti se mění v závislosti na teplotě, které je vystaven. Obecným trendem je, že pevnost a modul pružnosti cementového kompozitu s rostoucí teplotou klesají, nicméně tuto závislost nelze považovat za lineární. Za určitých podmínek a v určitém rozmezí teplot může dokonce dojít ke zlepšení mechanických vlastností.

Pro snazší objasnění přínosu vláken se následující kapitola nejdříve věnuje chování nevyztužených cementových kompozitů. Zpracován je přehled základních poznatků týkajících se chemických a fyzikálních jevů za zvýšené teploty a popis vývoje mechanických vlastností v závislosti na teplotě včetně vlivu ochlazení.

V navazující části se již pozornost věnuje cementovým kompozitům ztuženým vlákny. S ohledem na zvolený režim testování lze z kvazistatických zkoušek získat dvě odlišné skupiny vlastností. Jedná se o residuální pevnost, která popisuje stav materiálu konstrukce po požáru, anebo pevnost za vysoké teploty, která udává stav materiálu přímo za požáru.

5.1 Nevyztužené cementové kompozity

Reakce cementových kompozitů na vysoké teploty se odvíjí od chování zastoupených složek betonu a jejich vzájemné interakce. Na základě dlouhodobého bádání a mnoha vědeckých studií zaměřených na cementové kompozity bez rozptýlené výztuže byly ustanoveny základní procesy a jevy probíhající za vysoké teploty. Následující text shrnuje obecně známé poznatky o chování cementových kompozitů bez rozptýlené výztuže na mikroskopické a makroskopické úrovni. Uvedené závěry slouží jako opora při hodnocení účinků vláken na chování cementových kompozitů, kterým se podrobně věnují další kapitoly (kapitola 5.2, kapitola 5.3).

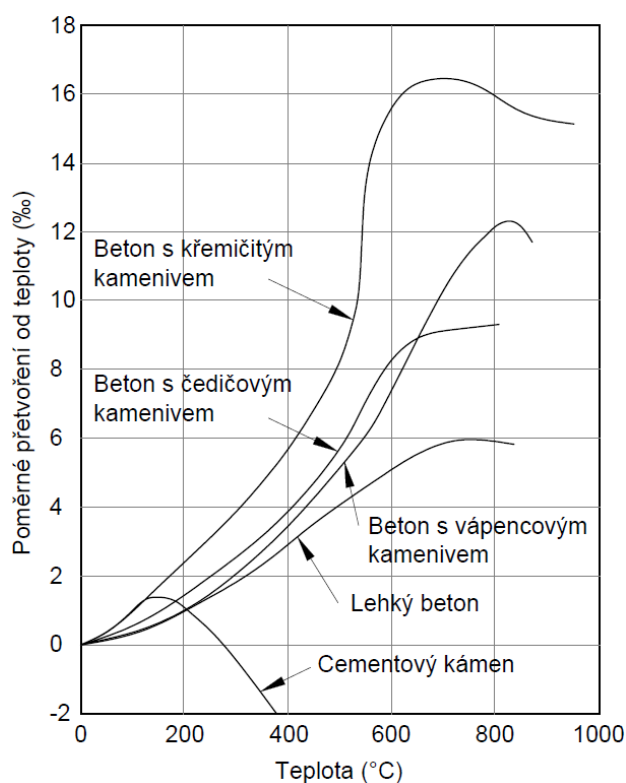
5.1.1 Chemické a fyzikální jevy za zvýšené teploty

Na mechanické vlastnosti cementových kompozitů má vliv několik procesů, které probíhají v různé míře souběžně během ohřevu. Jedná se o vývoj vlhkosti a pórového tlaku uvnitř struktury materiálu, chemické a fyzikální procesy v ITZ mezi cementovým kamenem a zrny kameniva. Každý z nich působí na vývoj mechanických vlastností v různé míře, pozitivně i negativně, krátkodobě i dlouhodobě, vždy však v závislosti na složení směsi a průběhu ohřevu.

Řada studií se shoduje na tom, že v počátku zahřívání do 300 °C většina druhů kameniva zůstává stabilní a významně neovlivňuje chování konečného kompozitu [128]. Ke změnám dochází především v cementovém kameni a na úrovni vazby mezi cementovým kamenem a zrny kameniva, kde probíhají jak chemické, tak fyzikální procesy ovlivňující mechanické vlastnosti kompozitu jako celku.

Významným fyzikálním jevem v ITZ je odlišná teplotní roztažnost cementového kamene a zrn kameniva (Obr.15). Díky ní dochází k napětí na rozhraní obou

komponentů, které může vést ke vzniku mikrotrhlin a narušení vnitřní integrity materiálu. Z dosavadních poznatků vyplývá, že v rozmezí teplot od 20 °C do 100 °C, se oba komponenty souběžně rozpínají a na jejich rozhraní tak dochází k minimálnímu pnutí doprovázeném vznikem trhlin [128]. Při dalším zvyšování teploty se ovšem tento trend mění, kdy u kameniva stále dochází k rozpínání a cementový kámen se naopak začíná výrazně smršťovat v závislosti na vlhkosti přítomné ve struktuře materiálu [123]. Díky odlišnému přetvoření obou komponentů vzniká na jejich rozhraní pnutí, jehož výsledkem je vznik mikrotrhlin, degradace ITZ mezi zrny kameniva a cementovým kamenem, narušení celistvosti struktury materiálu a pokles pevnosti [121]. Míra degradace a celkový pokles pevnosti závisí na typu kameniva. Čím nižší teplotní roztažnost kamenivo vykazuje, tím má obvykle cementový kompozit lepší stabilitu za vyšší teploty.



Obr. 15 Poměrné přetvoření cementového kamene a betonu s různým druhem kameniva v závislosti na teplotě [86]

V počáteční fázi ohřevu do 300 °C může v ITZ docházet ke zpevnění rozhraní mezi zrny kameniva a cementovým kamenem vlivem chemické reakce. Tento jev typický pro křemičité kamenivo, které má schopnost reagovat s cementem za přítomnosti vlhkosti a tlaku obdobně jako při procesu autoklávování, popř. propařování [129]. Chemickou reakcí se dosáhne vyšší pevnosti vazby mezi oběma komponenty, která se obecně považuje za nejslabší článek celé struktury materiálu [130]. V případě požáru, kdy se optimální podmínky pro chemickou reakci vyskytují pouze v krátkém časovém období, se její účinnost zvyšuje s jemností kameniva [131]. Výsledkem je, že výsledný cementový kompozit může vykazovat lepší mechanické vlastnosti [132].

Chování cementového kamene se od počátku zahřívání odvíjí od úrovně vlhkosti nacházející se ve struktuře cementového kompozitu, přičemž existují dva mezní stavy. U cementového kompozitu s nízkou počáteční vlhkostí nebo vysokou permeabilitou hrozí riziko, že již v úvodní fázi zahřívání nebude ve své struktuře obsahovat volnou vodu, nastane jeho vysušení a rychlejší degradace cementového kamene (angl. unsealed cement paste). Opačným mezním případem je nasycený stav cementového kamene (angl. sealed cement paste), který se projevuje tím, že i za vyšších teplot se ve struktuře materiálu nachází určitá vlhkost. Díky tomu mohou probíhat hygrotermální jevy ve struktuře cementového kompozitu, které mají vliv na mechanické vlastnosti. Takový stav nastává obvykle u směsí s nízkou permeabilitou nebo vyšší počáteční vlhkostí. Obecně lze konstatovat, že čím dříve je dosaženo vysušeného stavu uvnitř struktury, tím rychleji započne degradace cementového kompozitu. Na druhou stranu s nižší vlhkostí, popř. vyšší permeabilitou, klesá riziko porušení vnitřní struktury spojené s vysokým pórovým tlakem.

Změny v cementovém kameni (Tab.5) probíhají téměř od samotného počátku zahřívání [130], přičemž zhruba do teploty 200 °C dochází k méně výrazným změnám, které mohou mít negativní ale i pozitivní vliv na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu v závislosti na úrovni vlhkosti ve struktuře materiálu. Zahříváním se zahájí proces odpařování vody, přičemž postupně se odpařuje volná voda, následně fyzikálně vázaná voda, a nakonec voda chemicky vázaná [130]. V okamžiku, kdy dojde k migraci volné vody uvnitř struktury materiálu, vznikají ideální podmínky pro různé chemické a fyzikální jevy [133], které přispívají ke zpevnění struktury cementového kompozitu.

Nejdříve se se jedná o dodatečnou hydrataci. Ta nastává při kontaktu nezhydratovaných cementových zrn s volnou vodou, která s rostoucí teplotou migruje v podobě vodní páry ve struktuře betonu. Vznikají nové hydrosilikáty C-S-H společně s Portlanditem CaOH_2 , čímž se zpevňuje cementový kámen. Dalším procesem je rozpad vazby mezi skupinou silanů a vodou, díky které vznikají silnější silanové prvky mající pozitivní vliv na pevnost betonu. Poslední významný faktor lze přirovnat k procesu autoklávování. Nárůst teploty a pórového tlaku ve struktuře betonu vytváří ideální podmínky pro vznik Tobermoritu, který přispívá ke zpevnění struktury betonu a zvýšení pevnosti. Nárůst pevnosti při ohřevu lze ovšem poměrně složitě předpokládat a kontrolovat, protože si žádá optimální úroveň teploty včetně její délky působení, velikost tlaku a zastoupení potřebných složek [7]. Zatímco při běžném autoklávování lze poměrně snadno docílit optimálních podmínek pro výrobu betonů pomocí nastavení strojního zařízení, proces probíhající uvnitř struktury nelze nikterak řídit, obzvláště při nekontrolovaném požáru.

Tab. 5 Přehled chemických a fyzikálních změn během ohřevu [134, 5, 135, 128]

Teplota	Změna spojená se zvýšenou teplotou
40 °C – 200 °C	Možné zpevnění struktury (dodatečná hydratace, účinky autoklávování a propařování, chemická reakce v ITZ)
40 °C – 80 °C	Nízká míra evaporace volné vody
70 °C – 150 °C	Disociace ettringitu
80 °C – 250 °C	Intenzivní míra evaporace volné vody, fyzikálně vázané vody a chemicky vázané vody
120 °C – 163 °C	Rozložení sádrovce
150 °C – 200 °C	Počátek rozkladu C-S-H gelu
300 °C +	Významný nárůst porosity a rozvoj mikrotrhlin
300 °C – 600 °C	Původní zbarvení se mění na červeno hnědou až růžovou barvu
450 °C – 550 °C	Disociace Portlanditu na pálené vápno (CaO) a vodu (H ₂ O)
570 °C – 580 °C	Transformace α-křamene na β-křemen (u křemičitého kameniva) spojená s 5 % objemovým nárůstem
600 °C – 800 °C	Rozložení C-S-H gelu na Belit (β-C ₂ S)
600 °C – 900 °C	Zbarvení do šedé barvy
700 °C +	Dekarbonizace vápence (CaCO ₃) na pálené vápno (CaO) a oxid uhličitý (v cementovém kameni a vápencovém kamenivu)
800 °C	Vznik keramické vazby namísto hydraulické vazby
1 000 °C	Zbarvení do žlutohnědé barvy
1 200 °C – 1 400 °C	Tavení cementového kamene

První nežádoucí změna v chemickém složení cementového kamene spočívá v rozkladu ettringitu na meta-ettringit [136], který nastává v rozmezí teplot od 70 °C do 90 °C [137, 128, 135] a probíhá do teploty 150 °C [130]. V rozmezí od 120 °C do 163 °C dochází k rozkladu sádrovce [137, 135]. S dalším zvyšováním teploty se stále více začíná projevovat rozklad C-S-H gelu, za kterým z počátku stojí jeho dehydratace [138]. Probíhá v různé míře v rozmezí od 150 °C až po 800 °C, přičemž při určitých teplotách lze zaznamenat významné jevy. K rozkladu portlanditu dochází zhruba od 500 °C do 550 °C [130], podle jiných zdrojů v rozmezí 350 °C – 550 °C [128], 400 °C – 550 °C [135] nebo 400 °C – 600 °C [5]. K dalšímu významné změně ve složení C-S-H gelu dochází při teplotách 600 °C, kdy vzniká Belit (β-C₂S) [130]. Okolo 700 °C rovněž dochází k dekarbonizaci kalcitu (CaCO₃), který se může nacházet v cementovém kameni a vápencovém kamenivu. Rozkládá se na oxid uhličitý (CO₂) a pálené vápno (CaO), u kterého může nastat rehydratace za přítomnosti vlhkosti při ochlazení [130]. Keramická vazba vzniká okolo teploty 800 °C, kdy se ve struktuře materiálu

nenachází chemicky vázaná voda. Nahrazuje se tím slabá hydraulická vazba a mírně se zlepšují mechanické vlastnosti materiálu jako celku. Při extrémních teplotách převyšujících 1 200 °C nakonec dochází k tavení cementového kompozitu.

V neposlední řadě se při ohřevu cementových kompozitů mění zbarvení. Ačkoliv se nejedná o parametr, který by nějakým způsobem ovlivňoval pevnosti nebo mechanické chování, při hodnocení konstrukcí po požáru může hrát důležitou roli. Podle zbarvení povrchu cementových kompozitů lze predikovat teplotu, které byla konstrukce vystavena, přičemž výraznější změny ve zbarvení lze pozorovat na povrchu materiálu, který je vystaven přímému ohřevu. Do teploty 300 °C nedochází k viditelnému zbarvení a cementový kompozit si zachovává svůj původní vzhled. Následně, v rozmezí od 300 °C do 600 °C, dochází ke zbarvení do červeno-hnědé až růžové barvy díky oxidaci minerálů obsahujících železo, které se nachází především v křemičitém kamenivu. Následně mezi teplotou 600 °C a 900 °C se barva cementových kompozitů mění na šedou barvu a okolo teploty 1 000 °C u nich nastává žlutohnědé zbarvení [134, 135].

5.1.2 Mechanické vlastnosti

Dosavadní zkušenosti ukazují, že reakce nevyztužených cementových kompozitů na zvýšenou teplotu se liší v závislosti na jejich složení. Obecně mají cementové kompozity běžných pevností (angl. normal strength concrete – NSC) lepší stabilitu za zvýšené teploty než vysokopevnostní betony (angl. high strength concrete – HSC). Je to dáno tím, že NSC mají méně kompaktní strukturu, která vykazuje vyšší pórovitost [135]. Ta umožňuje efektivnější migraci vodní páry uvnitř struktury materiálu a přispívá k lepším podmínkám pro uskutečnění dodatečné hydratace v počáteční fázi ohřevu. Naopak HSC mají obvykle velmi kompaktní strukturu, která limituje transport vznikající vodní páry mimo strukturu materiálu. Pórový tlak uvnitř materiálu roste rychleji, což vede ke vzniku drobných mikrotrhlin a rychlejšímu narušení vnitřní integrity materiálu [139].

5.1.2.1 Pevnost v tlaku

Zvýšená pevnost v tlaku se může objevit u betonu zahřátém na teplotu do 300 °C v závislosti na úrovni vlhkosti uvnitř struktury cementového kompozitu, přičemž vrchol pevnosti lze obvykle zaznamenat okolo teploty 200 °C (Tab. 6). Při optimálních podmínkách se nárůst pevnosti v tlaku u směsi s portlandským cementem bez příměsí pohybuje do 5 %. Nárůst pevnosti v tlaku až 20 % mohou vykazovat směsi s popílkem, anebo struskou se zastoupením odpovídajícím zhruba 40 % hmotnosti cementu. Nejmenší přínos z běžných příměsí lze zaznamenat u křemičitého úletu, který dosahuje 10 % u směsi s 10 % zastoupením vůči hmotnosti cementu [135].

Tab. 6 Změna pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě z hlediska typu příměsí

Teplota		ČSN EN 1992-1-2 [140]		Experimentální data [31, 139, 135]			
		Vápenčové kamenivo	Křemičité kamenivo	Bez příměsí	Popílek	Vysoko. struska	Křemičitý úlet
100 °C	H.M. ²	0 %	0 %	0 %	+10 %	+10 %	0 %
	D.M.			-10 %	-5 %	-5 %	-15 %
200 °C	H.M.	-5 %	-3 %	+5 %	+20 %	+20 %	+15 %
	D.M.			-20 %	-10 %	-10 %	-15 %
300 °C	H.M.	-15 %	-9 %	0 %	+10 %	+10 %	+10 %
	D.M.			-30 %	-15 %	-15 %	-30 %
400 °C	H.M.	-25 %	-15 %	-15 %	+5 %	0 %	0 %
	D.M.			-40 %	-20 %	-20 %	-40 %
500 °C	H.M.	-40 %	-26 %	-25 %	-15 %	-10 %	-15 %
	D.M.			-50 %	-35 %	-35 %	-45 %
600 °C	H.M.	-55 %	-40 %	-50 %	-30 %	-35 %	-40 %
	D.M.			-75 %	-55 %	-45 %	-70 %
700 °C	H.M.	-70 %	-57 %	-65 %	-45 %	-50 %	-60 %
	D.M.			-80 %	-60 %	-60 %	-75 %
800 °C	H.M.	-85 %	-73 %	-75 %	-55 %	-65 %	-70 %
	D.M.			-85 %	-75 %	-75 %	-85 %
900 °C	H.M.	-92 %	-85 %	-80 %	-	-	-80 %
	D.M.			-85 %	-	-	-90 %
1000 °C	H.M.	-96 %	-94 %	-85 %	-	-	-80 %
	D.M.			-90 %	-	-	-90 %

Výjimečně lze dohledat studie zaměřené na směsi, které vykazují extrémně vysoké nárůsty pevnosti nebo vysokou stabilitu za vysoké teploty. Obvykle se jedná o sofistikované směsi obsahující kombinaci různých příměsí [141], které vykazují efektivní synergii za zvýšené teploty, anebo nestandardní směsi s vysokým zastoupením popílku (angl. high volume fly ash concrete – HVFA concrete) [142]. Příkladem je beton [119], který po ohřevu na teplotu 500 °C stále vykazuje zlepšení residuální pevnosti v tlaku. Jedná se ovšem o velmi specifický případ, kdy ohřev HSC

² H.M. = horní mez, D.M. = dolní mez

těles na vyšší teploty probíhal za velmi nízké rychlosti podle doporučení RILEM a trval desítky hodin, což se výrazně vzdaluje podmínkám skutečného požáru. Zvoleným způsobem ohřevu betonu tak patrně došlo k dodatečné hydrataci a výraznému zpevnění struktury, stejně jako je typické pro proces autoklávování. Nízkou rychlostí ohřevu navíc došlo k omezení poškození integrity materiálu, které by hrozilo při vysokém teplotním gradientu a nerovnoměrném ohřátí tělesa. V neposlední řadě byla předmětem směs s vysokým zastoupením popílku.

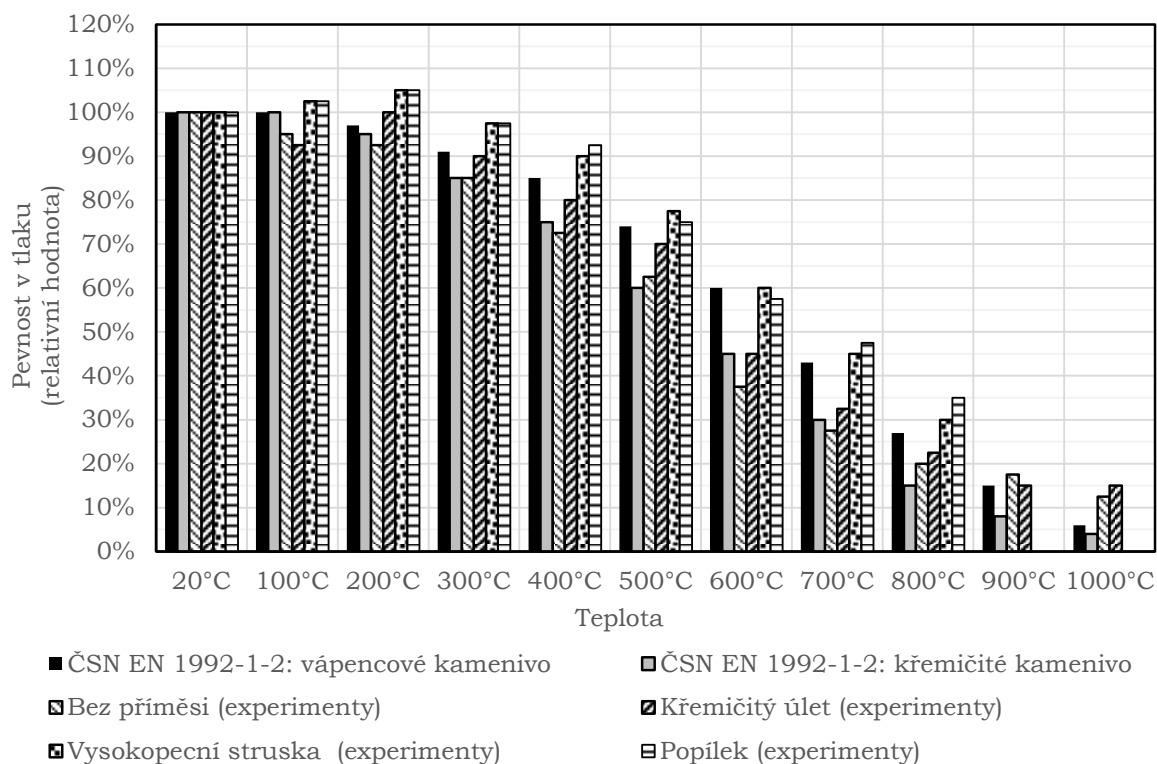
Ve většině případů ovšem dochází k situaci, kdy do teploty 300 °C dochází k mírnému poklesu pevnosti v tlaku. Míra snížení pevnosti se odvíjí od vlhkostních poměrů uvnitř struktury a příměsí, které jsou obsaženy v cementovém kompozitu. Pevnost v tlaku u směsi bez příměsí, případně směsi s popílkem a vysokopecní struskou se může zhoršit až o 15 % do teploty 300 °C. Tuto hodnotu obvykle vykazují směsi s menším zastoupením popílku, a naopak směsi s vyšším zastoupením vysokopecní strusky, přičemž zmíněný pokles lze očekávat u příměsí v množství shodném s hmotností cementu. Nejhorší chování v tomto teplotním rozmezí vykazují cementové kompozity s křemičitým úletem, které mohou vykazovat pokles až 30 % při 10% zastoupení k hmotnosti cementu.

V okamžiku, kdy teplota přesáhne 300 °C, se u cementových kompozitů začíná projevovat rapidní degradace bez ohledu na typ příměsí (Obr.16). Tento průběh souvisí s významným rozvojem trhlin a ztrátou chemicky vázané vody. Z hlediska příměsí se ukazuje, že nejlepší teplotní stabilitu mají cementové kompozity s příměsí popílku a vysokopecní strusky. Naopak přítomnost křemičitého úletu není až tak efektivní a jeho přínos v porovnání s běžnými cementovými kompozity bez příměsí je nevýznamný.

Obecně směsi s vápencovým kamenivem vykazují vyšší schopnost odolávat vyšším teplotám než při uplatnění křemičitého kameniva, které má horší stabilitu za vysoké teploty. Tuto skutečnost dokládají normová doporučení [140] a zároveň odborné zdroje [139]. Vždy ovšem záleží na mineralogickém složení, obsahu křemene, stabilitě za vysoké teploty, mechanických a fyzikálních vlastnostech kameniva. Příkladem je žulové kamenivo, které lze považovat za křemičité kamenivo díky vysokému obsahu křemene. Při jeho uplatnění vykazují cementové kompozity vyšší residuální pevnost v tlaku po tepelné expozici v porovnání s vápencovým a křemencovým kamenivem, přičemž procentuální rozdíl v relativní pevnosti roste lineárně se teplotou a dosahuje 15 % při teplotě 600 °C [9]. Určitým benefit křemičitého kameniva lze spatřit v počáteční fázi ohřevu. Jeho přítomnost může přispět k výraznějšímu nárůstu pevnosti díky mineralogickému složení, které vytváří ideální podmínky pro vznik tobermoritu za působení vlhkosti a pórového tlaku [34].

Na problematiku chování cementových kompozitů s recyklovaným kamenivem z betonového odpadu existují dva protichůdné názory založené na experimentálním zjištění. Tím prvním je, že recyklované kamenivo může přispět ke schopnosti směsi

zachovat si pevnost v tlaku za zvýšené teploty, protože vykazuje obdobnou teplotní roztažnost jako cementový kámen v nové směsi. Důvodem je starý cementový kámen, který je součástí recyklovaného kameniva a svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi se značně přibližuje novému cementovému kameni. Výsledkem je, že vznik mikrotrhlin od rozdílného přetvoření recyklovaného kameniva a nového cementového kamene není tak významný a vnitřní integrita materiálu je zachována [143]. Na druhou stranu lze výjimečně dohledat i publikace [139], které ukazují negativní dopad recyklovaného betonového kameniva. Za hlavní příčinu takového chování se považuje slabá vazba mezi novým cementovým kamenem a recyklovaným kamenivem, který obsahuje zbytky starého cementového kamene. Mechanické vlastnosti recyklované kameniva navíc mohou vykazovat známky degradace způsobené předchozím namáháním a procesem mechanické recyklace [144].



Obr.16 Průměrná hodnota pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě [31, 139, 135]

5.1.2.2 Pevnost v tahu

Vzhledem ke skutečnosti, že tahová pevnost cementových kompozitů bez rozptýlené výztuže nemá v betonovém průmyslu takovou důležitost, existuje pouze limitované množství poznatků a experimentálních výsledků. Trend vývoje pevnosti v tahu je shodný s tím, který vykazují cementové kompozity v tlaku. Daleko více se ovšem projevuje struktura narušená mikrotrhlinami od nerovnoměrného ohřevu a rozdílné teplotní roztažnosti zastoupených složek.

Uplatněním křemičitého úletu se dosáhne vyšší hutnosti cementového kompozitu, což má ovšem negativní vliv na vývoj pórového tlaku a vznik mikrotrhlin uvnitř struktury materiálu. V důsledku toho směsi s křemičitým úletem vykazují obvykle horší stálost pevnosti v tahu v porovnání se směsí bez příměsí. Přínos z hlediska pevnosti v tahu vykazují opět popílek a vysokopecní struska. Jejich uplatněním lze docílit mírného nárůstu pevnosti v počáteční fázi ohřevu, a i přes dramatický pokles pevnosti v tahu při teplotách nad 300 °C stále vykazují relativně dobrou stálost [139].

Důležité je upozornit na to, že pevnost v tahu se úzce odvíjí od rozvoje a vzniku mikrotrhlin od nerovnoměrné ohřevu, pórového tlaku a odlišného přetvoření složek zastoupených v cementovém kompozitu [145]. Proto má volba kameniva vysokou důležitost právě v případě pevnosti v tahu. Tento fakt dokládají i zjištěné experimentální výsledky chování betonu s žulovým kamenivem, který vykazuje výrazně vyšší stálost pevnosti v tahu v porovnání s vápencovým a křemičitým kamenivem. Přínos žulového kameniva roste lineárně s teplotou a v okamžiku, kdy je dosažena teplota 600 °C, činí 15 % [9].

Protichůdné názory lze vidět u studií zaměřených na recyklované betonové kamenivo jako náhrady přírodního kameniva. Příčinou může být skutečnost, že se účinky recyklovaného kameniva porovnávají s referenční směsí s přírodním kamenivem, jehož druh se u každé studie liší. Nelze proto jednoznačně určit, jakým způsobem recyklované betonové kamenivo ovlivňuje chování cementových kompozitů za zvýšené teploty v porovnání s přírodním kamenivem.

Většina poznatků se shoduje v tom, že stabilita pevnosti v tahu za zvýšené teploty se uplatněním recyklovaného betonového kameniva snižuje z důvodu nečistot, které se během ohřevu spálí a tím naruší celistvost struktury. V neposlední řadě se díky přítomnosti recyklátu zvyšuje množství ITZ v cementovém kompozitu, jež patří k nejslabším článkům struktury cementových kompozitů. Kromě ITZ mezi recyklátem a novým cementovým kamenem je zapotřebí zohlednit i ITZ mezi původním kamenivem a cementovým kamenem, který je nedílnou součástí recyklátu [145]. Naproti tomu lze výjimečně dohledat závěry studií [143], které poukazují na pozitivní přínos recyklovaného betonového kameniva jako náhrady vápencovitého kameniva. Opodstatněním může být složení betonového recyklátu, který mimo původního kameniva obsahuje i zbytky cementového kamene. Díky tomu se fyzikální a mechanické vlastnosti mohou přibližovat těm, kterými disponuje nový cementový kámen a vzájemná synergie obou komponentů tak může být daleko efektivnější [143].

5.1.3 Vliv ochlazení

Ačkoliv se může zdát, že způsob ochlazení nikterak neovlivňuje vývoj mechanických vlastností cementových kompozitů, tak opak je pravdou. Ochlazení materiálu s sebou přináší chemické a fyzikální procesy, mezi které patří rozvoj trhlin z důvodu nerovnoměrného ochlazení, adsorpce vlhkosti a následná opětovná hydratace s CaO (pálené vápno) [5].

Existuje několik způsobů (kapitola 3.2.3), které se využívají pro ochlazení zahřátých těles a mohou ovlivnit residuální mechanické vlastnosti. Degradace materiálu se odvíjí od rychlosti ochlazení (teplotního šoku), kterému jsou tělesa vystavena. V pořadí podle rychlosti se jedná o ochlazení v zavřené peci, přirozeně na vzduchu, postřikem vody, proudem vody a ve vodní lázni. Čím extrémnější způsob ochlazení se aplikuje, tím vyšší teplotní gradient v tělese vzniká. Ten má za následek vznik přídavných napětí, které mohou vést ke vzniku dalších mikrotrhlin a prohloubit tak degradaci vnitřní struktury materiálu.

Určité zdroje [107, 146] uvádí, že z hlediska míry porušení hraje důležitou roli teplota tělesa, při které dochází k ochlazení. Paradoxně může shodný způsob ochlazení zapříčinit výraznější poškození integrity materiálu zahřátém na nižší teplotu než na teplotu vyšší. Důvod spočívá v úrovni znehodnocení vnitřní struktury, která úzce koreluje s její poddajností. Materiály zahřáté na vysokou teplotu přesahující 450 °C, s výrazně poddajnou strukturou od účinků předchozího ohřevu, se dokážou efektivněji přizpůsobit přídavnému napětí od nerovnoměrného ochlazení a porušení v podobě vzniku nových mikrotrhlin není tak evidentní. Lze proto překládat, že extrémní způsob ochlazení vodní lázní se výrazně neprojeví na zhoršení mechanických vlastností. Naopak u mírně zahřátých těles do 450 °C, u kterých se výrazně neprojevila degradace materiálu a stále mají vysokou tuhost, může mít extrémní způsob ochlazení daleko znatelnější následky. V tomto případě může způsob ochlazení zásadně ovlivnit residuální mechanické vlastnosti.

Důležité je rovněž upozornit na to, že volbou ochlazení lze docílit i zlepšení mechanických vlastností [109]. Uplatněním ochlazení na bázi vody lze docílit opětovné hydratace reaktivních složek, které vznikly rozložením cementového kamene za vysoké teploty. Opětovnou hydratací lze snížit pórovitost materiálu a tím vylepšit lepší mechanické vlastnosti v řádu jednotek procent. Tento jev se projevuje zejména u cementových kompozitů zahřátých na velmi vysoké teploty, u kterých lze očekávat větší zastoupení reaktivních složek.

5.2 Residuální pevnost vláknocementových kompozitů

V současnosti existuje široké spektrum rozptýlené výztuže, která se využívá pro výrobu vláknocementových kompozitů. Každý typ přispívá odlišným způsobem, který se odvíjí od geometrie, tvaru, velikosti, zastoupeného množství a materiálu vláken. Důležitou roli při hodnocení přínosu vláken z hlediska chování cementových kompozitů za zvýšené teploty hraje i jejich stabilita za vysoké teploty.

5.2.1 Cementové kompozity ztužené syntetickými vlákny

Syntetická vlákna se využívají za účelem ztužení struktury materiálu a prodloužení jeho trvanlivosti. Zajišťují efektivnější rozvoj trhlin, snižují šířku trhlin a dále zvyšují rázovou odolnost, odolnost proti obrusu, odolnost proti únavě materiálu a mrazuvzdornost [147]. Důležitým benefitem v případě požáru je i schopnost vláken

snížit riziko odprýskávání betonu. Díky nízké teplotě tání (u polyethylenu PE a polypropylenu PP okolo 160 °C) dochází v počáteční fázi zahřívání betonu k tavení vláken a vzniku všesměrných cestiček, tzv. kapilár uvnitř struktury materiálu [148]. Přínos, který mají vlákna za běžné teploty, se sice ztrácí, ale vzniklé kapiláry efektivně umožní odvést vznikající vodní páru z betonu a snížit tím pórový tlak [133]. S ohledem na tuto nespornou výhodu při působení vysokých teplot se nabízí i otázka uplatnění vláken zhotovených z druhotných surovin nebo plastového odpadu [149]. Pro tento účel je důležité volit taková vlákna, která mají nízký bod tání a svoji přítomností v betonu negativně neovlivní jeho běžné vlastnosti betonu.

Studii zaměřených přímo na sledování pórového tlaku není mnoho. Častokrát lze dohledat závěry vycházející z experimentálních zkoušek zaměřených na sledování mechanických vlastností, které ovšem nelze považovat za průkazné. Důvodem je nízká rychlost ohřevu, která neodpovídá reálnému vývoji požáru. Díky tomu ve struktuře materiálu nevzniká takové prostředí, které by disponovalo pórovým tlakem o skutečných hodnotách.

Protože problematika vývoje pórového tlaku není dostatečně objasněna, dávkování syntetických vláken za účelem snížení pórového tlaku se odvíjí od předchozí zkušenosti nebo nepodložené predikce. V určitých případech tak může nastat situace, kdy nekontrolované množství efektivně přispěje ke snížení pórového tlaku, ale na druhou stranu zásadně ovlivní strukturu materiálu a jeho mechanické vlastnosti za zvýšené teploty. Není proto překvapením, že podrobná znalost o vývoji termomechanických vlastností v závislosti na množství syntetických vláken je velice důležitá. Díky omezenému množství dat a rozmanitosti vstupních parametrů nelze výsledky z různých studií vzájemně porovnávat. Na základě zjištěných poznatků z každé studie lze ale formulovat konkrétní teoretické závěry.

Experimentální zkoušky zaměřené na sledování residuální pevnosti se věnují zejména směsím s polypropylenovými (PP) vlákny disponující nízkým bodem tání okolo 160 °C, výjimečně pak s vlákny z polyethylenu (PE) a polyvinylalkoholu (PVA). Následující analýzy a formulované hypotézy se proto opírají především o poznatky a zkušenosti s cementovými kompozity ztuženými PP vlákny (Tab.7-11). Díky nízkému bodu tání PP se chování vláknocementových kompozitů mění v závislosti na teplotě a množství vláken. Jako zásadní při hodnocení vlivu PP vláken se jeví okamžik, kdy teplota cementového kompozitu dosáhne teploty tání vláken. Dochází tím ke změně materiálu, konkrétně jeho struktura ztužená PP vlákny se mění na strukturu s vysokou pórovitostí způsobenou vyhořelými vlákny. Tuto hypotézu potvrzují výsledky pevnosti v tlaku, a především pevnosti v tahu za ohybu.

Tab. 7 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení Způsob ochlazení	Složení		Kvazistatická zkouška Typ zkoušky Těleso
	Materiál Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka			Kamenivo Příměs		
[46]	PP vlákna 1 kg/m ³ 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek Metakaolin 100 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm	
[46]	PP vlákna 1 kg/m ³ 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek Křemičitý úlet 50 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm	
[46]	PP vlákna 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek Žádná	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm	
[48]	PP vlákna 1,8 kg/m ³	13 mm Nespecifi. ³ Nespecifi.	0,5 °C/min	580 min	200 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Nespecifikováno Křemičitý úlet 41 kg/m ³	Tlak Válec 110*220 mm Příčný tah Válec 110*220 mm Modul pružnosti Válec 160*320 mm	
[49]	PP vlákna 1 kg/m ³	20 mm 20 μm 1000 [-]	10 °C/min	100 min 120 min 140 min	400 °C 600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Vápencové kamenivo Křemičitý úlet 62 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tah Krychle 100 mm Lomová energie Trámec 100*100*300 mm	
[50]	PP vlákna 2 kg/m ³ 4 kg/m ³ 8 kg/m ³	12 mm 18 μm 667 [-]	2,5 °C/min	220 min 300 min 380 min	400 °C 600 °C 800 °C	Saturovaný Přirozeně na vzduchu	Lehčené kamenivo-pemza Křemičitý úlet 40 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*500 mm	

³ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 8 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení Způsob ochlazení	Složení Kamenivo Příměs	Kvazistatická zkouška Typ zkoušky Těleso
	Materiál Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka				
[50]	PP vlákna 2 kg/m ³ 4 kg/m ³ 8 kg/m ³	12 mm 18 μm 667 [-]	2,5 °C/min	220 min 300 min 380 min	400 °C 600 °C 800 °C	Saturovaný Přirozeně na vzduchu	Lehčené kamenivo- pemza Žádná	Tlak Krychle 100 mm Tah za ohybu Trámeč 100*100*500 mm
[51]	PP Vlákna 5 kg/m ³	30 mm Nespecifi. ⁴ Nespecifi.	5 °C/min	80 min 120 min 160 min 200 min	100 °C 300 °C 500 °C 700 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně v zavřené peci	Žulové kamenivo Křemičitý úlet + popílek	Tlak Krychle 100 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Modul pružnosti: Válec 150*300 mm
[51]	PP Vlákna 5 kg/m ³	30 mm Nespecifi. Nespecifi.	5 °C/min	80 min 120 min 160 min 200 min	100 °C 300 °C 500 °C 700 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně v zavřené peci	Žulové kamenivo Žádná	Tlak Krychle 100 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Modul pružnosti: Válec 150*300 mm
[52]	PP Vlákna 4,6 kg/m ³ 9,2 kg/m ³	58 mm 0,9 mm 64 [-]	Nespecifikován	Nespeci.	400 °C 600 °C 800 °C	Nespecifikováno Přirozeně na vzduchu	Říční písek Žádná	Tah za ohybu Trámeč 100*100*350 mm
[52]	PE Vlákna 4,55 kg/m ³ 9,1 kg/m ³	40 mm 0,44 mm 90 [-]	Nespecifikován	Nespeci.	400 °C 600 °C 800 °C	Nespecifikováno Přirozeně na vzduchu	Říční písek Žádná	Tah za ohybu Trámeč 100*100*350 mm
[54]	PP Vlákna 2 kg/m ³	15 mm 30 μm 500 [-]	6 °C/min	230 min 280 min 330 min	300 °C 600 °C 900 °C	Nespecifikováno Nespecifikováno	Vápenkové Popílek 100 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tah za ohybu Trámeč 100*100*400 mm
[81]	PP Vlákna recyklované 4,55 kg/m ³	20 mm 450 μm 44 [-]	3 °C/min	127 min 193 min 260 min 326 min	200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo Drobný těžký písek Popílek	Tlak Krychle 100 mm

⁴ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 9 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení Způsob ochlazení	Složení Kamenivo Příměs	Kvazistatická zkouška Typ zkoušky Těleso
	Materiál Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka				
[55]	PVA Vlákna 3,5 kg/m ³ 7 kg/m ³ 10,5 kg/m ³ 14 kg/m ³	12 mm 660 μm 18 [-]	6 °C/min	24 hod 145 min 208 min	100 °C 450 °C 650 °C	V peci při 100 °C po 24 hod Nespecifikováno ⁵	Běžný písek Žádná	Tlak Nespecifikováno Tah za ohybu Nespecifikováno
[57]	PP Vlákna 1 kg/m ³	6 mm 25 μm 240 [-]	5 °C/min	120 min 180 min	300 °C 600 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Hrubé žulové kamenivo Drobné vápencové kamenivo a říční písek Vápencová moučka	Tlak Krychle 150 mm Příčný tah Válec 150*300 mm
[57]	PP Vlákna 1 kg/m ³	12 mm 25 μm 480 [-]	5 °C/min	120 min 180 min	300 °C 600 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Hrubé žulové kamenivo Drobné vápencové kamenivo a říční písek Vápencová moučka	Tlak Krychle 150 mm Příčný tah Válec 150*300 mm
[59]	PP Vlákna 0,5 kg/m ³ 1,0 kg/m ³ 1,5 kg/m ³	19 mm Nespecifi. Nespecifi.	Tělesa vložena do ohřáté pece	120 min 120 min 120 min	200 °C 400 °C 600 °C	Saturované Fény	Hrubé žulové kamenivo Drobný říční písek Popílek 120 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 75*150 mm
[59]	PP Vlákna 0,5 kg/m ³ 1,0 kg/m ³ 1,5 kg/m ³	19 mm Nespecifi. Nespecifi.	Tělesa vložena do ohřáté pece	240 min 240 min 240 min	200 °C 400 °C 600 °C	Saturované Fény	Hrubé žulové kamenivo Drobný říční písek Popílek 120 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 75*150 mm
[63]	PP Vlákna 4,55 kg/m ³ 9,1 kg/m ³	52 mm 460 μm 113 [-]	2 °C/min	170 min	280 °C	Nespecifikováno Přirozeně v zavřené peci	Vápencové kamenivo Křemičitý úlet 20 kg/m ³	Tlak Válec 100*200 mm Tah za ohybu Trámeč 100*100*500 mm

⁵ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 10 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení		
[63]	PP Vlákna 4,55 kg/m ³ 9,1 kg/m ³	12 mm 25 μm 480 [-]	2 °C/min	170 min	280 °C	Nespecifikováno ⁶ Přirozeně v zavřené peci	Vápenčové kamenivo Křemičitý úlet 20 kg/m ³	Tlak Válec 100*200 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*500 mm
[63]	PP Vlákna 4,55 kg/m ³ + PP Vlákna 4,55 kg/m ³	52 mm 460 μm 113 [-] 12 mm 25 μm 480 [-]	2 °C/min	170 min	280 °C	Nespecifikováno Přirozeně v zavřené peci	Vápenčové kamenivo Křemičitý úlet 20 kg/m ³	Tlak Válec 100*200 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*500 mm
[66]	PVA Vlákna 20 kg/m ³	12 mm 200 μm 60 [-]	5 °C/ min	200 min 220 min 240 min 260 min 280 min 300 min 320 min	100 °C 200 °C 300 °C 400 °C 500 °C 600 °C 700 °C	Přirozeně na vzduchu a rovněž při 105 °C po nespecifikovanou dobu Přirozeně na vzduchu	Nespecifikováno Křemičitý úlet	Tlak Válec 100*200 mm
[67]	PVA Vlákna 15 kg/m ³ 17 kg/m ³ 20 kg/m ³ 22 kg/m ³	12 mm 40 μm 300 [-]	5 °C/min	160 min 200 min 240 min 280 min	200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	Při 100 °C po 24 hod Přirozeně na vzduchu	Křemičité drobné kamenivo Popílek (60%/65%/70%/75%)	Tlak Krychle 70,7 mm Osový tah Těleso tvaru kosti s průřezem 30*15 mm
[77]	PP Vlákna 1,4 kg/m ³ 3,5 kg/m ³ 7 kg/m ³	12 mm 20–30 μm 400–600 [-]	5 °C/min	280 min 320 min 360 min 400 min	200 °C 400 °C 600 °C 900 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Lehké kamenivo Křemičitý úlet	Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm

⁶ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

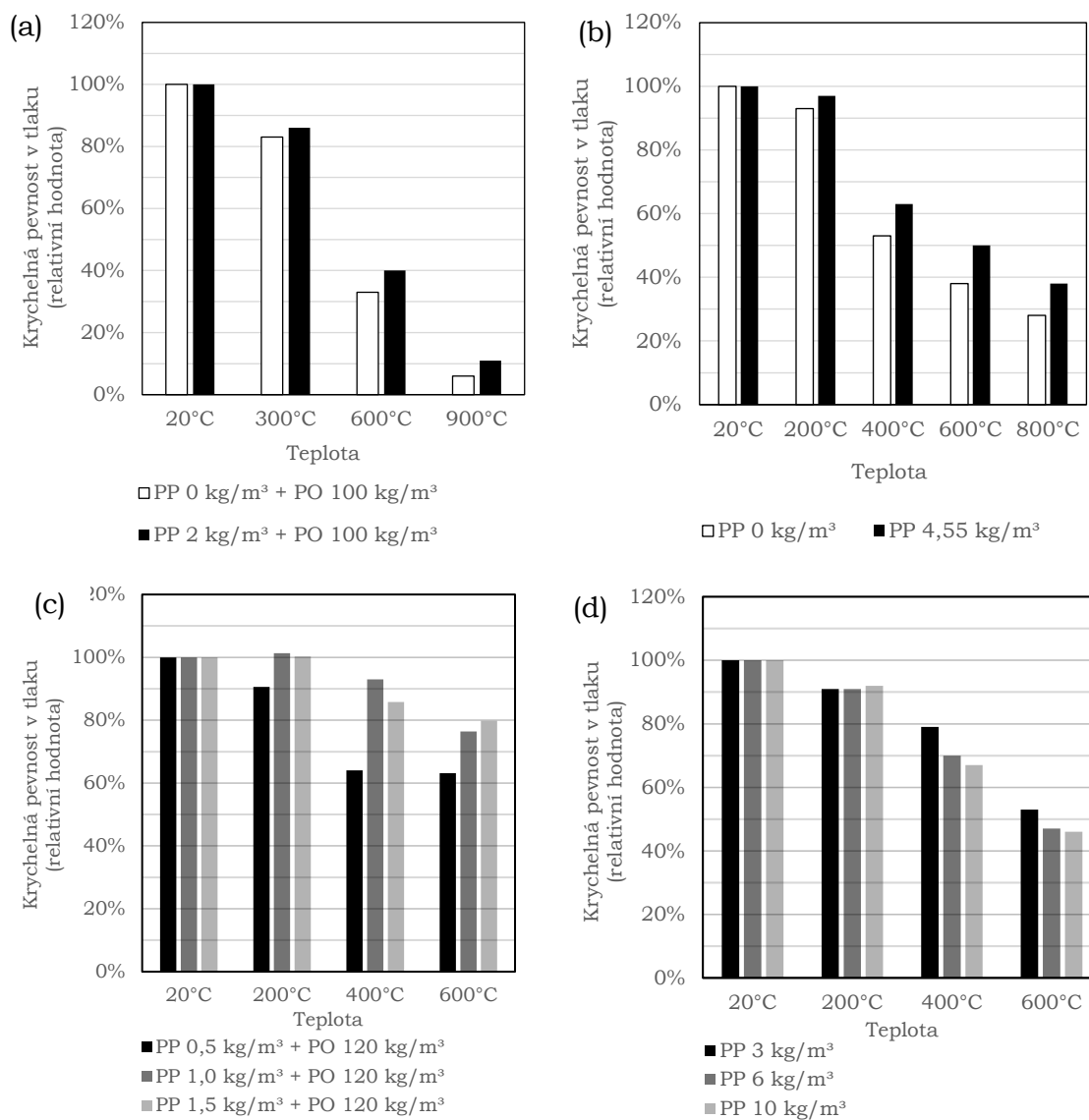
Tab. 11 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo Příměs	
[77]	PP Vlákna 1,4 kg/m ³	12 mm	5 °C/min	280 min	200 °C	Přirozeně na vzduchu	Lehké kamenivo	Tlak Válec 100*200 mm
20–30 μm		320 min		400 °C				
400-600 [-]		360 min		600 °C	Přirozeně v zavřené peci	Křemičitý úlet + popílek		
		400 min		900 °C				
[60]	PVA Vlákna 20 kg/m ³	12 mm	23,5 °C/min	384 min	100 °C	Přirozeně na vzduchu	Křemičité drobné kamenivo	Tlak Válec 100*200 mm
39 μm		388 min		200 °C				
308 [-]		392 min		300 °C	Nespecifikováno ⁷			
		396 min		400 °C				
		404 min		600 °C				
		124 min		100 °C				
		128 min		200 °C				
		132 min		300 °C				
		136 min		400 °C				
144 min		600 °C						
							Osový tah Těleso tvaru kosti s průřezem 76,2*12,7 mm	
[78]	PE Vlákna 12,5 kg/m ³	13 mm	1 °C/min	260 min	200 °C	V peci při 105 °C do ustálené hmotnosti	Nespecifikováno	Tlak Válec 100*200 mm Osový tah Těleso tvaru kosti s průřezem 48*13 mm
38 μm		460 min		400 °C				
342 [-]		660 min		600 °C	Nespecifikováno	Křemičitý úlet 361 kg/m ³		
		860 min		800 °C				
[81]	PP Vlákna recyklovaná 4,55 kg/m ³	20 mm	3 °C/min	127 min	200 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo Drobný těžký písek	Tlak Krychle 100 mm
450 μm		193 min		400 °C				
44 [-]		260 min		600 °C	Přirozeně na vzduchu	Žádná		
		326 min		800 °C				
[55]	PP Vlákna 3,5 kg/m ³ 7 kg/m ³ 10,5 kg/m ³ 14 kg/m ³	12 mm	6 °C/min	24 hod	100 °C	V peci při 100 °C po 24 hod	Běžný písek	Tlak Nespecifikováno Tah za ohybu Nespecifikováno
18 μm		145 min		450 °C				
666 [-]		208 min		650 °C	Nespecifikováno	Žádná		

⁷ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

5.2.1.1 Pevnost v tlaku

Experimentální data z širokého spektra zkoušek a závěry studie zaměřené na porovnání výsledků tlakových zkoušek [43] shodně poukazují na to, že relativní hodnoty získané z tlakové zkoušky na krychlich a válcích (popř. trámčích) se liší. Při analýze experimentálních dat a chování cementových kompozitů ztužených PP vlákny se proto musí rozlišovat mezi krychelnou pevností a válcovou pevností.



Obr.17 Residuální krychelná pevnost v tlaku cementových kompozitů s PP vlákny v závislosti na teplotě: (a) [54] a (b) [81] vliv PP vláken, (c) [59] a (d) vliv množství PP vláken ⁸

5.2.1.1.1 Krychelná pevnost

Z výsledků zkoušek na tělesech tvaru krychle je patrné, že z počátku zahřívání do 200 °C směs s vlákny vykazuje vyšší schopnost zachovat si pevnost v tlaku (Obr.17).

⁸ PO – popílek, PP – polypropylenová vlákna

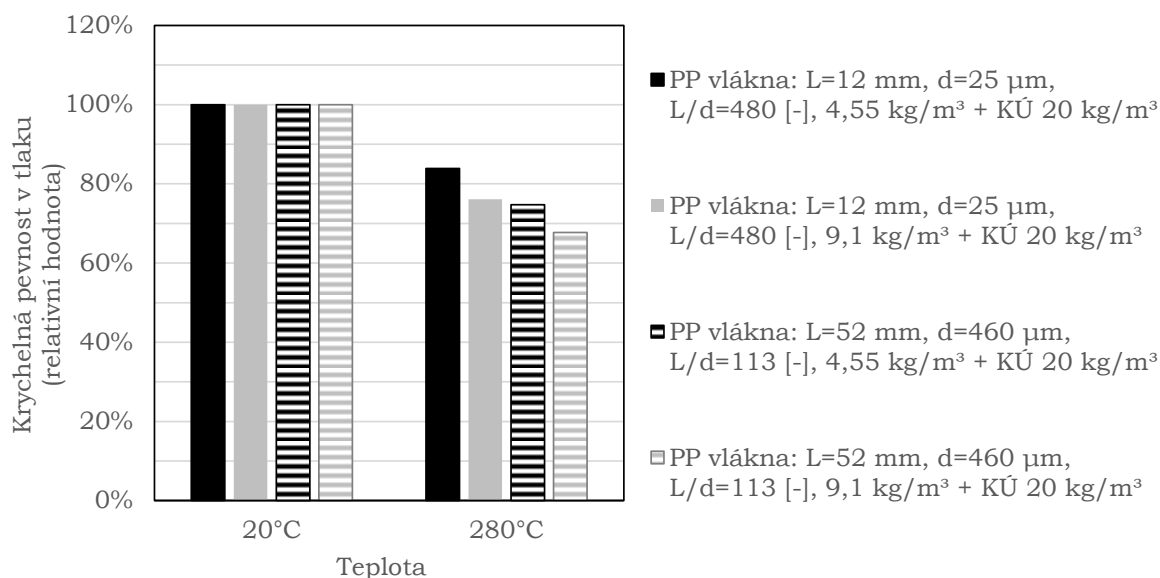
Hlavní důvod může spočívat v dodatečné hydrataci nezhydratovaných zrn cementu. Ty se nachází zejména v ITZ [150], ale i mezi vlákny a cementovým kamenem (angl. fibre interfacial transition zone – FITZ) [151]. Stěnový efekt a hydrofobita vláken rovněž přispívá k tomu, že na rozhraní obou komponentů vznikají mikrotrhliny. Ty negativně ovlivňují spolupůsobení vláken, ale zároveň při postupném zahřívání fungují jako kapiláry, které umožňují efektivnější transport vodní páry ve struktuře materiálu. Vlákna svojí přítomností ve směsi vytváří ideální podmínky pro to, aby se pára snáze dostala do kontaktu s nezhydratovanými zrny cementu a nastala jejich dodatečná hydratace. Pórový tlak vznikající souběžně se zahříváním navíc přispívá k efektivnějšímu průběhu celého procesu.

Zároveň nelze předpokládat, že se ve struktuře materiálu nachází takové množství nezhydratovaných cementových zrn, že by s každým dalším zvyšováním množství vláken lineárně rostla pevnost materiálu v tlaku spojená s dodatečnou hydratací [152]. Optimální podmínky pro dodatečnou hydrataci nastanou pouze v okamžiku, kdy směr bude obsahovat takové množství vláken, které umožní vytvořit prostředí s ideálním pórovým tlakem a vhodnou úrovní vlhkostí, a zároveň se v cementovém kameni bude nacházet dostatek nezhydratovaných zrn. Na základě dostupných poznatků a experimentálních výsledků [55, 59] lze usuzovat, že vhodná dávka se pohybuje v rozmezí 5 kg/m^3 až 10 kg/m^3 . Vyšší zastoupení vláken se již stává neefektivní, protože naopak urychluje vysušení cementového kamene a jeho degradaci.

Při dalším zvyšování teploty nad $200 \text{ }^\circ\text{C}$ se začíná projevovat skutečnost, že se již ve struktuře cementového kompozitu nenachází vyhořelá PP vlákna. Rostoucí množství vláken se sebou přináší progresivnější degradaci, kdy vzniklé kapiláry a póry narušují celistvost struktury materiálu a ten následně disponuje nižší pevností v tlaku. Nelze ovšem konstatovat, že vyšší množství vláken automaticky znamená horší stabilitu za vysoké teploty. Důležité je nahlížet na chování materiálu komplexně a zohlednit jeho vývoj po celou dobu ohřevu. Na počátku ohřevu do $200 \text{ }^\circ\text{C}$ u směsi s nižším zastoupením vláken může s vysokou pravděpodobností nastat dodatečná hydratace, jejíž výsledkem je materiál vykazující vyšší pevnost. Zároveň, při pokračujícím ohřevu a vyhoření vláken, celistvost struktury těchto směsí není tak výrazně narušena. V konečném součtu směsi s nízkým obsahem vláken vykazují lepší stabilitu za vysoké teploty, která se může dokonce navyšovat s množstvím vláken (Obr.17c). V okamžiku, kdy se dosáhne mezního množství vláken, vliv oslabení struktury začne převládat nad přínosem dodatečné hydratace a schopnost směsi zachovat si krychelnou pevnost v tlaku započne klesat (Obr.17d), přičemž procentuální rozdíly v relativních hodnotách pevností směsí s různým zastoupením vláken klesají s rostoucí teplotou. Shromážděná experimentální data ukazují na to, že v tomto směru lze za mezní hodnotu považovat dávku 5 kg/m^3 .

V neposlední řadě je zapotřebí upozornit i na vlhkostní poměry uvnitř struktury materiálu, které jsou úzce spojeny s vývojem pórového tlaku a mají vliv na stabilitu

materiálu za vysoké teploty. Obecně známá fakta uvádí, že PP vlákna ovlivňují pórový tlak uvnitř cementových kompozitů za požáru. Jinými slovy lze říct, že s ohledem na množství vláken se vyvíjí i vlhkostní poměry uvnitř struktury materiálu. Vyšší množství vláken přispívá k rapidnějšímu transportu vodní páry mimo strukturu materiálu a tím i k rychlejšímu vysušení cementového kamene. V důsledku tohoto jevu dochází k umocnění rozkladu cementového kamene a rychlejší ztrátě pevnosti materiálu. Lze proto očekávat, že směsi s vyšším zastoupením vláken mají tendenci vykazovat nižší pevnost na konkrétní teplotní úrovni.



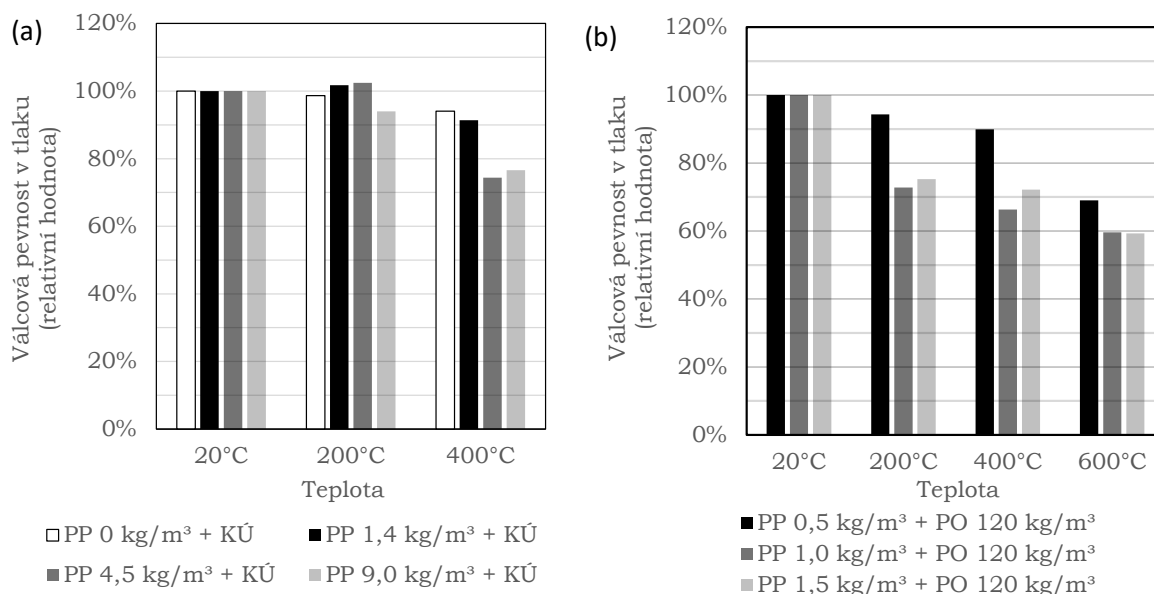
Obr. 18 Residuální krychelná pevnost v tlaku cementových kompozitů s PP vlákny v závislosti na teplotě: vliv geometrie vláken [57]⁹

Experimentální data [57, 63] rovněž ukazují na to, že větší přínos z hlediska stability směsi mají vlákna kratší a s menším průměrem (Obr. 18). Při stejném obsahu ve směsi taková vlákna narušují strukturu materiálu v menší míře a jsou schopná docílit efektivnějšího rozložení kapilár v jeho objemu. Materiál tím působí více jako stejnorodá látka.

5.2.1.1.2 Válcová pevnost

Dat zaměřených na studii válcové pevnosti není mnoho, i přes to lze odhadnout typický trend vývoje. Vliv PP vláken na válcovou pevnost cementových kompozitů v tlaku za vysoké teploty je téměř identický tomu, který byl objasněn v předchozí kapitole. Zásadní změnou je chování cementových kompozitů od okamžiku, kdy teplota ohřevu překročí teplotu tání vláken.

⁹ KÚ – křemičitý úlet, PP – polypropylenová vlákna



Obr. 19 Residuální válcová pevnost v tlaku cementových kompozitů s PP vlákny v závislosti na teplotě: (a) vliv vláken [77], (b) vliv množství PP vláken [59] ¹⁰

Stejně jako v případě krychlené pevnosti v tlaku z počátku zahřívání vykazují cementové směsi s menším množstvím vláken lepší stabilitu než nevyztužené cementové kompozity (Obr. 19a). Důvod spočívá v dodatečné hydrataci, pro kterou vlákna vytváří ideální podmínky. Jejich přítomností ve struktuře materiálu se zvyšuje množství FITZ, kde lze očekávat větší zastoupení nezhydratovaných cementových zrn a mikrotrhlin umožňující efektivní transport vodní páry uvnitř materiálu při ohřevu. Zahříváním materiálu dochází k efektivní migraci vodní páry k nezhydratovaným zrnům cementového kamene a za optimálního pórového tlaku probíhá dodatečná hydratace.

U většího množství vláken je naopak vidět klesající trend. Nelze očekávat, že s rostoucím zastoupením vláken poroste i množství nezhydratovaných zrn, které by umožňovaly dodatečnou hydrataci a zpevnění struktury materiálu. Zvyšováním obsahu vláken se proto zvyšuje množství FITZ, kde se na rozhraní cementového kamene a vláken vytváří mikrotrhliny mající negativní efekt na vývoj pevnosti. Vzniklé mikrotrhliny umožňují efektivnější způsob transportu vodní páry mimo strukturu materiálu, čímž dochází ke snížení pórového tlaku. Tento jev následně může zhoršit podmínky pro dodatečnou hydrataci nejenom ve FITZ ale i ITZ, tedy mezi kamenivem a cementovým kamenem. Efektivnějším odvodem vodní páry dochází k progresivnějšímu vysušení cementového kamene a jeho degradaci. Ve výsledku mohou v počátku zahřívání směsi s vysokým obsahem vláken vykazovat horší schopnost zachovat si válcovou pevnost v tlaku v porovnání s identickou směsí bez vláken.

¹⁰ KÚ – křemičitý úlet, PO – popílek, PP – polypropylenová vlákna

Vývoj válcové pevnosti vláknocementových směsí s PP vlákny od teploty 200 °C, tedy zhruba od okamžiku vyhoření vláken, je již odlišný od krychlené pevnosti. Tento rozdíl je zapříčiněn odlišným způsobem porušení těles. Při tlakové zkoušce dochází mezi tělesem a roznášecí deskou ke tření, které má v kombinaci s tvarem tělesa vliv na způsob porušení. Pokud má těleso tvar krychle nebo nízkého válce, jehož výška je shodná s průměrem podstavy, dochází k porušení v okamžiku, kdy je jádro tělesa vystaveno komplexnímu způsobu namáhání. Naopak u těles tvaru trámce nebo válce, jejichž výška je alespoň dvojnásobná v porovnání se stranou podstavy trámce nebo s průměrem válce, dochází ve středu výšky tělesa k porušení v čistém příčném tahu [153].

V okamžiku, kdy nastane vyhoření PP vláken, se začne projevovat negativní vliv oslabené struktury (Obr. 19a). Ta má následně menší schopnost odolávat tahovému namáhání během zkoušky, což ve výsledku znamená nižší pevnost materiálu. Navíc rostoucí množství vláken zvyšuje počet kapilár ve struktuře materiálu, čímž se sice snižuje pórový tlak, ale zároveň dochází k progresivnějšímu vysušení materiálu a jeho degradaci. Z experimentálních dat lze vyčíst, že celkové negativní důsledky vyhoření vláken převyšují ty pozitivní, které se u vláknocementového kompozitu mohou projevit na počátku ohřevu (dodatečná hydratace a nižší poškození struktury od pórového tlaku). Za vyšších teplot mají vláknocementové kompozity s PP vlákny horší stabilitu v porovnání s nevyztuženými cementovými kompozity. Výjimku mohou být směsi s velmi nízkým zastoupením vláken, u nichž nedojde k takovému oslabení struktury.

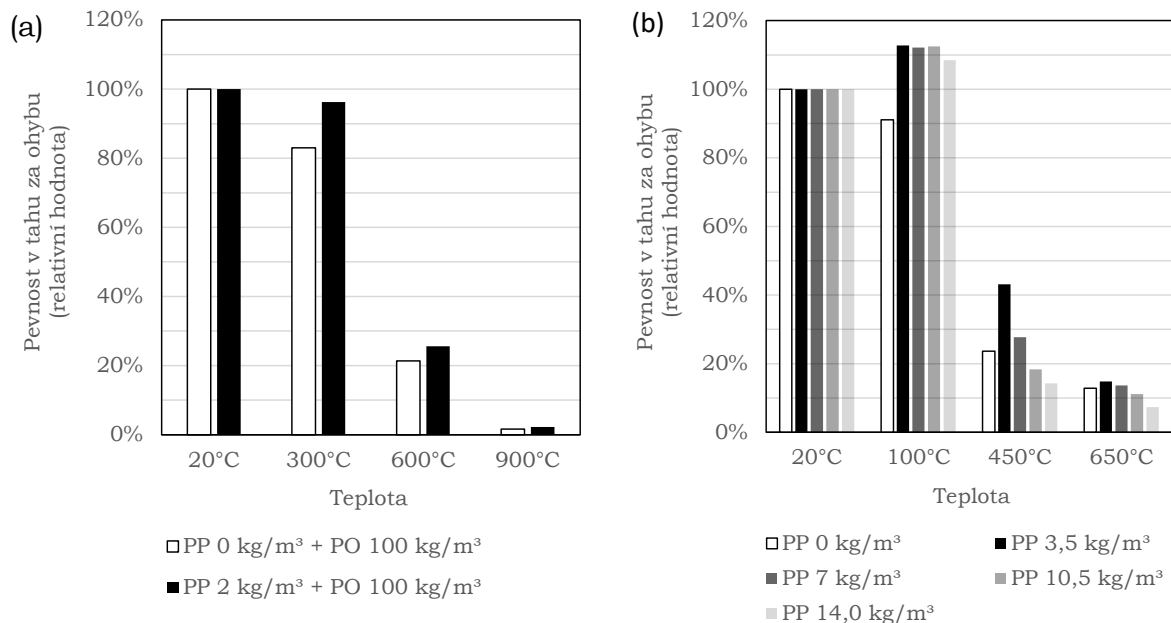
5.2.1.2 Pevnost v tahu

V současné době lze dohledat několik studií zabývajících se sledováním pevnosti v tahu za zvýšené teploty. Ve většině z nich se ovšem uplatňují nevhodné zkušební postupy (např. krátká doba ohřevu) [57, 59], anebo popis výzkumných činností a kroků (např. délka ohřevu, rychlost ohřevu) není jasný natolik, aby se mohla potvrdit správnost výsledků a objasnit příčiny zjištěného chování cementových kompozitů [52, 154].

Jedním z příkladů je studie, jejíž předmětem bylo sledovat vliv množství PP vláken na vývoj pevnosti v tahu v závislosti na teplotě (Obr.20b). Za drobné pochybení lze považovat proces přípravy těles. Zatímco tělesa testovaná za zvýšené teploty podstoupila proces vysušení, které lze částečně považovat za ošetřování propařováním, referenční tělesa bez tepelné expozice byla testována v saturovaném stavu bez vysušení. Stanovená relativní hodnota pevnosti tak může být zatížena určitou chybou.

I přes to lze z výsledku experimentu vypočítat trend vývoje pevnosti v tahu v závislosti na teplotě a množství vláken (Obr.20). Z počátku zahřívání do okamžiku tání vláken vláknocementové kompozity s nízkým zastoupením vláken vykazují lepší stabilitu než cementové kompozity bez rozptýlené výztuže. Důvodem je nižší

poškození vnitřní struktury od pórového tlaku, který klesá s rostoucím zastoupením vláken. Okolo vláken se nachází FITZ, které se svojí strukturou odlišují od běžného cementového kamene. Na rozhraní FITZ a PP vláken navíc vznikají mikrotrhliny fungující jako kapilární systém pro odvod vodní páry mimo těleso. Čím vyšší zastoupení vláken ve struktuře je, tím hustější síť kapilár vzniká a pórový tlak klesá.



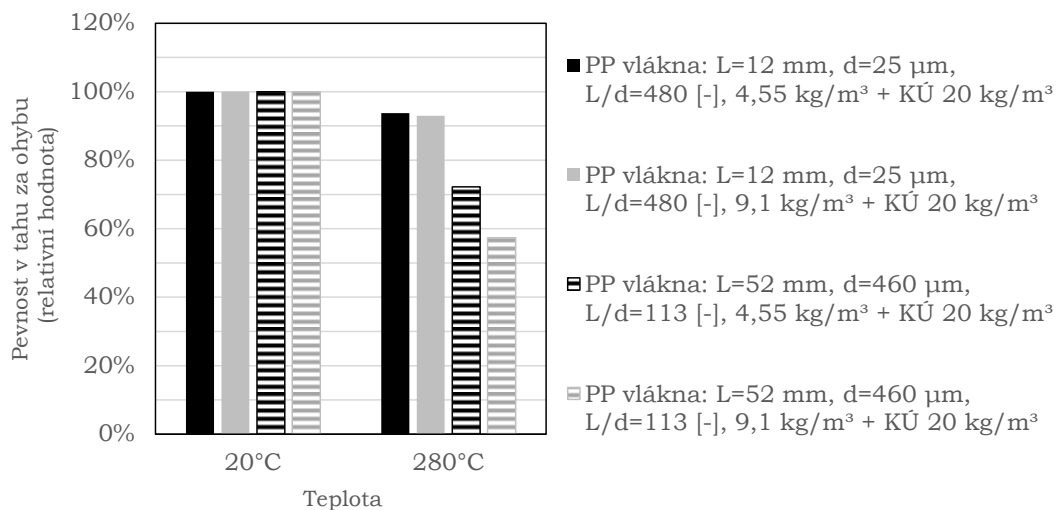
Obr.20 Residuální pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s PP vlákny: (a) vliv vláken [54], (b) vliv množství vláken [55] ¹¹

V počátku ohřevu se rovněž mohou projevit pozitivní účinky dodatečné hydratace v závislosti na množství nezhydratovaných zrn, aktuálních vlhkostních poměrech a pórovém tlaku uvnitř struktury materiálu. Zatímco se množství nezhydratovaných zrn odvíjí od složení směsi (zejména vodním součiniteli) a způsobu ošetřování betonu, množstvím přítomných vláken lze ovlivnit úroveň vlhkosti a hodnotu pórového tlaku. Mezi vlákny a cementovým kamenem vznikají mikrotrhliny umožňující efektivnější migraci vodní páry uvnitř tělesa. Přístup vodní páry k nezhydratovaným zrnům se zlepšuje a dochází k efektivnějšímu průběhu dodatečné hydratace. Tím, že se jedná o proces podobný autoklávování, existuje určité množství vláken, které umožní vytvořit optimální podmínky z hlediska pórového tlaku (0,8 MPa – 1,2 MPa). Nadměrné množství vláken může působit neefektivně a spíše umocnit vysušení materiálu.

Při dalším navyšování teploty lze vidět, že cementové kompozity s vysokým zastoupením vláken vykazují horší stabilitu než cementové kompozity bez rozptýlené výztuže. Za tímto trendem mohou stát dva jevy. V první řadě dochází vyhořením vláken k oslabení struktury, která následně není schopná odolávat takovým účinkům

¹¹ PO – popílek, PP – polypropylenová vlákna

zatížení. Druhý aspekt spočívá v progresivnější dehydrataci cementového kamene. Kapilární systém vzniklý vysušením vláken zvyšuje rychlost ztráty volné a následně i fyzikálně a chemicky vázané vody, čímž se umocňuje rozklad cementového kamene. Výsledkem je, že cementové kompozity s vysokým zastoupením vláken vykazují značné známky degradace a jejich schopnost zachovat si pevnost v tahu za zvýšené teploty je nižší v porovnání s cementovými kompozity bez rozptýlené výztuže. Naopak při nižším zastoupení vláken nedochází k tak výraznému oslabení struktury a navzdory vyšším teplotám se ještě po určitou dobu cementový kámen udržuje v hydratovaném stavu. Zváží-li se pozitivní procesy (dodatečná hydratace, nižší narušení vnitřní struktury od sníženého pórového tlaku), které se mohou objevit na počátku ohřevu, cementové kompozity s nižším zastoupením PP vláken mají lepší stabilitu za vysoké teploty než ty bez rozptýlené výztuže z hlediska pevnosti v tahu.



Obr.21 Residuální pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s PP vlákny: vliv geometrie vláken [63]¹²

Ojedinelá studie věnující se cementovým kompozitům a jejich reakci na vysokou teplotu v závislosti na geometrii vláken [63] ukazuje, že použitím kratších vláken s menším průměrem lze dosáhnout lepší odolnosti vůči zvýšené teplotě (Obr.21). Důležité je ovšem zmínit, že prezentované výsledky byly zjištěny na hranolech se čtvercovým průřezem o hraně 100 mm. Výsledky získané na směsi s vlákny délky 52 mm mohou být zatíženy chybou, protože orientace vláken byla s velkou pravděpodobností ovlivněna velikostí formy. Cementové kompozity s kratšími vlákny se svým chováním více přibližují ke stejnorodé látce a díky rovnoměrnému rozložení ve struktuře materiálu mohou efektivněji působit na snížení pórového tlaku. Stejným způsobem lze nahlížet i na průměr vláken. Pokud se využijí vlákna s menším průměrem, jejich množství v cementovém kompozitu se zvyšuje. Celková plocha rozhraní mezi vlákny a cementovým kamenem roste, čímž dochází ke snížení

¹² KÚ – křemičitý úlet, PP – polypropylenová vlákna

pórového tlaku a zároveň může dojít k efektivnějšímu procesu dodatečné hydratace. Hypoteticky lze usuzovat, že po vyhoření vláken s velmi malým průměrem může dojít i k částečnému zacelení vzniklých kapilár minerály vznikajícími během dodatečné hydratace. Důvodem je skutečnost, že úspěšná hydratace cementu vyžaduje dostatečný prostor [22] pro vznikající minerály, které mají zhruba dvojnásobný objem oproti původnímu cementu [155]. Ve většině případů ovšem nové minerály vyplňují daleko menší póry v rozmezí od 10 nm do 100 nm [156].

5.2.2 Cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny

Ocelová vlákna patří k nejvyužívanějším vláknům na trhu. Jako ztužující prvek cementových kompozitů přináší řadu benefitů v závislosti na množství a geometrii vláken. Uplatněním vláken lze docílit zvýšení pevnosti v tlaku o jednotky až desítky procent a stejně tak zvýšení pevnosti v tahu o desítky procent. Vlákna zároveň zlepšují trvanlivost materiálu. Přispívají ke snížení šířky trhlin a lepší kontrole rozvoje trhlin. Zvyšují houževnatost, rázovou odolnost, únavovou odolnost, odolnost vůči zmrazovacím a rozmrazovacím cyklům a odolnost vůči obrusu [157]. V neposlední řadě dobrá stabilita vláken za vysoké teploty umožňuje pozitivně ovlivnit chování vláknocementových kompozitů i za vysoké teploty.

Jejich přítomnost v cementovém kompozitu nepatrně přispívá ke snížení pórového tlaku tím, že v oblastech okolo vláken s hydrofobním povrchem vzniká FITZ. Ta má obvykle vyšší pórovitost, než vykazuje cementový kámen, a zároveň na rozhraní s vlákny mají tendenci vznikat mikrotrhliny [126], které mohou ve formě drobných kapilár přispět k odvodu vodní páry mimo strukturu materiálu. Z hlediska pórového tlaku se ovšem nejedná o efektivní řešení, protože i přes vyšší zastoupení vláken v cementových kompozitech dochází k odprýskávání betonu [127].

Protože se ocelová vlákna nepovažují za efektivní nástroj pro snížení rizika odprýskávání betonu, existuje pouze limitované množství experimentů (Tab. 12-16) zabývajících se pevnostními vlastnostmi za zvýšené teploty. Navíc se ukazuje, že stejně jako v případě syntetických vláken lze dohledat nemalé množství studií, ve kterých došlo k určitým pochybením a prezentované výsledky mohou být vágní.

5.2.2.1 Krychlená pevnost v tlaku

Ocelová vlákna se projevují při ohřevu cementových kompozitů od samotného počátku. V porovnání s nevyztuženými cementovými kompozity (Obr. 22) přispívají k lepší stabilitě za zvýšené teploty, zejména v počáteční fázi ohřevu do 150°C. Kromě ITZ okolo zrn kameniva se ve struktuře nachází i FITZ, tedy mezifázová přechodová zóna mezi vlákny a cementovým kamenem. Závěry analýz skenovacím elektronovým mikroskopem demonstrují, že v této oblasti se nachází řada mikrotrhlin [151]. Ty v počáteční fázi zahřívání přispívají k efektivnější migraci vodní páry uvnitř struktury materiálu a jejímu odchodu mimo materiál. Pórový tlak se snižuje a míra porušení struktury materiálu od jeho účinků klesá.

Tab. 12 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál	Délka L	Rychlost	Délka				
	Tvar	Průměr d						
	Množství	L/d			Způsob ochlazení	Kamenivo	Typ zkoušky Těleso	
						Příměs		
[40]	Ocelová	25 mm	2,8 °C/min	95 min	105 °C	Různé úrovně vlhkosti	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*400 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm
	Přímá s hákem	0,4 mm		125 min	200 °C			
	78 kg/m ³	62,5 [-]		160 min	300 °C			
				195 min	400 °C			
				265 min	600 °C			
				335 min	800 °C			
				405 min	1000 °C			
		440 min	1100 °C					
		475 min	1200 °C	Přirozeně na vzduchu	Žádná			
[46]	Ocelová	25 mm	2,5 °C/min	300 min	600 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm
	Přímá s hákem	0,42 mm		380 min	800 °C			
	78 kg/m ³	60 [-]						
[46]	Ocelová	25 mm	2,5 °C/min	300 min	600 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm
	Přímá s hákem	0,42 mm		380 min	800 °C			
	78 kg/m ³	60 [-]						
[46]	Ocelová	25 mm	2,5 °C/min	300 min	600 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm
	Přímá s hákem	0,42 mm		380 min	800 °C			
	78 kg/m ³	60 [-]						
[49]	Ocelová	30 mm	10 °C/min	100 min	400 °C	Přirozeně na vzduchu	Vápencové kamenivo	Tlak Krychle 100 mm Tah Krychle 100 mm
	Nespecifikov. ¹³	2 mm		120 min	600 °C			
	100 kg/m ³	15 [-]		140 min	800 °C			

¹³ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 13 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení Způsob ochlazení	Složení Kamenivo Příměs	Kvazistatická zkouška Typ zkoušky Těleso
	Materiál	Délka L	Rychlost	Délka				
	Tvar	Průměr d						
[53]	Ocelová	12 mm	2 °C/min a každých 200 °C držena teplota 30 min	130 min	200 °C	V peci při 110 °C nejméně 7 dní Přirozeně na vzduchu	Křemičité Křemičitý úlet + křemičitá moučka	Tlak Válec 50*100 mm Modul pružnosti Válec 50*100 mm
	Zvlněná	0,175 mm		180 min	300 °C			
	80 kg/m ³	69 [-]		260 min	400 °C			
	160 kg/m ³			310 min	500 °C			
	240 kg/m ³			390 min	600 °C			
				440 min	700 °C			
		520 min	800 °C					
[54]	Ocelová	35 mm	6 °C/min	230 min	300 °C	Nespecifikováno ¹⁴ Nespecifikováno	Vápencové Popílek 100 kg/m ³	Tlak Krychle 100 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*400 mm
	Přímá s hákem	0,55 mm		280 min	600 °C			
	40 kg/m ³	64 [-]		330 min	900 °C			
	55 kg/m ³							
[56]	Ocelová	13 mm	4 °C/min	150 min	120 °C	V peci při 120 °C po 24 hod Přirozeně v zavřené peci	Křemičité Křemičitý úlet + vysokopecní struska	Tlak Trámec 70,7*70,7*228 mm
	Nespecifikováno	0,22 mm		170 min	200 °C			
	78 kg/m ³	59 [-]		195 min	300 °C			
	156 kg/m ³			220 min	400 °C			
	234 kg/m ³			245 min	500 °C			
				270 min	600 °C			
				295 min	700 °C			
				320 min	800 °C			
				345 min	900 °C			
	[58]	Ocelová		32 mm	2,5 °C/min			
Zvlněná		0,8 mm	220 min	400 °C				
39 kg/m ³		40 [-]	300 min	600 °C				
78 kg/m ³								
117 kg/m ³								

¹⁴ Červenou barvou jsou označeny parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 14 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení	Složení	Kvazistatická zkouška			
	Materiál	Délka L	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo		Typ zkoušky Těleso		
	Tvar	Průměr d					Příměs				
	Množství	L/d									
[61]	Ocelová Přímá s hákem 20 kg/m ³ 40 kg/m ³ 80 kg/m ³	30 mm 0,5 60 [-]	Tělesa umístěna do pece zahřáté na požadovanou teplotu	120 min 120 min 120 min	300 °C 500 °C 700 °C	Vysušeny – způsob nespecifikován	Nespecifikováno ¹⁵	Zkouška v tahu protlačením (angl. double punch test) Válec 150*150 mm			
[61]	Ocelová Přímá s hákem 20 kg/m ³ 40 kg/m ³ 80 kg/m ³	60 mm 0,75 80 [-]		Tělesa umístěna do pece zahřáté na požadovanou teplotu	120 min 120 min 120 min	300 °C 500 °C 700 °C			Vysušeny – způsob nespecifikován	Nespecifikováno	Zkouška v tahu protlačením (angl. double punch test) Válec 150*150 mm
[61]	Ocelová Přímá zkroucená 20 kg/m ³ 40 kg/m ³ 80 kg/m ³	40 mm 0,5 80 [-]		Tělesa umístěna do pece zahřáté na požadovanou teplotu	120 min 120 min 120 min	300 °C 500 °C 700 °C			Vysušeny – způsob nespecifikován		
[62]	Ocelová Přímá s hákem 20 kg/m ³ 40 kg/m ³	60 mm 0,9 mm 67 [-]	8 °C/min	145 min 170 min 195 min 220 min	200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	Při 105 °C po 24 hod v peci Přirozeně na vzduchu	Říční písek Žulové kamenivo Popílek	Tlak Válec 100*200 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm			
[66]	Ocelová Nespecifikováno 78 kg/m ³	13 mm 0,2 mm 65 [-]	5 °C/min	200 min 220 min 240 min 260 min 280 min 300 min 320 min	100 °C 200 °C 300 °C 400 °C 500 °C 600 °C 700 °C	Přirozeně na vzduchu a rovněž při 105 °C po nespecifikovanou dobu Přirozeně na vzduchu	Nespecifikováno Křemičitý úlet	Tlak Válec 100*200 mm			

¹⁵ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 15 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál Tvar Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo Příměs	
[64]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³ 80 kg/m ³	35 mm 0,44 mm 80 [-]	100 °C/hod	25,5 hod 6 hod	150 °C 500 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Křemičité a žulové Křemičitý úlet	Tlak Válec 150*300 mm Tah za ohybu Trámec 75*105*430 mm
[64]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³ 50 kg/m ³	60 mm 0,44 mm 80 [-]	100 °C/hod	25,5 hod 6 hod	150 °C 500 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Křemičité a žulové Žádná	Tlak Válec 150*300 mm Tah za ohybu Trámec 75*105*430 mm
[64]	Ocelová Přímá s hákem 50 kg/m ³	60 mm 0,44 mm 80 [-]	100 °C/hod	25,5 hod 6 hod	150 °C 500 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně na vzduchu	Křemičité a žulové Křemičitý úlet	Tlak Válec 150*300 mm Tah za ohybu Trámec 75*105*430 mm
[68]	Ocelová Nespecifikován ¹⁶ 157 kg/m ³	13 mm 0,22 mm 59 mm	5 °C/min	204 min 240 min 280 min 320 min 360 min	120 °C 300 °C 500 °C 700 °C 900 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně na vzduchu	Hrubé a drobné křemičité kamenivo Křemičitý úlet + vysokopecní struska	Tlak Krychle 70,7 mm Příčný tah Krychle 70,7 mm Tah za ohybu Trámec 70,7*70,7*210 mm Modul pružnosti Trámec 70,7*70,7*210 mm
[69]	Ocelová Nespecifikován 157 kg/m ³	13 mm 0,22 mm 59 mm	5 °C/min	204 min 240 min 280 min 320 min 360 min	120 °C 300 °C 500 °C 700 °C 900 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně na vzduchu	Hrubé a drobné křemičité kamenivo Křemičitý úlet + vysokopecní struska	Tlak Krychle 70,7 mm Příčný tah Krychle 70,7 mm Tah za ohybu Trámec 70,7*70,7*210 mm Modul pružnosti Trámec 70,7*70,7*210 mm

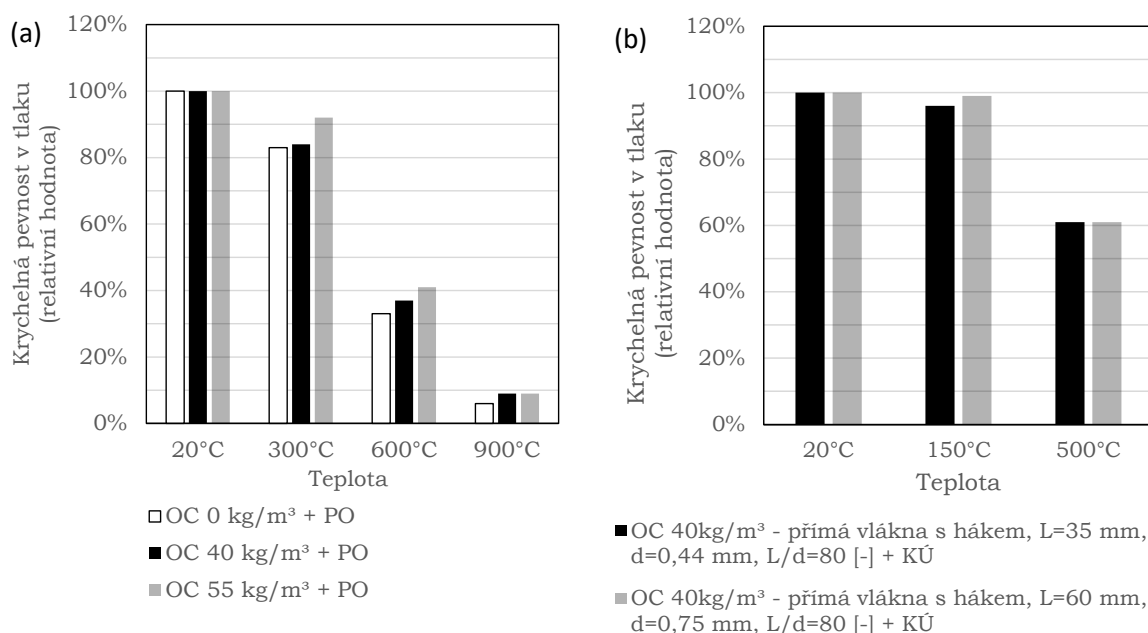
¹⁶ Červenou barvou jsou označeny parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 16 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení Způsob ochlazení	Složení Kamenivo Příměs	Kvazistatická zkouška Typ zkoušky Těleso
	Materiál Tvar Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka				
[77]	Ocelová Přímá 78 kg/m ³	13 mm 0,16 mm 81 mm	5 °C/min	280 min 320 min 360 min 400 min	200 °C 400 °C 600 °C 900 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Lehké kamenivo Žádná	Tlak Válec 100*200 mm
[52]	Ocelová Přímá s hákem 39 kg/m ³ 78 kg/m ³	35 mm 0,55 mm 64	Nespecifikován	Nespeci.	400 °C 600 °C 800 °C	Nespecifikováno ¹⁷ Přirozeně na vzduchu	Říční písek Žádná	Tah za ohybu Trámec 100*100*350 mm
[51]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³	30 mm 0,6 mm 64	5 °C/min	80 min 120 min 160 min 200 min	100 °C 300 °C 500 °C 700 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně v zavřené peci	Žulové kamenivo Křemičitý úlet + popílek	Tlak Krychle 100 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Modul pružnosti Válec 150*300 mm
[51]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³	30 mm 0,6 mm 64	5 °C/min	80 min 120 min 160 min 200 min	100 °C 300 °C 500 °C 700 °C	V peci do ustálené hmotnosti Přirozeně v zavřené peci	Žulové kamenivo Žádná	Tlak Krychle 100 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Modul pružnosti Válec 150*300 mm
[63]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³ 80 kg/m ³	30 mm 0,8 mm 37,5 [-]	2 °C/min	170 min	280 °C	Nespecifikováno Přirozeně v zavřené peci	Vápencové	Tlak Válec 100*200 mm Tah za ohybu Trámec 100*100*500 mm

¹⁷ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Větší síť kapilár uvnitř struktury materiálu může navíc přispět k efektivnějšímu průběhu dodatečné hydratace a mírnému nárůstu pevnosti v počáteční fázi ohřevu díky lepšímu přístupu vodní páry k zrnům cementu, u kterých neproběhla hydratace. Účinnost dodatečné hydratace se odvíjí od množství nezhydratovaných zrn ve struktuře materiálu, přičemž směsi s nižším vodním součinitelem obvykle vykazují vyšší zastoupení těchto zrn [156]. Důležitou roli v celém procesu hrají i aktuální vlhkostní poměry a úroveň pórového tlaku ve struktuře materiálu. Oba tyto parametry lze částečně ovlivnit množstvím ocelových vláken, okolo kterých se nachází FITZ s mikrotrhliny tvořící síť kapilár uvnitř struktury materiálu. Optimálním množstvím vláken lze dosáhnout takového pórového tlaku, který umožní efektivně uskutečnit dodatečnou hydrataci. Za optimální pórový tlak, zvaží-li se zkušenosti s procesem autoklávování, lze považovat rozmezí od 0,8 MPa do 1,2 MPa [158].



Obr.22 Residuální krychelná pevnost v tlaku cementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě: (a) vliv množství vláken [54], (b) vliv geometrie vláken [64] ¹⁸

Při dalším zvyšování teploty nad 150 °C se negativně začne projevovat odlišná teplotní roztažnost ocelových vláken. Zatímco se cementový kámen smršťuje díky jeho vysušování za zvýšené teploty, vlákna se s rostoucí teplotou prodlužují. Mezi oběma komponenty vzniká napětí, které přispívá k delaminaci. Proces delaminace probíhá za vzniku trhlin, které negativně přispívají k degradaci vnitřní struktury materiálu. Na druhou stranu existují hypotézy, že ocelová vlákna přispívají k rovnoměrnějšímu ohřevu materiálu. Důvodem je lepší tepelná konduktivita ocelových vláken v porovnání s dalšími komponenty cementového kompozitu. Při ohřevu dochází k rychlejšímu šíření tepla uvnitř struktury, teplotní gradient se snižuje a míra

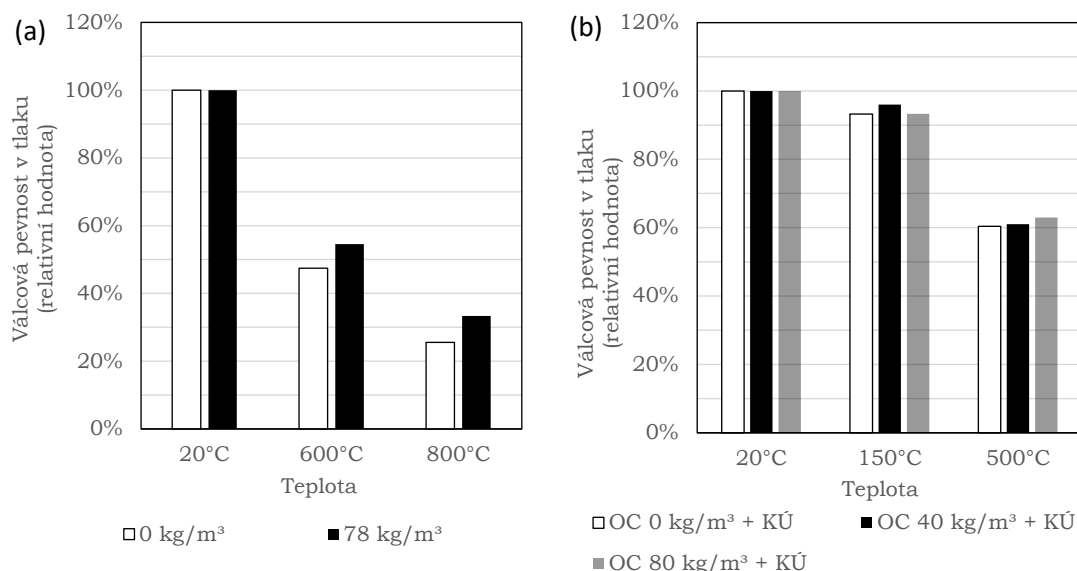
¹⁸ OC – ocelová vlákna, KÚ – křemičitý úlet, PO – popílek

narušení materiálu klesá. Shromážděná data ovšem ukazují, že pozitivní přínos vláken převládá a cementové kompozity s vlákny vykazují lepší stabilitu za vysoké teploty. Podle ojedinělé studie zaměřené na vliv geometrie vláken [54] se navíc ukazuje, že vývoj krychelné pevnosti v tlaku probíhá identicky bez ohledu na délku a průměr vláken.

5.2.2.2 Válcová pevnost v tlaku

Vývoj válcové pevnosti v závislosti na teplotě nemá u cementových kompozitů ztužených ocelovými vlákny jednotný trend a experimentální výsledky se liší. I přes to lze najít jeden rozdílový znak, podle kterého lze vývoj predikovat. Jedná se o stav vlhkosti materiálu v okamžiku, kdy započne požár, resp. ohřev zkušebních těles.

Pokud se materiál nechá vyzrát přirozenou cestou a neuplatnění se kontrolovaný proces sušení, před zahájením ohřevu budou tělesa obsahovat určité množství volné vody. Jak dokládají výsledky experimentálních studií [46, 64], u takových těles ocelová vlákna mohou fungovat jako efektivní nástroj, kterým lze řídit vývoj pórového tlaku a vlhkostních poměrů uvnitř struktury. Do 150 °C cementové kompozity s běžnou dávkou vláken do 1 % vykazují lepší stabilitu než identický kompozit bez vláken (Obr.23). Důvodem může být nižší porušení struktury materiálu od pórového tlaku, který se snižuje s rostoucím zastoupením vláken. Na jejich rozhraní s cementovým kamenem dochází ke vzniku mikrotrhlin [159], které fungují jako kapiláry pro odvod páry ven z materiálu. Navíc dochází k efektivnější migraci vodní páry uvnitř materiálu, čímž se zvyšuje možnost uskutečnění dodatečné hydratace.



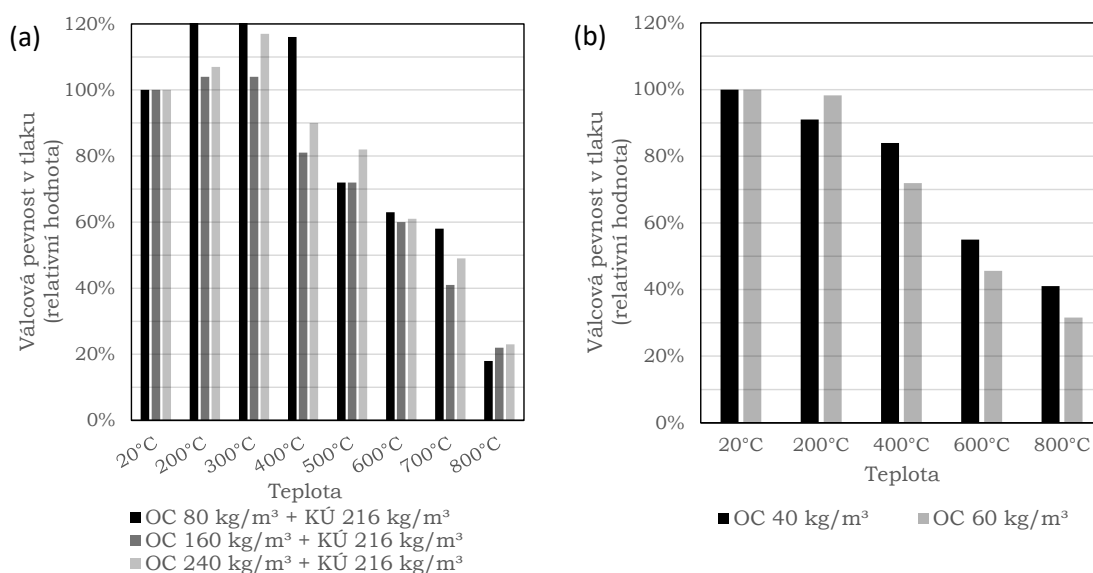
Obr.23 Residuální válcová pevnost v tlaku přirozeně vlhkých cementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě: (a) vliv vláken [46] a (b) vliv množství vláken [64]¹⁹

¹⁹ KÚ – křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna

Jakmile teplota překročí 150 °C, dehydratace vede ke smrštění cementového kamene a rostoucí teplota naopak přispívá k protažení vláken. Na rozhraní obou komponentů vzniká napětí, které může vést k výraznějšímu rozvoji mikrotrhlin a progresivnějšímu porušení struktury materiálu. Experimentální zjištění naznačují, že tento jev nemá ale zásadní vliv na vývoj pevnosti. To může být dáno tím, že určitá delaminace vláken nastává přirozeně při výrobě cementových kompozitů s ocelovými vlákny a následný rozvoj trhlin za zvýšené teploty už nemá tak zásadní roli. Trend z počátku ohřevu přetrvává a cementové kompozity s ocelovými vlákny v množství do 80 kg/m³ mají nejvyšší schopnost zachovat si pevnost v tahu.

Přínos vyššího množství vláken u nevysušených cementových kompozitů nelze ovšem jednoznačně určit z důvodu chybějících experimentálních dat. Výsledky ojedinelé studie [58] ukazují, že i při vyšším zastoupení vláken (117 kg/m³) se stále zvyšuje schopnost cementového kompozitu zachovat si válcovou pevnost v tlaku. Je ale zapotřebí upozornit na skutečnost, že testovaná směs obsahovala recyklované betonové kamenivo. Jeho odlišná pórovitost a nasákavost v porovnání s přírodním kamenivem pak do určité míry může ovlivnit chování celkového kompozitu za vysoké teploty.

Zcela odlišný trend naopak vykazují cementové kompozity, u kterých před ohřevem došlo k vysušení do ustálené hmotnosti [53, 62]. Relativní hodnota válcové pevnosti v tlaku u nich klesá s rostoucím množstvím vláken bez ohledu na úroveň teploty (Obr. 24). Příčinou takového chování může být významnější narušení struktury materiálu mikrotrhlinami, které vznikají v oblasti FITZ od odlišného přetvoření vláken a cementového kamene.

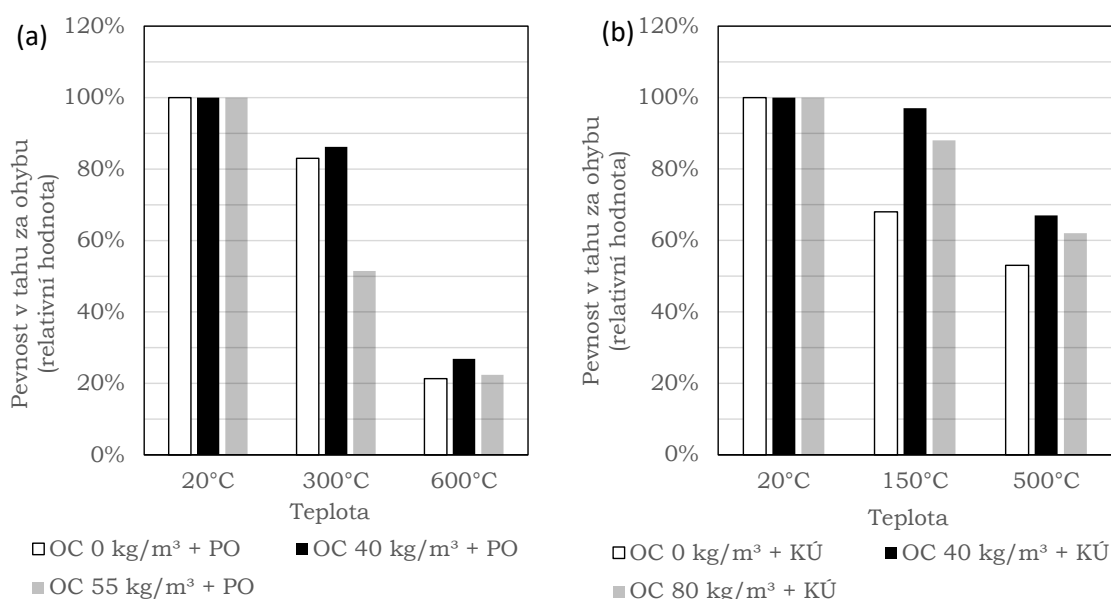


Obr.24 Residuální válcová pevnost v tlaku vysušených cementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě: (a) [53] a (b) [62] vliv množství vláken ²⁰

²⁰ KÚ – křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna

5.2.2.3 Pevnost v tahu

V případě pevnosti v tahu existují protichůdné výsledky a poznatky, které neumožňují formulovat jednoznačný trend vývoje. Většina z nich (Obr.25) poukazuje na to, že v počáteční fázi ohřevu do 150 °C směsi vlákna přispívají k lepší stabilitě v porovnání s cementovými kompozity bez vláken. Při specifikování důvodů lze hledat určitou paralelu s PP vlákny. V první řadě přítomnost vláken pozitivně ovlivňuje vývoj pórového tlaku. Na rozhraní vláken a cementového kamene vznikají mikrotrhliny [158], které mají funkci kapilár a umožňují efektivnější migraci vodní páry uvnitř struktury materiálu a její transport mimo těleso. S klesajícím pórovým tlakem se snižuje míra poškození vnitřní struktury a stabilita za vysoké teploty roste.



Obr. 25 Residuální pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě: (a) [54] a (b) [64] vliv množství vláken ²¹

Navíc i u cementových kompozitů ztužených ocelovými vlákny se v počáteční fázi ohřevu mohou projevit znaky dodatečné hydratace v závislosti na množství nezhydratovaných zrn, úrovni vlhkosti a velikosti pórového tlaku. S rostoucím množstvím vláken se zvyšuje hustota sítě kapilár, čímž lze docílit efektivnějšího rozložení vlhkosti uvnitř struktury materiálu a jejího přístupu k nezhydratovaným zrnům. Na druhou stranu nadměrné množství vláken může snížit pórový tlak na takovou hodnotu, která již nebude optimální z hlediska kvalitního průběhu dodatečné hydratace. V tomto směru lze hledat určitou podobnost s procesem autoklávování, který obvykle probíhá při tlaku od 0,8 MPa do 1,2 MPa [158].

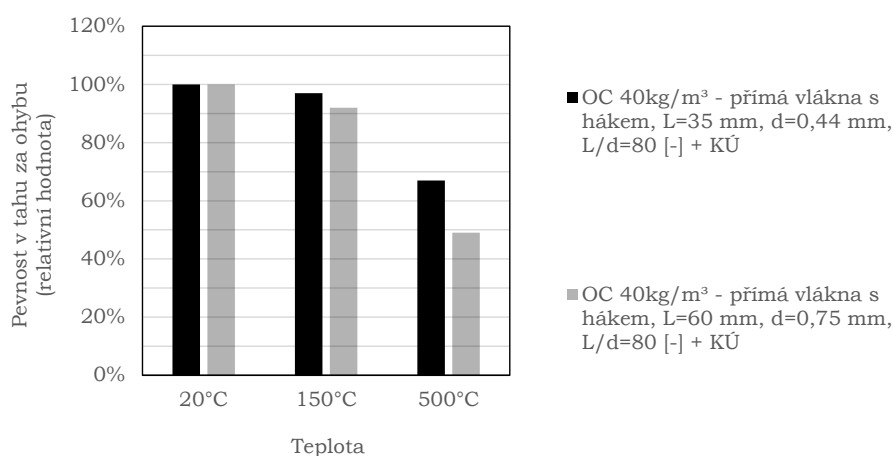
Zváží-li se výše uvedené teze, lze konstatovat, že existuje určité mezní množství ocelových vláken, jehož použitím se dosáhne optimální stability za teploty do 150°C. Z průběhu experimentálních dat [54, 64] lze vyčíst, že se tato mezní hodnota bude

²¹ KÚ – křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna, PO – popílek

pohybovat v rozmezí od 40 kg/m^3 do 80 kg/m^3 . Dalším zvyšováním dávky vláken se trend začne otáčet a schopnost cementových kompozitů s ocelovými vlákny zachovat si pevnost v tahu začne klesat.

S dalším růstem teploty nad $150 \text{ }^\circ\text{C}$ dochází k postupné delaminaci vláken a cementového kamene. Zatímco se vlákna s rostoucí teplotou stále natahují, cementový kámen se smršťuje. Díky tomuto jevu vzniká napětí na rozhraní obou komponentů, které může vést k narušení FITZ anebo delaminaci, přičemž míra degradace roste s množstvím vláken. Poškození struktury se však zdá být spíše nevýznamné, protože se trend vývoje pevnosti z počátku ohřevu zásadně nemění a nejlepší stabilitu z hlediska pevnosti v tahu vykazují cementové kompozity s dávkou ocelových vláken od 40 kg/m^3 do 80 kg/m^3 .

Mírně odlišný trend lze dohledat v ojediné studii [61], která se zabývala chováním cementových kompozitů s různým typem a množstvím ocelových vláken. Prezentované výsledky naznačují, že schopnost zachovat si pevnost v tahu za zvýšené teploty roste spolu s množstvím vláken bez ohledu na hodnotu teploty, přičemž přímá vlákna s hákem vykazují lepší výsledky než vlákna zvlněná. Toto tvrzení se ovšem opírá o výsledky, které byly získány pomocí nestandardní zkoušky v protlačení (angl. double punch test). Navíc délka ohřevu těles se zdá být příliš krátká, zváží-li se vyšší cílové teploty a velikost těles.



Obr.26 Residuální pevnost v tahu za ohybu cementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě a geometrii vláken [64]²²

Při detailnějším pohledu na experimentální data (Obr. 26) se ukazuje skutečnost, že samotný tvar ocelových vláken ovlivňuje vývoj pevnostních vlastností za zvýšené teploty [64]. Kratší vlákna přispívají k lepší stabilitě pevnosti v tahu za ohybu. Jako důvod se nabízí množství vláken působících v místě první makro-trhliny u ohýbaných těles. Díky většímu množství kratších vláken se dosáhne efektivnějšího rozložení vláken ve struktuře materiálu, který se svojí stavbou více přibližuje stejnorodé látce.

²² KÚ – křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna

Navíc lze předpokládat, že soudržnost vláken s cementovou maticí bude především záviset na množství vláken a způsobu zakončení vláken (bez zakončení, jednoduchý hák, dvojitý hák apod.). Vliv délky vláken u směsí vystavených zvýšené teplotě nebude mít tak zásadní vliv na soudržnost, protože spolupůsobení vláken a cementové matrice se působením vysoké teploty výrazně naruší.

5.2.3 Cementové kompozity s hybridním vyztužením

Pro účely této práce a v řadě dalších zdrojů se hybridním vyztužením myslí kombinace syntetických a ocelových vláken. Zváží-li se přínos vláken charakterizovaný v předchozích kapitolách, bezpochyby se jedná o vhodnou kombinaci vláken pro cementové kompozity vystavené zvýšené teplotě. Syntetická vlákna s nízkou teplotou tání umožňují efektivně snížit pórový tlak, ale zároveň významně oslabují strukturu materiálu po jejich vyhoření. Naopak vliv ocelových vláken na pevnost cementových kompozitů přetrvává bez ohledu na úroveň teploty.

Hybridnímu vyztužení se věnuje relativně vysoká pozornost právě kvůli vhodné synergii obou typů vláken. Proto existuje relativně široké spektrum studií (Tab.17, Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20), které umožňují získat představu o vývoji pevností za zvýšené teploty. Diagram relativní hodnoty krychelné a válcové pevnosti v tlaku (Obr.27) v závislosti na teplotě ukazuje, že vývoj obou pevností je velmi obdobný. Data navíc potvrzují řadu předchozích poznatků o příměsích a vláknech.

Na vývoji válcové pevnosti v tlaku lze vidět, že u cementového kompozitu s vyšším zastoupením PE vláken v kombinaci s ocelovými vlákny (značeno zeleným kolečkem) se projevuje oslabení struktury od vyhořelých PE vláken [78] a rychlejší vysušení cementového kamene. To je především patrné na úrovni teploty 400°C. Další studie [160] ale ukazuje, že oslabení struktury od vysokého množství vláken s nízkou teplotou tání lze eliminovat popílkem (značeno oranžovým kolečkem). V tomto konkrétním případě je ovšem popílek dávkován v nestandardním množství, které zhruba odpovídá dávce cementu.

Identický jev lze vyzorovat i u studie zaměřené na krychelnou pevnost v tlaku [71]. I přes vyšší zastoupení vláken PVA lze přidáním popílku docílit vysoké stability (značeno červeným trojúhelníkem). Stejně jako v předchozím případě i nyní zastoupení popílku odpovídá zhruba hmotnosti cementu. Významný pokles pevnosti mezi 200 °C a 400 °C navíc potvrzuje důsledek vyhoření vláken PVA s teplotou tání 225 °C. Do jisté míry protichůdné výsledky ukazují směsi s křemičitým úletem a vysokým obsahem PVA vláken (značeno modrým trojúhelníkem a černým kolečkem), které byly testované v rámci jedné studie [66]. V počátku ohřevu do 400 °C se oslabení struktury zásadně neprojevuje na relativní hodnotě krychelné pevnosti. Příčinou může být skutečnost, že tělesa vystavená teplotě do 400 °C byla testovaná v saturovaném stavu, a naopak tělesa vystavená vyšším teplotám byla předem sušena.

Tab. 17 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými a ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení		Složení		Kvazistatická zkouška
	Materiál Tvar Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo Příměs	Typ zkoušky Těleso		
[46]	Ocelová Přímá s hákem 78 kg/m ³	25 mm 0,42 mm 60 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm		
	PP vlákna 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]			Přirozeně na vzduchu				Metakaolin 100 kg/m ³	
[46]	Ocelová Přímá s hákem 78 kg/m ³	25 mm 0,42 mm 60 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm		
	PP vlákna 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]			Přirozeně na vzduchu				Křemičitý úlet 50 kg/m ³	
[46]	Ocelová Přímá s hákem 78 kg/m ³	25 mm 0,42 mm 60 [-]	2,5 °C/min	300 min 380 min	600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé žulové kamenivo a říční písek	Tlak Krychle 100 mm Tlak Válec 100*200 mm Modul pružnosti Válec 100*200 mm		
	PP vlákna 2 kg/m ³	19 mm 0,05 mm 360 [-]			Přirozeně na vzduchu				Žádná	
[49]	Ocelová Nespecifikováno ²³ 100 kg/m ³	30 mm 2 mm 15 [-]	10 °C/min	100 min 120 min 140 min	400 °C 600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Vápencové kamenivo	Tlak Krychle 100 mm Tah Krychle 100 mm Lomová energie Trámec 100*100*300 mm		
	PP vlákna 1 kg/m ³	20 mm 20 μm 1000 [-]			Přirozeně na vzduchu				Křemičitý úlet 63 kg/m ³	

²³ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora).

Tab. 18 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými a ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení		Složení		Kvazistatická zkouška		
	Materiál	Délka L	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo	Príměs	Typ zkoušky Těleso			
	Tvar	Průměr d										
	Množství	L/d										
[54]	Ocelová	35 mm	6 °C/min	230 min	300 °C	Nespecifikováno ²⁴	Vápencové		Tlak Krychle 100 mm			
	Přímá s hákem	550 μm		280 min	600 °C					Nespecifikováno	Popílek 100 kg/m ³	Tah za ohybu Trámec 100*100*400 mm
	40 kg/m ³	64 [-]		330 min	900 °C							
	55 kg/m ³											
	PP Vlákna	15 mm										
	3 kg/m ³	30 μm										
2 kg/m ³	500 [-]											
[43]	Ocelová	13 mm	4 °C/min	150 min	120 °C	Přirozeně na vzduchu	Drobné křemičité kamenivo		Tlak Krychle 70,7*70,7*70,7 mm			
	Nespecifikováno	220 μm		170 min	200 °C							
	78 kg/m ³	59 [-]		195 min	300 °C							
	156 kg/m ³			220 min	400 °C					Přirozeně v zavřené peci	Křemičitý úlet 240 kg/m ³ + vysokopecní struska 120 kg/m ³	Tlak Trámec 40*40*160 mm
	PP Vlákna	20 mm		245 min	500 °C							
	1 kg/m ³			270 min	600 °C							
	2 kg/m ³			295 min	700 °C							
				320 min	800 °C							
				345 min	900 °C							Tlak Trámec 70,7*70,7*228 mm
	[63]	Ocelová		30 mm	2 °C/min					170 min	280 °C	Nespecifikováno
Přímá s hákem		0,8 mm										
40 kg/m ³		37,5 [-]										
80 kg/m ³						Přirozeně v zavřené peci	Křemičitý úlet 20 kg/m ³	Tah za ohybu Trámec 100*100*500 mm				
PP Vlákna		52 mm										
4,55 kg/m ³		460 μm										
	113 [-]											

²⁴ Červenou barvou jsou označeny parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 19 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými a ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení		Složení		Kvazistatická zkouška				
	Materiál	Délka L	Rychlost	Délka		Způsob ochlazení	Kamenivo	Príměs	Typ zkoušky Těleso					
	Tvar	Průměr d												
	Množství	L/d												
[66]	Ocelová	13 mm	5 °C/min	200 min	100 °C	Přirozeně na vzduchu a rovněž při 105 °C po nespecifikovanou dobu	Nespecifikováno ²⁵		Tlak Válec 100*200 mm					
	Nespecifikováno	200 μm		220 min	200 °C									
	39 kg/m ³	65 [-]		240 min	300 °C									
	78 kg/m ³			260 min	400 °C									
	117 kg/m ³			280 min	500 °C									
	PVA Vlákna	12 mm		300 min	600 °C									
	15 kg/m ³	200 μm		320 min	700 °C									
	10 kg/m ³	60 [-]												
	5 kg/m ³													
													Křemičitý úlet - 25% hmotnosti cementu	
[71]	Ocelová	13 mm,	10 °C/min	130 min	100 °C	Přirozeně na vzduchu	Křemičitý písek		Tlak Krychle 50 mm					
	Nespecifikováno	160 μm		140 min	200 °C									
	39 kg/m ³	81 [-]		150 min	300 °C									
				160 min	400 °C									
	PVA Vlákna	12 mm		170 min	500 °C									
	19,5 kg/m ³	38 μm		180 min	600 °C									
		316 [-]		200 min	800 °C									
													Popílek - 122% hmotnosti cementu	
[73]	Ocelová	35 mm	8,3 °C/min - 20°C-450°C	127 min	450 °C	Přirozeně na vzduchu	Hrubé a drobné vápencové kamenivo		Tlak Krychle 150 mm					
	Přímá s hákem	750 μm		157 min	650 °C									
	20 kg/m ³	47 [-]		195 min	825 °C									
	20 kg/m ³													
	PP Vlákna	12 mm		4,6 °C/min - 650°C-825°C										
	1,5 kg/m ³	31-35 μm												
	2,5 kg/m ³	343-387 [-]												
							Křemičitý úlet 45 kg/m ³		Příčný tah Válec 150*300 mm					
									Tah za ohybu 150*150*600 mm					

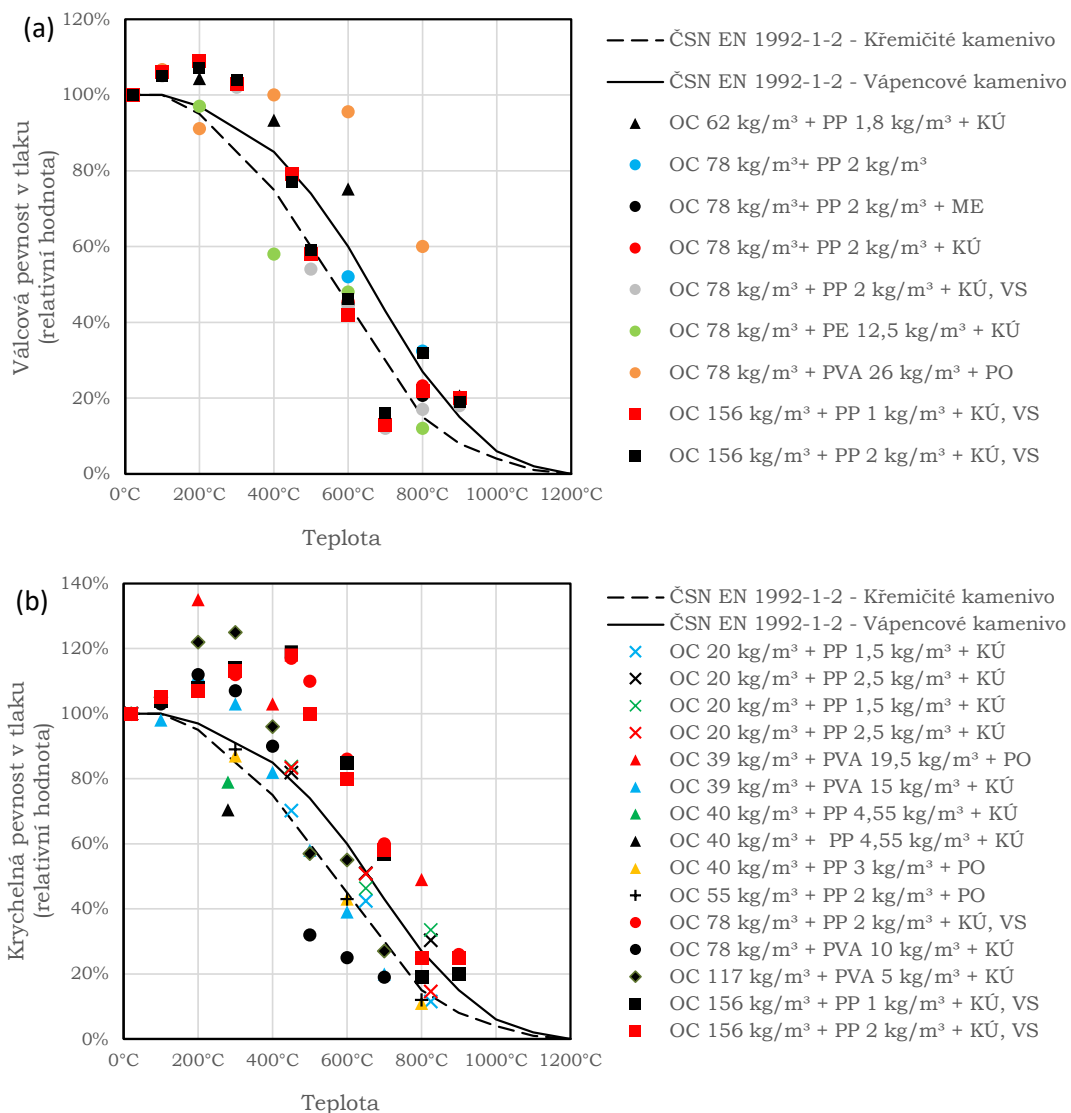
²⁵ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Tab. 20 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými a ocelovými vlákny

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob sušení		Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál Tvar Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka		Způsob sušení	Způsob ochlazení		
[73]	Ocelová Přímá s hákem 20 kg/m ³ 20 kg/m ³	30 mm, 350 μm, 86 [-]	8,3 °C/min - 20°C-450°C 6,7 °C/min - 450°C-650°C	127 min 157 min 195 min	450 °C 650 °C 825 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Hrubé a drobné vápencové kamenivo Křemičitý úlet 45 kg/m ³	Tlak Krychle 150 mm Modul pružnosti (UPV) Krychle 150 mm Příčný tah Válec 150*300 mm Tah za ohybu Tráмец 150*150*600 mm	
[77]	Ocelová Přímá 78 kg/m ³	13 mm 0,16 mm 81 mm	5 °C/min	280 min 320 min 360 min	200 °C 400 °C 600 °C	Přirozeně na vzduchu Přirozeně v zavřené peci	Lehké kamenivo Křemičitý úlet 8,7% hmotnosti cementu	Tlak Válec 100*200 mm	
[78]	Ocelová Nespecifikováno ²⁶ 78 kg/m ³	13 mm 160 μm 81 [-]	1 °C/min	260 min 460 min 660 min	200 °C 400 °C 600 °C	V peci při 105 °C do ustálené hmotnosti	Nespecifikováno Křemičitý úlet 361 kg/m ³	Tlak Válec 100*200 mm Osový tah Tělesa tvaru konsti s průřezem 48*13 mm	
[63]	PE Vlákna 12,5 kg/m ³	13 mm 38 μm 342 [-]		860 min	800 °C	Nespecifikováno			
[63]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³	30 mm 0,8 mm 37,5 [-]	2 °C/min	170 min	280 °C	Nespecifikováno Přirozeně v zavřené peci	Vápencové kamenivo Křemičitý úlet 20 kg/m ³	Tlak Válec 100*200 mm Tah za ohybu Tráмец 100*100*500 mm	
	PP Vlákna 4,55 kg/m ³	12 mm 25 μm 480 [-]							

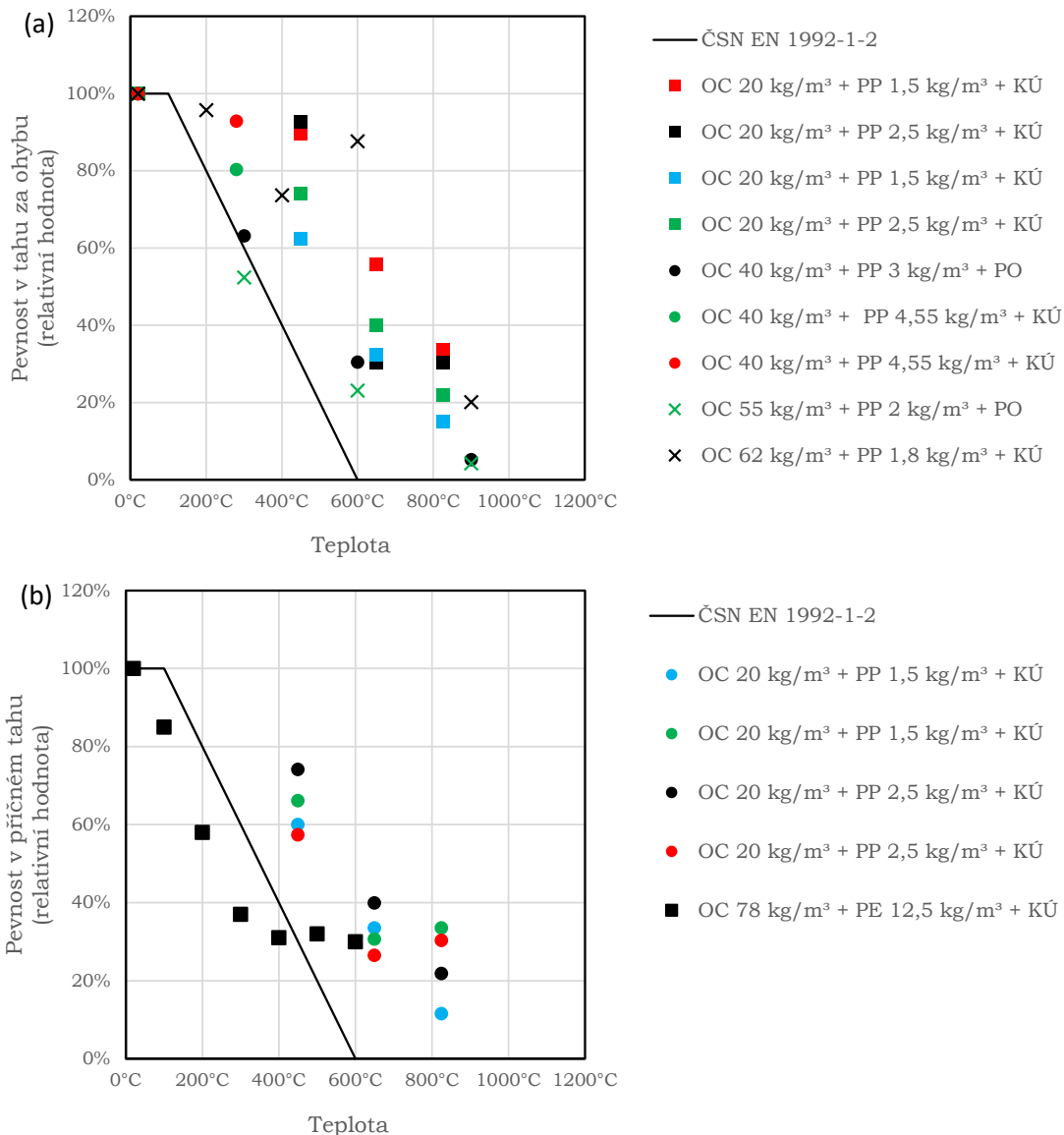
²⁶ Červenou barvou je označena nedostatečná délka ohřevu (podle úsudku autora) a parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

Databáze výsledků pevností v tahu za ohybu a v příčném tahu (Obr. 28) neobsahuje takové množství měření. I přes to lze konstatovat, že cementové kompozity s běžným zastoupením hybridní výztuže mají lepší stabilitu, než uvádí norma ČSN EN 1992-1-2 [140]. Jedinou výjimkou je směs s vysokým obsahem PE vláken v kombinaci s ocelovými vlákny (značeno černým čtverečkem) [78]. Na chování směsi je názorně vidět, že ocelová vlákna nemají takový přínos, který by eliminoval důsledky oslabení struktury od vyhořelých vláken a rapidnější vysušení cementového kamene. Pro dosažení optimální stability z hlediska tahové pevnosti se proto nabízí použít pouze takové množství vláken s nízkou teplotou tání, které neutralizuje odprýskávání betonu za požáru.



Obr. 27 Residuální pevnost v tlaku cementových kompozitů s hybridním vyztužením v závislosti na teplotě: (a) válcová pevnost v tlaku, (b) krychelná pevnost v tlaku ²⁷

²⁷ KÚ - křemičitý úlet, ME – metakaolin, OC – ocelová vlákna, PE – polyethylenová vlákna, PO – popílek, PP – polypropylenová vlákna, PVA – polyvinylalkoholová vlákna, VS – vysokopecní struska



Obr.28 Residuální pevnost v tahu cementových kompozitů s hybridním vyztužením v závislosti na teplotě: (a) pevnost v tahu za ohybu, (b) pevnost v příčném tahu ²⁸

5.2.4 Cementové kompozity ztužené alternativními vlákny

Kromě běžných vláken uvedených v předchozích kapitolách existují i zkušenosti s využitím nestandardních vláken z hlediska materiálu. Dohledat lze poznatky ze studií zaměřených na sledování chování cementových kompozitů ztužených vlákny uhlíkovými [55, 47, 76], čedičovými [75], skleněnými [55] nebo obecně přírodními [119]. Limitované množství informací neumožňuje ovšem formulovat konkrétní

²⁸ KÚ - křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna, PE – polyethylenová vlákna, PO – popílek, PP – polypropylenová vlákna, PVA – polyvinylalkoholová vlákna

závěry, které by bylo možné využít pro predikci chování vláknocementových kompozitů s příměsí těchto alternativních vláken.

Na základě zkušenosti s ocelovými a syntetickými vlákny se dá usuzovat, jaký vliv budou mít i další nestandardní vlákna na chování za zvýšené teploty. Důležitý přínos uplatnění vláken spočívá ve vzniku FITZ [151], které se svými vlastnostmi podobají ITZ. V blízkém okolí vláken se tak nachází cementový kámen s vyšší pórovitostí a zároveň na rozhraní obou komponentů mohou vznikat drobné mikrotrhliny. Ty v době ohřevu fungují jako efektivní kapilární systém, který přispívá k mírnému snížení pórového tlaku uvnitř struktury materiálu a zároveň zvyšuje efektivitu dodatečné hydratace tím, že umožňuje efektivnější migraci vodní páry.

Další přínos se odvíjí již od vlastností konkrétních vláken. U vláken s vyšší tepelnou vodivostí (uhlíková vlákna) lze očekávat, že teplotní gradient při ohřevu cementového kompozitu bude nižší než při uplatnění vláken s nižší hodnotou tepelné vodivosti (skleněná a čedičová vlákna). Díky tomu se snižuje vnitřní pnutí materiálu a míra porušení klesá.

Určitou nevýhodou alternativních vláken je skutečnost, že ve většině případů se jedná o vlákna přímá bez speciálního zakončení. Soudržnost takových vláken se nedosahuje vysokých hodnot, protože závisí pouze na tření mezi cementovým kamenem a vlákny [159]. Navíc povrch vláken bývá spíše hladký a podél jejich rozhraní ve FITZ se mohou objevit drobné mikrotrhliny, které se s rostoucí teplotou a pórovým tlakem mohou dále rozvíjet [117].

V neposlední řadě hraje důležitou roli teplota tání materiálu vláken. Pokud vlákna mají nízkou teplotu tání, při ohřevu dochází k jejich spálení. Vzniká zcela odlišná struktura materiálu, která vykazuje vyšší pórovitost a zároveň se ztrácí přínos vláken. Díky zvýšené pórovitosti pórový tlak a míra narušení vnitřní struktury klesá, ale na druhou stranu dochází i k oslabení struktury materiálu. Vzniklý kapilární systém navíc přispívá k rychlejšímu vysušení cementového kamene, což lze považovat za zcela klíčový aspekt.

5.3 Pevnost vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty

Pevnost cementových kompozitů za zvýšené teploty vychází ze zkoušek na zahřátých tělesech. Díky vysokým požadavkům na vybavení a celkovému provedení těchto zkoušek existuje pouze omezené množství studií (Tab.21, Tab.22, Tab.23), které se zabývají sledováním termomechanických vlastností. Omezené množství studií se navíc liší v řadě parametrů (složení směsi, rychlost ohřevu apod.), čímž neumožňuje provést relevantní vyhodnocení výsledků. I přes to, s uvážením určitého zjednodušení, lze na základě porovnání výsledků pevnosti v tlaku formulovat několik teoretických závěrů.

Tab. 21 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými vlákny za zvýšené teploty

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob vysušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál Tvar Množství	Délka L Průměr d L/d	Rychlost	Délka			Kamenivo Příměs	Typ zkoušky Těleso
[44]	Ocelová Přímá 78 kg/m ³ 156 kg/m ³ 234 kg/m ³	13,2 mm 0,75 mm 18 [-]	5 °C/min	100 min 150 min 160 min 180 min	200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	V peci při 100 °C do ustálené hmotnosti	Křemičité Křemičitý úlet + vysokopecní struska	Tlak Trámec 70,7*70,7*220 mm
[65]	Ocelová Profilovaná 42 kg/m ³	38 mm 1,14 mm 33 [-]	2 °C/min	170 min 220 min 320 min 420 min 520 min	100 °C 200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Vápenčové hrubé kamenivo Přírodní říční písek Popílek + vysokopecní struska	Tlak Válec 75*150 mm Příčný tah Válec 75*150 mm
[83]	Ocelová Přímá s hákem 40 kg/m ³	60 mm 0,75 mm 80 [-]	2,5 °C/min	120 min 240 min 360 min	200 °C 400 °C 600 °C	Přirozeně na vzduchu	Křemičité Žádná	Tlak Krychle 150 mm Příčný tah Krychle 150 mm
[69]	Ocelová Nespecifikováno ²⁹ 157 kg/m ³	13 mm 0,22 mm 59 [-]	5 °C/min	204 min 240 min 280 min 320 min 360 min	120 °C 300 °C 500 °C 700 °C 900 °C	Vysušeny v peci do ustálené hmotnosti	Hrubé a jemné křemičité kamenivo Křemičitý úlet + vysokopecní struska	Tlak Krychle 70,7 mm Tlak Hranol 70,7*70,7*210 mm Příčný tah Krychle 70,7 mm Tah za ohybu Trámec 70,7*70,7*210 mm
[161]	Ocelová Přímá 78 kg/m ³ 156 kg/m ³	6 mm 0,2 mm 30 [-]	3 °C/min	180 min 240 min 360 min 420 min	200 °C 400 °C 600 °C 800 °C	Přirozeně na vzduchu	Říční písek Žádná	Tlak Válec 70*140 mm

²⁹ Červenou barvou jsou označeny parametry, které nebylo možné dohledat v původních zdrojích.

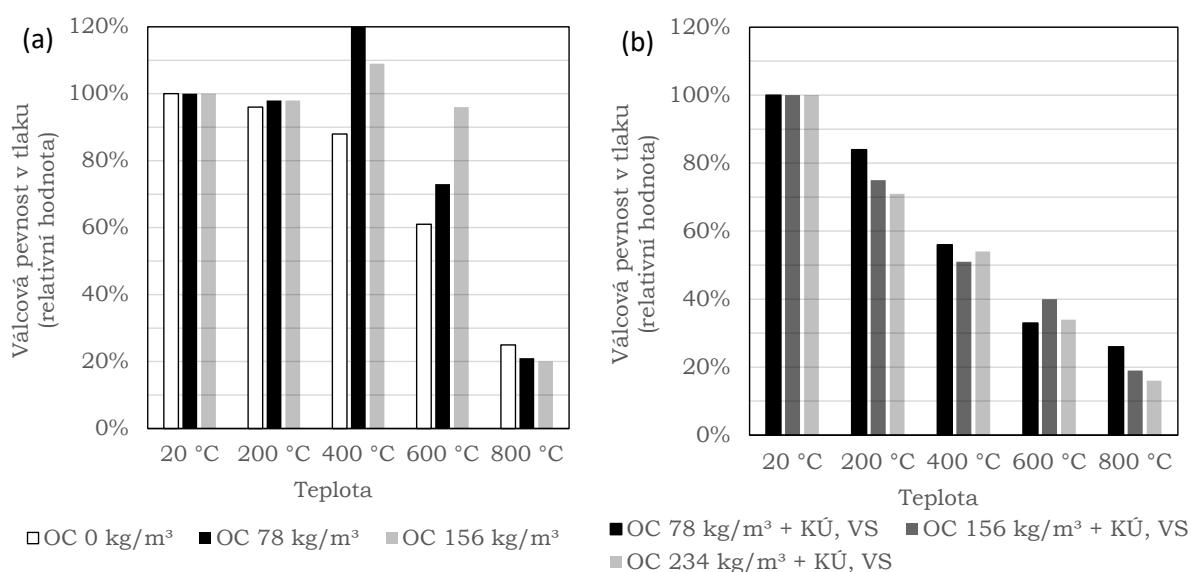
Tab. 22 Experimenty cementových kompozitů se syntetickými vlákny za zvýšené teploty

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob vysušení	Složení	Kvazistatická zkouška
	Materiál	Délka L Průměr d Množství	Rychlost	Délka				
[65]	PP	20 mm	2 °C/min	170 min	100 °C	Přirozeně na vzduchu	Vápencové hrubé kamenivo	Tlak Válec 75*150 mm
	Přímá			220 min	200 °C		Přírodní říční písek	Příčný tah Válec 75*150 mm
	1 kg/m ³			320 min	400 °C		Popílek + vysokopecní struska	
				420 min	600 °C			
			520 min	800 °C				

Tab. 23 Experimenty cementových kompozitů s ocelovými a syntetickými vlákny za zvýšené teploty

Zdroj	Vlákna		Ohřev		Teplota	Způsob vysušení	Složení	Kvazistatická zkouška	
	Materiál	Délka L Průměr d Množství	Rychlost	Délka					Kamenivo Příměs
[45]	Ocelová přímá s hákem 70 kg/m ³	50 mm	2,5 °C/min	240 min	400 °C	Přirozeně na vzduchu	Křemičité	Tlak Krychle 150 mm	
		0,75 mm 57 [-]		360 min	600 °C		Popílek	Příčný tah Krychle 150 mm	
[65]	PP, Přímá 1,5 kg/m ³	38 mm	2 °C/min	170 min	100 °C	Přirozeně na vzduchu	Vápencové hrubé kamenivo	Tlak Válec 75*150 mm	
		1,14 mm		220 min	200 °C		Přírodní říční písek	Příčný tah Válec 75*150 mm	
		42 kg/m ³		33 [-]	320 min		400 °C	Popílek + vysokopecní struska	
				420 min	600 °C				
		20 mm		520 min	800 °C				
[83]	Ocelová přímá s hákem 40 kg/m ³	60 mm	2,5 °C/min	120 min	200 °C	Přirozeně na vzduchu	Křemičité	Tlak Krychle 150 mm	
		0,75 mm		240 min	400 °C			Příčný tah Krychle 150 mm	
		80 [-]		360 min	600 °C		Žádná		
		PP, Přímá 3 kg/m ³		54 mm					

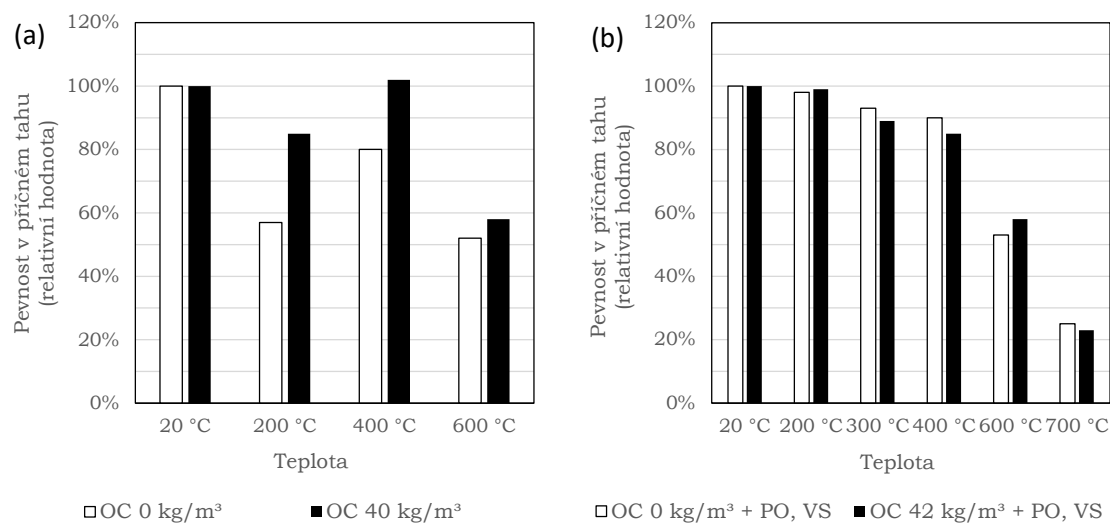
Většina studií zaměřených na testování za zvýšené teploty se věnuje cementovým kompozitům ztuženým ocelovými vlákny. Při pohledu na výsledky válcové pevnosti v tlaku (Obr. 29) si lze povšimnout určité paralely s vývojem residuální pevnosti. Pokud je vysoké teplotě vystaven předem vysušený cementový kompozit, s rostoucím množstvím vláken se snižuje relativní hodnota pevnosti bez ohledu na úroveň teploty (Obr. 29b). Pravděpodobná příčina spočívá v odlišném přetvoření ocelových vláken a cementového kamene [44]. Při ohřevu postupně vzniká vnitřní pnutí ve FITZ, což může vést ke vzniku mikrotrhlin, jejichž množství roste s množstvím zastoupených vláken. Vnitřní struktura materiálu se narušuje a zároveň se zvyšuje míra degradace materiálu od zvýšené teploty. Naopak u přirozeně vlhkých cementových kompozitů dochází uplatněním vláken spíše k nárůstu relativní hodnoty pevnosti.



Obr.29 Válcová pevnost v tlaku cementových kompozitů s ocelovými vlákny za zvýšené teploty: (a) vliv vláken [161], (b) vliv množství vláken [44]³⁰

Závěry lze formulovat i pro pevnost v příčném tahu cementových kompozitů ztužených ocelovými vlákny. Nejprve se jedná o trend vývoje pevnosti v závislosti na teplotě, který byl určen na základě úzkého spektra výsledků (Obr.30) ze dvou experimentálních studií [65, 83]. Bez ohledu na teplotu lze uplatněním ocelových vláken dosáhnout stejné nebo lepší stability v porovnání s nevyztuženým cementovým kompozitem. Rozhodujícím důvodem může být nižší narušení vnitřní struktury materiálu od pórového tlaku, který nepatrně klesá právě díky přítomnosti vláken. V oblasti FITZ se nachází cementový kámen s vyšší pórovitostí a mikrotrhlinami, které během ohřevu fungují jako efektivní kapilární systém. Vodní pára má možnost migrovat uvnitř a mimo strukturu materiálu. Pórový tlak se tak snižuje a zároveň se zvyšuje efektivita dodatečné hydratace tím, že je umožněn snazší přístup vlhkosti k nezhydratovaným zrnům.

³⁰ KÚ – křemičitý úlet, OC – ocelová vlákna, VS – vysokopecní struska



Obr. 30 Pevnost v příčném tahu cementových kompozitů s ocelovými vlákny za zvýšené teploty: (a) [83] a (b) [65] ³¹

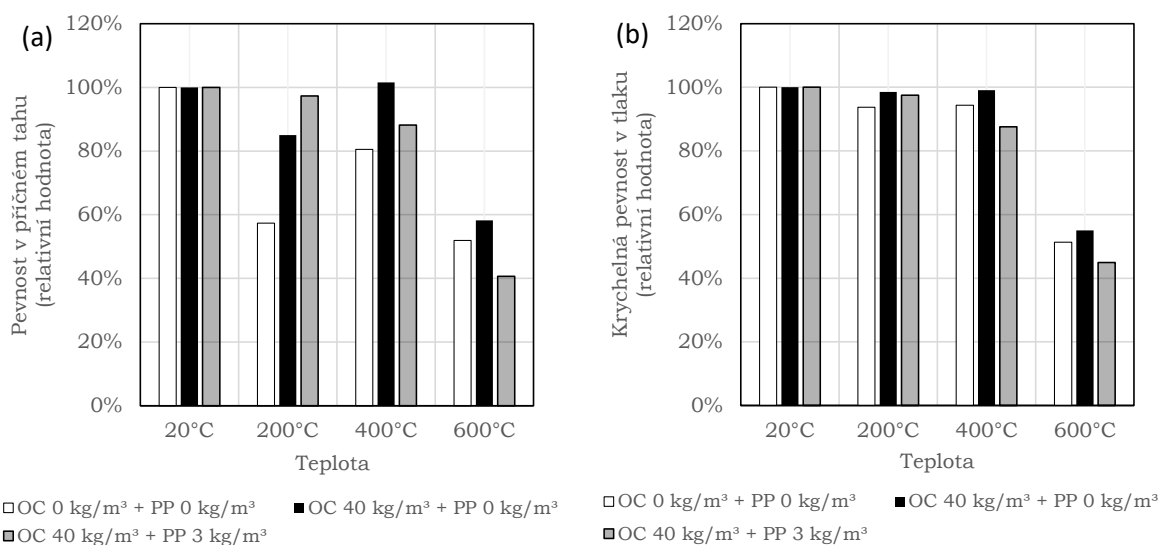
Na výsledcích studie [83] lze navíc vidět paradoxní jev, kdy testované směsi vykazují relativní hodnotu pevnosti vyšší při 400 °C než 200 °C. Důvod spočívá v zatížení, kterému jsou zkušební tělesa vystavena během zkoušky. Kromě kvazi-statického silového zatížení se u zahřátých těles musí zohlednit i pórový tlak, který má tendenci zkušební těleso roztrhnout. Během ohřevu se velikost pórového tlaku mění stejně jako pevnost materiálu. Za určitých podmínek tak může nastat situace, kdy relativní hodnota pevnosti bude větší za vyšší teploty. Podrobně tuto problematiku rozebírá následující kapitola.

5.3.5 Vliv pórového tlaku

Důležitým znakem zkoušek na zahřátých tělesech, který je zapotřebí mít na paměti při vyhodnocení výsledků a v řadě případů se nezohledňuje, je vliv pórového tlaku. Ten se v závislosti na teplotě a permeabilitě materiálu mění. Za určitých podmínek může při ohřevu tělesa nabýt takové hodnoty, která sice nevede k porušení tělesa, ale na druhou stranu může významně ovlivnit výsledky kvazistatických zkoušek.

Tento problém byl zjištěn a podrobně prokázán během experimentální studie [83], která se věnovala sledování termomechanických vlastností na cementových kompozitech se zastoupením různých druhů vláken (referenční směs bez vláken, směs s ocelovými vlákny, směs s hybridním vyztužením v podobě ocelových a polypropylenových vláken). Pevnosti směsí byly sledovány na krychlích o hraně 150 mm zahříváných skokově (nelineárně) na teploty 200 °C, 400 °C a 600 °C. Z výsledků experimentálních zkoušek se stanovily relativní hodnoty pevnosti, které představují poměr mezi pevností zjištěnou na tělesech zahřátých na cílovou teplotu (f_T) a tělesech o pokojové teplotě (f).

³¹ OC – ocelová vlákna, PO – popílek, VS – vysokopecní struska



Obr.31 Pevnost v příčném tahu (a) a krychelná pevnost v tlaku (b) cementových kompozitů s různým zastoupením vláken [83]³²

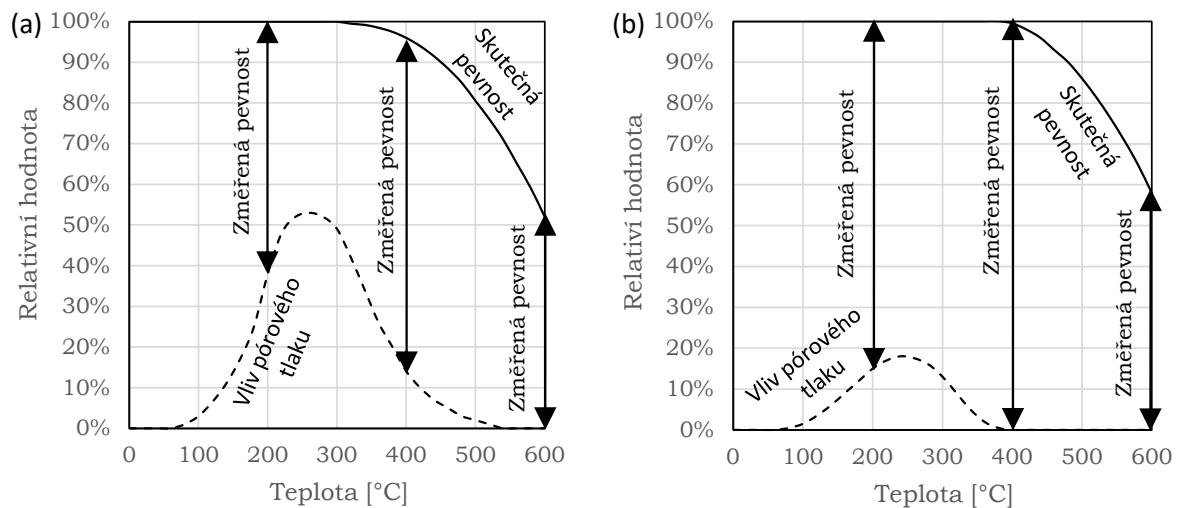
Při pohledu na grafické znázornění vývoje relativních hodnot v závislosti na teplotě (Obr. 31) lze vidět rozdílné chování sledovaných směsí. U hybridního vláknobetonu postupně klesá pevnost s rostoucí teplotou podle očekávání. Naopak u prostého betonu a drátkobetonu dochází k paradoxnímu jevu, kdy obě směsi vykazují vyšší pevnost při teplotě 400 °C než při teplotě 200 °C, přičemž pokles pevnosti prostého betonu je u obou teplot výraznější. Tento jev lze s velkou pravděpodobností přisuzovat pórovému tlaku, který přirozeně vzniká uvnitř struktury materiálu při ohřevu. Během kvazistatických zkoušek musí zahřátá tělesa odolávat nejenom běžnému silovému zatížení, ale i silovým účinkům od pórového tlaku. Změřená pevnost pak neodpovídá skutečné pevnosti materiálu, která by byla zjištěna bez působení pórového tlaku.

S ohledem na typ rozptýlené výztuže zastoupené v jednotlivých směsích lze předpokládat, že vývoj pórového tlaku bude u každé směsi odlišný. Nejvyšší hodnoty bude vykazovat směs bez vláken, následovaná směsí s ocelovými vlákny a směsí s hybridním vyztužením. Tomuto předpokladu odpovídá i samotný vývoj relativních pevností. U hybridního vláknobetonu dochází okolo 150 °C k tavení polypropylenových vláken a vzniku kapilár nezbytných pro efektivní odchod vodní páry mimo strukturu materiálu. V okamžiku měření pevností je tak těleso vystaveno zanedbatelnému nebo dokonce žádnému pórovému tlaku, což dokládá přirozený pokles pevnosti v závislosti na teplotě.

U drátkobetonu lze předpokládat, že ke snížení pórového tlaku přispívají drobné mikrotrhliny vznikající ve FITZ na rozhraní hydrofobních ocelových vláken a cementového kamene (angl. pressure-induced tangential space – PITS) [126, 117]. Díky rozdílnému bodu tání nemají ovšem ocelová vlákna takovou účinnost jako

³² OC – ocelová vlákna, PP – polypropylenová vlákna

polypropylenová, a proto se vznik pórového tlaku očekává. Toto tvrzení potvrzuje i změřená pevnost při teplotě 200 °C, kterou jednoznačně nelze považovat za skutečnou díky působení pórového tlaku (Obr. 32). Naopak delší doba ohřevu nezbytná pro dosažení teplotní rovnováhy na teplotě 400 °C vytvořila časový prostor pro odchod vodní páry a snížení pórového tlaku na minimum. Pevnost změřená na tělese o teplotě 400 °C lze proto považovat za skutečnou.



Obr.32 Schématické znázornění vývoje pevnosti v příčném tahu a pórového tlaku v závislosti na teplotě a pórovém tlaku: prostý beton (a) a beton se syntetickými vlákny (b)

Z hlediska vývoje pórového tlaku patří běžné cementové kompozity (bez provzdušňovacích přísad a rozptýlené výztuže) k vysoce rizikovým. Není proto překvapením, že změřené pevnosti na teplotě 200 °C a 400 °C se významně liší od výsledků u ostatních směsí a na první pohled nedávají smysl. Již průběh zkoušky v příčném tahu demonstroval fakt, že pórový tlak při měření pevností prostého betonu bude hrát důležitou roli. Při teplotě 200 °C nastalo porušení těles v okamžiku, kdy při určité úrovni zatížení došlo k explozivnímu roztržení tělesa doprovázeném viditelným uvolněním vody a naakumulované vodní páry. Vysoká hodnota pórového tlaku a nízká permeabilita materiálu přispěly k tomu, že i během ohřevu těles na 400 °C nedošlo k uvolnění veškeré nahromaděné páry v tělese. Zjištěnou pevnost cementových kompozitů bez rozptýlené výztuže proto nelze považovat za pevnost skutečnou.

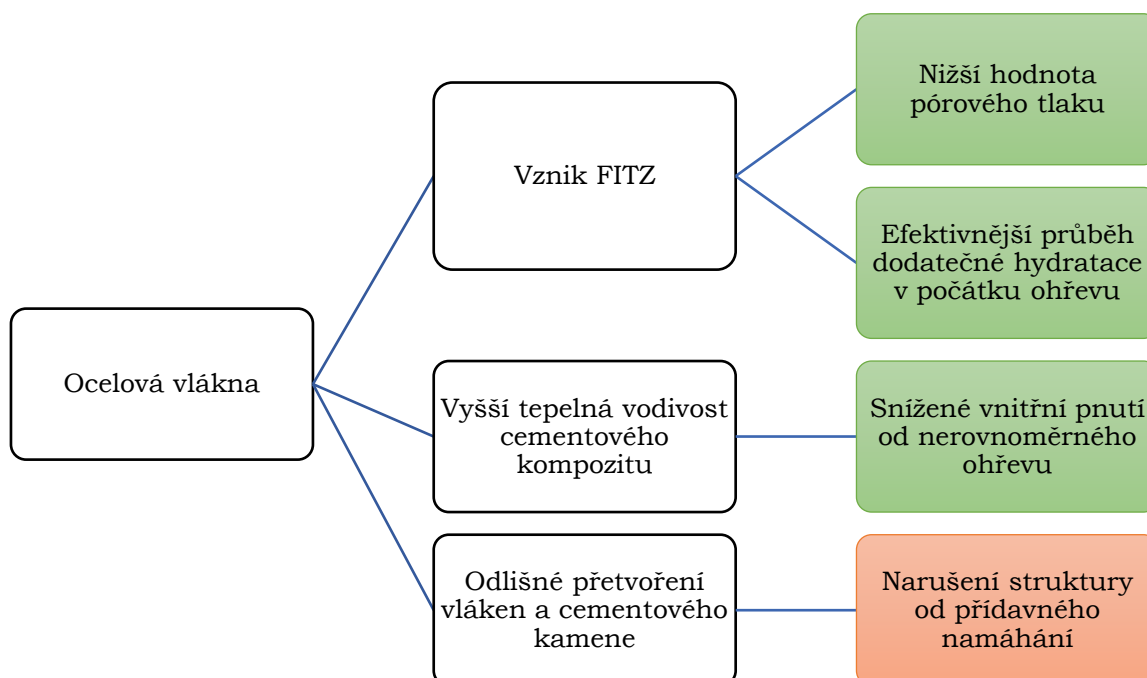
Při měření mechanických vlastností na zahřátých tělesech se musí brát v úvahu, že získané výsledky mohou být ovlivněny působením pórového tlaku, zejména v rozsahu teplot od 100 °C do 500 °C. Ovlivnění získaných výsledků lze očekávat u všech zkoušek v tahu, kde se pórový tlak významně podílí na porušení zkušební tělesa. Rovněž se předpokládá, že může dojít k ovlivnění zkoušek v tlaku na válcových tělesech, pro které je typické porušení v příčném tahu. Pro získání relevantních výsledků, tedy skutečných pevností bez vlivu pórového tlaku, se doporučuje testovat cementové kompozity s nízkým rizikem vzniku pórového tlaku nebo prodloužit délku

ohřevu natolik, aby byl umožněn odchod vodní páry z tělesa před zahájením kvazistatických zkoušek.

5.4 Vztahy pro predikci pevnosti

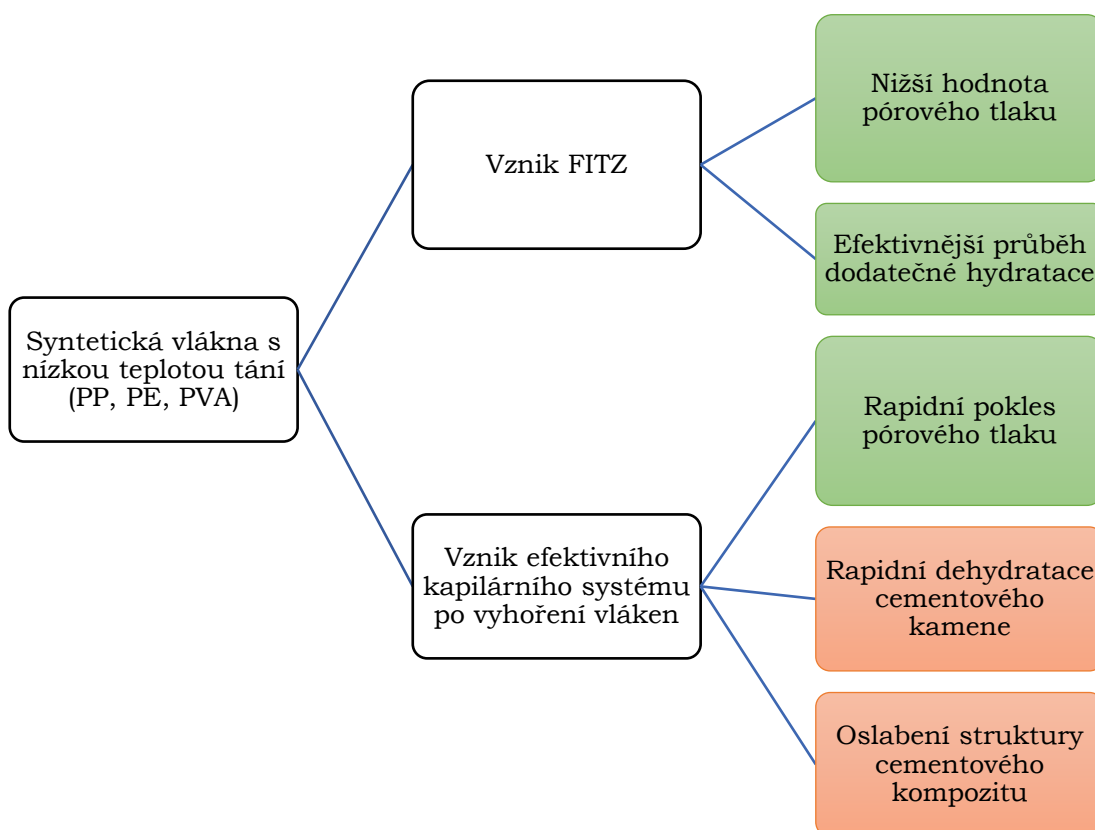
Uplatnění vláknocementových kompozitů v praxi pro prvky bez běžné betonářské výztuže a s vyšším rizikem působení vysokých teplot vyžaduje rozsáhlou znalost o chování materiálu za vysoké teploty. Typickým příkladem je ostění tunelů [162], u kterých hrozí vyšší riziko požáru způsobeného dopravou (nehoda, porucha vozidla apod.). V takovém okamžiku může požární odolnost konstrukce, resp. reakce použitého materiálu na oheň hrát zcela klíčovou roli. Vztahy určené pro odhad pevnosti za zvýšené teploty mohou následně přispět k efektivnějšímu návrhu takové konstrukce a optimalizaci složení směsi.

Předchozí zkušenosti s chováním cementových kompozitů bez rozptýlené výztuže ukazují, že existuje mnoho parametrů ovlivňujících vývoj pevnostních vlastností za zvýšené teploty. Mezi dominantní lze zařadit počáteční vlhkost cementového kompozitu a různé druhy příměsí. Rozbor experimentálních dat získaných ze zkoušek cementových kompozitů s rozptýlenou výztuží zároveň demonstruje, že vývoj pevnosti a stabilita materiálu za zvýšené teploty se výrazně odvíjí i od množství a typu zastoupených vláken. Při vývoji konstitutivních vztahů by se proto měly zvážit veškeré tyto okolnosti, aby se docílilo přesné predikce pevnosti vlákno cementových kompozitů za vysoké teploty.



Obr.33 Důsledky ocelových vláken na chování cementového kompozitu a procesy probíhající za vysoké teploty

Aby bylo možné jasně určit přínos vláken v cementovém kompozitu, je důležité správně pochopit jejich dopad na chování materiálu a procesy probíhající za vysoké teploty (Obr. 33, Obr.34). Analýza experimentálních dat ukázala, že při hodnocení možných důsledků je na prvním místě důležité rozlišovat, zda se jedná o vlákna syntetická s nízkou teplotou tání nebo ocelová. Zatímco přínos ocelových vláken lze předpokládat po celou dobu ohřevu, u syntetických vláken s nízkou teplotou tání dochází již na počátku ohřevu ke shoření vláken. Tím sice dochází ke zmírnění poškození struktury od vysokého pórového tlaku, ale zároveň je oslabena struktura materiálu a dochází k rychlejší dehydrataci cementového kamene.



Obr. 34 Důsledky syntetických vláken (PP, PE, PVA) na chování cementového kompozitu a procesy probíhající za vysoké teploty

Výsledky dvou odlišných způsobů testování, kterými lze získat residuální pevnosti po předchozím ohřevu nebo pevnosti přímo zahřátého materiálu, rovněž ukázaly, že není vhodné používat jednotné vztahy pro oba případy. Hlavním důvodem je pórový tlak, který je schopen zásadně ovlivnit především výsledky tahové pevnosti zahřátého materiálu. U residuální pevnosti materiálu se naopak mohou projevit dopady teplotního šoku při extrémním ochlazení materiálu, případně účinky opětovné hydratace při hašení vodou. Oba tyto jevy však podle experimentálních dat nepatří k těm, které by z hlediska vývoje pevnosti byly považovány za dominantní.

V současné době lze dohledat řadu vztahů, které jsou určeny přímo pro vláknocementové kompozity. Téměř ve všech případech se ovšem jedná o velmi zjednodušené vztahy, které byly vyvinuté pouze na základě výsledků zkoušek na jedné konkrétní směsi [65, 56, 53, 62], výjimečně zvážením i dalších experimentálních dat [163, 164]. Obvykle vychází z lineární a nelineární regresivní analýzy získaných dat a obsahují pouze jednu proměnou, kterou je teplota T . Odvozené jsou tedy na základě chování testovaného materiálu za konkrétních podmínek (residuální pevnost, pevnost za zvýšené teploty) a nezohledňují výše uvedené aspekty (počáteční vlhkost, příměs, typy a množství vláken), které ovlivňují vývoj pevnosti v závislosti na teplotě.

Odhadovanou pevnost vláknocementových kompozitů v závislosti na teplotě, lze získat podle následujícího obecného vztahu (2), kde $f_{fc,T}$ představuje pevnost

$$f_{fc,T} = \beta_T * f_{fc} \quad (2)$$

vláknocementového kompozitu za zvýšené teploty, součinitel β_T vliv teploty na sledovanou veličinu a f_{fc} počáteční pevnost vláknocementového kompozitu za běžné teploty. Pokud se uváží indexy pro jednotlivé typy pevnostní, tak krychelnou pevnost vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty lze označit symbolem $f_{fc,cube,T}$, válcovou pevnost $f_{fc,c,T}$ a tahovou pevnost $f_{fc,t,T}$. Samozřejmě se nabízí rozlišovat i mezi jednotlivými typy pevností v tahu, nicméně s ohledem na velmi limitované množství experimentálních dat to v současné době nedává příliš velký smysl.

5.4.1 Residuální pevnost

Z hlediska vývoje pórového tlaku za vysoké teploty lze syntetická vlákna považovat za nezbytnou složku cementových kompozitů. Množství vztahů vyvinutých pro odhad jejich pevnosti v závislosti na vysoké teplotě je ovšem limitované. Vztah pro součinitel zohledňující vliv teploty na pevnost v tlaku (3) a pevnost v tahu (4) byl odvozen tak, aby vhodně refletoval úzký soubor experimentálních dat [163], které byly převzaty z několika studií uskutečněných do roku 2014.

Tab. 24 Vztahy pro cementové kompozity ztužené PP vlákny

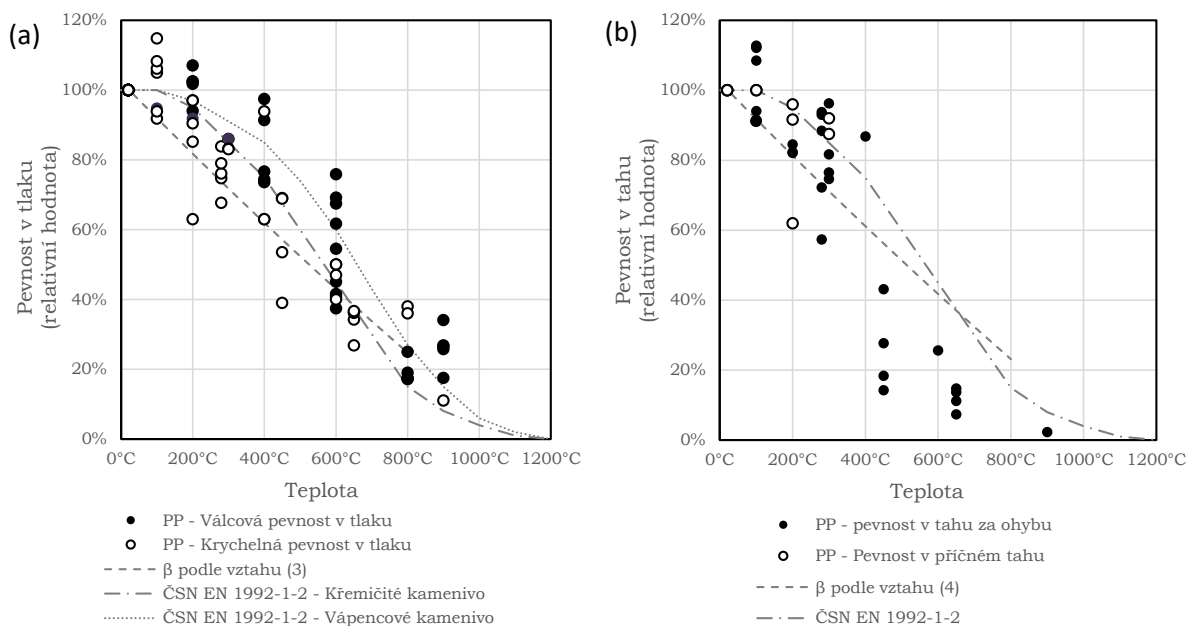
Pevnost v tlaku	
[163]	$\beta_{f_{fc,c,T}} = \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 1,0237 - 0,00105 * T + 1 * 10^{-7} * T^2 \end{array} \quad \begin{array}{l} 20^{\circ}\text{C} \\ 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (3)$
Pevnost v tahu	
[163]	$\beta_{f_{fc,t,T}} = \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 1,0237 - 0,00107 * T + 1 * 10^{-7} * T^2 \end{array} \quad \begin{array}{l} 20^{\circ}\text{C} \\ 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (4)$

V obou případech se jedná o elementární vztah bez širšího zvážení geometrie vláken a dalších důležitých parametrů mající vliv na konečné vlastnosti materiálu za vysoké

teploty. Při prvním pohledu na rozšířený soubor experimentálních dat (Obr. 35) lze konstatovat, že vztah (3) relativně přesně vystihuje vývoj pevnosti cementového kompozitu, zejména krychelné pevnosti. Na určitých úrovních teploty je ovšem patrné, že se odhad odklání od skutečných hodnot. Příkladem může být hodnota 62 % při 200 °C, která byla experimentálně zjištěna na směsi s křemičitým úletem a 1,8 kg/m³ PP vláken [48], anebo hodnota 76 % na teplotě 600 °C, která byla stanovena na směsi s popílkem (30 % hmotnosti cementu), lehkým kamenivem a 1,4 kg/m³ PP vláken [77]. V porovnání s odhadovanou hodnotou podle vztahu (3) rozdíl činí 20 %, popř. téměř až 40 %. Lze tedy vidět, že elementární vztahy bez zohlednění zastoupených složek lze využívat pouze s obezřetností obvykle pro běžné případy.

Zajímavým zjištěním je i samotná distribuce experimentálních dat v grafu. Z ní vyplývá, že měřením na tělesech válce (s poměrem průměru k výšce 1:2) lze získat vyšší relativní hodnotu pevnosti než na tělesech tvaru krychle. Neexistuje ovšem studie, která by se přímo zaměřovala na porovnání pevností identické směsi zjištěných na odlišných typech těles. Nelze tedy jednoznačně určit, zda příčina odlišného chování spočívá ve tvaru tělesa, anebo ve složení testovaných směsí.

Vztah (4) určený pro predikci pevnosti v tahu lze z hlediska přesnosti rozdělit do dvou teplotních rozmezí. Zatímco do teploty 400 °C se odhadované pevnosti téměř shodují s experimentálními daty, u vyšších teplot dochází ke značnému nadhodnocení odhadovaných hodnot až o 40 %. Většina dat umístěných pod křivkou odhadu vývoje pevnosti je ale převzata z jedné experimentální studie [55], která byla zaměřena na vláknocementové směsi s relativně vysokým obsahem PP vláken.



Obr.35 Residuální pevnost v tlaku (a) a pevnost v tahu (b) cementových kompozitů s PP vlákny za vysoké teploty

Široké uplatnění ocelových vláken do cementových kompozitů za běžné teploty se odráží na počtu vztahů vyvinutých pro určení pevnosti v tlaku v závislosti na teplotě. Většinu z nich (5)-(8) lze považovat za elementární vztahy, které popisují vývoj pevnosti pouze s ohledem na teplotu bez hlubšího uvážení složení materiálu. Snahu zohlednit vliv množství vláken lze vidět u vztahu (9), který nabízí tři formulace pro směsi s vlákny v množství 1 %, 2 % a 3 %. Formulace určená pro nejvyšší množství vláken je ovšem vágní, protože odhadované pevnosti rostou exponenciálně se zvyšující se teplotou.

Zbylé vztahy (Tab. 25) lze s určitou obezřetností uplatnit pro predikci vývoje pevnosti v tlaku zejména do teploty 800 °C. Vztah (5) obsahuje několik formulací založených na lineární regresi pro různé teplotní úrovně, čímž se autoři patrně snažili docílit přesnějšího odhadu pevnosti v tlaku uplatněním jednoduchých matematických zápisů. Na druhou stranu lze vidět (Obr. 36), že funkce odhadovaného vývoje je nespojitá a na úrovni 700 °C dochází ke skokové změně pevnosti.

Tab. 25 Vztahy pro cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny – pevnost v tlaku

$$[56] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,99 + 0,60 * \frac{T}{1000} & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 120^{\circ}\text{C} \\ 1,09 - 0,28 * \frac{T}{1000} & 120^{\circ}\text{C} \leq T \leq 300^{\circ}\text{C} \\ 2,29 - 4,28 * \frac{T}{1000} & 300^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 0,89 - 0,79 * \frac{T}{1000} & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600^{\circ}\text{C} \\ 2,14 - 2,86 * \frac{T}{1000} & 600^{\circ}\text{C} \leq T \leq 700^{\circ}\text{C} \\ 0,07 + 0,30 * \frac{T}{1000} & 700^{\circ}\text{C} \leq T \leq 900^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$[62] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ 1 + \frac{T}{1000} - 2 * \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \quad 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \right\} \quad (6)$$

$$[164] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,0 & 20^{\circ}\text{C} \\ 0,93 + 0,0025 * T - 7 * 10^{-6} * T^2 & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 1,0242 + 0,0006 * T - 2 * 10^{-6} * T^2 & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (7)$$

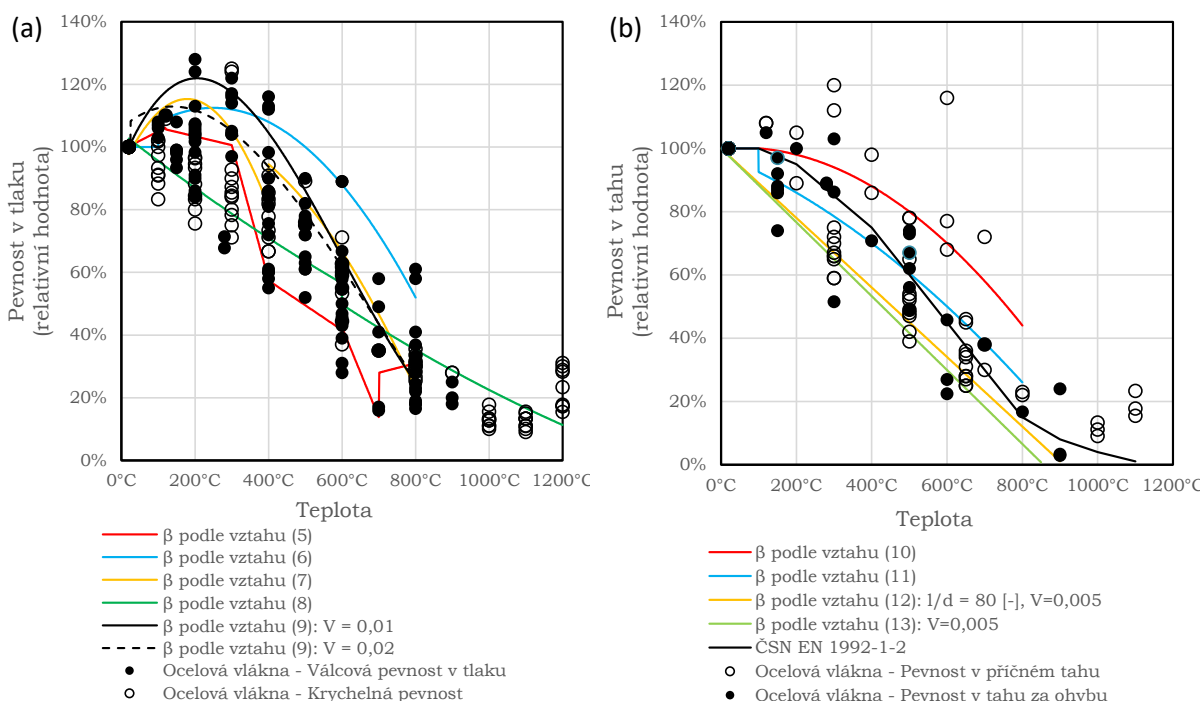
$$[164] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,0 & 20^{\circ}\text{C} \\ 1,0452 - 0,00092 * T + 2 * 10^{-7} * T^2 & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600^{\circ}\text{C} \\ 1,0252 - 0,001 * T + 2 * 10^{-7} * T^2 & 600^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$[53] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,946 + 2,855 * 10^{-3} * T - 8,375 * 10^{-6} * T^2 + 4,648 * 10^{-9} * T^3 & V_f = 0,01 \\ 1,059 + 1,053 * 10^{-3} * T - 4,223 * 10^{-6} * T^2 + 2,066 * 10^{-9} * T^3 & V_f = 0,02 \\ 0,984 + 9,782 * 10^{-3} * T - 3,923 * 10^{-6} * T^2 + 1,919 * 10^{-9} * T^3 & V_f = 0,03 \end{array} \right\} \quad (9)$$

pro 25°C < T ≤ 800°C

Na základě experimentálních dat [62] byl vyvinut vztah (6), který je určen především pro geopolymery-betony, u kterých se obvykle očekává vyšší stabilita za vysoké teploty. Vztah proto nelze doporučit pro odhad pevnosti běžných vláknocementových kompozitů, Tuto skutečnost dokládají nashromážděná data, která se významně liší (až o 60 % na teplotě 600 °C) v porovnání s odhadovanými hodnotami. Navíc vývoj pevnosti v počáteční fázi ohřevu do 100 °C není nikterak definován.

V roce 2014 byly publikovány dva vztahy určené pro predikci vývoje pevnosti v tlaku cementových kompozitů s ocelovými vlákny [164]. Vyvinuty byly na základě úzkého souboru experimentálních dat nashromážděných z několika výzkumů. První vztah (7) popisuje stav, kdy v počáteční fázi ohřevu u cementového kompozitu dochází k nárůstu pevnosti např. z důvodu dodatečné hydratace. Druhý vztah (8) je naopak pro vláknocementové kompozity, u kterých od samotného počátku ohřevu nastává pokles pevnosti. Blíže pravidla nebo informace ve věci uplatnění vztahů ovšem nejsou k dispozici. Výsledné průběhy by se proto daly považovat za určité hranice, které mezi sebou tvoří oblast možného vývoje pevnosti v tlaku za vysoké teploty. Řada experimentálních dat se ale nachází i mimo tuto oblast, kdy rozdíl relativní hodnoty činí až 20 %. Funkce vývoje pevnosti jsou navíc nespojitě, kdy u vztahu (7) dochází ke skokové změně odhadované pevnosti o 15 % na teplotě 400 °C a u vztahu (8) o 7 % na teplotě 600 °C. V neposlední řadě není dostatečně jasně určen vývoj pevnosti v počáteční fázi ohřevu do 100 °C.



Obr.36 Pevnost v tlaku (a) a pevnost v tahu (b) cementových kompozitů s ocelovými vlákny za vysoké teploty

Z hlediska korelace se souborem dat udává nejhorší výsledky vztah (9). Ten obsahuje tři formulace pro směsi s různým zastoupením vláken, přičemž poslední z nich pro největší množství vláken má exponenciální průběh a je vágní. Průběhy pro 1 % a 2 % zastoupení vláken se liší v počáteční fázi ohřevu, což odpovídá teoretickým závěrům z předchozích kapitol. Odhadované relativní hodnoty z obou vztahů jsou ovšem až o 40 % vyšší v porovnání s reálnými výsledky, a proto nelze jejich využití doporučit.

Pro odhad pevnosti v tahu cementových kompozitů s příměsí ocelových vláken lze využít několik vztahů (Tab. 26). Na základě výsledků získaných na geopolymerbetonu s ocelovými vlákny [62] byl vyvinut elementární vztah (10), který se nabízí uplatnit pro podobné typy kompozitů s vyšší tepelnou stabilitou. Predikovat pevnost běžného cementového kompozitu s ocelovými vlákny by tak mohlo vést k chybě až o 40 %, uváží-li se zpracovaný soubor experimentálních dat (Obr. 36). Navíc není zcela jasně určen vývoj pevnosti v počáteční fázi ohřevu do 100 °C.

Tab. 26 Vztahy pro cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny – pevnost v tahu

$$[62] \quad \beta_{fc,t,T} = \left\{ 1 + \frac{T}{10000} - \left(\frac{T}{1000} \right)^2 \quad 100^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \right\} \quad (10)$$

$$[164] \quad \beta_{fc,t,T} = \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 0,98 - 0,0005 * T - 5 * 10^{-7} * T^2 \end{array} \quad \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \\ 100^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$[165] \quad \beta_{fc,t,T} = \left\{ \left[\left(0,008 * \frac{l}{d} - 0,03 \right) * V_f - 0,113 \right] * T \right\} \quad (12)$$

$$[165] \quad \beta_{fc,t,T} = \left\{ (0,033 * V_f - 0,117) * T + 100 \right\} \quad (13)$$

V roce 2012 vyšel vědecký článek se vztahem určeným pro stanovení pevnosti vláknocementových kompozitů s ocelovými vlákny v závislosti na teplotě. Tento elementární vztah byl vyvinut na základě korelace s výsledky z několika mála studií. V současné době, kdy lze získat větší soubor dat, lze vidět, že velice dobře vystihuje průměrné pevnosti vláknocementových kompozitů. Na druhou stranu v porovnání s reálnými hodnotami se odhadované hodnoty v určitých teplotních rozmezích liší až o 30 %. To je dáno formulací vztahu, kdy hodnota pevnosti závisí pouze na teplotě bez zohlednění dalších důležitých aspektů (použití příměsí, vlhkost, vlákna apod.). Rovněž, stejně jako v mnoha přechozích případech, není zcela jasně popsán vývoj pevnosti v počáteční fázi ohřevu. Za předpokladu, že hodnota pevnosti se nikterak nemění, u funkce popisující vývoj pevnosti dochází při 100 °C k nespojitému průběhu.

Určitou snahu o zohlednění množství vláken včetně jejich geometrie lze vidět u vztahů (12) a (13), které byly formulovány na základě experimentálních dat získaných ze specifické zkoušky [165]. Určitým nedostatkem studie je délka ohřevu, která patrně neumožnila dosáhnout teplotní rovnováhy na tělesech zahříváných na vyšší teplotu.

Toto pochybení mohlo ovlivnit konečné výsledky a posléze i přesnost vztahů. I přes to odhadované pevnosti vykazují relativně dobrou shodu se souborem experimentálních výsledků (Obr. 36). Vztah (12) byl formulován primárně pro směsi s ocelovými vlákny zakončenými hákem, vztah (13) pro směsi se zvlněnými ocelovými vlákny. Oba vztahy zohledňují procentuální zastoupení vláken, které podle předchozí analýzy dat hraje důležitou roli ve vývoji pevnosti. Vztah (13) navíc bere v úvahu i štiřlostní poměr vláken. Tento přístup lze považovat jistě za správný, bohužel úpravy ve vstupních parametrech (štiřlostní poměr, množství vláken) vyvozují v odhadovaných pevnostech změny v řádu jednotek procent. Jedná se tedy o zanedbatelné změny v porovnání se závěry formulovanými v předchozích částech habilitační práce. Navíc ani pro jeden vztah nejsou uvedeny podmínky uplatnění, zejména pro jaké rozmezí teplot a množství vláken jsou vztahy platné.

5.4.2 Pevnost za zvýšené teploty

Vztahy určené pro predikaci pevnosti za zvýšené teploty by se měly lišit od těch, které se užívají pro odhad residuální pevnosti. Hlavním důvodem je pórový tlak, který má schopnost výrazně ovlivnit chování materiálu za zvýšené pevnosti. Ten se projevuje především u vláknocementových kompozitů s ocelovými vlákny, ale rovněž se může objevit i kompozitů s nízkým zastoupením syntetických vláken nebo obecně vláken s vysokou teplotou tání. S ohledem na nízkou četnost experimentálních zkoušek za zvýšené teploty neexistuje dostatečně široké spektrum dat, které by umožnilo objektivně posoudit přesnost vyvinutých vztahů.

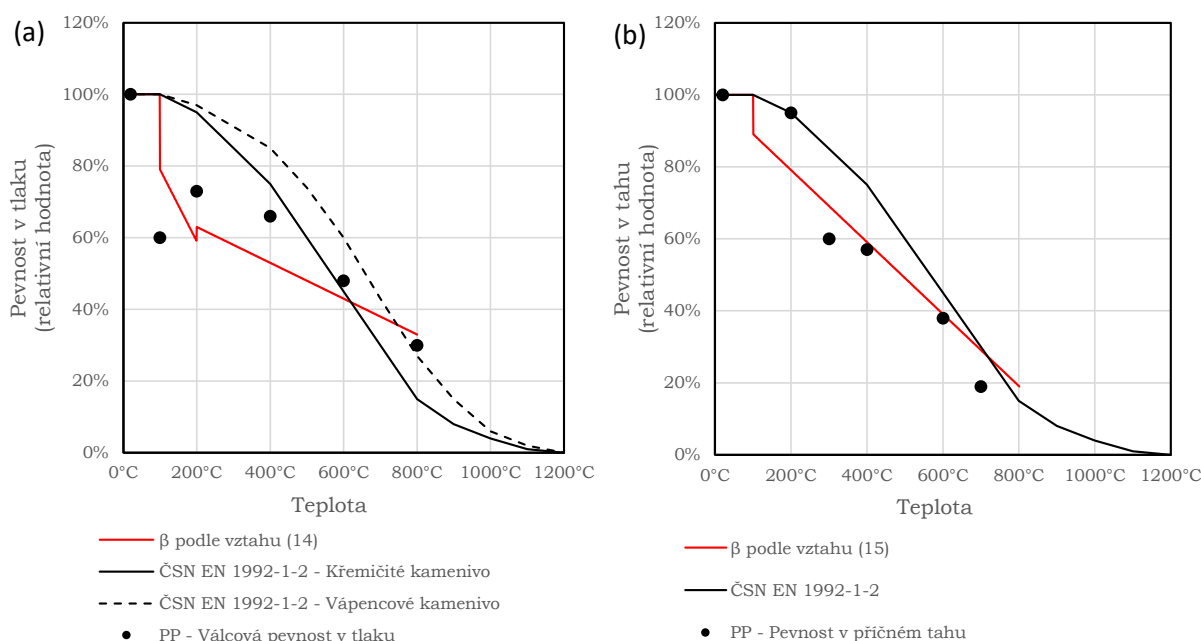
Tab. 27 Vztahy určené pro cementové kompozity ztužené PP vlákny – pevnost v tlaku

$$[65] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \begin{cases} 1,0 & 20^{\circ}\text{C} \\ 0,99 - 0,002 * T & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\ 0,73 - 0,0005 * T & 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

Pro cementové kompozity ztužené PP vlákny existují vztahy (Tab.27, Tab.28) vycházející pouze z jednoho výzkumu [65]. Jedná se o elementární vztahy, které popisují vývoj teploty v závislosti na teplotě. Byly formulovány na základě experimentálních dat ze zkoušek samozhutnitelného betonu. Ta zároveň představují jediná data, která byla možná zařadit do souboru experimentálních dat (Obr. 37) pro validaci. Správnost navržených vztahů pro odhad pevnosti v tlaku (14) a vztahu pro odhad pevnosti v tahu (15) proto nelze objektivně ověřit.

Tab. 28 Vztahy určené pro cementové kompozity ztužené PP vlákny – pevnost v tahu

$$[65] \quad \beta_{f_{c,t,T}} = \begin{cases} 1,0 & 20^{\circ}\text{C} \\ 0,99 - 0,001 * T & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (15)$$



Obr.37 Pevnost v tlaku (a) a pevnost v tahu (b) cementových kompozitů se syntetickými vlákny za vysoké teploty

I přes to si lze povšimnout problému, na který bylo v práci již upozorněno a bývá běžně opomíjen. Výsledek zkoušky pevnosti v tlaku na válcových tělesech při teplotě 100 °C vykazuje v porovnání s výsledkem při teplotě 200 °C o téměř 20 % nižší relativní hodnotu (pevnost). Tento pokles může být sice zapříčiněn chybou spojenou s nejistotami měření, ale s ohledem na jeho velikost se lze domnívat, že hlavní příčinou je pórový tlak působící uvnitř materiálu. Ten v okamžiku testování přispívá k porušení materiálu, čímž se snižuje změřená hodnota pevnosti. Díky tomu je vidět, jak důležité je zohlednit vliv pórového tlaku u vztahů pro odhad pevnosti za zvýšené teploty. Navržený vztah (14) a normativní vztahy podle ČSN EN 1992-1-2 [140] nemohou poskytnout relevantní odhad pevnosti v tlaku zejména pro teploty v počáteční fázi ohřevu, kdy je materiál vystaven působení pórového tlaku. U vztahu (14) navíc není dostatečně určena formulace pro odhad pevnosti v teplotním rozsahu od 20 °C do 100 °C. Uváží-li se, že se pevnost v tomto rozmezí nikterak nemění, pak dochází ke skokové změně relativní hodnoty při teplotě 100 °C.

Navržený vztah (15) pro odhad pevnosti v tahu za zvýšené teploty se opírá o výsledky jedné jediné studie [65] zabývající se samozhutnitelným betonem. Navíc lze pouze polemizovat, do jaké míry pórový tlak ovlivnil tyto výsledky. Sice se jedná hodnoty pevností změřených při teplotách vyšších, než je teplota tání PP vláken, nicméně s ohledem na použité množství vláken 1 kg/m³ může být materiál stále vystaven určitému pórovému tlaku i po vyhoření vláken. Na druhou stranu byl při ohřevu použit velmi pozvolný nárůst teploty, který umožnil efektivní migraci vodní páry mimo materiál. Bez širšího spektra výsledků a podrobnějších znalostí o vývoji pórového tlaku nelze jednoznačně určit přesnost vztahu. Zcela jistě lze ovšem konstatovat, že

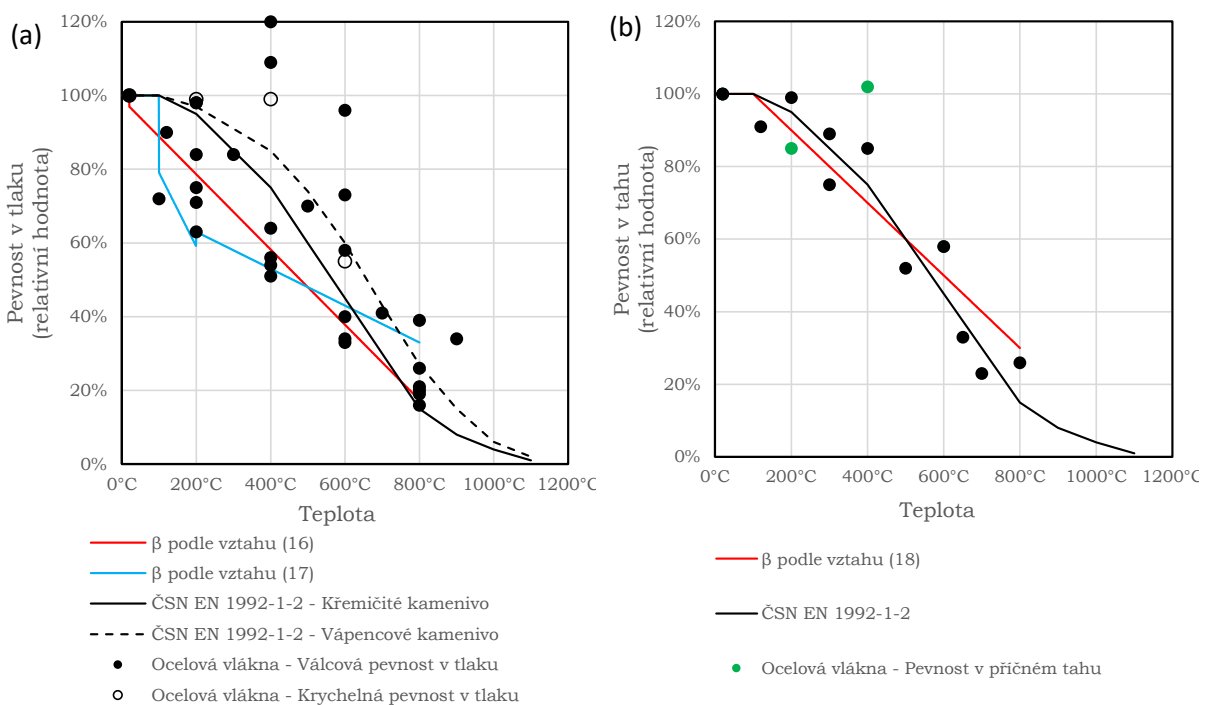
navržený vztah nezohledňuje vliv pórového tlaku, což u pevností za zvýšené teploty může být zásadní.

Tab. 29 Vztahy pro cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny – pevnost v tlaku

$$[44] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ 0,99 - 1,02 * \left(\frac{T}{1000} \right) \quad 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \right\} \quad (16)$$

$$[65] \quad \beta_{f_{c,c,T}} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,0 & 20^{\circ}\text{C} \\ 0,99 - 0,002 * T & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\ 0,73 - 0,0005 * T & 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (17)$$

V případě vláknocementových kompozitů s ocelovými vlákny je situace mírně příznivější a existuje k dispozici větší množství dat. Zejména se jedná o data ze zkoušek pevnosti v tlaku. Stále se ovšem nejedná o takový rozsah, který by umožňoval adekvátní zhodnocení přesnosti vztahů (Tab. 29, Tab. 30) pro odhad pevnosti v závislosti na teplotě.



Obr.38 Pevnost v tlaku (a) a pevnost v tahu (b) cementových kompozitů se syntetickými vlákny za vysoké teploty

Pro odhad pevnosti v tlaku lze dohledat elementární vztahy (16) a (17), které popisují vývoj pevnosti pouze v závislosti na teplotě. I přes to relativně přesně popisují spodní mez souboru experimentálních dat (Obr. 38). To platí i v počáteční fázi ohřevu, kdy se může uvnitř materiálu negativně projevit pórový tlak. Na druhou stranu je nutné zmínit, že oba vztahy ve své formulaci nezohledňují důležité parametry (pórový tlak, použité příměsi, množství vláken apod.) ovlivňující vývoj pevnosti, a tudíž se nedají využít pro jakýkoliv cementový kompozit a podmínky.

Tab. 30 Vztahy pro cementové kompozity ztužené ocelovými vlákny – pevnost v tahu

$$[65] \quad \beta_{f_c, t, T} = \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 1,1 - 0,001 * T \end{array} \quad \begin{array}{l} 20^{\circ}\text{C} \\ 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \quad (18)$$

Vztah (18) určený pro odhad pevnosti v tahu vychází z lineární závislosti pevnosti na teplotě v rozmezí od 100 °C do 800 °C. Jedná se o triviální přístup, kterým lze bezesporu konzervativně popsat chování materiálu za vysoké teploty. S ohledem na výsledky konkrétních experimentálních zkoušek [83] se však ukazuje, že formulace vztahu není vhodná pro pokročilejší popis pevnosti při zohlednění pórového tlaku. Ten u zmíněné studie způsobil paradoxní jev, že naměřená pevnost při teplotě 200 °C byla o téměř 20 % nižší než při teplotě 400 °C (zelené body).

6 Rozhraní tištěných vrstev

Za poslední dvě dekády zaznamenal betonářský průmysl výrazný vývoj. Ten spočívá v implementaci nových materiálů (Ultra High Performance Concrete – UHPC, samohojící beton, plastbeton [166] apod.) a výrobních technologií, které se používají pro stavbu betonových konstrukcí. Typickým příkladem je aditivní technologie, která přináší zcela nový pohled na výrobu betonových konstrukcí. Ta, v případě nejvíce rozšířeného způsobu výroby vrstvením materiálu (angl. Extrusion-based 3D printing technology), vzniká postupným vrstvením filamentů na cementové bázi bez použití tradičního bednění. Výjimečně se lze setkat i s upravenými technologiemi, které se v určitých detailech liší od té původní. Například se jedná o technologii založené na vrstvení, kdy cementový kompozit je ovšem nanášen stříkáním směsi z krátké vzdálenosti na tištěnou konstrukci (Shotcrete 3D printing technology) [167].

Aditivní technologii se nabízí využít pro menší a tvarově složitě dílce (prvky městského mobiliáře), pro které může být výroba tradičního bednění značně nákladná. Nejedná se pouze o jediný způsob využití technologie. Stále více se lze setkat s myšlenkou uplatnění technologie pro menší, zejména nízkonákladové obytné objekty. První vzorové objekty lze vidět v USA, kde se na řadě míst uskutečnila výstavba tištěných domů v rámci developerských projektů [168]. Typizované objekty jsou zhotovené in-situ pomocí portálových tiskáren, které se pohybují po kolejnicích umístěných podél tištěného objektu. Tvar a konstrukce jsou přizpůsobeny tak, aby umožňovaly výstavbu zhotovit za pomoci aditivní technologie. Jedná se o jednopodlažní domy se svislou tištěnou konstrukcí a lehkou dřevěnou střešní konstrukcí.



Obr.39 Developerský projekt zahrnující 100 tištěných domů v Austinu (převzato z www.iconbuild.com)

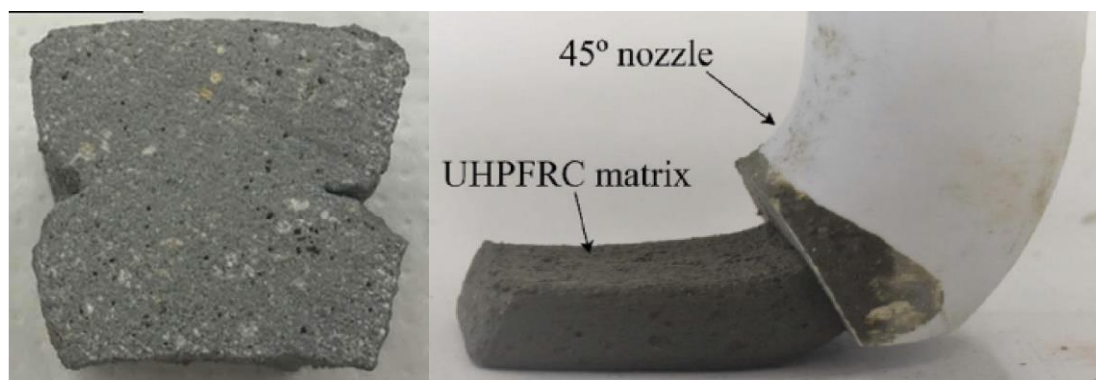
Současný stav poznání ukazuje na řadu problémů, které nejsou dostatečně objasněny a limitují širší uplatnění technologie v praxi. Jedním z nich je způsob vyztužování tištěné konstrukce. Ta se obvykle vyrábí pouze z nevyztužených cementových kompozitů, případně z kompozitů ztužených syntetickými vlákny (Obr. 40) zajišťující lepší tvarovou stálost čerstvé směsi [169]. Ve výjimečných případech se do konstrukce ručně vkládá běžná betonářská výztuž během jejího tisku [170], případně se lze setkat s automatizovaným vkládáním (zapichováním) svislých prutů paralelně s tiskem filamentů [171] a velmi zřídka s vrstvením kompozitu okolo výztužné sítě [172]. Jedná se ovšem o ojedinělé případy vyztužování betonářskou výztuží a v současné době se lze spíše setkat pouze s úvahami o způsobu automatizovaného vyztužování [173], které budou předmětem dalšího laboratorního bádání.



Obr.40 Tvarová stálost čerstvé směsi při shodném zatížení – vláknobeton s polypropylenovými mikro vlákny (vlevo) a prostý beton (vpravo) [169]

Technologicky složitý způsob vyztužování tištěných konstrukcí hraje z hlediska jejich chování důležitou roli. V okamžiku, kdy konstrukce neobsahuje vázanou výztuž, únosnost se odvíjí pouze od její geometrie, mechanických vlastností cementového kompozitu, a především pevnosti rozhraní mezi jednotlivými vrstvami. Nejenom, že nelze s přínosem výztuže v podobě přenosu tahových namáhání uvažovat, ale zároveň se musí vzít v potaz, že se konstrukce skládá z mnoha filamentů propojených rozhraním. Na tištěnou konstrukci nelze proto nahlížet jako na běžnou monolitickou konstrukci zhotovenou do tradičního bednění, ale spíše na segmenty v podobě filamentů, které jsou propojeny vrstvou se specifickým chováním. Pak se při konstrukčním návrhu tištěných konstrukcí musí kromě samotné pevnosti cementového kompozitu zohlednit i pevnost rozhraní. To platí zejména u tištěných stěnových prvků rodinných domů, které jsou vystaveny příčnému zatížení od účinků větru nebo excentrickému svislému zatížení od vlastní tíhy nebo střešní konstrukce. Navíc musí být navrženy tak, aby byly spolehlivé za běžné situaci ale i při mimořádných událostí.

Rozhraní filamentů typických pro tištěné konstrukce lze považovat za kritickou oblast, kde hrozí největší riziko porušení [174]. Důvody lze spatřit už v samotné výrobní technologii. Zatímco filameny vznikají vytlačněním cementového kompozitu z extrudéru, ve kterém dochází k určité míře stlačení a tím i zhutnění, rozhraní vrstev obvykle není nikterak upraveno za účelem dosažení shodných vlastností jako má cementový kompozit. Plocha průřezu rozhraní je navíc v porovnání s průřezem filamentů nižší, jak dokládá typický průřez tištěného prvku (Obr. 41). V neposlední řadě se ve většině případů tryskou vytlačuje směs s hladkým povrchem a tím se omezuje jakákoliv silnější provázanost dvou přilehlých filamentů, obzvlášť uváží-li se i delší časový odstup kladení přilehlé vrstvy. Je tedy zřejmé, že pevnost rozhraní bude ve většině případů nižší než pevnost samotného cementového kompozitu. Otázkou však stále zůstává, s jakou pevností rozhraní lze při konstrukčním návrhu prvků uvažovat.



Obr. 41 Typický průřez dvou přilehlých filamentů [175] a tryska bez perforace s vyústěním pod 45° [176]

6.1 Časově závislá pevnost za běžné teploty

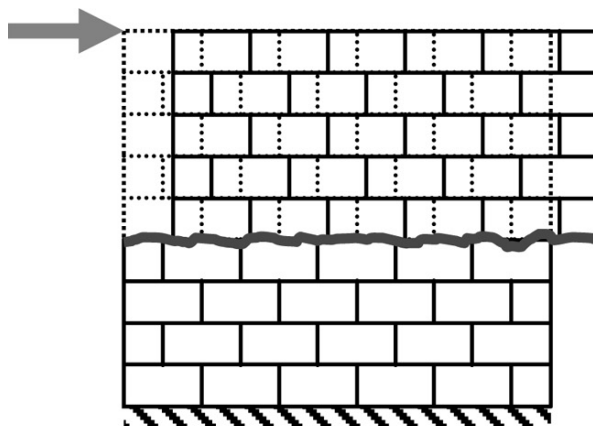
Požadavek na znalost chování rozhraní tištěných vrstev se odvíjí namáhání, kterým je konečná konstrukce vystavena. V současné době se aditivní technologie využívá především pro stěnové prvky. Jednak je tento typ prvků pro zvolenou technologii přirozenější, kdy se vyrábí ve svislé, již konečné, pozici, a zároveň oproti deskovým prvkům nevyžaduje zcela nutně vázanou výztuž. Typickým příkladem jsou obytné jednopodlažní domy menší velikosti, které se skládají z tištěných stěn, na kterých je uložena lehká střešní konstrukce např. v podobě dřevěných vazníků.

6.1.1 Namáhání tištěných stěnových prvků

Tím, že se aditivní technologie užívá převážně pro zhotovení stěn, lze základní požadavky na chování a mechanické vlastnosti rozhraní určit z jejího způsobu namáhání. Stěny jsou obecně vystaveny ohybovému namáhání a namáhání tlakem, ve výjimečných případech i tahem. Je ovšem nutné mít na paměti i to, že u stěn může vznikat smykové namáhání.

Z hlediska původu vzniku ohybového namáhání u tištěných stěn lze rozlišit dvě základní příčiny. Jednak může být střešní konstrukce uložena na stěnách takovým způsobem, kdy zatížení působí s určitou výstředností ke střednicové rovině stěny a tím vyvozuje její ohybové namáhání v kombinaci s namáháním v tlaku. Hodnotu takových ohybových momentů lze efektivně snížit vhodným návrhem propojení obou prvků až do takové míry, kdy stěna bude víceméně pouze tlačena. Druhou příčinou vzniku ohybových momentů je zatížení od větru, které působí v kolmém směru na střednicovou rovinu stěny. Hodnota takového namáhání se mění v závislosti na geometrii a lokalitě tištěného objektu. Bez ohledu na původ vzniku zmíněných ohybových momentů může u konstrukce nastat stav, kdy dojde k tahovému namáhání průřezu stěn. Tomu bude vystaven jak samotný cementový kompozit, tak i rozhraní vrstev. Při dosažení tahové pevnosti v jedné z oblastí může nastat porušení stěny ve formě vzniku nepříjemných trhlin nebo dokonce jejího celkového kolapsu.

Tištěné stěny mohou být rovněž vystaveny i smykovému namáhání od zatížení působícího v příčném směru na objekt nebo od účinků zemětřesení při mimořádných událostech. V takové případě může výjimečně nastat delaminace tištěných vrstev a pokluz na jejich rozhraní. Podobný způsob porušení byl sledován i u zděných konstrukcí [177], kde ložná spára simulovala rozhraní mezi zdicími prvky (Obr. 42). Tento způsob porušení navíc hrozí u objektů zhotovených aditivní technologií, kde se očekává nízká smyková únosnost rozhraní a malé přitížení od vrchní konstrukce objektu.



Obr. 42 Porušení zdiva ve smyku – pokluz v ložné spáře [178]

Studie namáhání tištěné konstrukce s důrazem na stěnové prvky jasně ukazuje, že chování a spolehlivost konstrukce se odvíjí nejenom od mechanických vlastností samotného cementového kompozitu, ale především rozhraní tištěných vrstev, které lze považovat z kritickou oblast s vyšším rizikem porušení. Správný konstrukční návrh tištěných konstrukcí proto vyžaduje mít rozsáhlé znalosti o pevnosti rozhraní v tahu a ve smyku.

6.1.2 Metodika zkoušení

Metodika zkoušení pevnosti rozhraní není nikterak rozšířená. Důvodem je, že znalost chování rozhraní nebyla v betonovém stavitelství až do okamžiku, kdy byla implementována aditivní technologie, tak významná. Před tím měla smysl pouze pro úzké spektrum aplikací. Mezi ně patří spřažené betonové konstrukce, zejména filigránové konstrukce, které se skládají z prefabrikované části tvořící trvalé bednění a monolitické nabetonávky. Pro podobné typy konstrukcí je typické, že monolitická nabetonávka je zhotovená v dlouhém časovém odstupu v řádu dnů až měsíců, a navíc skrz rozhraní obvykle prochází spřahovací výztuž, která má hlavní podíl na soudržnosti přilehlých částí konstrukce [179]. Další specifickou oblastí je zesilování stávajících betonových konstrukcí. To probíhá způsobem, kdy se na upravený povrch např. v podobě zdrsnění stávající konstrukce, nanese nová vrstva obvykle vysokopevnostního betonu [180].

Aditivní technologie přináší ovšem zcela nový směr zhotovení betonových konstrukcí, který spočívá ve vrstvení čerstvého cementového kompozitu v krátkém časovém odstupu. Přesný odstup vrstvení se odvíjí od vlastností čerstvé směsi, zejména tvarové stálosti a extrudovatelnosti [181], ale i složitosti konstrukce a možné rychlosti pojezdu trysky. Dosavadní zkušenosti naznačují, že u běžných konstrukcí se časový odstup pohybuje v rozmezí od jednotek minut až po 90 minut, přičemž je snaha zkrátit časový odstup na minimum, aby nedošlo k nadměrnému vysušení povrchu předchozí vrstvy.

Z výše uvedeného vyplývá, že dosavadní získané poznatky o chování rozhraní běžných spřažených konstrukcí nelze využít pro návrh tištěných konstrukcí. V současné době se proto objevují první experimentální studie, které se zabývají chováním rozhraní vrstev z cementového kompozitu zhotovených v krátkém časovém odstupu za běžné a zvýšené teploty. První závěry ovšem ukazují na to, že především díky novosti tématu a chybějící opoře ve standardech se pro testování a výrobu zkušebních těles využívají různé metody. Výsledky se proto mohou značně lišit v závislosti na použité zkušební metodě [182]. Postupně se tak vytváří databáze výsledků, které ovšem nelze nikterak porovnávat a jednoduše uplatnit při vývoji konstitutivních modelů pro predikci časově závislého chování rozhraní za běžné a zvýšené teploty. Lze tedy očekávat, že tlak na zavedení unifikované metody testování včetně předpisů pro výrobu zkušebních těles bude v blízké budoucnosti sílit. Zavedením jednotné metodiky by se výrazně sjednotily výsledky a snížilo riziko nevhodného až chybného způsobu stanovení výsledků.

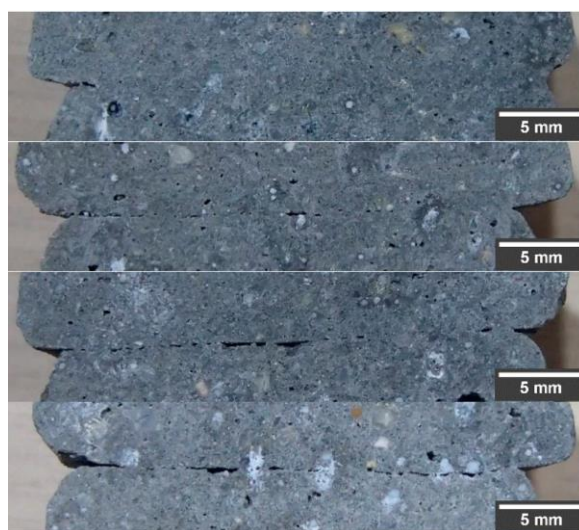
6.1.2.1 Zkušební tělesa

Přesně definovaný postup výroby a tvar zkušebních těles se pro interpretaci výsledků zdá být zcela zásadní. Již drobné odchylky mohou ovlivnit získané výsledky a vést ke zcela odlišným závěrům. Pro stanovení pevnosti rozhraní vrstev na cementové bázi se využívají tělesa zhotovená dvěma odlišnými technologiemi výroby. Jednak se dají

použít tištěná zkušební tělesa, ve většině případů se jedná spíše o výřezy z tištěných konstrukcí [183], anebo lze experimenty provádět na standardizovaných tělesech běžných rozměrů a tvarů. S ohledem na dosavadní zkušenosti nelze jednoznačně určit, jaký typ těles je pro stanovení mechanických vlastností rozhraní vhodnější.

6.1.2.2 Tištěná zkušební tělesa

Na první pohled se jako optimální nabízí tištěná tělesa, protože jejich princip výroby shoduje se skutečnou výrobou tištěných konstrukcí. Experimentálně lze proto získat jasnou představu o skutečné únosnosti rozhraní při uvážení konkrétních podmínek. Důležité je ovšem zdůraznit, že zjištěná hodnota představuje únosnost rozhraní, která se odvíjí od pevnosti rozhraní a kontaktní ploše vzdorující zatížení [174]. Nejedná se tedy o skutečnou pevnost rozhraní, jak se na první pohled může zdát. Ta, při znalosti kontaktní plochy a zatěžovací síly, by se pomocí jednoduchého vztahu dala vyjádřit. Tomu ale brání složitý přístup k určení plochy rozhraní, které má jednak nepravidelný tvar a zároveň v celé své ploše obsahuje řadu nespojených oblastí (Obr. 43). Přesné vyčíslení ploch proto vyžaduje znalost sofistikovaných metod jako je např. trojrozměrné optické skenování [181], čímž se proces stanovení pevnosti stává složitý a náročný na experimentální vybavení.



Obr.43 Typický průřez tištěných vrstev s nespojenými oblastmi [184]

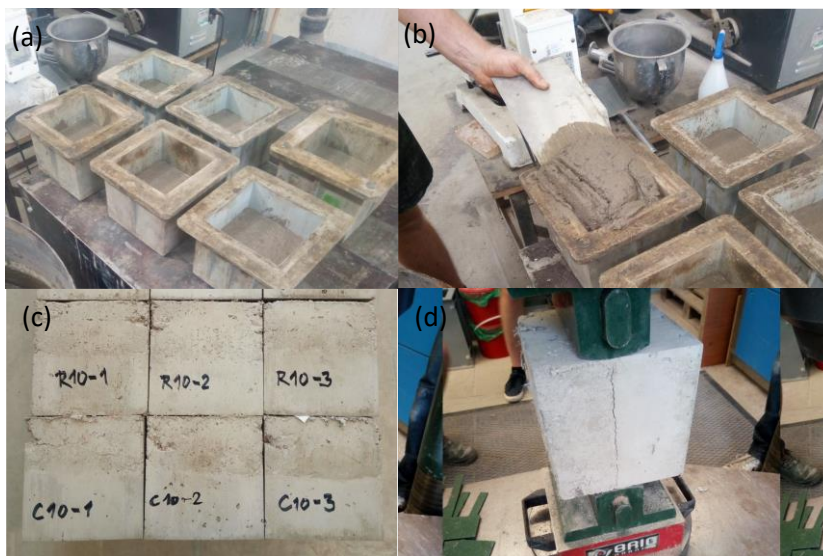
U těles, které vznikly výřezem z tištěné konstrukce, lze narazit i na další aspekty, které mohou ovlivnit pevnost rozhraní. Jedná se zejména o přitížení rozhraní vlastní tíhou vrstev zhotovených v pozdější fázi výroby konstrukce. Při kladení vrstev v krátkém časovém odstupu může dojít k relativně vysokému přitížení spodních vrstev v okamžiku, kdy jsou stále v čerstvém, plastickém, stavu. Tím se může docílit daleko efektivnějšího provázání vrstev konstrukce a zlepšení mechanických vlastností rozhraní. Pevnost rozhraní těles, odebraných z tištěné svíslé konstrukce v oblasti paty a hlavy, se pak může lišit. V neposlední řadě může během výřezu tělesa dojít k narušení oblasti v blízkosti řezu a tím i oslabení rozhraní. Při získání výřezů

by se proto mělo postupovat s velkou opatrností a zkušební tělesa by zároveň měla být dostatečně veliká, aby se vliv znehodnoceného okolí řezu snížil na minimum.

6.1.2.3 Normovaná zkušební tělesa

V případě využití normovaných těles zhotovených standardním způsobem vzniká zcela opačný problém. Ten tkví ve schopnosti simulovat rysy aditivní technologie při výrobě zkušebních těles a samotného rozhraní, což lze názorně vidět na tělese tvaru krychle složené ze dvou vrstev zhotovených v určitém časovém odstupu (Obr. 44). Poznatky z pilotních zkoušek poukázaly na to, že již od samotného počátku výroby se objevuje hned několik otázek a podnětů pro další bádání, bez ohledu na tvar a typ tělesa.

Příkladem je přístup k hutnění spodní vrstvy. Cílem by mělo být dosáhnout shodné míry zhutnění jako v případě tištěné směsi z extrudéru tiskárny, ve kterém dochází k určitému stlačení směsi. Při nevhodném uplatnění běžných nástrojů pro zhutnění, např. laboratorní vibrační stůl, může ovšem dojít k odlišné míře zhutnění, a především krvácení betonu na povrchu spodní vrstvy. To se projevuje separací cementové suspenze (směs vody a cementu) od zbylých složek cementového kompozitu a usazením na povrchu vrstvy, kde tvoří nežádoucí povlak. Následně může přítomnost tohoto povlaku zásadně ovlivnit pevnost rozhraní a zjištěné výsledky.



Obr. 44 Výroba normových těles: (a) spodní zhutněná vrstva, (b) uložení druhé vrstvy přes hladký plech simulující povrch trysky, (c) zhotovená zkušební tělesa, (d) typický způsob porušení v příčném tahu

Další otázkou je způsob zhotovení druhé vrstvy. Ta se musí ukládat takovým způsobem, aby nedošlo k nežádoucímu provázání se spodní vrstvou a nechtěným zvýšením pevnosti rozhraní. Rovněž je důležité vystihnout i parametry tištěné směsi, která je vytlačována tryskou v podobě filamentů obvykle s hladkým povrchem. V neposlední řadě by mělo dojít k optimálnímu zhutnění směsi tak, aby u spodního povrchu nevznikaly nežádoucí póry nebo dokonce větší vzduchové oblasti, které by

měly vliv na velikost kontaktní plochy obou vrstev. Druhou vrstvu se proto nabízí ukládat přes silný plech, kterým lze dosáhnout hladkého spodního povrchu druhé vrstvy a zároveň může sloužit jako opora pro hutnění směsi (Obr. 44b). Efektivita zhutnění ovšem není tak vysoká jako v případě v první, což ukazuje povrch zhotovených zkušebních těles. Nicméně se jedná pouze o elementární způsob zhotovení, který lze dále rozvinout v sofistikovanější přístup.

Pilotní experimentální zkoušky demonstrují, že problematika výroby normovaných těles pro zkoušky pevnosti rozhraní tištěných konstrukcí je stále značně neprobádaná. Existuje pouze omezené množství poznatků, které navíc ukazují, že plnohodnotně simulovat aditivní technologii při výrobě normovaných těles bude velice obtížné. Výhodou ovšem je, že při správném postupu výroby lze zhotovit tělesa, díky kterým bude možné získat relevantní výsledky.

6.1.3 Zkoušky pevnosti v tahu

Obecně lze pevnost v tahu považovat za parametr, který patří k základním vlastnostem materiálu a rozhraní vrstev. Není proto překvapením, že metodiky určené pro její stanovení jsou již dostatečně prověřené a rozšířené [182]. Daleko závaznější otázkou ovšem je, jakým způsobem přistupovat k výrobě zkušebních těles tak, aby bylo dostatečně zohledněna podstata aditivní technologie a zároveň byla schopná vykázat průkazné chování rozhraní v tahu.

6.1.3.1 Zkouška v osovém tahu

Ačkoliv se jedná o základní zkoušku pro měření pevnosti v tahu, z mnoha důvodů se v praxi využívá pouze sporadicky. Hlavní nedostatek spočívá v uchycení zkušebního tělesa do zařízení pro měření tahové pevnosti, které se obvykle provádí za použití kovových úchytnů a čelistí. Ty se k měřicímu zařízení a zkušebnímu tělesu připojují mechanicky (Obr. 45), případně lze těleso připevnit pomocí lepidla na chemické bázi (chemické kotvy apod.). Celý proces osazení tělesa s sebou ovšem nese vysoké požadavky na přesnost. Případné excentricky vnesené zatížení by vyvodilo nežádoucí přídavná namáhání, která by zásadně ovlivnila získané výsledky [182]. Tento problém může být zcela zásadní pro uplatnění zkoušky na tělesech zhotovených aditivní technologií, která mají nepravidelný tvar a nerovný povrch. I přes to se pro zkoušky využívají jak výřezy z tištěné konstrukce, tak tělesa různých tvarů zhotovená běžnými výrobními metodami.

I teoreticky dokonalé osazení tělesa ve zkušebním zařízení nemusí zaručit řádný průběh experimentální zkoušky. Závěry z proběhlých zkoušek cementových kompozitů zcela jasně demonstrují, že existuje vysoké riziko nežádoucího porušení v oblasti mimo testovaný materiál před dosažením pevnosti materiálu v tahu. Při určité úrovni zatížení může nastat pokluz kovového úchytnu v měřicím zařízení, k lokálnímu porušení zkušebního tělesa v místě kontaktu s kovovým úchytem nebo poškození vrstvy lepidla mezi úchytem a zkušebním tělesem. Určitou nadějí je

skutečnost, že hodnota pevnosti rozhraní v tahu je v porovnání s pevností v tahu cementového kompozitu nižší. Tudíž se zvyšuje šance, že porušení nastane dříve v oblasti rozhraní. V současné době se lze proto setkat s prvními výsledky zkoušek rozhraní v osovém tahu [184, 185, 186]. Důležité je ovšem zmínit, že ze zkoušky v prostém tahu lze získat pouze pevnost rozhraní, nikoliv závislost mezi deformací a pevností, protože záznam deformace může nabývat vágních hodnot.



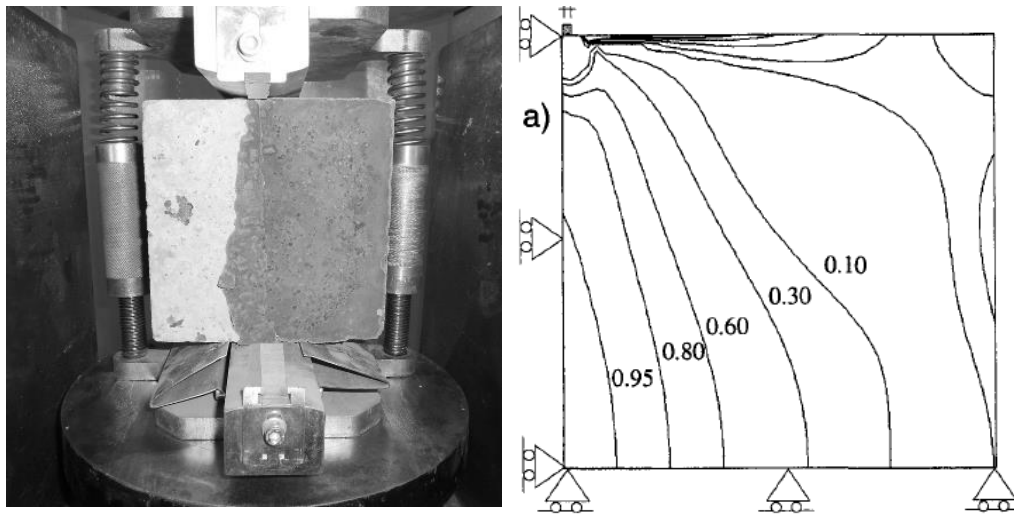
Obr. 45 Zkouška v osovém tahu: (a) zkouška pevnosti cementového kompozitu – mechanické uchycení tělesa [187], (b) zkouška rozhraní tištěných vrstev – mechanické ukotvení tělesa [188], (c) zkouška rozhraní vrstev na cementové bázi – lepený spoj [181]

6.1.3.2 Zkouška v příčném tahu

Za nejrozšířenější zkoušku pevnosti v tahu lze považovat zkoušku v příčném v tahu [113]. Jedná se o zkušební metodu, která je nenáročná na laboratorní vybavení včetně zkušebních těles a relativně rychlá z hlediska provedení [182]. Z podstaty zkoušky ovšem vyplývá, že ji lze provádět pouze na normovaných tělesech, která mají pravidelný tvar, rovný povrch a přesnou pozici rozhraní. Nelze ji proto využít pro zjištění pevnosti rozhraní na tištěných tělesech, což může znamenat určitou překážku v oblasti aditivní technologie.

Pevnost rozhraní vrstev lze zjišťovat na běžných tělesech tvaru krychle [189, 190, 180, 191, 192], případně na krychlích opatřených zářezem [193]. Použit lze rovněž i válce, které se ovšem vyrábí v pozici, která neumožňuje vytvořit rozhraní mezi vrstvami v podélném směru. Bez ohledu na typ tělesa je důležité dbát na správné umístění a rovinnost rozhraní. To musí procházet středem tělesa tak, aby při osazení tělesa v lisu byly ocelové zatěžovací prvky včetně roznášecích dřevěných proužků umístěny právě nad rozhraním vrstev (Obr. 46). V takovém případě bude rozhraní vystaveno maximálnímu namáhání v příčném tahu. Případné pochybení v přípravě zkušebních těles by přispělo k nežádoucímu způsobu porušení. Při nedodržení správné pozice rozhraní a drobném odchýlení sice nastane porušení v místě rozhraní, nicméně pro delaminaci vrstev bude nezbytné vynaložit vyšší sílu. Důvodem je skutečnost, že oblast s rozhodujícím tahovým namáháním v příčném směru se nachází v ose zatěžovacích prvků a jakékoliv odchýlení rozhraní od této osy vede

k chybě ve výsledcích. Pokud by rozhraní vrstev bylo velmi vzdálené od oblasti s maximálním příčným tahovým namáháním, mohla by nastat extrémní situace, kdy nastane porušení mimo oblast rozhraní.



Obr. 46 Chybné umístění rozhraní ve zkušební tělese [180] a typické rozložení příčného tahového namáhání na čtvrtině průřezu krychle při zkoušce v příčném tahu.

6.1.3.3 Zkouška přídržnosti (pull-off test)

Zkušební metoda byla vyvinuta zejména pro určení přídržnosti sanačních systémů pro ochranu a opravu betonových konstrukcí [194], případně přídržnosti povrchových úprav stavebních konstrukcí k podkladu [195]. S ohledem na podstatu zkušební metody [196] a dosavadní zkušenosti s problematikou testování rozhraní cementových vrstev lze konstatovat, že se jedná o přijatelný způsob testování rozhraní tištěných konstrukcí.

Ačkoliv se jedná o méně užívanou zkoušku v betonovém stavitelství, závěry z několika studií [197, 198] ukazují, že ji lze efektivně používat pro měření přídržnosti betonových vrstev zhotovených v určitém časovém odstupu. Stále je zapotřebí mít na paměti, že se jedná o zkušební metodu podobnou zkoušce v prostém tahu, která má řadu úskalí. Zejména se jedná o vysoké požadavky na přesnost osazení tělesa vůči jeho namáhání, protože i drobná excentricita zatížení může vyvolat nežádoucí přídavná namáhání, která ovlivní získané výsledky. Rovněž se během zkoušky mohou vyskytnout problémy s uchycením tělesa, které může selhat před dosažením pevnosti v tahu testovaného rozhraní.

6.1.3.4 Zkouška v tahu za ohybu

Hojné uplatnění zkoušky v tahu za ohybu se ukazuje i v případě stanovení tahové pevnosti rozhraní. Ačkoliv se více používá tříbodová ohybová zkouška [183, 174, 199, 200, 201], čtyřbodová ohybová zkouška [202, 203, 204] se jeví jako vhodnější. Během ní dochází k porušení v nejslabším místě střední třetiny délky tělesa, což může být

v případě rozhraní vrstev zcela klíčové. Zejména se to týká těles zhotovených aditivní technologií, u nichž lze očekávat vyšší variabilitu výsledků z důvodu různé kvality rozhraní. Pokud střední část tělesa bude natolik dlouhá, že bude obsahovat několik rozhraní, uplatněním čtyřbodové ohybové zkoušky bude možné získat přesnější výsledky. Navíc se ukazuje, že u veškerých dohledaných studií se ohybové zkoušky uskutečnily právě na tištěných tělesech.

6.1.4 Zkoušky pevnosti ve smyku

Pevnost rozhraní ve smyku má úzké spektrum využití, především při návrhu zesilování a úpravách konstrukcí v podobě nabetonávek na stávající konstrukce. Pro určení pevnosti existuje několik typů zkoušek, které se liší ve tvaru zkušebního tělesa a způsobu namáhání. Široce užívaným typem je zkouška šikmým smykem prováděna na tělesech tvaru hranolu [205, 185, 197, 190] nebo válce [206], které se skládají ze dvou částí uložených na sobě pod určitým úhlem (Obr. 47). Pro výrobu zkušebních těles lze použít pouze běžné výrobní postupy. S ohledem na tvar tělesa je uplatnění aditivní technologie zcela vyloučené. Identický problém je spojen se smykovou zkouškou na unikátních tělesech [207], které se skládají ze dvou shodných částí tvaru L. Jedna z mála zkoušek, která se dá uskutečnit na tělesech zhotovených aditivní technologií, spočívá v zatěžování bloku vyříznutého z tištěné konstrukce [208].



Obr. 47 Zkouška šikmým smykem (vlevo) [197], smyková zkouška na unikátním tělese (uprostřed) [207], smyková zkouška na tělese zhotoveném aditivní technologií (vpravo) [208]

6.2 Časově-závislá pevnost za běžné teploty

Problematika chování rozhraní vrstev z cementových kompozitů tištěných v krátkém časovém odstupu je na svém počátku, a proto lze v současné době dohledat pouze závěry a poznatky z pilotních experimentálních zkoušek. I přes to lze již nyní s jistotou konstatovat, že se jedná o složitou oblast betonových konstrukcí, která bude v budoucnu vyžadovat značnou pozornost a usilovné bádání. Důvodem je řada parametrů, která má vliv na pevnost rozhraní za běžné a zvýšené teploty, přičemž

časový odstup kladení vrstev patří ke zcela zásadním a typickým pro aditivní technologii.

Téměř veškeré experimentální studie se zabývají chováním rozhraní vrstev zhotovených v odstupech řádu hodin [180, 193, 191, 186, 185, 192, 197, 190, 205, 206], dnů nebo dokonce měsíců. Z těchto studií se lze zajisté inspirovat, ale získaná měření jsou pro účely aditivní technologie nevýznamná. V poslední době se proto objevují pilotní studie, které nabízí první výsledky týkající se pevnosti rozhraní zhotoveném v krátkém časovém odstupech v řádu jednotek až desítek minut. Většinou se zaměřují na různé oblasti v problematice rozhraní a rovněž nevyužívají jednotnou metodiku zkoušení. Proto je velice brzo na to, aby se mohly formulovat jasné závěry.

Klíčovou roli v chování tištěné konstrukce hraje vývoj pevnosti rozhraní v závislosti na časovém odstupech zhotovení přilehlých filamentů. V současné době lze podle několika studií [175, 184, 174, 199, 209, 200] a zkušenosti autora vydedukovat, že s časovým odstupem klesá pevnost rozhraní. Nedostatečně probádané zůstává pouze to, jakou pevnost lze předpokládat pro každý časový odstup. Detailnější popis vývoje pevnosti bude vyžadovat daleko obsáhlejší základnu dat, protože dostupné studie udávají různé výsledky, kolikrát navíc s nedostatečným popisem (orientace rozhraní během zkoušky apod.). Příkladem je tahová pevnost rozhraní vrstev zhotovených s časovým odstupem 10 min. Ta se podle studií pohybuje od 25 % [184], přes 50 % [175] až po 90 % [209] v porovnání s referenční hodnotou. S ohledem na orientaci zkušebního tělesa ale poslední hodnota pravděpodobně neodpovídá tahové pevnosti rozhraní, nýbrž cementovému kompozitu.

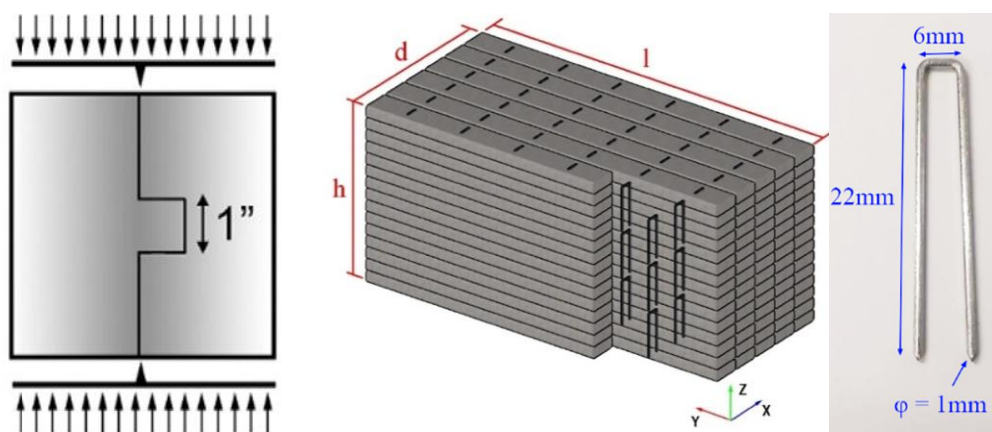
I přes to, že v současné době existují pouze pilotní studie a kolikrát i s řadou pochybení, některé zjištění ukazují oblasti, kterým by se v budoucnu měla věnovat patřičná pozornost. Kromě přesného objasnění vývoje pevnosti rozhraní v závislosti na časovém odstupech kladení filamentů by se vědecké práce měly soustředit na problematiku vlivu použitých příměsí a obecného složení cementových směsí [200]. Ve vývoj pevnosti rozhraní bude mít klíčovou roli i vlhkost povrchu vrstev v okamžiku kladení přiléhající vrstvy [209], přičemž se dá předpokládat, že mezi oběma parametry bude možné najít korelaci [183]. V neposlední řadě byl zjištěn neočekávaný výsledek, kdy u tělesa zhotoveného aditivní technologií s 15 min odstupem kladení vrstev nastalo porušení přímo v cementovém kompozitu mimo rozhraní vrstev [174].

6.2.5 Opatření pro zvýšení pevnosti

Skutečnost, že rozhraní vrstev patří ke kritické oblasti tištěných konstrukcí, se sebou rovněž přináší otázku, zda existují způsoby, jakými by se dala docílit jeho vyšší kvalita. Ideální volba by spočívala v uplatnění svislé vázané výztuže, která by přecházela přes rozhraní vrstev a přispívala by především ke zvýšení smykové a tahové únosnosti rozhraní. Na tento přístup se nelze ovšem spolehnout, protože automatizované vyztužování konstrukce se prozatím zdá být zásadní problém technologie. Je proto zapotřebí hledat další možnosti, které by se nabízely uplatnit.

Souběžně s výzkumem pevnosti rozhraní se vědecké práce věnují i opatřením, která by ji umožnila zvýšit. Mezi ně lze zařadit úpravu povrchu v podobě zářezu [210], který umožňuje lepší provázání obou vrstev. Optimální tvar zářezu přispívá ke zvýšení únosnosti rozhraní tím, že se zvyšuje kontaktní plochu mezi sousedními vrstvami. Otázkou ovšem zůstává, zda při praktickém uplatnění dojde k řádnému probetonování zářezu. Ten musí mít totiž takovou šířku, aby se vměstnal do úzkého filamentu, jehož tvarová stálost musí být stále zajištěna.

Za další opatření se dá považovat aplikace různých ocelových prvků, drobných prutů nebo rozptýlené výztuže. Příkladem jsou spony, které se vpichují do filamentů v pravidelném rastru [208]. Spony prochází minimálně přes jedno rozhraní, jehož únosnost se tím zvyšuje. Použitím spon (Obr. 48) v osové vzdálenosti 30 mm lze dosáhnout zhruba dvakrát vyšší pevnost v tahu a ve smyku.



Obr. 48 Schéma zkoušky v příčném tahu na tělese se zářezem (vlevo) [210], blok se sponami zhotovený aditivní technologií (uprostřed) [208] a detail spony (vpravo) [208]

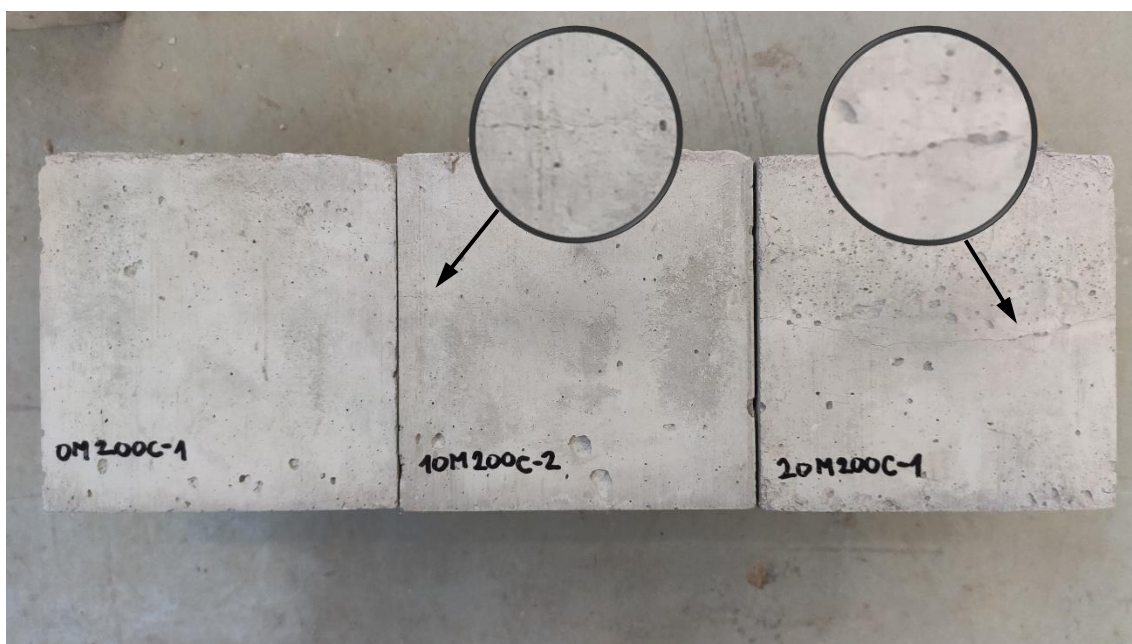
Zvýšení pevnosti rozhraní lze dosáhnout i aplikací speciálních mezivrstev, které jsou schopné vytvořit silný spoj mezi sousedními filamenty. Použit lze speciální polymerní směsi, které mohou navýšit pevnost v tahu o 20 % [211] až 100 % [189] v závislosti na typu polymeru a dalších podmínkách. Nevyřešenou otázkou ovšem je časově závislé chování a reakce na oheň opatření podobného typu.

V neposlední řadě lze použít i standardní způsoby ošetřování rozhraní v podobě vlhčení nebo aplikace cementového mléka [189]. Zatímco úprava rozhraní směsí na cementové bázi s sebou může přinést nárůst pevnosti v tahu až o 160 %, situace s vlhčením se zdá být výrazně složitější. Pokud použité množství vody přesáhne určitou mez, dochází k vytvoření slabého vodního filmu v místě rozhraní, které následně vykazuje vyšší pórovitost. Velikost kontaktní plochy sousedních filamentů se snižuje a zároveň s tím klesá i únosnost rozhraní [189]. Pokud ovšem dojde pouze k drobnému zvlhčení, pevnost rozhraní může růst [183].

6.3 Časově závislá pevnost za zvýšené teploty

Vize použití aditivní technologie pro výstavbu nízkonákladových domů rovněž přináší otázku, jakým způsobem se bude tištěná konstrukce chovat nejenom za běžných podmínek, ale i při mimořádné události v podobě požáru. Zatímco poznatků o chování cementových kompozitů ztužených vlákny je dostatek, vliv vysoké teploty na chování rozhraní není dostatečně objasněn, obzvláště v případě zhotovení vrstev v krátkém časovém odstupu.

Pokud existuje nízké množství poznatků o chování rozhraní za běžné teploty, tak na výsledky týkající se měření za zvýšené teploty lze narazit pouze výjimečně. Společným znakem nashromážděných studií [202, 203, 201, 204] jsou tělesa zhotovená aditivní technologií, na kterých byly prováděné experimentální zkoušky. Díky tomu bylo možné odhalit specifické chování tištěných prvků, které spočívá v delaminaci filamentů přímo při ohřevu [202], popř. po ohřevu při manipulaci, anebo úpravě těles [203, 204]. Tento jev patrně souvisí se smršťováním cementového kamene a pórovým tlakem. Tuto hypotézu potvrzují i záznamy z experimentů autora (Obr.49), kdy se na normovaných tělesech objevují mikrotrhliny v místě rozhraní v závislosti na časovém odstupu kladení vrstev. Ty se navíc dále rozvíjejí s rostoucí teplotou, kterým jsou tělesa vystavena.



Obr. 49 Zkušební tělesa složená ze dvou vrstev zhotovených s různým časovým odstupem: vlevo 0 min, uprostřed 10 min, vpravo 20 min

Častá delaminace v různých fázích experimentálních zkoušek naznačuje, že ztráta pevnosti bude u rozhraní daleko progresivnější, než tomu je u cementových kompozitů. Tuto skutečnost potvrzují i naměřená data, která uvádí 90 % ztrátu tahové pevnosti rozhraní po ohřevu na cca 250 °C [203]. Jedná se ovšem o hodnoty, které byly změřeny na tělesech vyřezaných z velkého tištěného bloku po ohřevu. Není

proto zřejmé, do jaké míry mohlo řezání ovlivnit kvalitu těles a konečné výsledky, když u některých těles došlo k jejich delaminaci vlivem řezání.

Daleko pozitivnější vývoj tahové pevnosti v závislosti na teplotě uvádí závěry studie, která testovala tištěná tělesa v různých pozicích z hlediska orientace filamentů [201]. Ohybovou zkouškou na tělesech s rozhraním umístěným kolmo na osu tělesa byly zjištěny velmi podobné tahové pevnosti v závislosti na teplotě jako u cementových kompozitů. Ty dosahovaly 90 %, 85 %, 76 % původní pevnosti při teplotách 120 °C, 250 °C, 400 °C. Důvodem ovšem může být velmi krátký časový odstup kladení vrstev, který činil 30 s.

Za zmínku stojí i studie, která se věnovala tahové pevnosti rozhraní vyztuženém ocelovými drátky v pravidelné vzdálenosti [204]. Tahová pevnost byla zjištěna na tělesech vystavených ohybové zkoušce, přičemž u jedné sady byly do rozhraní zapíchnuty ocelové drátky a u druhé sady nikoliv. Část těles z každé sady byla vystavena identickému nerovnoměrnému ohřevu. Získané výsledky ukazují, že vlákna lze docílit vyšší tahové pevnosti za zvýšené ale i běžné teploty, přičemž jejich přínos je výraznější za vysoké teploty. V této konkrétní studii se přínos pohyboval okolo 10 %, resp. 30 %. Navíc se zdá, že vlákna jsou schopna eliminovat delaminaci během ohřevu, která byla zjištěna pouze u několika nevyztužených těles.

7 Závěr

Předkládaná habilitační práce se věnuje vývoji pevnosti cementových kompozitů ztužených rozptýlenou výztuží za zvýšené teploty. V úvodu se zaměřuje na vybrané složky betonu, aby si čtenář udělal dostatečnou představu o jejich chování a možné interakci za zvýšené teploty. Následně se pozornost věnuje metodice testování materiálu za vysoké teploty a způsobu ohřevu zkušebních těles, který je častokrát podceňován.

Hlavní část práce se upíná k problematice pevnosti cementových kompozitů za zvýšené teploty. Nejdříve jsou v krátkosti shrnuty poznatky o cementových kompozitech bez rozptýlené výztuže. Důraz je kladen na různé příměsi, které mají významný vliv na chování cementového kompozitu a jeho schopnost zachovat si pevnost za zvýšené teploty. Následuje analýza vlivu syntetických a ocelových vláken na základě experimentálních dat. Formulovány jsou teoretické závěry plynoucí z výsledků vědeckých článků a rozsáhlých experimentů autora. Součástí je rozbor vztahů vyvinutých pro predikci chování cementových kompozitů za zvýšené teploty.

Na výsledky studií zaměřených na chování vláknocementových kompozitů za zvýšené teploty se musí nahlížet s velkou obezřetností. Ukazuje se, že navzdory jejich umístění ve významných vědeckých databázích obsahují řadu chyb a neúplných údajů. Typický problém spočívá v délce ohřevu, která není dostatečná natolik, aby u těles nastala teplotní rovnováha. Pochybení se může negativně projevit ve výsledcích získaných z kvazistatických zkoušek a následně i ve vývoji vztahů pro predikci pevnosti za zvýšené teploty. Popis řady experimentů je navíc nedostatečný a neobsahuje veškeré důležité informace.

Častokrát se studie věnují i hodnocení tendence směsí k odprýskávání. Ve většině experimentů se ovšem používá nižší rychlost ohřevu, která nereflektuje skutečné podmínky požáru. Proto takové závěry mohou být pro praktické využití nepřesné. Tento problém se především týká cementových kompozitů s příměsí ocelových vláken nebo extrémně malým zastoupením syntetických vláken s nízkou teplotou tání. Rovněž pevnosti zjištěné při experimentálních zkouškách s nízkou rychlostí ohřevu mohou být odlišné od těch, kterými bude materiál disponovat během skutečného požáru. Vyšší teplotní gradient přispívá k progresivnějšímu narušení struktury materiálu od nerovnoměrného ohřevu, a zároveň se mohou výrazněji projevit účinky pórového tlaku.

Pórový tlak patří k jevům, které jsou úzce spojené s chováním cementových kompozitů přímo za zvýšené teploty. Působí jako nestandardní silové zatížení a přispívá k porušení materiálu. Projevit se může především při měření pevnosti v tahu u směsí s vyšším rizikem odprýskávání, kde může pórový tlak nabývat výrazných hodnot. Spolu s běžným silovým zatížením vytváří tahová namáhání, kterým je testovaný materiál vystaven. V extrémní situaci může u prvků během zatěžování nastat explozivní typ porušení s evidentním uvolněním vodní páry.

Bez ohledu na materiál může uplatnění vláken přinést pozitivní ale i negativní účinky na vývoj pevnosti cementového kompozitu za zvýšené teploty. Kromě samotných vláken hraje důležitou roli i počáteční stav vlhkosti materiálu. U nevysušených cementových kompozitů s běžnou dávkou syntetických vláken (obvykle PP vlákna) může v počátku ohřevu dojít k drobnému nárůstu pevnosti. Mezi cementovým kamenem a vlákny vzniká mezifázová přechodová zóna, která disponuje vyšší pórovitostí a obsahuje mikrotrhliny. Ty fungují jako kapilární systém pro migraci vodní páry uvnitř struktury materiálu a mimo ni. V závislosti na úrovni vlhkosti, hodnotě pórového tlaku a množství nezhydratovaných zrn může během počáteční fáze ohřevu dojít k dodatečné hydrataci a mírnému nárůstu pevnosti.

V okamžiku, kdy se dosáhne teploty tání materiálu vláken (160 °C pro PP vlákna), se hutná struktura mění na pórovitou. Díky ní dochází k efektivnímu snížení pórového tlaku a současně klesá narušení struktury od jeho působení. Na druhou stranu zvýšená pórovitost ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu a přispívá k progresivnější dehydrataci cementového kamene, přičemž míra se zvyšuje s rostoucím zastoupením vláken. Za běžných podmínek při zvážení všech jevů odehrávajících se během celého procesu ohřevu lze konstatovat, že použitím PP vláken v množství okolo 3 kg/m³ lze dosáhnout lepší stability za vysoké teploty v porovnání s identickou směsí bez vláken.

Experimentálních dat k vysušeným cementovým kompozitům se syntetickými vlákny není mnoho, a proto lze vývoj pevnosti pouze odhadovat. Pominou-li se jevy probíhající za přítomnosti vody nebo vlhkosti, dá se předpokládat, že s rostoucím množstvím vláken bude klesat schopnost cementového kompozitu zachovat si pevnost za vysoké teploty. Rozhodujícím důvodem bude oslabená struktura materiálu od vyhořelých vláken.

Rovněž i u ocelových vláken hraje důležitou roli počáteční stav vlhkosti. U nevysušených cementových kompozitů může nastat dodatečná hydratace stejně jako u syntetických vláken, zejména díky mezifázové přechodové zóně, která funguje jako efektivní kapilární systém. V pozdějších fázích ohřevu počáteční přínos stále přetrvává i přes to, že se s ohledem na odlišnou teplotní roztažnost cementového kamene a ocelových vláken dá předpokládat určité narušení struktury materiálu. Na základě experimentálních dat lze usuzovat, že v případě běžných podmínek by se optimální zastoupení vláken mělo pohybovat okolo 1 %.

Jediné dostatečně široké spektrum dat k vysušeným cementovým kompozitům s ocelovými vlákny se věnuje válcové pevnosti v tlaku. U té se ukazuje, že s rostoucím množstvím vláken klesá schopnost cementového kompozitu zachovat si pevnost bez ohledu na hodnotu teploty. Příčinou může být narušení struktury plynoucí z odlišného přetvoření cementového kamene a ocelových vláken. Tento vývoj pevnosti byl prokázán u směsí se zastoupením vláken do 3 %. Podobný trend lze očekávat i v případě krychelné pevnosti a pevnosti v tahu, ačkoliv experimentální data

v současné době nejsou k dispozici. V neposlední řadě je důležité upozornit na to, že ocelová vlákna nelze považovat za efektivní nástroj pro eliminaci pórového tlaku. Z hlediska odprýskávání je uplatnění samotných ocelových vláken bez dalších opatření pro praktické aplikace velice rizikové.

Pro predikci pevnosti vláknocementových kompozitů existuje několik vztahů vyvinutých na základě regresní analýzy. Ve většině případů se jedná o zcela elementární vztahy, které byly formulovány na základě úzkého spektra výsledků. Až na výjimky nezohledňují množství a typ vláken nebo dokonce jejich tvar. Navíc se ukazuje, že u pokročilých vztahů umožňujících přesný odhad pevnosti by se měly zohlednit i vlhkostní poměry uvnitř materiálu včetně typu a množství použitých příměsí. Nejedná se proto o snadnou úlohu, protože dopad na pevnost má řada parametrů, které se navíc vzájemně ovlivňují.

V současné době by se měla největší pozornost věnovat zpřesnění vztahů pro predikci pevnosti za zvýšené teploty, které jsou velice elementární a v řadě případů i nepřesné. Implementace aditivní technologie do betonového stavitelství a její využití pro stavbu jednoduchých obytných budov přináší rovněž řadu otázek. Důležitou oblastí se jeví rozhraní tištěných vrstev, které se svým chováním odlišují od běžných cementových kompozitů.

Bibliografie

- [1] G. A. Khoury, Y. Anderberg, K. Both, J. Fellingner, N. P. Hoj and C. Majorana, Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2007.
- [2] D. J. Naus and H. L. Graves, "A review of the effects of elevated temperature on concrete materials and structures," *Proceedings of ICON14 - International Conference on Nuclear Engineering*, 17 July 2006.
- [3] J. Piasta, "Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste," *Materials and Structures*, pp. 415-420, 1 November 1984.
- [4] C. Cruz and M. Gillen, "Thermal Expansion of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete at High Temperatures," *Fire and Materials*, pp. 66-70, 1980.
- [5] Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling, International Federation for Structural Concrete (fib), 2007.
- [6] D. J. Naus, The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures - A Literature Review, Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2005.
- [7] H. Yazıcı, E. Deniz and B. Baradan, "The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete," *Construction and Building Materials*, pp. 53-63, 9 February 2013.
- [8] J. Válek, „Navrh a výroba specializovaných vápenných pojiv pro obnovu památek s využitím historických technologií,“ Národní úložiště šedé literatury, 2015.
- [9] M. Tufail, K. Shahzada, B. Gencturk and J. Wei, "Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, pp. 17-28, March 2017.
- [10] I. Netinger, I. Kasegic and I. Guljas, "The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates," *Fire Safety Journal*, pp. 425-430, 6 August 2011.
- [11] B. Kratochvíl, V. Švorčík a D. Vojtěch, Úvod do studia materiálů, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [12] J. Castro, L. Keiser, M. Golias and J. Weiss, "Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures," *Cement & Concrete Composites*, pp. 1001-1008, 4 August 2011.
- [13] J. Newman and B. S. Choo, Advanced Concrete Technology, Burlington: Elsevier Ltd., 2003.
- [14] Českomoravský beton, a.s., Českomoravský cement, a.s., Českomoravské štěrkovny, a.s., Beton: Suroviny, výroba, vlastnosti - příručka technologa, Artis - reklamní studio, 2005.
- [15] V. W. Tam, X. Gao, C. Tam and C. Chan, "New approach in measuring water absorption of recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, pp. 364-369, 10 October 2006.
- [16] I. González-Taboada, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella and D. Carro-López, "Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis," *Materiales de Construcción*, 28 June 2016.

- [17] I. Kesegić, I. Netinger and D. Bjegović, "Recycled clay brick as an aggregate for concrete: overview," *Technical Gazette*, pp. 35-40, 2008.
- [18] J. Trojková, „Základy fyziky: Modul 2 – Mechanika tekutin a termika,“ Vysoká škola Báňská - Technická Univerzita Ostrava.
- [19] „The engineering toolbox,“ [Online]. Available: <https://www.maviyesilmuhendislik.com/wp-content/uploads/2020/02/Saturated-Steam-Table.pdf>. [Přístup získán 15 September 2022].
- [20] R. A. Bareš, „Vlhkostní poměry v kompozitních systémech,“ *Pozemní stavby*, pp. 489-496, Listopad 1980.
- [21] J. Ščučka a P. Martinec, *Stavební hmoty 1 - Beton*, 2013.
- [22] D. Kulisch, A. Katz and S. Zhutovsky, "Quantification of Residual Unhydrated Cement Content in Cement Pastes as a Potential for Recovery," *Sustainability*, 23 December 2022.
- [23] R. Hela, *Technologie betonu*, Brno, 2005.
- [24] H. A. Shah, Q. Yuan and S. Zuo, "Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete - a review," *Construction and Building Materials*, 19 December 2020.
- [25] R. Rixom and N. Mailvaganam, *Chemical Admixtures for Concrete*, London, 1999.
- [26] R. Hela, „Příměsi do betonu,“ *Beton TKS*, pp. 4-10, 2015.
- [27] ČSN EN 206+A2: Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [28] A. Štěrba, *Beton TKS*, pp. 20-27, Lisopad 2011.
- [29] K. Sobolev, F. Sanchez and I. Flores, "The Use of Nanoparticle Admixtures to Improve the Performance of Concrete," *12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, pp. 455-469, 2012.
- [30] C.-S. Poon, S. Azhar, M. Anson and Y.-L. Wong, "Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures," *Cement and Concrete Research*, p. 1291-1300, 18 June 2001.
- [31] Q. Song, M.-Z. Guo a T.-C. Ling, „A review of elevated-temperature properties of alternative binders: Supplementary cementitious materials and alkali-activated materials,“ *Construction and Building Materials*, 10 May 2022.
- [32] Svaz výrobců betonu ČR, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, *TNK 99 Kámen a kamenivo, Popílek do betonu - část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [33] STAVCERT Praha s.r.o., *TNK 99 Kámen a kamenivo*, Český normalizační insitut, ČSN EN 12620+A1, Český normalizační insitut, 2008.
- [34] A. Savva, P. Manita and K. Sideris, "Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates," *Cement & Concrete Composites*, pp. 239-248, 2005.
- [35] J. Ahmad, K. J. Kontoleon, A. Majdi, M. T. Naqash, A. F. Deifalla, N. B. Kahla, H. F. Isleem and S. M. A. Qaidi, "A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production," *Sustainability*, 18 July 2022.

- [36] L. Phan, *Fire Performance of High-Strength Concrete: A report of the State-of-the-Art*, Gaithersburg, 1996.
- [37] U. Schneider, "Concrete at High Temperatures - A General Review," *Fire Safety Journal*, pp. 55-68, 1988.
- [38] G. Torelli, P. Mandal, M. Gillie and V.-X. Tran, "Concrete strains under transient thermal conditions: A state-of-the-art review," *Engineering Structures*, pp. 172-188, 3 September 2016.
- [39] V. K. Kodur, S. Banerji and R. Solhmirzaei, "Test methods for characterizing concrete properties at elevated temperature," *Fire and Materials*, pp. 1-15, 20 September 2019.
- [40] A. Lau and M. Anson, "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, pp. 1698-1707, 23 March 2006.
- [41] R. Serrano, A. Cobo, M. I. Prieto and M. d. I. N. González, "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers," *Construction and Building Materials*, p. 302-309, 9 July 2016.
- [42] X. Dong, Y. Ding and T. Wang, "Spalling and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High-performance Concrete Subjected to Fire," *Journal of Wuhan University of Technology*, pp. 743-749, 24 July 2008.
- [43] W. Zheng, H. Li and Y. Wang, "Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature," *Materials and Design*, p. 403-409, 21 May 2012.
- [44] W. Zheng, B. Luo and Y. Wang, "Stress-strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures," *Materials and Structures*, p. 2299-2314, 18 April 2014.
- [45] J. Novák and A. Kohoutková, "Fire response of hybrid fiber reinforced concrete to high temperature," *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*, 2016.
- [46] C. Poon, Z. Shui and L. Lam, "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures," *Cement and Concrete Research*, pp. 2215-2222, 13 February 2004.
- [47] J. Drchalová, E. Mňahončáková, R. Vejmělka, J. Kolísko, P. Bayer and R. Černý, "Hydric and mechanical properties of carbon fiber reinforced cement composites subjected to thermal load," *Construction and Building Materials*, pp. 567-578, 11 June 2004.
- [48] N. A., "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C," *Cement and Concrete Research*, p. 2192 - 2198, 15 March 2005.
- [49] G.-F. Peng, W.-W. Yang, J. Zhao, Y.-F. Liu, S.-H. Bian and L.-H. Zhao, "Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures," *Cement and Concrete Research*, p. 723-727, 14 December 2005.
- [50] H. Tanyildizi, "Statistical analysis for mechanical properties of polypropylene fiber reinforced lightweight concrete containing silica fume exposed to high temperature," *Materials and Design*, p. 3252-3258, 20 January 2009.
- [51] K. Sideris, P. Manita and E. Chaniotakis, "Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes," *Construction and Building Materials*, p. 1232-1239, 27 September 2008.
- [52] P. Sukontasukkul, W. Pomchiengpin and S. Songpiriyakij, "Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature," *Construction and Building Materials*, p. 1967-1974, 24 April 2010.

- [53] Y.-S. Tai, H.-H. Pan and Y.-N. Kung, “Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C,” *Nuclear Engineering and Design*, p. 2416–2424, 1 April 2011.
- [54] Y. Ding, C. Azevedo, J. Aguiar and S. Jalali, “Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature,” *Construction and Building Materials*, p. 21–31, 2 July 2011.
- [55] A. Cavdar, “A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites,” *Composites: Part B*, p. 2452–2463, 19 October 2011.
- [56] W. Zheng, H. Li and Y. Wang, “Compressive stress–strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 931–940, 15 June 2012.
- [57] K. Sideris and P. Manita, “Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 296–302, 11 January 2013.
- [58] G. Chen, Y. He, H. Yang, J. Chen and Y. Guo, “Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 1–15, 7 September 2014.
- [59] A. N. A. Qadi and S. M. Al-Zaidyeen, “Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures,” *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, pp. 33–39, 20 December 2012.
- [60] P. S. Bhat, V. Chang and M. Li, “Effect of elevated temperature on strain-hardening engineered cementitious composites,” *Construction and Building Materials*, p. 370–380, 15 August 2014.
- [61] J. Kim, G.-P. Lee and D. Y. Moon, “Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test,” *Construction and Building Materials*, p. 182–191, 23 January 2015.
- [62] F. U. A. Shaikh and A. Hosan, “Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 15–28, 31 March 2016.
- [63] D. Choumanidis, E. Badogiannis, P. Nomikos and A. Sofianos, “The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 266–277, 3 November 2016.
- [64] G. M. Giaccio a R. L. Zerbino, „Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete,“ *Materials and Structures*, pp. 335–342, 14 June 2004.
- [65] W. Khaliq and V. Kodur, “Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures,” *Cement and Concrete Research*, p. 1112–1122, 24 June 2011.
- [66] S. Sanchayan and S. J. Foster, “High temperature behaviour of hybrid steel-PVA fibre reinforced reactive powder concrete,” *Materials and Structures*, p. 769–782, 30 January 2015.
- [67] X. Li, Y. Bao, L. Wu, Q. Yan, H. Ma, G. Chen and H. Zhang, “Thermal and mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 829–838, 30 September 2017.
- [68] X. Hou, M. Abid, W. Zheng and G. Q. Waqar, “Evaluation of residual mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to high temperature using

- nondestructive testing,” *6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017*, p. 588–596, 2017.
- [69] M. Abid, X. Hou, W. Zheng and G. Q. Waqar, “Mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature and after cooling,” *6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017*, pp. 597-604, 2017.
- [70] T. Drzymała, W. Jackiewicz-Rek, M. Tomaszewski, A. Kuś, J. Gałaj and R. Śukys, “Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC),” *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*, pp. 256-263, 2017.
- [71] J.-C. Liu a K. H. Tan, „Fire resistance of strain hardening cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers,” *Construction and Building Materials*, p. 600–611, 29 December 2016.
- [72] P. N. Hiremath and S. C. Yaragal, “Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 499–512, 1 March 2018.
- [73] F. Varona, F. Baeza, D. Bru and S. Ivorra, “Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete,” *Construction and Building Materials*, p. 73–82, 14 November 2017.
- [74] R. Abaeian, H. P. Behbahani and S. J. Moslem, “Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres,” *Construction and Building Materials*, p. 631–638, 20 February 2018.
- [75] M. H. Niaki, A. Fereidoon and M. G. Ahangari, “Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete,” *Composite Structures*, p. 231–238, 1 May 2018.
- [76] P. Behera, V. Baheti, J. Militky and S. Naeem, “Microstructure and mechanical properties of carbon microfiber reinforced geopolymers at elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 733–743, 30 January 2018.
- [77] Z. Huang, K. Padmaja, S. Li and J. R. Liew, “Mechanical properties and microstructure of ultra-lightweight cement composites with fly ash cenospheres after exposure to high temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 760–774, 8 January 2018.
- [78] J.-C. Liu and K. H. Tan, “Fire resistance of ultra-high performance strain hardening cementitious composite: Residual mechanical properties and spalling resistance,” *Cement and Concrete Composites*, pp. 62-75, 26 February 2018.
- [79] J. Komonen and V. Penttala, “Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes,” *Fire Technology*, pp. 23-34, 2003.
- [80] Y.-s. Kim, T.-g. Lee and G.-y. Kim, “An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load,” *Materials and Structures*, pp. 607-620, 8 August 2012.
- [81] H. Mohammadhosseini, N. H. A. S. Lim, A. R. M. Sam and M. Samadi, “Effects of Elevated Temperatures on Residual Properties of Concrete Reinforced with Waste Polypropylene Carpet Fibres,” *Arab J Sci Eng*, p. 1673–1686, 20 June 2017.
- [82] R. Štefan , J. Procházka, J. Novák, J. Fládr, F. Wald, A. Kohoutková, L. Scheinherrová and M. Čáchová, “Heat transfer in hybrid fibre reinforced concrete-steel composite column exposed to a gas-fired radiant heater,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, September 2017.

- [83] J. Novák and A. Kohoutková, "Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature," *Fire Safety Journal*, pp. 66-76, 13 January 2018.
- [84] J. Holan, J. Novák, P. Müller and R. Štefan, "Experimental investigation of the compressive strength of normal-strength air-entrained concrete at high temperatures," *Construction and Building Materials*, 2 March 2020.
- [85] J. Holan, J. Novák a R. Štefan, „Provzdušnění betonu jako alternativa k polypropylenovým vláknům a jeho vlivu na pevnost v tlaku běžného betonu vystaveného působení vysokých teplot,“ *Beton TKS*, pp. 40-43, 15 Duben 2020.
- [86] P. Müller, J. Novák and J. Holan, "Destructive and non-destructive experimental investigation of polypropylene fibre reinforced concrete subjected to high temperature," *Journal of Building Engineering*, 31 July 2019.
- [87] I. Tkalenko, A. Tretyakov, F. Wald, J. Novák, R. Štefan and A. Kouhoutková, "The Steel and Fibre Reinforced Concrete Circular Hollow Section Composite Column Exposed to Fire," 2017.
- [88] RILEM Technical Committee, "Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications. Part 1: Introduction—General presentation," *Materials and Structures*, p. 841–853, 21 September 2007.
- [89] RILEM Technical Committee, "129-MHT Test Method for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures. Compressive strength for service and accident conditions," *Materials and Structures*, pp. 410-414, 1 March 1996.
- [90] RILEM Technical Committees, "RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 4: Tensile strength for service and accident.," *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, pp. 219-223, 30 November 2000.
- [91] RILEM Technical Committee, „RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Modulus of elasticity for service and accident conditions,“ *Materials and Structures*, pp. 139-144, March 2004.
- [92] RILEM Technical Committees, "RILEM TC 129-MHT: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures - Recommendations: Part 6 - Thermal Strain," *Materials and Structures*, pp. 17-21, March 1997.
- [93] RILEM Technical committee, "RILEM TC 129-MHT: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures - Recommendations - Part 7: Transient Creep for service," *Materials and Structures*, pp. 290-295, June 1998.
- [94] RILEM Technical Committee, "RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 8: Steady-state creep and creep recovery for service and accident conditions," *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, pp. 6-13, February 2000.
- [95] RILEM Technical Committee, "RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 9: Shrinkage for service and accident conditions," *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, pp. 224-228, May 2000.
- [96] RILEM Technical Committee, "Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperature – Modelling and applications: Part 10: Restraint stress," *Materials and Structures*, pp. 913-919, December 2005.
- [97] Ulrich Schneider, "Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and application - Part 11: Relaxation," *Materials and Structures*, p. 449–458, 30 January 2007.

- [98] J. Novák and A. Kohoutková, "Fire response of hybrid fiber reinforced concrete to high temperature," *Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*, pp. 784-790, 2017.
- [99] K. Sakr and E. El-Hakim, "Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties," *Cement and Concrete Research*, p. 590-596, 13 May 2004.
- [100] G.-F. Peng, S.-H. Bian, Z.-Q. Guo, J. Zhao, X.-L. Peng and Y.-C. Jiang, "Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures," *Construction and Building Materials*, p. 948-955, 18 January 2007.
- [101] Y. Wang, F. Liu, L. Xu and H. Zhao, "Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, pp. 540-547, 21 March 2019.
- [102] S. Pul, A. Atasoy, M. Senturk and I. Hajirasouliha, "Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high - temperature and axial loading under different heating - cooling scenarios," *Journal of Building Engineering*, 1 April 2021.
- [103] E. F. T. de Carvalho, J. T. da Silva Neto, P. R. R. Soares Junior, P. de Souza Maciel, H. L. Fransozo, A. C. da Silva Bezerra and A. M. C. de Gouveia, "Influence of Cooling Methods on the Residual Mechanical Behavior of Fire-Exposed Concrete: An Experimental Study," *Materials*, 26 October 2019.
- [104] K. Liu, C. Wu, X. Li, J. Liu, M. Tao and J. Fang, "The influences of cooling regimes on fire resistance of ultra-high performance concrete under static-dynamic coupled loads," *Journal of Building Engineering*, 15 September 2021.
- [105] X. Luo, S. Wei and S. Y. N. Chan, "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, pp. 379-383, 13 December 1999.
- [106] M. Abramowicz and R. Kowalski, "The Influence of Short Time Water Cooling on the Mechanical Properties of Concrete Heated up to High Temperature," *Journal of Civil Engineering and Management*, pp. 85-90, 01 April 2005.
- [107] R. Kowalski, "The effects of the cooling rate on the residual properties of heated-up concrete," *Structural Concrete*, 2007.
- [108] L. Tanaçan, H. Y. Ersoy and Ü. Arpacioğlu, "Effect of high temperature and cooling conditions on aerated concrete properties," *Construction and Building Materials*, p. 1240-1248, 18 September 2008.
- [109] M. B. Karakoç, "Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature," *Construction and Building Materials*, pp. 21-25, 31 December 2012.
- [110] S. D. Kore, "Journal of Materials and Engineering Structures," *Effect of real fire and cooling systems on concrete properties*, pp. 405-414, 22 Decemeber 2021.
- [111] Svaz výrobců betonu ČR, ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [112] Svaz výrobců betonu ČR, ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [113] Svaz výrobců betonu ČR, ČSN EN 12390-6: Zkoušení ztvrdlého betonu - část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [114] Svaz výrobců betonu ČR, ČSN EN 12390-13: Zkoušení ztvrdlého betonu - část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [115] Technický a zkušební ústav stavební Praha s.p., ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [116] Technický a zkušební ústav stavební Praha s.p., ČSN 73 1373: Nedestruktivní zkoušení betonu - Tvrdoměrné metody zkoušení betonu, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [117] J.-C. Liu, K. H. Tan and Y. Yao, "A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete," *Construction and Building Materials*, pp. 581-591, 10 July 2018.
- [118] L. Shen, F. Lo Monte, G. Di Luzio, G. Cusatis, W. Li, R. Felicetti, F. Lombardi, M. Lualdi, M. Cao and Q. Ren, "On the moisture migration of concrete subject to high temperature with different heating rates," *Cement and Concrete Research*, 3 June 2021.
- [119] D. Zhang, K. Hai Tan, A. Dasari and Y. Weng, "Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, 31 December 2019.
- [120] P. Prochon a T. Piotrowski, „The effect of cement and aggregate type and w/c ratio on the bound water content and neutron shielding efficiency of concretes,” *Construction and Building Materials*, 8 Červenec 2020.
- [121] K. Akçaözoglu, „Microstructural examination of concrete exposed to elevated temperature by using plane polarized transmitted light method,” *Construction and Building Materials*, 24 Srpen 2013.
- [122] Y. Li, E.-H. Yang, A. Zhou a T. Liu, „Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: A review,” *Construction and Building Materials*, 10 Březen 2021.
- [123] J. Denoël, Fire Safety and Concrete Structures, FEBELCEM - Federation of Belgian Cement Industry, 2007.
- [124] . Tsakiridis and B. Georgali, "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study," *Cement & Concrete Composites*, 2005.
- [125] B. Zdravkov, J. J. Čermák, J. Janků, V. Kučerová a M. Šefara, „Kategorizace pórů v pórých matricích,” *Chemické Listy*, pp. 434-438, 2008.
- [126] E. Adili and A. Kheyroddin, "Fiber interfacial transition zone concept for steel fiber-reinforced concrete by SEM observation," *Journal of Applied Research and Technology*, pp. 294-307, 31 August 2021.
- [127] D. Zhang, G. Y. Tan and K. H. Tan, "Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature," *Cement and Concrete Composites*, 16 April 2021.
- [128] S. A. Memon, S. F. A. Shah, R. A. Khushnood and W. L. Baloch, "Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature - A review," *Construction and Building Materials*, p. 435-455, 17 December 2018.

- [129] Q. Yang, S. Zhang, S. Huang and Y. He, "Effect of ground quartz sand on properties of high-strength concrete in the steam-autoclaved curing," *Cement and Concrete Research*, pp. 1993-1998, 8 August 2000.
- [130] I. Hager, "Behaviour of cement concrete at high temperature," *Bulletin of the Polish Academy Sciences*, pp. 145-154, 2013.
- [131] N. Isu, H. Ishida and T. Mitsuda, "Influence of Quartz Particle Size on the Chemical and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete (I) Tobermorite Formation," *Cement and Concrete Research*, pp. 243-248, 5 August 1994.
- [132] F. U. A. Shaikh and A. Hosan, "Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolymer concretes at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, 31 March 2016.
- [133] W. Zheng, B. Luo and Y. Wang, "Microstructure and mechanical properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures," *Magazine of Concrete Research*, pp. 397-408, 11 March 2014.
- [134] B. Georgali and P. Tsakiridis, "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study," *Cement & Concrete Composites*, pp. 255-259, 2005.
- [135] M. Malik, S. Bhattacharyya and S. V. Barai, "Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review," *Construction and Building Materials*, 24 November 2020.
- [136] Q. Zhou and F. Glasser, "Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <math><120^{\circ}\text{C}</math>," *Cement and Concrete Research*, pp. 1333-1339, 29 May 2001.
- [137] T. Kannangara, P. Joseph, S. Fragomeni and M. Guerrieri, "Existing theories of concrete spalling and test methods relating to moisture migration patterns upon exposure to elevated temperatures – A review," *Case Studies in Construction Materials*, 29 April 2022.
- [138] H. Song, Y. Jeong, S. Bae, Y. Jun, S. Yoon and J. E. Oh, "A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG," *Construction and Building Materials*, p. 648-661, 1 March 2018.
- [139] O. Babalola, P. O. Awoyera, D.-H. Le and L. B. Romero, "A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite," *Construction and Building Materials*, 29 May 2021.
- [140] TNK 36 Betonové konstrukce, ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru, Český normalizační institut, 2006.
- [141] A. M. Rashad, "Potential Use of Silica Fume Coupled with Slag in HVFA Concrete Exposed to Elevated Temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 January 2015.
- [142] S. Donatello, C. Kuenzel, A. Palomo and A. Fernández-Jiménez, "High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste," *Cement & Concrete Composites*, pp. 234-242, 21 September 2013.
- [143] S. R. Sarhat and E. G. Sherwood, "Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 1721-1730, 17 October 2013.
- [144] J. Gales, T. Parker, D. Cree and M. Green, "Fire Performance of Sustainable Recycled Concrete Aggregates: Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Current Research Needs," *Fire Technology*, pp. 817-845, 18 May 2015.

- [145] C. Laneyrie, A.-L. Beaucour, M. F. Green, R. L. Hebert, B. Ledesert and A. Noumowe, "Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, pp. 368-378, 21 March 2016.
- [146] X. Luo, W. Sun and S. Y. N. Chan, "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, pp. 379-383, 13 December 1999.
- [147] S. C. Paul, G. P. v. Zijl and B. Šavija, "Effect of Fibers on Durability of Concrete: A Practical Review," *Materials*, 14 October 2020.
- [148] G. Mazzucco, C. Majorana and V. Salomoni, "Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions," *Computers and Structures*, pp. 17-28, 11 April 2015.
- [149] J. Novák a A. Horáková, „Vlastnosti cementových kompozitů ztužených vlákny z plastového odpadu,“ *26.Betonářské dny (2019)*, 2019.
- [150] J. Ollivier, J. Maso and B. Bourdette, "Interfacial Transition Zone in Concrete," *Advanced Cement Based Materials*, pp. 30-38, 11 April 1994.
- [151] E. Adili and A. Kheyroddin, "Fiber interfacial transition zone concept for steel fiber-reinforced concrete by SEM observation," *Journal of Applied Research and Technology*, pp. 294-307, 31 August 2021.
- [152] J. Ahmad, F. Aslam, R. Martínez-García, J. d. Prado-Gil, N. Abbas and M. H. E. Ouni, "Mechanical performance of concrete reinforced with polypropylene fibers (PPFs)," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, p. 2021, 30 October 2021.
- [153] S. Wang, M.-H. Zhang and S. T. Quek, "Effect of Specimen Size on Static Strength and Dynamic Increase Factor of High-Strength Concrete from SHPB Test," *Journal of Testing and Evaluation*, September 2011.
- [154] A. Jameran, I. S. Ibrahim, S. H. S. Yazan and S. N. A. A. Rahim, "Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature," *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*, pp. 818-824, 2015.
- [155] J. W. Bullard, H. M. Jennings, R. A. Livingston, A. Nonat, G. W. Scherer, J. S. Schweitzer, K. L. Scrivener and J. J. Thomas, "Mechanisms of cement hydration," *Cement and Concrete Research*, pp. 1208-1223, 22 September 2010.
- [156] X. Wu, Y. Luo, W. Yang, Y. Gao, Y. Bi and Y. Xie, "Effect of rehydration of unhydrated cement on ultra-high performance concrete after curing," *Ceramics – Silikáty*, pp. 305 - 315, 16 August 2021.
- [157] X. Wang, F. Fan, J. Lai and Y. Xie, "Steel fiber reinforced concrete: A review of its material properties and usage in tunnel lining," *Structures*, pp. 1080-1098, 25 August 2021.
- [158] X. Qu and X. Zhao, "Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review," *Construction and Building Materials*, pp. 505-516, 12 January 2017.
- [159] C. Lin, T. Kanstad, S. Jacobsen and G. Ji, "Bonding property between fiber and cementitious matrix: A critical review," *Construction and Building Materials*, 21 March 2023.
- [160] A. A. Deshpande, D. Kumar and R. Ranade, "Influence of high temperatures on the residual mechanical properties of a hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite," *Construction and Building Materials*, pp. 283-295, 7 March 2019.

- [161] L. Li, R. Zhang, L. Jin, X. Du, J. Wu and W. Duan, "Experimental study on dynamic compressive behavior of steel fiber reinforced concrete at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, pp. 673-684, 21 March 2019.
- [162] J. L. Vitek a P. Vitek, „Beton vyztužený vlákny a jeho aplikace v tunelech,“ *Tunel*, 2017.
- [163] F. Aslani and B. Samali, "High Strength Polypropylene Fibre Reinforcement Concrete at High Temperature," *Fire Technology*, p. 1229-1247, 4 March 2013.
- [164] F. Aslani and B. Samali, "Constitutive Relationships for Steel Fibre Reinforced Concrete at Elevated Temperatures," *Fire Technology*, p. 1249-1268, 28 December 2012.
- [165] J. Kim, G.-P. Lee and D. Y. Moon, "Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test," *Construction and Building Materials*, p. 182-191, 23 January 2015.
- [166] A. Horáková a J. Novák, „Uplatnění plastového odpadu při výrobě betonu,“ *25. Betonářské dny*, 2018.
- [167] F. Heidarneshad and Q. Zhang, "Shotcrete based 3D concrete printing: State of art, challenges, and opportunities," *Construction and Building Materials*, 31 January 2022.
- [168] A. H. F. C. Team, Research and Feasibility Study on 3D Printed Homes in Rural Alaska, Xtreme Habitats Institute, 2021.
- [169] J. Novák, *Výzkum a vývoj 3D tiskárny pro použití ve stavebnictví - závěrečná odborná zpráva*, Praha, 2021, p. 25.
- [170] H. Shayani, M. Razzhivina and J. Zindroski, Fabrication strategies for precise application of reinforcement in 3D-printed concrete, 2018.
- [171] T. Marchment and J. Sanjayan, "Reinforcement method for 3D concrete printing using paste-coated bar penetrations," *Automation in Construction*, 12 April 2021.
- [172] T. Marchment and J. Sanjayan, "Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing," *Automation in Construction*, 23 October 2019.
- [173] H. Kloft, M. Empelmann, N. Hack and E. Herrmann, "Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing," *Civil Engineering Design*, pp. 131-139, 1 September 2020.
- [174] T. Le, S. Austin, S. Lim, R. Buswell, R. Law, A. Gibb a T. Thorpe, „Hardened properties of high-performance printing concrete,“ *Cement and Concrete Research*, p. 558-566, 2012.
- [175] B. Panda, S. C. Paul, N. A. N. Mohamed, Y. W. D. Tay and M. J. Tan, "Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar," *Measurement*, pp. 108-116, 01 September 2017.
- [176] X. Cao, S. Yu, H. Cui and Z. Li, "3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials: A Review," *Buildings*, 7 April 2022.
- [177] M. Tomaževič, "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry," *Materials and Structures*, 17 September 2008.
- [178] E. Dumova-Jovanoska and S. Churilov, "Calibration of a numerical model for masonry with application to experimental results," Taylor & Francis Group, London, 2009.
- [179] D. S. Santos, P. M. Santos and D. Dias-da-Costa, "Effect of surface preparation and bonding agent on the concrete-to-concrete interface strength," *Construction and Building Materials*, pp. 102-110, 24 August 2012.

- [180] P. Dybel and D. Wałach, "Evaluation of the Development of Bond Strength between Two Concrete Layers," IOP Publishing Ltd, 2017.
- [181] A. Vespalec, J. Novák, A. Kohoutková, P. Vosynek, J. Podroužek, D. Škaroupka, T. Zikmund, J. Kaiser and D. Paloušek, "Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing," *Materials*, 15 November 2020.
- [182] A. Momayez, M. Ehsani, A. Ramezani pour a H. Rajaie, „Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials,” *Cement of Concrete Research*, pp. 748-757, 17 May 2005.
- [183] J. G. Sanjayan, B. Nematollahi, M. Xia a T. Marchment, „Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete,” *Construction and Building Materials*, p. 468–475, 4 April 2018.
- [184] Y. W. D. Tay, G. H. A. Ting, Y. Q. B. Panda, L. He and M. J. Tan, “Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete,” *Virtual and Physical Prototyping*, 11 July 2018.
- [185] S. Feng, H. Xiao and Y. Li, “Influence of interfacial parameters and testing methods on UHPC–NSC bond strength: Slant shear vs. direct tensile testing,” *Cement and Concrete Composites*, 2 May 2022.
- [186] A. R. L. d. Santos, M. d. R. d. S. Veiga, A. M. d. S. Silva and J. M. C. L. d. Brito, “Tensile bond strength of lime-based mortars: The role of the microstructure on their performance assessed by a new non-standard test method,” *Journal of Building Engineering*, 24 December 2019.
- [187] M. Tipka, J. Vašková and J. Vodička, “Tensile Strength Tests for Concrete and Fibre Reinforced Concrete,” *Solid State Phenomena*, pp. 94-101, 28 February 2018.
- [188] M. Rubio, M. Sonebi, S. Amziane and A. Perrot, “Mechanical properties of 3D bio-printing cement-based materials,” Belfast, 2019.
- [189] Y. Weng, M. Li, T. N. Wong and M. J. Tan, “Synchronized concrete and bonding agent deposition system for interlayer bond strength enhancement in 3D concrete printing,” *Automation in Construction*, 19 January 2021.
- [190] P. M. D. Santos and E. N. B. S. Júlio, “Factors affecting bond between new and old concrete,” *ACI Materials Journal*, pp. 449-456, 5 October 2011.
- [191] P. Qian and Q. Xu, “Experimental investigation on properties of interface between concrete layers,” *Construction and Building Materials*, pp. 120-129, 18 April 2018.
- [192] K. Rashid, T. Ueda, D. Zhang, K. Miyaguchi and H. Nakai, “Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions,” *Construction and Building Materials*, pp. 414-425, 17 July 2015.
- [193] E. Tschegg a S. Stanzl, „Adhesive power measurements of bonds between old and new concrete,” *Journal of Materials Science*, pp. 5189-5194, 1991.
- [194] ČSN EN 1542 - Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - zkušební metody - stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou, Český normalizační institut, 2000.
- [195] Zkouška přídržnosti povrchové úpravy stavebních konstrukcí k podkladu, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1981.
- [196] S. Yang, Z. Xu and Z. Bian, “Prediction on compressive strength concrete using modified pull-off testing method (MPTM),” *Construction and Building Materials*, 28 March 2020.

- [197] P. M. Santos, E. N. Júlio and V. D. Silva, “Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface,” *Construction and Building Materials*, pp. 1688-1695, 31 May 2007.
- [198] Y. Tao, K. Lesage, K. V. Tittelboom, Y. Yuan and G. D. Schutter, “Influence of substrate surface roughness and moisture content on tensile adhesion performance of 3D printable concrete,” *Cement and Concrete Composites*, 18 November 2021.
- [199] R. Wolfs, F. Bos and T. Salet, “Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion,” *Cement and Concrete Research*, pp. 132-140, 27 February 2019.
- [200] V. N. Nerella, S. Hempel and V. Mechtcherine, “Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing,” *Construction and Building Materials*, p. 586–601, 12 February 2019.
- [201] M. D'Hondt, S. Rémond and P. Leblond, “Fire Behavior of a Printed Sample for Building,” *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 428-438, 2020.
- [202] A. Cicione, J. Kruger, R. S. Walls and G. V. Zijl, “An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures,” *Fire Safety Journal*, 4 May 2020.
- [203] A. Cicione, K. Mazolwana, J. Kruger, R. Walls, Z. Sander and G. Van Zijl, “Effect of transverse and longitudinal confinement on the interlayer bond in 3D printed concrete at elevated temperatures: an experimental study,” The University of Queensland, Brisbane, 2020.
- [204] J. Kruger, A. Cicione, F. Bester, M. v. d. Heever, S. Cho, R. Walls and G. v. Zijl, “Facilitating Ductile Failure of 3D Printed Concrete Elements in Fire,” *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 449-458, 2020.
- [205] E. N. Júlio, F. A. Branco, V. D. Silva and J. F. Lourenco, “Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate,” *Building and Environment*, p. 1934–1939, 17 June 2005.
- [206] R. Mirmoghtadaei, M. Mohammadi, N. A. Samani and S. Mousavi, “The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete,” *Construction and Building Materials*, p. 76–83, 31 January 2015.
- [207] J. Xiao, Z. Li and J. Li, “Shear transfer across a crack in high-strength concrete after elevated temperatures,” *Construction and Building Materials*, p. 472 – 483, 19 September 2014.
- [208] L. Wang, G. Ma, T. Liu, R. Buswell and Z. Li, “Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails,” *Cement and Concrete Research*, 23 July 2021.
- [209] E. Keita, H. Bessaies-Bey, W. Zuo, P. Belin and N. Roussel, “Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin,” *Cement and Concrete Research*, 22 June 2019.
- [210] B. Zareiyan a B. Khoshnevis, „Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete,“ *Automation in Construction*, p. 212–221, 17 August 2017.
- [211] E. Hosseini, M. Zakertabrizi, A. H. Korayem and G. Xu, “A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation,” *Cement and Concrete Composites*, p. 112–119, 14 March 2019.
- [212] M. Collepari, *Moderní beton*, Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009.
- [213] M. Vinkler a J. L. Vitek, „Vysychání a smršťování betonu,“ *BETON TKS*, pp. 40-45, Únor 2016.

- [214] A. Masood, M. Shariq, M. M. Alam, T. Ahmad a A. Beg, „Effect of Elevated Temperature on the Residual Properties of Quartzite, Granite and Basalt Aggregate Concrete,“ *Journal of The Institution of Engineers (India) Series A*, 12 May 2018.
- [215] A. Millard and P. Pimienta, *Modelling of Concrete Behaviour at High Temperature*, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [216] M. Bastami and F. Aslani, “Preloaded High-Temperature Constitutive Models and Relationships for Concrete,“ *Transaction A: Civil Engineering*, pp. 11-25, February 2010.
- [217] A. Çavdar, “A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites,“ *Composites: Part B*, p. 2452–2463, 19 October 2011.
- [218] P. Bamonte and P. G. Gambarova, “Thermal and Mechanical Properties at High Temperature of a Very High-Strength Durable Concrete,“ *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 545-555, June 2010.
- [219] J. Xiao, Q. Xie and W. Xie, “Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004–2016) - An updated overview,“ *Fire Safety Journal*, p. 11–24, 5 February 2018.
- [220] RILEM Technical Committee, “Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications - Part 2: Stress–strain relation,“ *Materials and Structures*, pp. 855-864, 21 September 2007.
- [221] P.-C. Aitcin, *High-Performance Concrete*, London: E & FN Spon, 1998.
- [222] R. Haddad, R. Al-Saleh and N. Al-Akhras, “Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete,“ *Fire Safety Journal*, pp. 334-343, 31 December 2007.