



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VLIV VYSOKÝCH TEPLOT NA VLASTNOSTI BETONU

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES ON CONCRETE PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Klobása

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SEDLMAJER, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Klobása
Název	Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu
Vedoucí práce	Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. COLLEPARDI, Mario, Moderní beton, ČKAIT, 2009.
2. AITCIN, Pierre-Claude, Vysokohodnotný beton, ČKAIT, 2005.
3. KUČERA, Petr, Požární odolnost stavebních konstrukcí, Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010.
4. STARIKOV, Nikolaj, PROCHÁZKA, Petr, Chemical and mechanical properties of fiber reinforced concretes, Czech Technical University in Prague, 2008.
5. BRADÁČOVÁ, Isabela, Stavby z hlediska požární bezpečnosti, ERA group, 2007
6. Tuzemské a zahraniční publikace v odborných časopisech

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce bude věnována vlivu vysokých teplot na vlastnosti betonu. Mělo by se především jednat o vliv velmi vysokých teplot dosahujících až 1 000 °C, které simulují působení teploty při vzniku a působení požáru na beton. Také by měly být popsány metody zkoušení betonu a teplotní křivky používané při simulaci požáru. V práci by mělo být, v návaznosti na dostupnou literaturu, popsáno chování betonu a změny jeho vlastností za vysokých teplot společně s jevy, ke kterým vlivem extrémní teploty dochází. Součástí teoretické práce by měl být popis betonu, jako materiálu, a chování betonu při požáru. Dále by měly být uvedeny možnosti, jak předcházet a eliminovat vliv vysokých teplot na nežádoucí chování betonu při požáru, především z pohledu jeho složení a popisu jednotlivých vstupních surovin. V tomto směru bude provedena rešerše možností zvýšení odolnosti betonu vůči vysokým teplotám a dostupné znalosti o chování betonu při požáru.

Na základě poznatků z teoretické části by měly být v praktické části vyvozeny závěry a hodnocení dostupných informací řešené problematiky. Vyvozené závěry by měly prezentovat podložená opatření pro návrh betonu s vyšší odolností betonu vůči působení vysokých teplot. Dále by měl být demonstrován vliv využití vláken, jako opatření pro zvýšení odolnosti betonu při působení vysokých teplot. V praktické části budou dále uvedeny závěry ze zahraniční i tuzemské literatury související s řešenou problematikou.

Pro vypracování bakalářské práce bude využita uvedená literatura, doplněná o vlastní zdroje. Rozsah práce cca 40 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je studium problematiky chování betonu při zatížení vysokými teplotami. V teoretické části práce jsou shrnuty poznatky o změnách, které probíhají v betonu, který je vystaven vysokému teplotnímu zatížení, které simuluje působení požáru. Také je zde shrnut vliv vysokých teplot na chování jednotlivých složek, který beton tvoří. Důraz je kladen na popsání možností eliminace poškození betonu při působení vysokých teplot. Dále jsou popsány principy změn a dějů v důsledku působení vysokých teplot simulující vliv požáru. V experimentální části jsou shrnuty poznatky související se složením betonu, použitím různých druhů vláken a dalších opatření při zatěžování betonu vysokou teplotou. Popsány jsou také kroky ovlivňující negativní dopad na vlastnosti a odolnost betonu při působení vysoké teploty. Na základě shrnutých poznatků jsou formulovány závěry.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, požární odolnost, spalling, rozptýlená výztuž, celulózová vlákna, permeabilita, teplotní roztažnost, explozivní odprýskávání

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to study the problem of the behavior of concrete under high temperatures. The theoretical part of the work summarizes the knowledge about the changes that take place in concrete, when it is exposed to a high thermal load that simulates the effects of fire. It also summarizes the effect of high temperatures on the behavior of the individual components that make up concrete. Emphasis is placed on describing the possibilities of eliminating concrete damage at high temperatures. Furthermore, the principles of changes and events due to high temperatures simulating the effect of fire are described. The experimental part summarizes the knowledge related to the composition of concrete, the use of different types of fibers, and other measures in loading concrete at high temperatures. Steps influencing the negative impact on the properties and resistance of concrete to high temperatures are also described. Based on the summarized findings, conclusions are formulated.

KEYWORDS

Concrete, fire resistance, spalling, dispersed reinforcement, cellulose fibers, permeability, thermal expansion, explosive spalling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jan Klobása *Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu*. Brno, 2020. 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jan Klobása
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jan Klobása
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Sedlmajerovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, ochotu a pomoc, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Poděkování patří také mé rodině a přátelům, kteří mě během studia podporovali.

OBSAH

1. Úvod.....	10
2. Cíl práce.....	11
3. Teoretická část.....	12
3.1. Základní pojmy a názvosloví.....	12
3.1.1. Požár.....	12
3.1.2. Návrhový požár	12
3.1.3. Požární bezpečnost.....	12
3.1.4. Požární nebezpečí	13
3.1.5. Požární odolnost	13
3.1.6. Požární scénář	13
3.1.7. Požární úsek	13
3.1.8. Fáze požáru	13
3.2. Požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí.....	14
3.2.1. Požárně technické vlastnosti stavebních výrobků.....	14
3.2.2. Třída reakce na oheň	14
3.2.3. Požární odolnost stavebních konstrukcí	15
3.3. Chování složky betonu za vysokých teplot.....	17
3.3.1. Cementový tmel	17
3.3.2. Kamenivo	19
3.3.3. Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž	20
3.4. Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu	21
3.4.1. Vliv vysokých teplot na strukturu betonu.....	21
3.4.2. Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu	23
3.4.2.1. Pevnost v tlaku betonu.....	23
3.4.2.2. Pevnost v tahu betonu	24
3.4.2.3. Modul pružnosti betonu.....	24
3.4.2.4. Propustnost betonu.....	25
3.4.3. Chování betonu při statickém zatížení a působení vysokých teplot	25
3.4.4. Vliv vysokých teplot na fyzikální vlastnosti betonu	27
3.4.4.1. Tepelná vodivost betonu.....	27
3.4.4.2. Teplotní roztažnost betonu.....	27
3.4.4.3. Měrné teplo betonu	28
3.5. Odprýskávání betonu vlivem vysokých teplot.....	29
3.5.1. Plošné odprýskávání betonu	30
3.5.2. Štěpení a odprýsknutí části kameniva	30
3.5.3. Explosivní odprýskávání.....	31
3.6. Možnosti eliminace poškození betonu působením vysokých teplot.....	33
3.6.1. Cementový tmel	33

3.6.2. Kamenivo	33
3.6.3. Vlákna	34
3.6.3.1. Polypropylenová vlákna	35
3.6.3.2. Ocelová vlákna	38
3.6.3.3. Skelná vlákna	41
3.6.3.4. Celulózová vlákna	42
4. Experimentální část	45
4.1. Vliv polypropylenových a ocelových vláken na odolnost betonu proti působení vysokých teplot	45
4.2. Vliv celulózového vlákna na odolnost betonu proti působení vysokých teplot....	50
5. Závěr	55
6. Seznam použitých zdrojů a literatury	59
7. Seznam tabulek	64
8. Seznam obrázků	65
9. Seznam grafů	66

1. Úvod

Výrazný pokrok, který se promítá ve všech oborech průmyslu a technických vědách, je patrný také ve stavebnictví. Zásadní vliv na přidanou hodnotu v tomto odvětví mají nejen nové poznatky a znalosti v materiálovém inženýrství, ale také v technologiích, které tento rozvoj umožňují. Stavební materiály se časem výrazně mění a přináší vyšší užité vlastnosti a širší možnosti využití. Současně se také zvyšují nároky, které jsou na stavební materiál kladeny, protože stavební materiál je základní element pro stavební konstrukci, kde je důležité spolupůsobení nejrůznějších stavebních materiálů.

Mezi nejpoužívanější stavební materiál patří beton, který skýtá mnoho technologických i materiálových výhod, které předurčují jeho široké pole využití. Ale i na tento trvanlivý materiál, který je označován také jako umělý kámen, působí mnoho negativních činitelů během své životnosti, kdy beton musí plnit svojí požadovanou funkci ve vytvořené konstrukci. Beton se vyrábí v mnoho variantách, které jsou přizpůsobeny pro konkrétní aplikaci a funkci v konstrukci.

Jedním z negativních faktorů, které mohou působit na beton je vysoká teplota, která může na beton působit krátkodobě či dlouhodobě. Proto jednou ze specifických oblastí, kde je sledována odolnost betonu, je jeho odolnost při působení požáru. V těchto případech je nezbytné posuzovat odolnost betonu v souvislosti s bezpečností, a to přesto, že se jedná o materiál nehořlavý. Je nutné brát ohled na chování betonu a změnu jeho vlastností, ke kterým může dojít během požáru, respektive při zatížení betonu extrémně vysokými teplotami. Proto je stále aktuální otázka chování betonu při zatížení vysokou teplotou a jeho odolnost v těchto extrémních podmínkách. Předpoklady pro splnění požadavků, které jsou v této oblasti na beton kladeny, musí vycházet ze správného a vhodného návrhu betonu pro tyto specifické požadavky.

2. Cíl práce

Tato bakalářská práce je zaměřená na problematiku působení vysokých teplot na vlastnosti betonu. Toto nestandardní zatížení vysokými teplotami zásadně mění vlastnosti betonu, a už v samotném návrhu složení betonu je potřeba uvažovat s tímto druhem zatížení. V práci je uvedena rešerše dosavadních poznatků a výsledků z testování a vývoje betonů s cementovou matricí s vyšší odolností vůči vysokým teplotám. Dále je nutné provést rozklad betonu na jeho jednotlivé složky, u kterých je sledován jejich vliv na výsledné vlastnosti celého kompozitu při působení vysokých teplot. Na základě zjištěných informací a závěrů je studována volba vhodných složek do betonu pro zvýšení požární odolnosti betonu, jako materiálu, který by měl tomuto zatížení odolávat. Jednou z hlavních částí této práce je možnost eliminace dopadu vysokých teplot na výsledné a požadované vlastnosti betonu pomocí rozptýlených vláken. Popsána jsou organická a anorganická vlákna, především se jedná o polypropylenová, ocelová či celulózová vlákna. Společně s popisem jednotlivých vstupních surovin, rozptýlených vláken a základních definic spojených s problematikou požáru a vysokoteplotního zatížení, jsou popsány také principy chování betonu a děje, které se odehrávají v betonu při vysoké teplotě s odvoláním na studie či práce, které v tomto směru byly provedeny.

Experimentální část je úzce spjata s teoretickou částí, která je věnována shrnutí závěrů studií s problematikou zvýšení požární odolnosti betonu. Především je pozornost zaměřena na vliv využití vláken do betonu, kde je znám obecný předpoklad pro zvýšení požární odolnosti betonu. Práce si dále klade za cíl detailně sledovat vliv druhu vlákna, jeho geometrie a také dávkování na chování betonu při vysoké teplotě. Jedná se o mnoho faktorů a detailů, které souvisí s dosažením požadovaného výsledku, tj. zvýšené odolnosti betonu vůči působení vysokých teplot. Proto jsou sledovány změny vlastností a chování betonového kompozitu při působení vysokých teplot. Tato oblast je velmi žádaná také s ohledem na bezpečnost, a to nejen ve stavu ke konstrukci, ale také ve vztahu k bezpečnosti osob.

3. Teoretická část

V teoretické části je řešena problematika požární odolnosti z pohledu základního popisu, protože požár je důvod, kdy konstrukce či stavební materiál musí odolávat působení nestandardnímu zatížení, kterým je působení vysokých teplot. V návaznosti na uvedení do problematiky je následně pozornost věnována betonu, jako materiálu, a to z různých pohledů souvisejících s řešeným tématem. [2]

3.1. Základní pojmy a názvosloví

Pohled na požární odolnost je spjat se zajištěním bezpečnosti majetku, ale především osob. Snahou je minimalizovat jakékoliv ztráty či škody. V tomto oboru je několik základních pojmů a definic, které souvisí s řešenou problematikou a je třeba jim věnovat pozornost. [2]

3.1.1. Požár

Požár je chápán jako každé nechtěné hoření, při kterém dojde k úmrtí nebo poranění osob nebo zvířat. Dále pak dochází ke škodám na materiálové bázi nebo v životním prostředí. Požár je také stav, kdy nežádoucí hoření ohrožuje osoby, zvířata, materiálovou bázi a životní prostředí. U požáru se můžeme setkat s pojmem „plně rozvinutý požár“, který symbolizuje situaci, kdy při požáru na všech materiálech v hodnoceném místě probíhá hoření. [1] [3] [4]

Požár rozdělujeme na lokální, kdy dochází k požárnímu zatížení pouze v určitém místě požárního úseku, a dále na celoplošný. [1]

3.1.2. Návrhový požár

Vývoj a průběh požáru v požárním úseku nebo objektu, na který je dimenzováno požární zabezpečení požárního úseku nebo objektu. Zahrnuje fázi vývoje požáru, fázi plně rozvinutého požáru (okamžik, kdy se požár rozšíří po celé ploše místnosti, ve více místnostech nebo v kompletním požárním úseku, popřípadě kdy teploty v hořícím pásu dosáhnou 500 až 600 °C). Dále sem patří fáze dohořívání a chladnutí (okamžik, kdy teploty plynů v požárním prostoru začnou klesat). [1]

3.1.3. Požární bezpečnost

Požární bezpečností je rozuměno shrnutí organizačních, technických a stavebních zabezpečení k zamezení vzniku požáru nebo výbuchu s následným požárem a k ochraně osob, zvířat, majetku v případě začátku požáru a k zabránění jeho šíření.[3]

S požární bezpečností úzce souvisí stupeň požární bezpečnosti. Charakterizuje klasifikační zatřídění vyjadřující schopnost stavebních konstrukcí požárního úseku jako celku čelit požáru z hlediska požáru a stability konstrukcí objektu. [2] [4]

U staveb je požární bezpečnost stavby posuzována jako schopnost stavby co nejvíce zamezit riziko počátku a rozšiřování požáru, a zabránit úmrtí a poškození zdraví osob a zvířat v případě požáru, dále i ztrátám na majetkové bázi. Vhodnými nástroji jsou urbanistické začlenění stavby, konstrukční a materiálový systém, dále pak dispoziční řešení. V neposlední řadě lze zvýšit bezpečnost stavby speciálními bezpečnostními opatřeními a zařízeními požární ochrany. [3]

3.1.4. Požární nebezpečí

Chápeme jako pravděpodobnost počátku požáru nebo výbuchu s následným požárem. [1]

3.1.5. Požární odolnost

Požární odolnost je dána jako doba v minutách, během níž je konstrukce schopna vzdorovat teplotám vytvořených při požáru, aniž by ztratila svou funkci. Klasifikuje se třídou požární odolnosti podle ČSN 73 0810. [3]

U požární odolnosti se řeší také požární zatížení, které působí na konstrukci. Toto zatížení je suma tepelné energie, která je uvolňována při hoření všech hořlavých materiálů. [2]

3.1.6. Požární scénář

Vyjadřuje průběh požáru v čase udávající klíčové události, které charakterizují požár a odlišují požár od jiných možných požárů. Většinou jej vymezuje vznícení, průběh požáru, plně rozvinutá fáze dohořívání společně s prostředím a zařízením budovy, které mají vliv na požár. [2] [4]

3.1.7. Požární úsek

Je prostor objektu, který je ohraničený od ostatních částí tohoto objektu, popřípadě od sousedních objektů požárně dělícími konstrukcemi. Požárně dělící konstrukce je stavební konstrukce, která zabraňuje šíření požáru mimo požární úsek a je schopná odolávat působení vysokých teplot. Je to zejména požární stěna, strop nebo střecha. [1] [3]

3.1.8. Fáze požáru

Podle sledování skutečných či experimentálních požárů lze jejich průběh rozdělit na tři časové fáze. V prvním období dochází ke vznícení hořlavých materiálů a k šíření požáru na ostatní hořlavé materiály. Tato fáze může trvat od několika minut až po několik hodin. V druhé fázi dojde k úplnému rozšíření požáru, kdy hoří převládající část hořlavých hmot v požárním úseku. V porovnání s první fází, kde se vyskytují poměrně nízké teploty v objektu zasaženém požárem, je druhá fáze charakteristická rychlým

vzestupem teplot a shořením většiny hořlavých hmot. V poslední fázi nastává pokles teplot díky nedostatku hořlavého materiálu. [4]

3.2. Požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí

Jedná se o komplexní hodnocení, které začíná u základních elementů, kterými jsou stavební materiály či stavební hmoty, které se označují jako stavební výrobky. Následně je problematika požárně technických vlastností řešena na konstrukcích. [2]

3.2.1. Požárně technické vlastnosti stavebních výrobků

Při zkoušení požárních technických vlastností stavebních hmot a výrobků, jakožto základních elementů, se řeší především:

- reakce stavebních výrobků na oheň;
- šíření plamene po povrchu stavebních hmot;
- hodnocení odkapávání hmot z podhledů stropů střeš;
- hodnocení podlahovin a textilií. [1]

3.2.2. Třída reakce na oheň

Stavební výrobky se v současnosti zkoušejí na reakci na oheň (lidověji na hořlavost) podle pěti evropských zkušebních norem. Klasifikace výrobků reakce na oheň se provádí podle evropské klasifikační normy ČSN EN 13501–1. Při hodnocení stavebního výrobku v oblasti požárně technických vlastností je toto rozdělení rozhodující. Každý stavební výrobek by měl být klasifikován v souladu s touto klasifikační normou. Konkrétně se jedná o tyto klasifikační třídy reakce na oheň:

- Třída A1: výrobky třídy A1 nebudou přispívat k požáru v žádném jeho stádiu, z toho důvodu jsou automaticky považovány za vyhovující všem požadavkům pro nižší třídy, nehořlavé hmoty třídy A1 se považují anorganické hmoty, výrobky a konstrukce bez ohledu na užití ve stavebním objektu;
- Třída A2: výrobky sice vyhovují stejným kritériím EN 13823 jako pro třídu B, ale navíc nebudou za podmínek plně rozvinutého požáru významně přispívat ke kalorickému zatížení a tím i k dalšímu růstu požáru;
- Třída B: jako i třídy C, ale s přísnějšími požadavky;
- Třída C: jako u třídy D, ale navíc při tepelném působení jednotlivého hořícího předmětu vykazují omezené rozšíření plamene;
- Třída D: výrobky vyhovující kritériím E a schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez jeho významného rozšíření. Kromě toho jsou též schopny odolávat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolnění tepla;

- Třída E: výrobky schopné odolávat působení malého plamene po krátký časový interval bez významného rozšíření plamene;
- Třída F: výrobky, které nelze zařadit do žádné z předchozích tříd. [1] [2] [4]

3.2.3. Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požární odolnost (odolávání účinků požáru) je jedna z hlavních vlastností stavebních konstrukcí. Při hodnocení vlastností stavebních konstrukcí v hořícím prostoru musí být splněna podmínka: požadovaná požární odolnost \leq zjištěná požární odolnost. [1]

Požární odolnost stavebních konstrukcí se stanovuje pomocí požárních scénářů. Jednotlivým scénářům odpovídají odlišné teplotní křivky. Teplotní křivky jsou graficky znázorněny na obrázku č. 1, kde jsou patrné jejich rozdíly především v počátečním náběhu teplot. Můžeme je rozdělit na:

- normová teplotní křivka;
- ostatní teplotní křivky:
 - křivka pomalého zahřívání pro doutnající požár;
 - „polopřirozený“ požár;
 - uhlovodíková křivka;
 - křivka působení vnějšího požáru. [4]

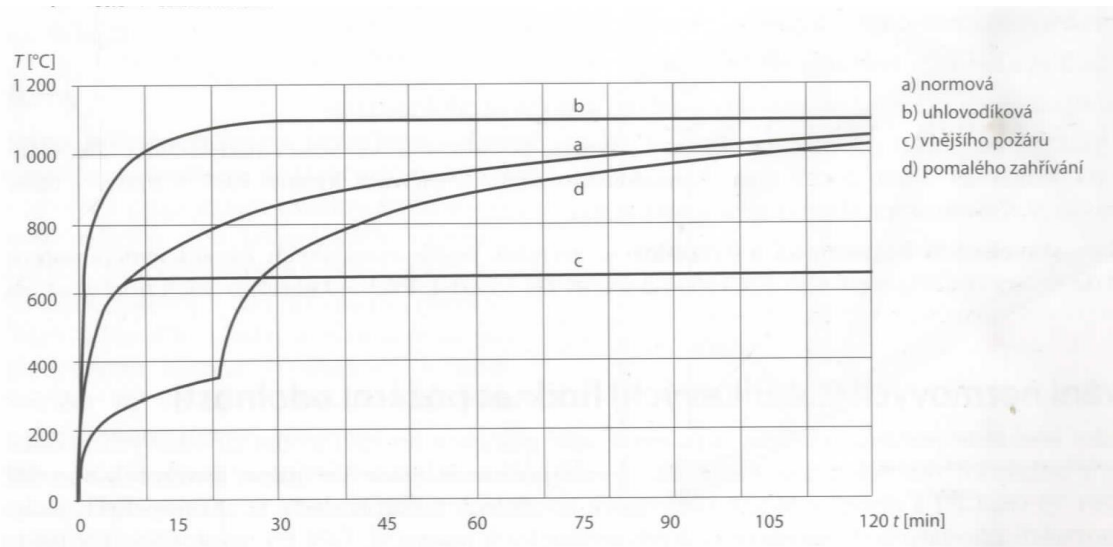
Normové křivce byl na základě statistiky mezinárodně určen časový průběh teplot při požáru, tzv. normová teplotní křivka T, která definována dle vztahu:

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20$$

kde: t – doba od začátku zkoušky [min];
T – průměrná teplota v peci [°C]. [1]

Způsob stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí je možné stanovit několika způsoby anebo jejich kombinací, a to:

- zkouškou;
- normovou hodnotou, popř. výpočtem;
- zkouškou a výpočtem. [2] [4]



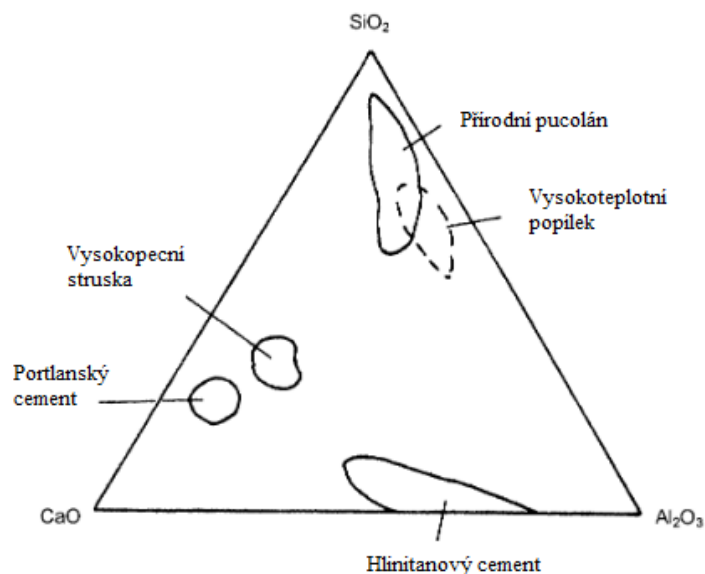
Obrázek 1: Teplotní křivky podle ČSN 1363-1 a 1363-2 [1]

3.3. Chování složky betonu za vysokých teplot

Beton z hlediska jeho odolnosti proti vysokým teplotám je nejpoužívanější stavební materiál na světě. Přestože svým chováním překonává materiály jako je dřevo či ocel, stále dochází k závažným nevratným změnám, které se při působení vysokých teplot vyskytují a projevují. Beton, jak ho všichni známe, je materiálem heterogenním, a tedy se jedná o materiál kompozitní. Je složen z jednotlivých homogenních materiálů, které nazýváme fázemi dané soustavy. Z toho důvodu si beton musíme rozdělit na jednotlivé fáze (složky), u kterých sledujeme chování a vlastnosti při vysokých teplotách. [44]

3.3.1. Cementový tmel

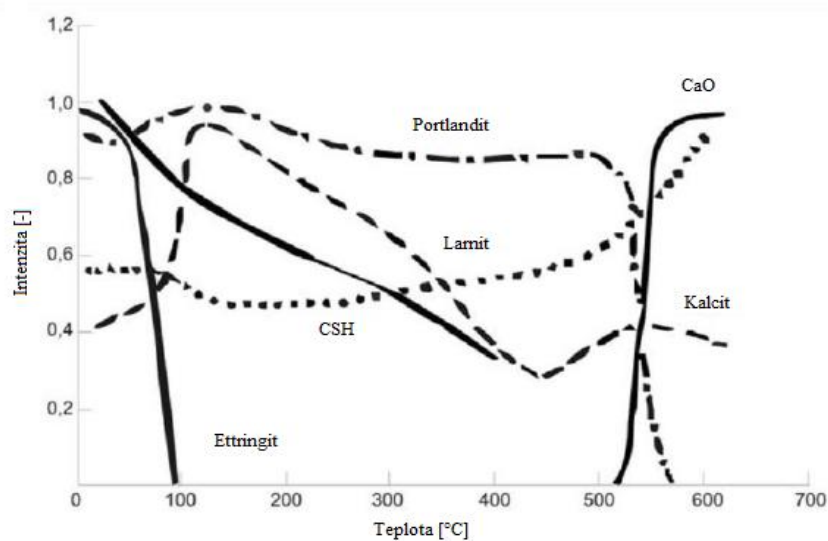
Chování cementového tmele za vysokých teplot je ovlivněno poměrem mísení složek, které tento tmel tvoří. Na obrázku č. 2 můžeme vidět trojsložkový diagram s CaO , SiO_2 a Al_2O_3 ze kterého je patrné, že například vysoký obsah strusky nebo vysokopecního popílku mění poměr CaO a SiO_2 v cementovém tmelu. [16]



Obrázek 2: Složky cementového tmele [16]

Chování cementového tmele při vysoké teplotě závisí na faktorech jako vodní součinitel, poměr CaO/SiO_2 , množství vytvořeného hydroxidu vápenatého ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a stupeň hydratace. Hydratace cementového tmele se vyvíjí v několika stupních a nezávisí nejen na základních složkách, ale také na způsobu a teplotě ošetřování. Je patrné, že různě složený cementový tmel se může chovat odlišně. Rozlišují se dvě skupiny chování cementového tmele při zvýšených teplotách. První skupina je charakteristická neuzavřeným prostředím. Při zahřívání cementového tmele dochází k zvýšení

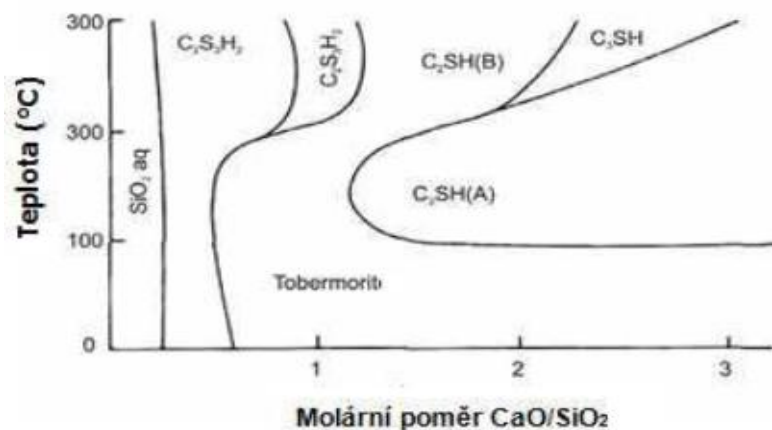
transportu vody a vodní difuze, která vede k urychlení sušení a ztráty volné (kapilární) vody. Poté co je cementový tmel zahříván ještě na vyšší teplotu odchází i voda chemicky vázaná. Zkoumání změn je prováděno na základních minerálech – CSH gel, ettringit, larnit, kalcit, portlandit a oxid vápenatý (obrázek č. 3). Ze všech zde zmíněných se nejdříve rozkládá ettringit okolo 100 °C. Dehydratace CSH gelu je markantní a můžeme ji sledovat od počátku ohřívání. Je třeba poznamenat, že struktura cementového tmele je již částečně poškozena dehydratací při teplotě 105 °C, přestože tato teplota odpovídá sušení materiálu. Při pokračujícím zahřívání na teplotu okolo 500 °C výrazně klesne obsah portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vlivem rozkladu a odchodu vody. Díky tomuto rozkladu je možné pozorovat zvyšující se obsah CaO v cementovém tmelu. [16] [17]



Obrázek 3: Vývoj intenzity rozkladu základních minerálů cementového tmele [7]

Z předešlé části je patrný faktor, který ovlivní schopnost betonu odolávat žáru. Pokud na výrobu betonu bude použit cement s nižším obsahem slínku, bude více odolný. Při chlazení dochází ke zpětnému rozpínání vlivem reakce CaO s H_2O , které je doprovázeno zvětšením objemu produktů reakce. Zvětšení objemu výsledného produktu reakce $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vede k narušení struktury betonu a díky tomu se beton začíná rozpadat. [18]

Postupným zahříváním a dosažením teploty 110 °C s vhodným poměrem CaO/SiO_2 přibližně 1,5 mohou vznikat podoby křemičitanů vápenatých, které se vyznačují špatnou krystalizací. Dle následujícího obrázku je patrné, že při poměru CaO/SiO_2 rovno 1 a dosáhnutí teploty nad 150 °C může vznikat tobermorit. Při následujícím zvyšování teploty se mohou vytvářet další křemičitany jako Xonotlit a Hillebrandit. [7] [16] [18]

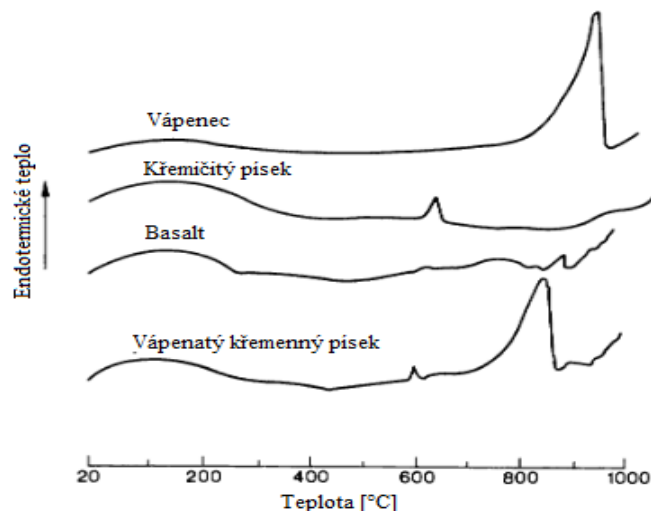


Obrázek 4: Vliv poměru CaO/SiO₂ a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [16]

Ve druhé skupině je za vlhkých podmínek v uzavřeném prostředí cementový tmel zahříván a dochází k tzv. hydrotermálním reakcím. Tento efekt označujeme jako vnitřní autoklávování. Při působení těchto podmínek dochází k chemickým a fyzikálním změnám, které mohou nastartovat změny v mikrostrukturu hydratačních produktů. Tento postup je velmi dobře známý a je hojně používán při výrobě pórobetonu. [16] [19] [20]

3.3.2. Kamenivo

Kamenivo je základem každé betonové směsi. Vytváří nosnou kostru, která zaujímá okolo 70–80 % objemu betonu. Z tohoto důvodu výrazně ovlivňuje chování a vlastnosti betonu při vysokých teplotách. Výběr kameniva do betonu, který má být odolný vůči vysokým teplotám, je důležitým faktorem. Při zvyšování teploty se každé kamenivo chová odlišně a je doprovázeno chemicko-fyzikálními změnami. Sledované vlastnosti kameniva z hlediska použití při vysoké teplotě jsou nízký koeficient teplotní deformace, nízká zbytková deformace po ochlazení, teplotní stabilita a mono-minerální struktura kameniva. Tepelně stabilní kameniva se vyznačují chemicko-fyzikální stabilitou za vysokých teplot. Teplotní deformace kameniva závisí na mineralogickém složení. Tento jev lze dobře pozorovat v křemičitém kamenivu. Při teplotě 574 °C probíhá fázová přeměna β – křemene na α – křemen se zvýšením objemu až o 5 %. Vápencové kamenivo vykazuje dobré tepelné chování do 700 °C. Při dosažení této teploty dochází k rozkladu uhličitanu vápenatého na CaO a CO₂. Při chlazení betonu poté dochází k hydrataci a vzniku Ca(OH)₂. Tato reakce je spojena s nárůstem objemu až o 44 %. Lepší chování betonů je zaznamenáno s vápenatým kamenivem, zejména pokud je teplota požáru nižší než 750 °C. Tato skutečnost je vysvětlována vyšším množstvím tepla, které se spotřebuje při endotermickém rozkladu vápenatého kameniva. [12] [15] [16]



Obrázek 5: Fyzikálně-chemické transformace ve čtyřech různých agregátech [16]

Mono-minerální struktura kameniva je výhodnější z pohledu stejného koeficientu teplotní roztažnosti. Kameniva tvořená z více minerálu jsou náchylnější k rozpadu z důvodu napětí mezi krystaly díky rozdílné teplotní roztažnosti. [7]

Tabulka 1: Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti pro různé horniny [7]

Typ horniny	Koeficient lineární teplotní roztažnosti [$\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$]
Žula	1,8–11,9
Čedič	3,6–9,7
Pískovec	4,3–13,9
Vápenec	0,9–12,2
Dolomit	6,7–8,6

3.3.3. Vliv vysokých teplot na ocelovou výztuž

Účinky vysoké teploty na beton výrazně ovlivňují vlastnosti betonu. Avšak větší nebezpečí zhroutení hrozí výztuži, která své mechanické vlastnosti ztrácí při teplotách okolo 450–500 °C. Beton sám o sobě vydrží vyšší teploty. Z tohoto důvodu musí beton chránit výztuž tak dlouho, jak je to jen možné. Z tohoto hlediska má tloušťka krytí zásadní význam pro udržení teploty výztuže pod 450 °C. [15]

Při narůstající teplotě u vyztuženého betonu má vliv i soudržnost betonu s výztuží, která je za normálních teplot založena na stejné teplotní roztažnosti obou materiálů. Nad teplotu 100 °C se začíná součinitel teplotní roztažnosti betonu lišit od oceli – u oceli se začíná zvyšovat. Důsledek tohoto chování s narůstající teplotou je ten, že se ocelová výztuž snaží více rozpínat, čímž dochází ke vzniku napětí a pomalému snížení soudržnosti mezi ocelí a betonem. Na základě zahraničních a domácích zkoušek platí pro soudržnost oceli s betonem následující zásady:

- mezi hladkými a žebříkovými ocelovými výztužemi byly pozorovány velké rozdíly v soudržnosti;
- kvalita povrchů hladkých ocelí výrazně ovlivňuje soudržnost za vysokých teplot – v případě silně zkorodované výztuže se chová hladká ocel přibližně stejně jako ocel žebříková;
- vliv vodního součinitele na soudržnost se neuplatní;
- druh kameniva patří k rozhodujícím faktorům – čím nižší jsou tepelné deformace betonu, tím je vyšší soudržnost při narůstajících teplotách. [2]

3.4. Vliv vysokých teplot na vlastnosti betonu

Beton řadíme k materiálům nehořlavým, avšak vysoké teploty vznikající při požáru značně ovlivňují jeho vlastnosti. Z hlediska požární odolnosti se beton rozděluje do těchto skupin:

- beton skupiny A – betonová směs vyrobená z přírodního (tufy, sopečné pemzy) nebo umělého (agloporit) pórovitého kameniva, jehož objemová hmotnost nepřesáhne $1\,800\text{ kg/m}^3$;
- beton skupiny B – betonová směs z hutného kameniva, jehož objemová hmotnost je alespoň $1\,800\text{ kg/m}^3$. [1] [2]

Odolnost proti požáru je způsobena reakcí mezi složkami betonu – cementem a kamenivem. Když tyto složky spolu chemicky reagují, vytváří materiál, který je podstatě inertní a má nízkou tepelnou vodivost, vysokou tepelnou kapacitu a pomalou ztrátu pevnosti s narůstající teplotou. Díky tomuto může být beton použit jako účinná protipožární ochrana. Chování betonu vystavenému ohni závisí na tepelných, mechanických a deformačních vlastnostech složek, ze kterých je beton složen. [5]

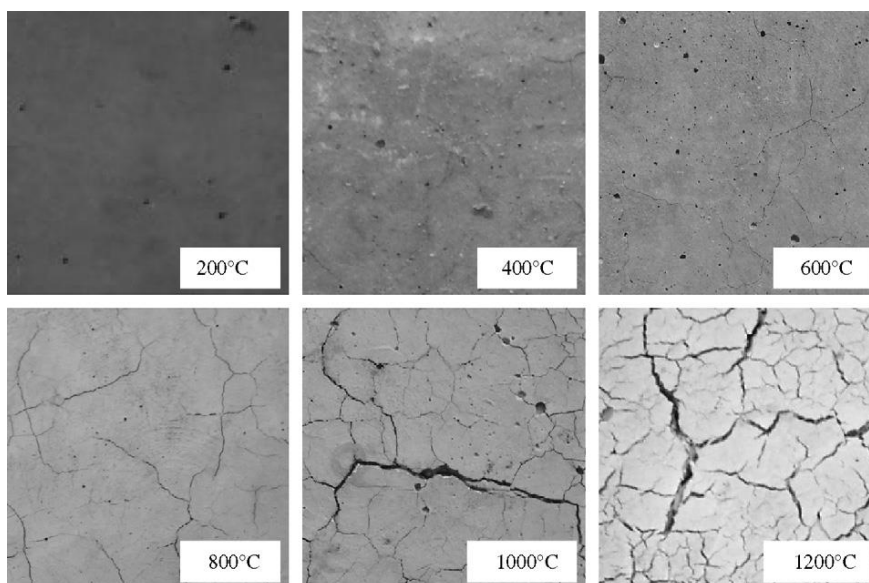
3.4.1. Vliv vysokých teplot na strukturu betonu

Změny ve struktuře betonu jsou závislé na použitém cementu, druhu kameniva a velikosti tranzitní zóny. V cementovém tmelu je ovlivňována struktura obsahem CSH gelu a Ca(OH)_2 . Přehled celkových změn v mikrostruktuře betonu je uveden v tabulce č. 2. Do teploty 200 °C nedochází v cementové matici ani v tranzitní zóně k žádným mikrotrhlinám. Při velmi vysoké teplotě okolo $1\,000\text{ °C}$ se pórovitost betonu zmenšuje díky slinování. Neznamená to však, že mechanické vlastnosti betonu při velmi vysoké teplotě by byly lepší než vlastnosti při nízkých teplotách, protože se změnila struktura pórovitosti a charakteristika betonového materiálu. [9] [16]

Důsledky odpařování vody a chemických změn hydratačních produktů můžeme pozorovat na obrázku č. 6. Je jasně viditelné, že se zvyšující se teplotou se zvyšuje pórovitost a velikost pórů v betonu, které vede až k vzniku trhlin a rozpadu. Odpařování vody je dále zodpovědné za zdrsňení struktury pórů a snížení mechanických vlastností, jak bylo diskutováno v předchozím odstavci. [9]

Tabulka 2: Přehled změn ve struktuře betonu při zvyšování teploty [7]

Rozsah teplot	Změny v mikrostruktuře betonu
20–200 °C	ztráta kapilární vody a snížení soudržných sil v důsledku expanze vlhkosti
	80–150 °C dehydratace ettringitu,
	150–170 °C rozklad sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	počátek dehydratace CSH gelu ztráta fyzikálně vázané vody
300–400 °C	praskání křemičitého kameniva (350 °C)
	kritická teplota pro vodu (374 °C) – poté už není možná přítomnost volné vody
400–500 °C	rozklad portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
500–600 °C	přeměna křemene z β fáze na α fázi (573 °C) v kamenivu
600–800 °C	druhá fáze rozkladu CSH gelů, tvorba $\beta\text{-C}_2\text{S}$
800–1 000 °C	840 °C rozklad dolomitického vápence
	930–960 °C rozklad kalcitu $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1 000–1 200 °C	tvorba wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
1 300 °C	celkový rozpad betonu



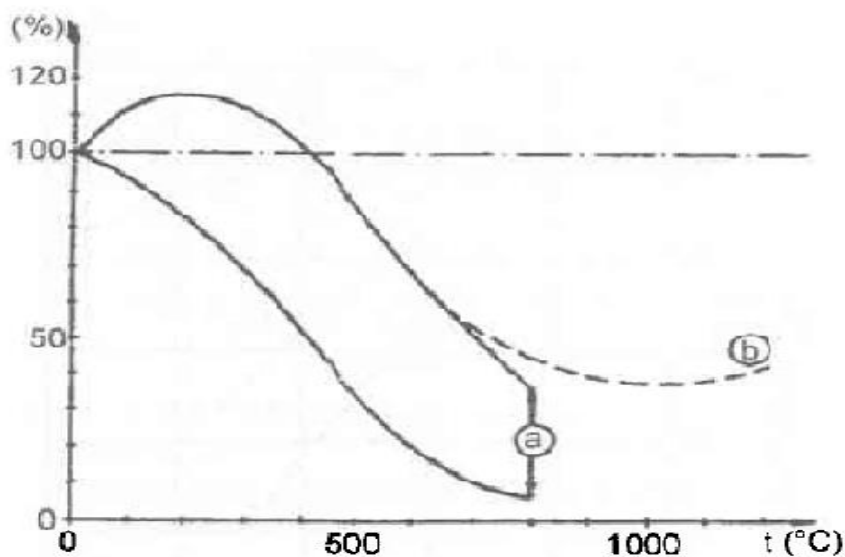
Obrázek 6: Povrchová struktura betonových vzorků vystavených zvýšeným teplotám [6]

3.4.2. Vliv vysokých teplot na mechanické vlastnosti betonu

Mechanické vlastnosti betonu jsou velmi důležité při navrhování požární odolnosti. Teplota požáru má vliv jak na pevnost v tlaku, tak i další charakteristiky betonu (pevnost v tahu, modul pružnosti). Zkoušky se obvykle provádějí na vzorcích, kterými jsou zpravidla válce nebo kostky různých velikostí. [5]

3.4.2.1. Pevnost v tlaku betonu

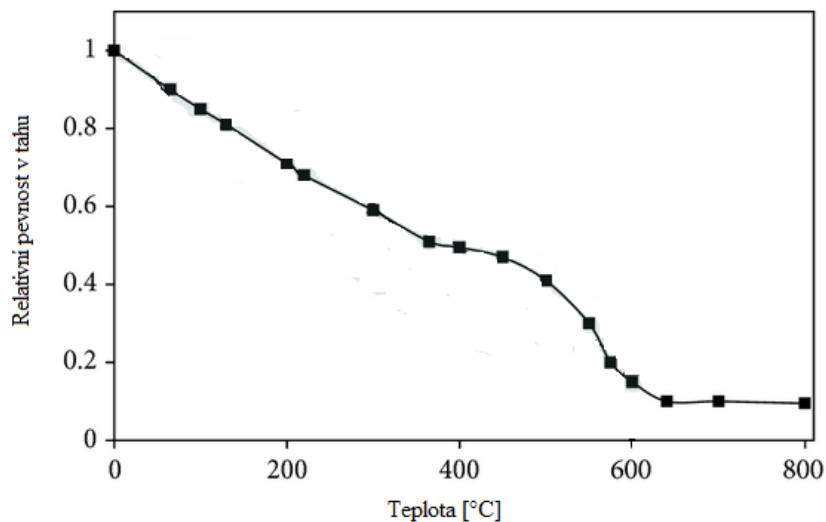
Pevnost v tlaku betonu je základní charakteristikou tohoto materiálu a platí to také při působení zvýšené teploty, protože je důležitá při navrhování požární odolnosti. Při okolní teplotě závisí pevnost v tlaku na poměru vody s cementem, kontaktní zóně či rozhraní mezi kamenivem a cementovým tmelem, podmínkách tvrdnutí, druhu a velikosti kameniva, typech příměsí a mnoho dalších faktorech. Při vysoké teplotě je pevnost v tlaku vysoce ovlivněna počáteční pevností, mírou zhutnění, rychlostí zahřívání a chlazení, druhem pojiva a druhem kameniva. Jak je vidět, existuje spousta faktorů, které ovlivňují požadavky na zvýšenou odolnost vůči působení vysokých teplot. Na obrázku č. 7 je možné vidět grafické znázornění změny pevnosti v tlaku se zvyšující se teplotou v porovnání s pevností betonu za normální teploty (100 %) bez teplotního namáhání. Při zahřátí betonu na 100 °C se začíná odpařovat volná a z část fyzikálně vázané vody, což přispívá k zvýšení pevnosti. V dalším intervalu od 100 °C do 400 °C se tlak moc neliší od původní hodnoty. V rozmezí 100–200 °C je částečné zvýšení pevnosti pozitivně ovlivňováno hydratací dosud nezhydratovaných zrn cementu. Mezi 400–500 °C dochází k uvolnění chemicky vázané vody a vzniká pára, která způsobuje zmenšení pevnosti díky uvolňování vazeb. S dále narůstající teplotou pokračuje pokles pevnosti v tlaku betonu. [2] [5] [8] [9] [10]



Obrázek 7: Změna pevnosti betonu v tlaku působením vysokými teplotami (pevnost za normální teploty =100 %) [2]

3.4.2.2. Pevnost v tahu betonu

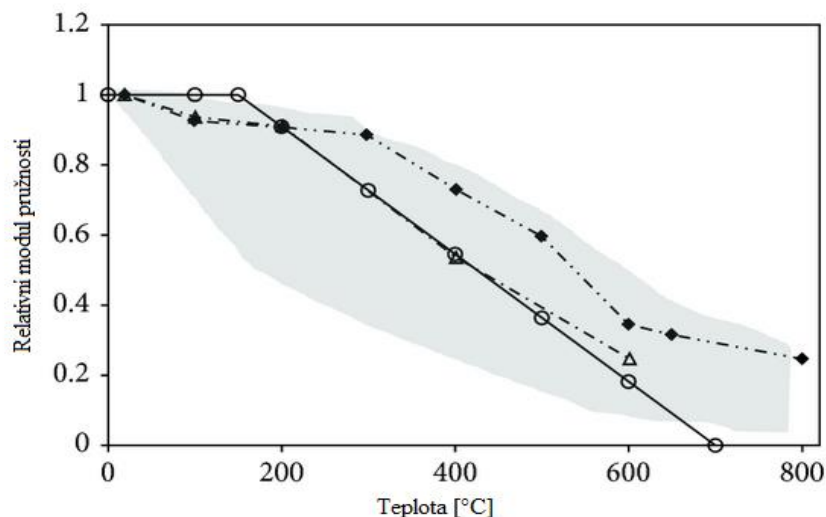
Pevnost v tahu betonu je oproti pevnosti v tlaku značně nižší. Z tohoto důvodu se pevnost v tahu betonu při výpočtech pevnosti při normální teplotě často zanedbává. Při požáru je to naopak významná vlastnost, protože vytvoření trhlin v betonu při vysokých teplotách je obecně zapříčiněno tahovým napětím. Od počátku zvyšování teploty začíná pevnost v tahu klesat. Při 200 °C může klesnout až o 30 %. Znázornění poklesu tahových pevností se zvyšující teplotou je znázorněna na obrázku č. 8. [5] [11] [12]



Obrázek 8: Znázornění pevnosti v tahu při zvyšování teploty [5]

3.4.2.3. Modul pružnosti betonu

Vyšší teploty mají podobný vliv na hodnotu modulu pružnosti jako u pevnosti v tlaku. Obecně lze říct, že mechanické vlastnosti spolu korespondují. Mezi hlavní faktory ovlivňující modul patří vodní součinitel, stáří betonu, druh a velikosti kameniva a obsah vlhkosti. Obecně se dá říct, že modul pružnosti se přibližně lineárně snižuje se zvyšující teplotou. Modul při zvýšené teplotě klesá mnohem více pro beton vytvrzený pod vodou než na vzduchu. Na obrázku č. 9 je možné sledovat grafické znázornění změny modulu pružnosti se zvyšující se teplotou při použití různých druhů kameniv. Šedá zóna vyznačuje rozptyl výsledků jednotlivých druhů betonů. Jeví se, že zhoršení modulu pružnosti se neděje při opakovaném zvyšování a snižování teploty, ale souvisí s nejvyšší dosaženou teplotou během ohřevu. [5] [8] [9] [10] [13]



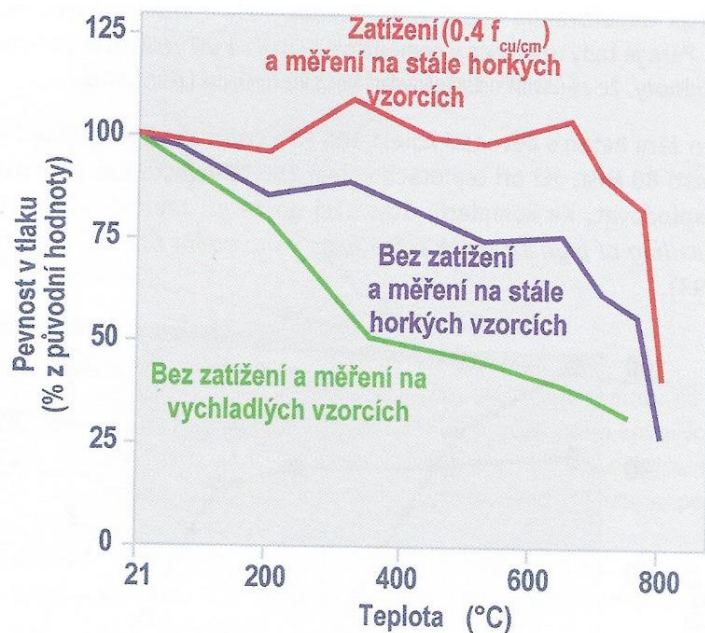
Obrázek 9: Znázornění modulu pružnosti při zvýšení teplot pro beton s různými kamenivý [5]

3.4.2.4. Propustnost betonu

Vývoj propustnosti neboli permeability betonu se změnou teploty byl také studován v rámci projektů. Stanovení bylo prováděno měřením pomocí dusíku při různých tlakových gradientech. Při teplotě 105 °C se vnitřní propustnost pohybuje řádově 10^{-17} m^2 . U teploty 400 °C byla ekvivalentní propustnost betonu řádově 10^{-15} m^2 . V dílech Sliwinski a kol 2004 bylo ukázáno, že se zvyšující se teplotou se prostupnost betonu zvyšuje exponenciálně. [12]

3.4.3. Chování betonu při statickém zatížení a působení vysokých teplot

Tato kapitola je shrnutí několika studií s mnoha výsledky, kterých bylo dosaženo v rámci výzkumů na zatížených betonových konstrukcích. V publikovaných výsledcích bylo studováno mechanické chování betonu při vysokých teplotách. Byl pozorován vliv přítomnosti zatížení při nárůstu teploty na pevnost v tlaku. Byly sledovány výsledky ze dvou různých variant zkoušení. V první variantě byl beton zkoušen na pevnost v tlaku po odeznění účinků vysoké teploty, ale stále na horkých vzorcích zatížených na 40 % jejich únosnosti. Ve druhé variantě byl beton klasicky vystaven vysokým teplotám, poté byl zkoušen na pevnost v tlaku na horkých a vychladlých vzorcích. Testy byly povětšinou prováděny do teploty 800 °C. [15]



Obrázek 10: Vliv zatížení na pevnost v tlaku [15]

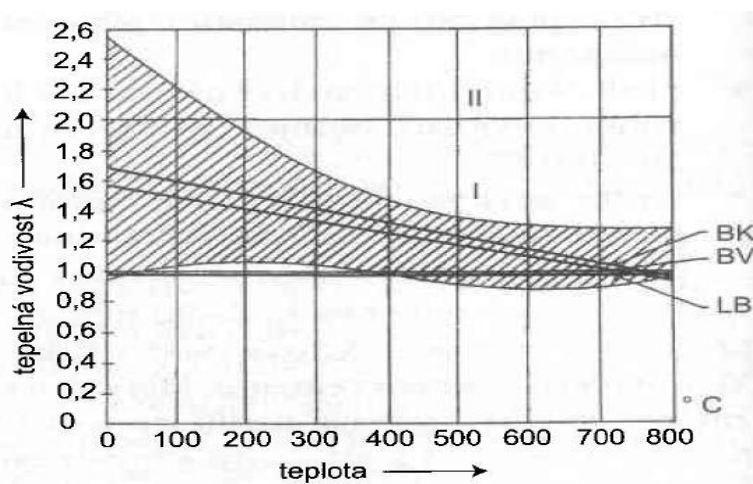
Na obrázku č. 10 je znázorněn výsledek jedné ze studií. Hned na první pohled jsou patrné rozdíly mezi křivkami, které symbolizují klesající pevnost v tlaku při zvyšující se teplotě. Je možné vidět, že aplikace statického zatížení pozitivně ovlivnila vývoj pevností až do teploty okolo 700 °C, kdy beton ztratil svoji soudržnost a zkolaboval. Docházelo k tomu zřejmě z důvodu, že zatížení mohlo eliminovat porušení, protože expanze způsobená vysokou teplotou byla redukována tímto zatížením. Dále je pak možné vidět rozdíl mezi metodou zkoušení na horkých a vychladlých vzorcích. Daleko vyšší ztrátu pevnosti můžeme sledovat na vychladlých vzorcích, u kterých mohlo docházet k dodatečnému vytváření trhlin vlivem teplotní roztažnosti a následnému smrštění, které tuto pevnost snížili. [15]

3.4.4. Vliv vysokých teplot na fyzikální vlastnosti betonu

Sledované fyzikální vlastnosti v betonových konstrukcích jsou především tepelná vodivost, tepelná kapacita a teplotní roztažnost. Tyto vlastnosti jsou významně ovlivněny typem kameniva, obsahem vlhkosti a složením betonové směsi. [5]

3.4.4.1. Tepelná vodivost betonu

Tepelná vodivost betonu při pokojové teplotě je v rozmezí 1,4 a 3,6 W/(m·K), což je průměrně 1,5× větší než u cihelného zdiva. Na následujícím obrázku je znázorněna závislost tepelné vodivosti na zvyšující se teplotě. Na první pohled je vidět rozdíl mezi obyčejným a lehkým betonem. Tepelná vodivost obyčejných (hutných) betonů s teplotou klesá, kdežto u lehkých zůstává téměř konstantní. Vyšrafovaná oblast znázorňuje rozptyl výsledků při stanovování tepelné vodivosti jednotlivých vzorků. Z grafického vyjádření sledujeme, že tepelná vodivost je velice proměnná a závisí na mnoha faktorech jako je například hutnost, teplota a vlhkost betonu. Teplo nejlépe vedou vlhké, tučné a hutné betony. Naproti tomu lehké suché betony vedou teplo podstatně méně. Je třeba poznamenat, že existuje jen velmi málo standardizovaných metod pro měření tepelných vlastností. [2] [5]

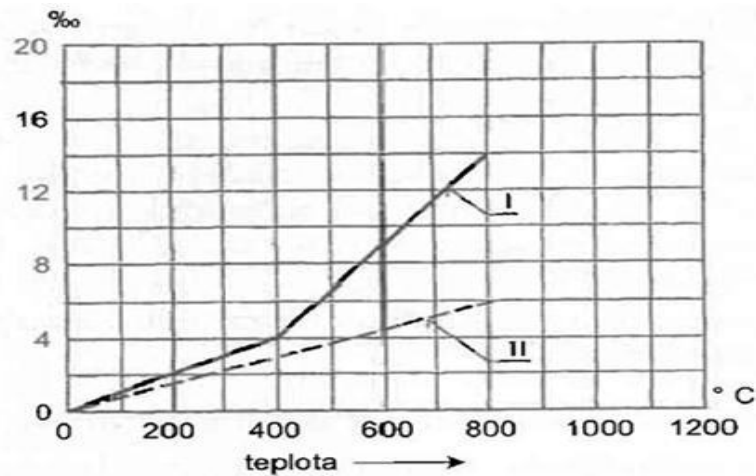


Obrázek 11: Tepelná vodivost betonů v závislosti na teplotě (B – hutné betony, L– lehké betony, šrafovaná plocha označuje rozptyl měření pro hutné betony) [2]

3.4.4.2. Teplotní roztažnost betonu

Beton obecně podléhá expanzi při zvýšených teplotách. Teplotní roztažnost betonu se zvyšuje z téměř 0 při pokojové teplotě na přibližně 1,3 % při 800 °C a potom obvykle zůstává konstantní až do 1 000 °C. Tento nárůst je podstatný v teplotním rozsahu 20–800 °C a je způsoben zejména vysokou teplotní roztažností způsobenou kamenivem a cementovým tmelem v betonu. Teplotní roztažnost betonu je dále závislá na dalších faktorech jako jsou dodatečné změny objemu způsobené změnami obsahu vlhkosti, chemickými reakcemi (dehydratace, změna složení), dotvarováním a vzniku

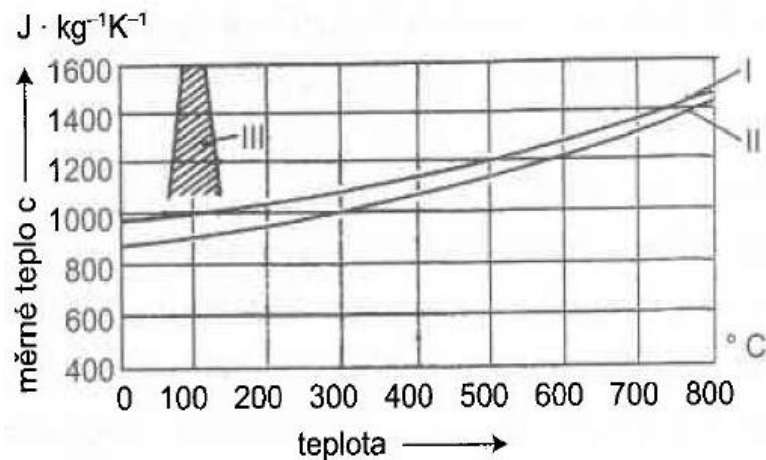
mikrotrhlin v důsledku nesteromerného tepelného napětí. V některých případech se může jednat o tepelné smrštění v důsledku ztráty vody při zahřívání. Znamená to, že celková změna objemu bude záporná. [2] [5]



Obrázek 12: Teplotní roztažnost betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony) [2]

3.4.4.3. Měrné teplo betonu

Měrné teplo je vlastnost betonu, které je citlivé na různé fyzikální a chemické přeměny, ke kterým dochází v betonu při zvyšování teplot. Počínaje odpařování volné vody při 100 °C, disociaci Ca(OH)_2 na CaO a H_2O a křemenné modifikaci okolo 573 °C. Měrné teplo je proto vysoce závislé na obsahu vlhkosti a výrazně se zvyšuje vodním součinitelem. Jak vyplývá z obrázku č. 13, měrné teplo betonu se při pokojové teplotě pohybuje okolo 900 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Při teplotě okolo 800 °C se zvyšuje až na hodnotu 1 400 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Mokrý beton při 200 °C vykazuje až dvojnásobné hodnoty vysušených betonů. [2] [5]



Obrázek 13: Měrné teplo betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony, III – mokré betony) [2]

3.5. Odprýskávání betonu vlivem vysokých teplot

Nejčastější problém při zatížení betonu vysokou teplotou je odprýskání části betonu. Tento jev je označován jako spalling neboli odlupování (odprýskávání). Označuje se jako nežádoucí účinek vysoké teploty na beton, který souvisí s obsaženou vlhkostí v betonu. Samotné odlupování může být násilné nebo nenásilné odtržení vrstvy nebo kousků betonu z povrchu konstrukce, je-li vystaven vysokému a rychlému stoupání teploty, jaké se při požáru vyskytují. Téměř všechny znalosti o odlupování pochází ze zkušeností s konstrukcemi vystavenými požáru. Nové informace vyplývají ze simulace požáru v tunelové konstrukci. Tunelová konstrukce má daleko vyšší počáteční vlhkost než obytné budovy. Dále se pak při požáru budov rychlost zahřívání betonového povrchu pohybuje v rozmezí 20–30 °C/min. U tunelu se udává, že tato hodnota stoupání je přibližně 250 °C/min. [16]

Odlupování lze rozdělit do několika kategorií:

- štěpení a odprýskávání části kameniva;
- explozivní odprýskávání;
- plošné odprýskávání;
- odlupování rohů;
- odlupování po ochlazení. [16]



$w_{mc}=25\%$



$w_{mc}=50\%$



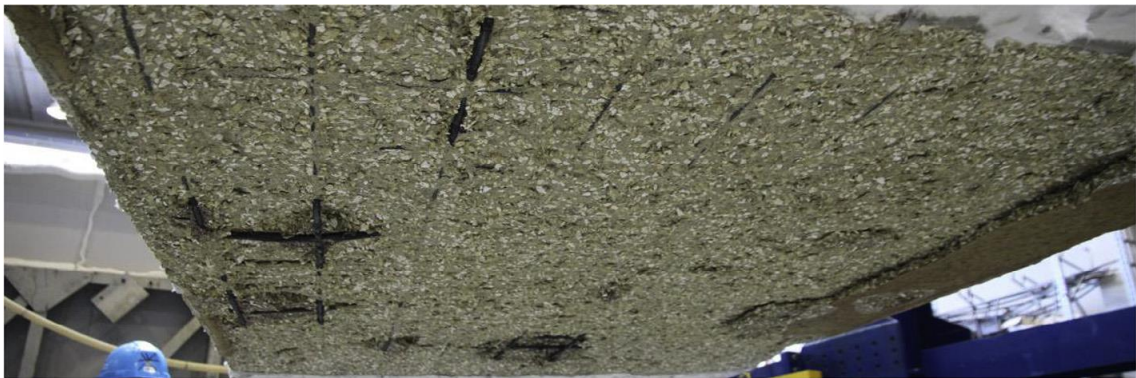
$w_{mc}=100\%$

Obrázek 14: Spalling při různém množství vlhkosti [46]

Tyto kategorie nejsou úplně vypovídající, některé studie spalling rozdělují odlišně, protože mezi některými z nich neexistuje jasná dělící čára. Při požáru dochází většinou k více druhům odlupování, může dokonce dojít i ke všem. První tři zmíněné druhy odlupování se obvykle vyskytují na začátku a při největší intenzitě požáru, naopak zbylé druhy se vyskytují až na konci požáru. Odlupování může být nevýznamné, alternativně může mít vážný účinek proti požární odolnosti betonu z důvodu odstranění krycí vrstvy betonu, po kterém vystavíme výztuž rychlému nárůstu teploty, čímž dochází k poškození. [16] [45] [46]

3.5.1. Plošné odprýskávání betonu

Tento druh odlupování se projevuje v počáteční fázi požárního zatížení. Typickým znakem je vytvoření plošných podpovrchových puchýřků a dutinek, jež jsou příčinou následného odprýsknutí. Jak už název předpovídá, jedná se o celoplošné odstranění krycí vrstvy betonu a celkové odhalení výztuže. Odprýsknuté části se pohybují okolo 20 mm. [16]



Obrázek 15: Plošné odprýskávání po teplotním namáhání [49]

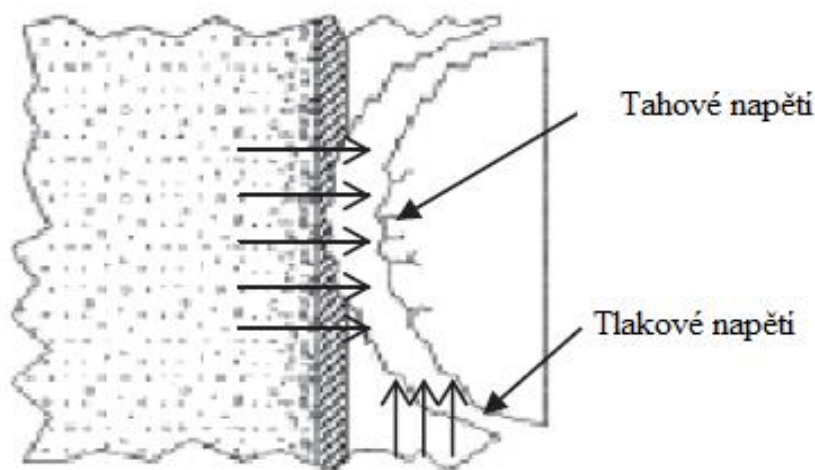
3.5.2. Štěpení a odprýsknutí části kameniva

Efekt štěpení a odprýsknutí části kameniva je způsoben rozdílnou teplotní roztažností jednotlivých složek betonu. Při tepelném zatížení dochází buď k narušení vazby mezi kamenivem a cementovým tmelem nebo poškození samotného kameniva díky fyzikálním a chemickým přeměnám nebo rozdílné teplotní roztažnosti samotného kameniva. Je proto výhodnější mono-minerální kamenivo. Tento druh odprýskávání se především vyskytuje u betonu s použitým křemičitým kamenivem, u kterého dochází k fázové přeměně. [16] [48]

3.5.3. Explosivní odprýskávání

Explosivní odprýskávání je katastrofální selhání betonu, ke kterému obvykle dochází při požáru. Dochází k odstranění betonové vrstvy do hloubky 25–100 mm, což vede k výraznému snížení mechanických vlastností a může způsobit dokonce zhroucení struktury či konstrukce. [16]

Jeden z mechanismů, který popisuje explosivní odprýskávání je založen na přeměně kapaliny obsažené uvnitř betonu na plynnou fázi s nárůstem objemu, a tudíž zvýšení tlaku. Ve ztvrdlém betonu jsou póry různě zaplněny vlhkostí. Množství vlhkosti je závislé na prostředí a staří betonu. Při zahřívání dochází k přeměně kapalné vlhkosti na vodní páru, která zvyšuje tlak v pórech. Pokud je pórový systém dostatečně hustý a beton propustný, vzniklá pára se rozpíná nebo uniká k povrchu, tudíž nenastávají žádné deformace a iniciace trhlin. Při nízké pórovitosti vznikající tlak začne beton namáhat tahovým a tlakovým napětím, který překročí mechanické vlastnosti samotného materiálu a dochází k explosivnímu odstřelu kusů betonu. [27]



Obrázek 16: Schéma explosivního odprýskávání [9]

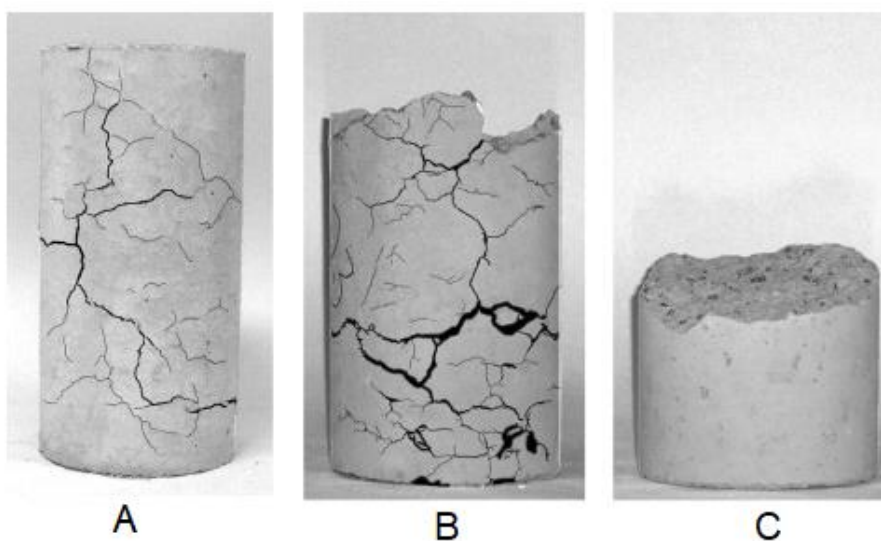
K druhému mechanismu odprýskávání dochází díky tepelnému stresu, který souvisí s vývojem teplotního gradientu a s tím spojené tepelné dilatace. Tyto dva mechanismy mohou působit samostatně nebo v kombinaci. [47]

K odprýsknutí může dojít také u suchého betonu. Během působení vysoké teploty dochází k přeměně pevné fáze spojené s chemickým rozkladem cementového tmelu. Tyto procesy vedou k mechanicky a chemicky iniciovaným mikrotrhlinám. [9] [10]

Faktory ovlivňující explozivní odprýskávání:

- pevnost betonu;
- stáří a propustnost;
- rychlost ohřevu;
- velikost a tvar průřezu;
- typ a velikost kameniva;
- obsah vlhkosti;
- přítomnost trhlin;
- vyztužení. [45]

Velmi zajímavý jev související se vznikem trhlin či odprýskáváním betonu je možné vidět na obrázku č. 17. Na tomto obrázku jsou zobrazena tělesa vyrobená z obyčejného betonu. Na výrobu betonu každého tělesa bylo použito jiné maximální zrno kameniva. U betonu A (vlevo) bylo použito maximální zrno kameniva 14 mm, beton B (uprostřed) měl zrno 10 mm a u betonu C bylo použito jen drobné kamenivo do 4 mm. Rozdíly mezi výsledky jsou patrné hned na první pohled, ačkoli odlupování v závislosti na velikosti kameniva není v odborné literatuře příliš studováno. [48]



Obrázek 17: Vliv velikosti kameniva na odlupování betonu [48]

V rámci experimentu je tento efekt vysvětlen existencí mnoha mikrotrhlin nahromaděných kolem hlavní trhliny (lomové zóny). Při zvýšení velikosti maximálního zrna kameniva se zvyšuje lomová plocha. Vytvořená energie se uvolní do větších trhlin a nedojde k odstřelu betonu. [48]

3.6. Možnosti eliminace poškození betonu působením vysokých teplot

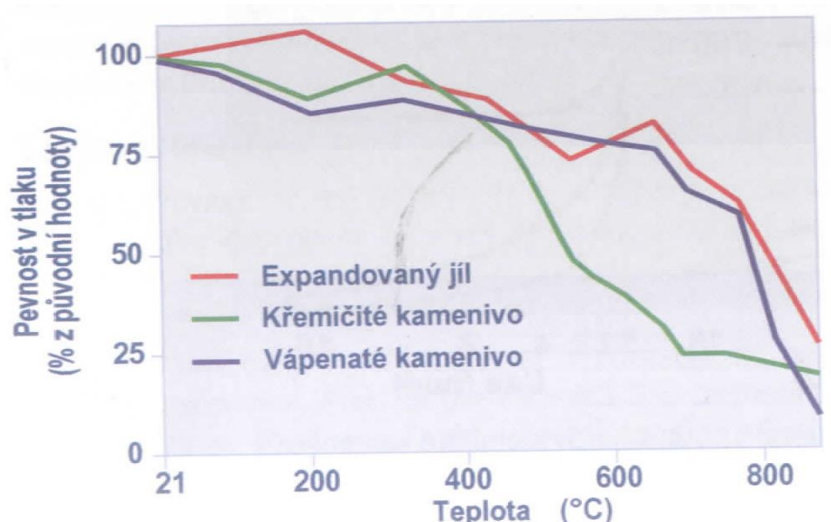
Působení vysokých teplot a jejich účinek na vlastnosti betonu částečně vyplývá z výše uvedených teoretických i praktických poznatků některých studií. Základním předpokladem pro zajištění odolnosti vůči působení vysokých teplot, respektive požáru, je správný návrh složení betonu, tj. vhodná volba vstupních surovin. [23]

3.6.1. Cementový tmel

Používání portlandského cementu s vysokým podílem portlandského slínku do betonu odolného proti vysokým teplotám je nejméně vhodné. Jak již bylo řečeno, při hydrataci portlandského slínku se vytváří Ca(OH)_2 , ve kterém při zvýšení teploty dochází k rozkladu a ztrátě vody. Největší problém je v tomto případě chlazení. Při hašení požáru je přiváděna voda, která způsobuje opětovné reakce CaO s H_2O . Tento jev je velmi úzce spjat s rozpínáním a objemovým nárůstem. Právě proto se s výhodou používají cementy s nízkým obsahem portlandského slínku, nebo je možnost využít nižší množství portlandského cementu společně s přísadkou. Používají se nejrůznější přísady, např. popílek, vápenec a struska. [15]

3.6.2. Kamenivo

Při navrhování obyčejného cementového betonu odolného proti vysokým teplotám musíme zohlednit typ používaného kameniva. Tento faktor se připisuje k nejdůležitějším při odolnosti betonu proti vysokým teplotám. Velká neznámá zůstává reálné chování kameniva v betonu při různých požárních scénářích. Hlavním důvodem odlišného chování kameniva se udává rozdílné mineralogické složení. K dalším vlastnostem, kromě teplotní stálosti kameniva, patří dále druh kameniva a s tím spojený tvar zrna – geometrické vlastnosti, nasákavost a mnoho dalších. Ve srovnání kameniva vápenatého a křemičitého má v tomto směru příznivější vlastnosti kamenivo vápenaté. Při zvyšování teploty vykazuje lepší objemovou stálost a zachování svých vlastností s rostoucí teplotou. Nižší odolnost křemičitého kameniva určuje počáteční fázová přeměna, která nastává okolo $574\text{ }^\circ\text{C}$ oproti kamenivu vápenatému, u kterého je teplota rozkladu mnohem vyšší. Tato počáteční fázová přeměna je doprovázena velkými objemovými změnami, při kterých dochází k narušení struktury a snížení pevnosti betonu až o 80 %. Tato fázová přeměna je reverzibilní, z toho plyne, že při chlazení dojde ke změně na původní modifikaci doprovázenou opět objemovými změnami. [15]
[22]

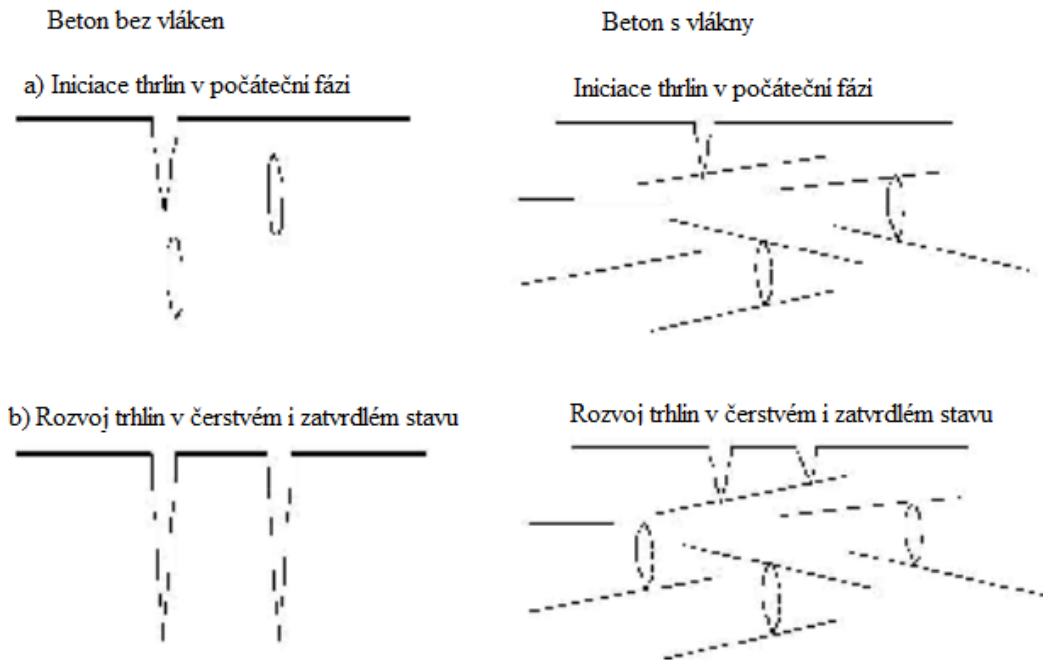


Obrázek 18: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku při zvyšování teploty [15]

Hojně využívanou skupinou kameniv pro zvýšení odolnosti betonu proti žáru jsou lehká kameniva. Mezi nejpoužívanější uměle vyráběná kameniva, která se používají do betonu, patří kameniva z vypálených expandovaných jíílů. Při expandování dochází k tvorbě pórové struktury. Zvýšení pórové struktury má za následek zlepšení tepelně izolačních vlastností. Tyto kameniva mají vysokou tepelnou stabilitu až do teploty okolo 1 000 °C. Z tohoto důvodu je více než vhodné pro betony s vysokou požární odolností. Je tu ovšem jedno velké úskalí. S vyšší pórovitostí se zvyšuje také nasákavost. Tuto vlastnost při zrání betonu bereme jako pozitivní, protože při hydrataci cementu dochází k uvolňování vody z pórů. Naopak při požáru může působit tato vlastnost silně negativně. Voda nahromaděná v kamenivu může zapříčinit explozivní odprýskávání. [23]

3.6.3. Vlákna

Velkým nedostatkem všech materiálů pojených cementovým tmelem (beton) je zrod mikrotrhlin a trhlin ve struktuře. Vznikající trhliny jsou příčinou snížení pevnosti nebo zhroutení celého kompozitu. Přítomnost trhlin lze bohužel předpokládat v každém betonu a jejich počet a velikost má vliv na pevnost a trvanlivost. Použití vláken do betonu nám může pomoci ke snížení vzniku a šíření trhlinek, a tím také pozitivně ovlivní odolnost betonu při působení vysokých teplot. Klasickou výztuží není tohoto efektu dosaženo nebo jen velmi omezeně. Vlákna nemůžeme považovat za výztužení jako takové, protože jsou orientována všesměrně. Při vznikaní trhlin se začne na vlákna, směřující napříč trhlinami, přenášet tahové napětí. Vlákna tak působí přímo ve směru namáhání a částečně mohou distribuovat vzniklé napětí v betonu. [21] [25]



Obrázek 19: Schématické znázornění vlivu vláken na omezení vzniku a rozvoje trhlin [25]

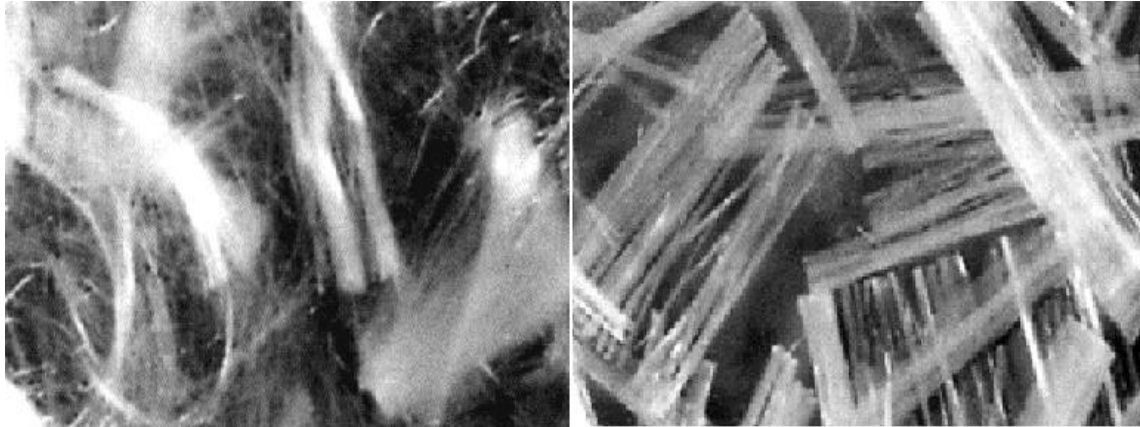
3.6.3.1. Polypropylenová vlákna

Polypropylenová vlákna (PP) vytváří vysoce významnou skupinu materiálů používaných pro rozptýlenou výztuž. Pokud se podíváme do různých zdrojů literatury či studií, zjistíme, že uvádějí zejména následující přínosy:

- omezení vzniku a rozvoj plastických smršťovacích trhlin v počátcích tuhnutí a tvrdnutí betonu;
- omezení vázaných objemových změn a vznik trhlin při vysychání;
- zvýšení pórovitosti a permeability pro odcházející páru při vzniku požáru;
- zvýšení houževnatosti a odolnosti proti rázům. [25]

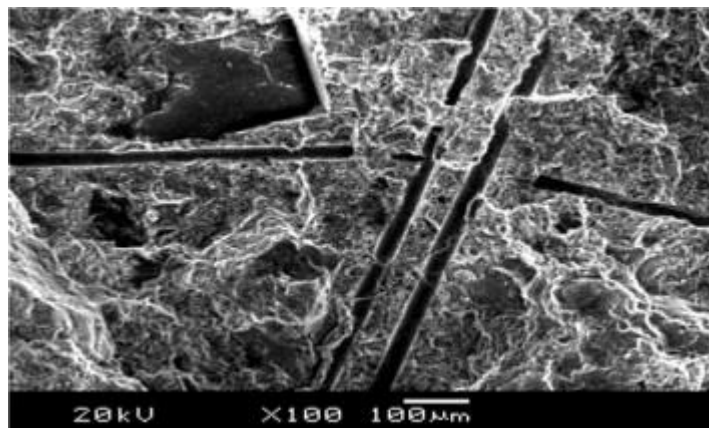
Dále je z těchto studií patrné, že přidáním dávky do 1 % těchto polypropylenových vláken neovlivníme výrazně pevnost v tlaku i v tahu za ohybu. V dnešní době jsou pro vyztužování cementových matric a betonů běžně užívána vlákna PP tří typů, které se liší způsobem výroby:

- vlákna monofilamentní – vyráběna rozvlákněním z taveniny, protlačováním z taveniny, protlačováním tryskou do vzduchu, produktem jsou mikroválka od 15 do 40 μm i makroválka průměru od 0,3 až do 1 mm;
- vlákna fibrilovaná – vyráběná fibrilací (rozvlákněním) předepnuté fólie;
- vlákna sdružená – vytvořená složením z jednotlivých vláken, která vznikla výrobními postupy uvedenými v předešlých odrážkách. [24] [25]



Obrázek 20: Vlevo – PP monofilamentní vlákna, vpravo – PP fibrilovaná vlákna [32]

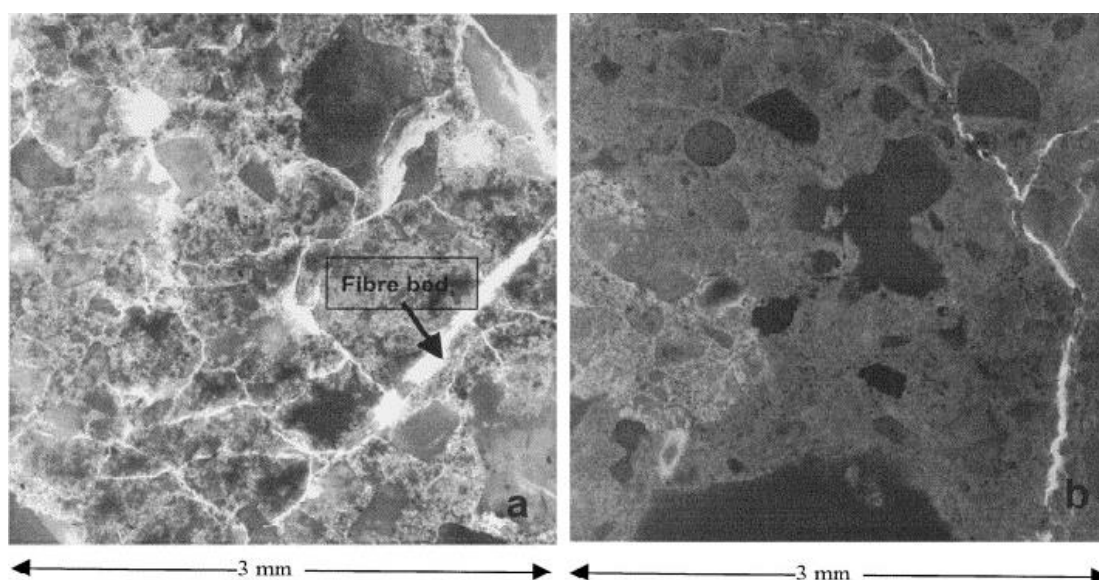
Jak už je uvedeno, přidáním polypropylenových vláken do betonu při požáru zvýšíme pórovitost a permeabilitu. Při požáru totiž vzniká vysoký pórový tlak, který převyšuje hodnotu pevnosti betonu v tahu a který je hlavním důvodem explozivního odprýskávání betonu. Při teplotách vyšších jak 170 °C dochází k roztavení PP vláken. Po vyhoření těchto vláken vzniká hustě protkaný prostor, ve kterém se může vzrůstající tlak vodní páry rozpínat nebo dokonce odcházet z betonu k volnému okraji. [26]



Obrázek 21: Kanálky v betonu vzniklé v důsledku tání PP vláken [36]

Dávkování PP vláken se pohybuje v rozmezí 0,8 – 1,1 kg/m³. Je však k zamyšlení a diskuzi, jestli zvýšení dávky polypropylenových vláken vede ke snížení explozivního odprýskávání. Několik výzkumů se snažilo vyřešit otázku použití nejvhodnějších vláken k zabránění odprýskávání. U jedné z těchto studií byla pozornost zaměřena na druh materiálu včetně geometrie vlákna. Z prezentovaných závěrů je možné usuzovat, že použití užších a delších vláken je mnohem vhodnější, než zvýšení dávky standardních vláken. [36]

Ve studii od KALIFA, CHÉNÉ a GALLÉ bylo pozorováno množství trhlin při nárůstu teploty. Toto měření bylo prováděno pomocí optického mikroskopu na betonovém povrchu, který byl vyleštěný a naimpregnovaný fluorescenčním přípravkem (pryskyřicí). Nejzajímavější a nejpřekvapivější závěr z této studie spočívá v porovnání mezi dvěma betony při teplotě expozice 400 °C, jak je vidět na obrázku č. 22. [28]



Obrázek 22: Množství trhlin při teplotě 400 °C, kde bílá barva znázorňuje trhliny a lůžka po vláknech naplněná pryskyřicí (vlevo – beton s PP vlákny, vpravo – obyčejný beton) [28]

Na snímku z mikroskopu (obrázek č. 22) je možné u betonu, kde byla použita polypropylenová vlákna o tloušťce 50 μm a délce 20 mm, pozorovat výskyt mnohem vyšší hustoty trhlin než u obyčejného betonu. V betonu, kde byla použita vlákna, byly trhliny velmi tenké (téměř 1 μm) a tvořily velmi hustou síť. V obyčejném betonu byly trhliny silnější (odhadem 10 μm) a překonávaly výrazně větší vzdálenost až docházelo k vytvoření trhlin mezi hrubými zrny kameniva. Odlišné vytvoření trhlin je způsobeno účinností vláken, která pomáhaly lokalizovat a zachytit trhliny. Tímto přispěly distribuci mikrotrhlin. [28]

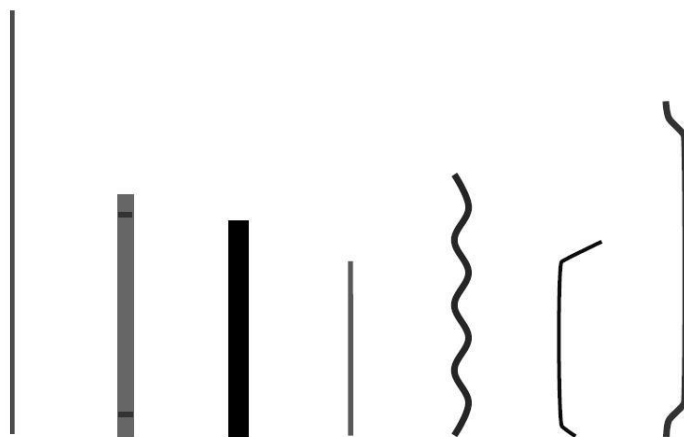
3.6.3.2. Ocelová vlákna

Je obecně známé, že přidáním ocelových vláken do betonu přinášíme zvýšení mechanických vlastností betonu. Toto odlišné chování betonu s vlákny oproti betonu prostému je vidět už v prvních hodinách tuhnutí. Nejvíce se ale tento rozdíl projeví po tvrdnutí cementové matrice, kdy už jsou vlákna pevně zakotvena. Nejvíce se zvýšení mechanických vlastností projevuje u pevnosti v tahu a pevnosti v tahu ohybem. Lze tedy obecně konstatovat, že podpora vláken spočívá především pro tahová napětí a distribuci tohoto napětí v betonu. Velmi důležitá je i skutečnost, že ocelová vlákna brání vzniku smršťovacích trhlin a zvýšení odolnosti proti explozivnímu odprýskávání betonu. Dávkování těchto vláken se pohybuje okolo 20 až 40 kg/m³. [29]

Ocelová vlákna je možné rozdělit do několika základních skupin. První dělení je charakterizováno základním tvarem a průřezem a poté dle druhu materiálu, ze kterého jsou vyrobená. Hlavní a také nejpoužívanější skupina je tvořena vlákny s typickými kotvícími upravenými konci, které můžeme vidět na obrázku č. 23. [30]

Délka takovýchto vláken se pohybuje od 10 do 70 mm dle použití. Jejich průřez je ve tvaru kruhového nebo obdélníkového ve formě:

- rovná vlákna s hladkým povrchem;
- rovná vlákna s profilovaným povrchem;
- zvlněná vlákna – vlákna s koncovými ohyby;
– vlákna s koncovými kotvícími ohyby a rílováním;
- segmentová vlákna – pozinkovaná a antikorozní vlákna;
– speciální vlákna. [30]

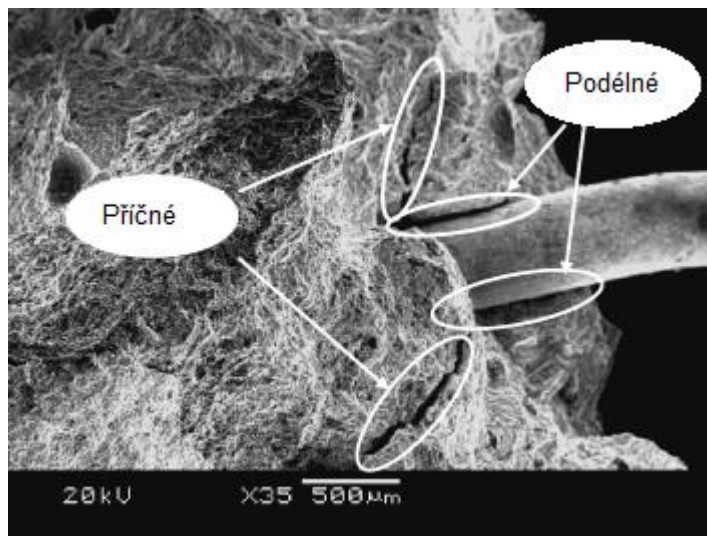


Obrázek 23: Různé formy a průřezy ocelových vláken [33]

Používáním ocelových vláken do betonu, který je zatížen vysokými teplotami lze ovlivnit šíření trhlin a tím potenciálně zlepšit soudržnost betonu. Pro dávkování vyšší než 80 kg ocelových vláken na 1 m³ betonu však ale nedochází k významnému zlepšení požadované odolnosti, ale naopak ke zhoršení vlastností, protože dochází k významnému rozdělení jednotlivých fází hmoty betonu a tvoření shluků. [29]

Autoři A. Lau a M. Anson ve své publikaci dospěli k závěru, že začlenění ocelových vláken zůstává prospěšné pro beton, který byl vystaven vysokým teplotám až do 1 200 °C. Přidáním ocelových vláken vedlo ke zvýšení mechanických vlastností a vyšší odolnosti vůči účinkům zahřívání. Docházelo k zvýšení soudržnosti a zvýšení zbytkové pevnosti. [34]

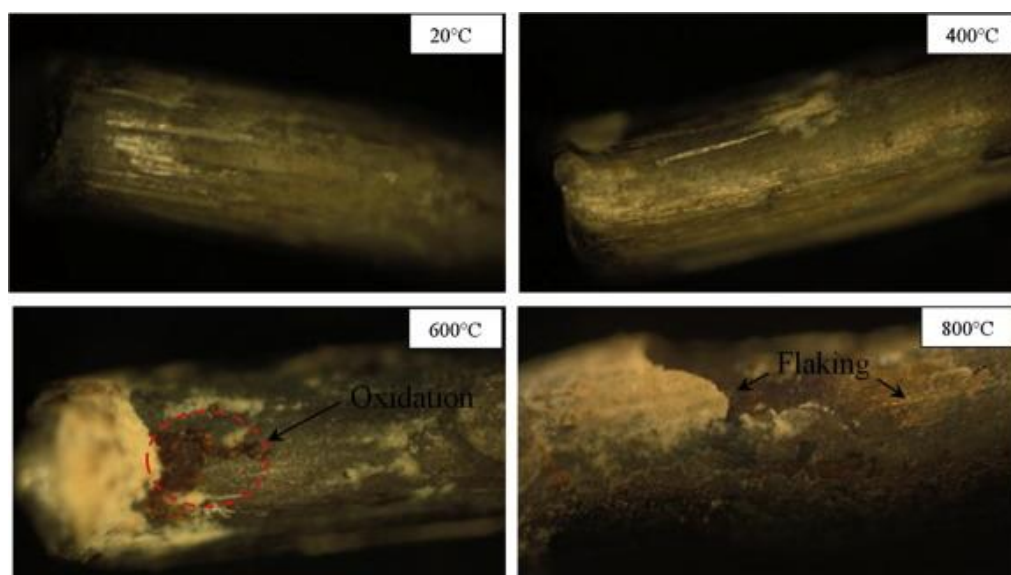
Avšak jiná studie došla k závěru, že po přidání ocelových vláken do betonu byly pozorovány i negativní účinky po vystavení velmi vysoké teplotě. Příčné a podélné trhliny mezi maticí a ocelovými vlákny se objevily v důsledku různých koeficientů teplotní roztažnosti, jež jsou vidět na následujícím mikroskopickém snímku (obrázek č. 24). Po teplotě 750 °C bylo pozorováno částečné natavení vláken. Takto natavená vlákna vyplnily trhliny a staly se křehčími. Poté docházelo k lomu a kolapsu celého betonu. Je tedy otázkou, zda používání ocelových vláken vede ke zvýšení odolnosti betonu proti působení vysokých teplot. [31]



Obrázek 24: Podélné a příčné trhliny mezi maticí a ocelovými vlákny po vystavení 900 °C. [36]

S používáním ocelových vláken do betonu se pojí jedna důležitá věc, která je mnohdy opomíjena, ale velmi důležitá. Je známo, že selhání betonu s ocelovými vlákny silně souvisí s mechanismem vytažování vláken, tj. soudržnosti a kotvení vlákna s cementovou matricí. Tento efekt zahrnuje oddělování vláken od matrice a s tím spojené tření, které zde vzniká. Tyto zkoušky prováděli pánové Naamanem a Najmem na různých typech ocelových vláken (hladké, deformované a s háčkovým zakončením) vsazených do cementových matric při normálních a poté při vysokých teplotách. Výsledky jasně ukázaly, že deformovaná vlákna odolávala daleko více vytažení než vlákna s háčkovým zakončením. U háčkového zakončení vlákna, při namáhání tahem, docházelo k narovnání a dále se chovala jako vlákno s rovným zakončením. Jak bylo očekáváno, síla vytržení se zvyšovala s délkou použitého vlákna. Z výsledků zkoušek bylo zřejmé a očekávané, že s rostoucí teplotou odolnost proti vytažení klesá. Důvodem bylo narušení rozhraní mezi vláknem a matricí, které ovlivnilo přilnavost a tření. [35]

Po vyzkoušení betonových vzorků byla vlákna vytažena a analyzována pomocí optického mikroskopu. Z následujícího obrázku č. 25 je patrné, že vlákna uložená v betonu, který byl vystaven teplotám vyšším jako 400 °C, vykazovala výrazné zhoršení povrchu ve srovnání s vlákny z betonu, který byl vystaven nižším teplotám. Vlákna vytáhnutá ze vzorků zahřátých na 400–800 °C jasně změnila barvu a na vláknech se vytvořil zkorodovaný povrch. Tyto změny byly způsobeny oxidačním procesem, který vedl k poškození povrchu. Výrazněji se projevil při vyšších teplotách. U teplot 600 a 800 °C dále sledujeme důsledek různé teplotní roztažnosti cementového tmelu a ocelového vlákna ve formě odloupenutí vrstvy cementového tmelu z ocelového vlákna. [35]



Obrázek 25: Poškozená vlákna, která byla vytažena z testovaného betonu [35]

3.6.3.3. Skelná vlákna

U betonu vyrobeného se skelnými vlákny se očekává, že bude mít delší životnost při vystavení náročným podmínkám. Skelná vlákna s krátkou délkou primárně zamezují šíření mikrotrhlin a do jisté míry mohou zvýšit konečné mechanické vlastnosti, zatímco dlouhá řídí vývin makrotrhlin. Mechanické vlastnosti se zlepšují s poměrem objemu vláken, ale jak už to bývá pouze jen do určité hranice. Dávkování těchto vláken se pohybuje mezi 0,5–1,2 kg/m³. Pevnost v tahu cementového kompozitu vyztuženými skelnými vlákny závisí na délce, disperzi a orientaci vlákna. [37]

V čínské studii zkoušeli vliv délky a množství na vlastnosti cementového kompozitu. Mechanické vlastnosti se po přidání vláken do betonu zvýšily, ale musí být dáno vhodné množství. Zbytkové mechanické vlastnosti se zvýšily s množstvím přidaného skelného vlákna a s jeho délkou. Beton s těmito vlákny snížil tepelnou vodivost, která je důležitá v případě požáru u betonové konstrukce. [38]



Obrázek 26: Skelná vlákna [38]

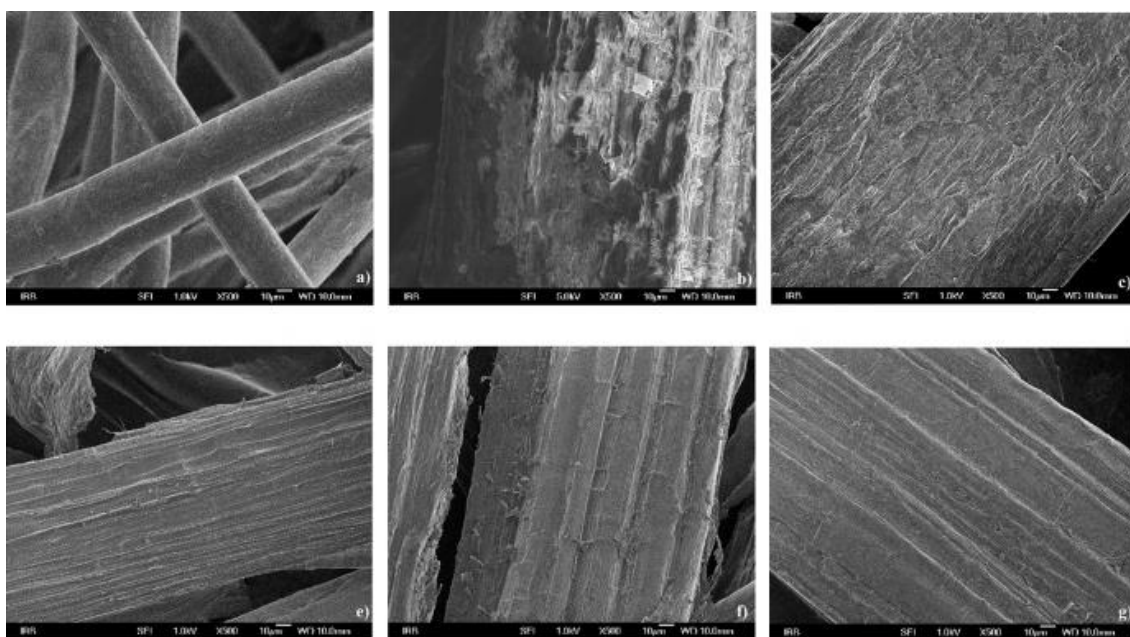
V tabulce č. 3 jsou porovnávány některé charakteristické vlastnosti polypropylenových, skelných a ocelových vláken.

Tabulka 3: Vybrané charakteristiky různých typů vláken [25]

Materiál vlákna	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Protažení při přetržení [%]	Průměr vlákna [μm]	Hustota [kg/m ³]
PP – vlákna	200–700	3,5–18	5–40	10–300	910
Skelná vlákna	1 500–3 600	60–90	2–4	10–15	2 700
Ocelová vlákna	1 500–3 800	170–300	1–2	100–600	7 850

3.6.3.4. Celulózová vlákna

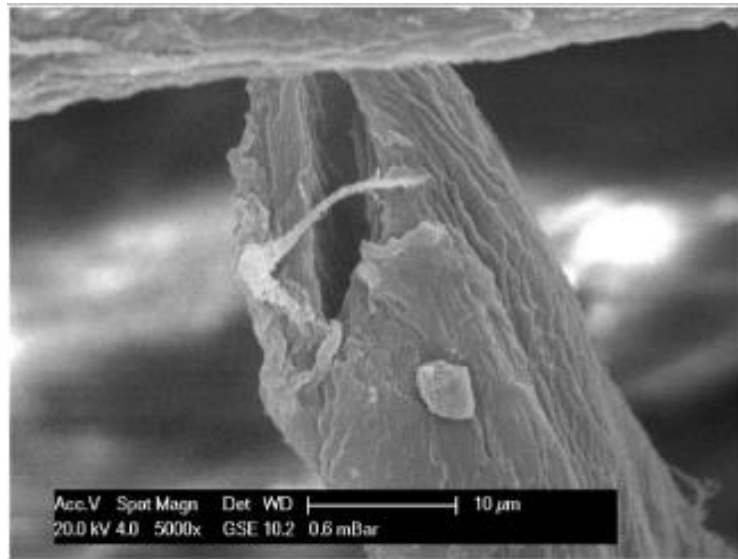
Mnoho zajímavých studií a výzkumů je věnováno použití celulózových vláken a jejich účinkům na cementový kompozit. Hlavní chemickou složkou je celulóza, hemicelulóza a různé množství ligninu. Celulózová vlákna vykazují řadu důležitých výhod jako je nízká cena, široká dostupnost, nízká hmotnost, biologická rozložitelnost a stabilní mechanické vlastnosti. Možné problémy spojené s těmito vlákny mohou být špatná mezifázová adheze mezi celulózovým vláknem a matricí, omezená teplotní stabilita kompozitu a špatná separace a disperze vláken. Tyto nevýhody lze eliminovat úpravou vláken. Nejúčinnější a nejvýhodnější se ukázalo alkalické ošetření (NaOH, Na₂SO₃). [40]



Obrázek 27: a) PP vlákno, b) Konopné vlákno bez ošetření, c) Konopné vlákno sterilizované, e) Konopné vlákno po 5% NaOH, f) Konopné vlákno po 2,5% NaOH + 2% Na₂SO₃, g) Konopné vlákno po 5% NaOH + 2% Na₂SO₃. [40]

Nejčastěji studované formy vláken užívané k zhotovení celulózových cementových kompozitů jsou vyrobeny z primárních nebo sekundárních surovin. Z primárních surovin je nejvíce studováno konopí, juta nebo sisal. Další možností je využití měkkého či tvrdého dřeva nebo zemědělského odpadu. Sekundární skupina materiálů se získává recyklací a rozvlákněním novinového papíru. [39]

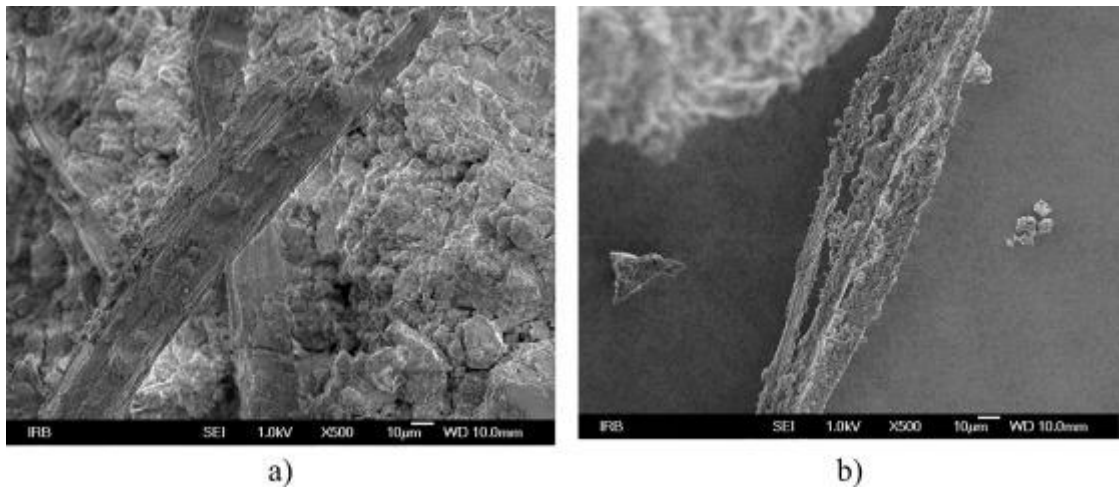
Vlastnosti betonu vyztuženého celulózovými vlákny ovlivňuje mnoho faktorů jako jsou typ vlákna, geometrie, dávkování, návrh směsi, míchání, ukládání a podmínky tvrdnutí. Celulózové vlákno má velmi speciální mikrostrukturu, které uvnitř obsahuje nepřetržitou dutinu. Tato dutina slouží jako zásobárna vody k podpoření hydratace cementu během zrání. Toto podpoření je prospěšné pro zajištění homogenní a husté mikrostruktury. Jsou tedy vhodná pro tzv. samoošetřování betonu. [43]



Obrázek 28: Průřez celulózového vlákna z kůry měkkého dřeva (Celtis) [43]

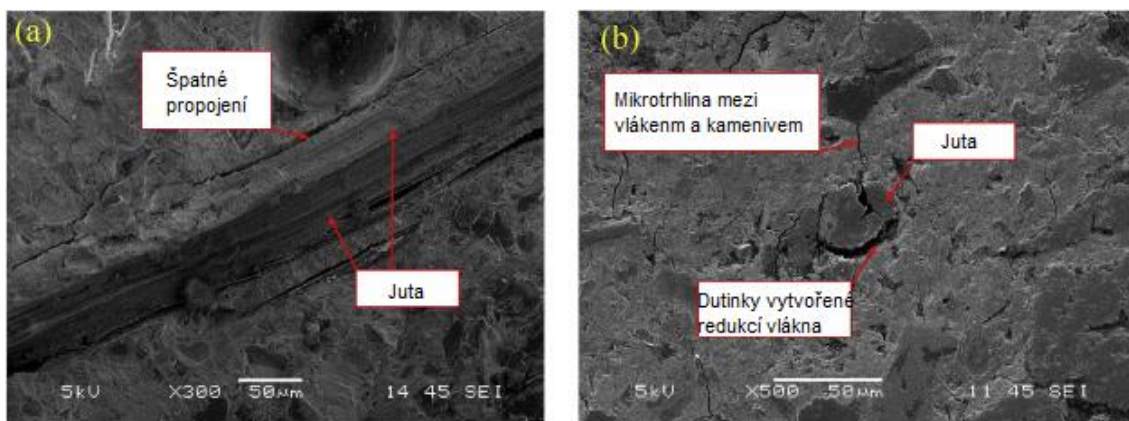
Díky absorpční schopnosti je během procesu míchání patrná hodnota spotřeby vody. Tato hodnota je vyšší, než u pevných vláken jako jsou PP, skelná nebo ocelová vlákna. Během procesu tvrdnutí je tato absorpční voda extrahována. Výsledkem je vyschnutí a zmenšení vlákna. Prostory vzniklé smrštěním vlákna a dutiny ve vláknech pomáhají pojmout tlak vodní páry a tím zlepšit požární odolnost. [43]

V souvislosti s ekologickou zátěží a zdroji surovin zkoumal Grubeša a kolektiv vliv konopných vláken na požární odolnost. Připravili referenční beton, beton s PP vlákny a betony s různými dávkami konopných vláken. Oba typy vláken přispěly ke tvorbě kanálků, čímž se zlepšila požární odolnost. Jak je vidět na obrázku č. 29, neúplně rozpadnuté konopné vlákno zvyšuje propustnost a zároveň zabraňuje šíření trhlin, které při teplotě 400 °C začínaly vznikat. Tímto efektem mohou dokonce konopná vlákna ještě zlepšit požární odolnost. Z pohledu zbytkových mechanických vlastností, jako je pevnost v tlaku, nebylo pozorováno výrazné ovlivnění použití těchto vláken. [40]



Obrázek 29: Konopná vlákna a) před vystavením vysoké teploty, b) po vystavení vysoké teploty [40]

Výsledky testů používání jutových vláken, místo syntetických vláken jako jsou např. polypropylenová, vycházejí dost obdobně. Problémy jsou jako u všech organických vláken s adhezí mezi vláknem a cementovou matricí, jak je možné vidět na obrázku č. 30 vlevo (a). Dále na tomto obrázku vpravo můžeme vidět redukci vlákna, která proběhla při teplotě 200 °C. Po této redukci má vodní pára možnost se pomocí těchto vytvořených dutin rozpínat nebo odcházet z betonu. Další hlavní sledované parametry byly pevnost v tlaku a doba odlupování. Je zřejmé, že přidáním vláken se sníží objemová hmotnost a zvýší pórovitost. Tímto krokem se ale současně sníží pevnost v tlaku. Udává se, že každé 1 % vzduchu snižuje pevnost v tlaku až o 5 %. Doba odlupování se snížila díky vytvoření dutinek, díky kterým se vodní pára transportuje z betonu. [41] [42]



Obrázek 30: Jutové vlákno v betonu a) při pokojové teplotě a b) při teplotě 200 °C [42]

4. Experimentální část

Chování betonu při vysokých teplotách je jednou z podstatných a důležitých oblastí ve stavebnictví. Působení vysokých teplot způsobuje nepříznivé účinky na vlastnosti betonu, které mohou způsobovat nejen škody na majetku, ale také ohrožovat lidské životy. Je proto důležité najít vhodná řešení pro zlepšení těchto vlastností při zvyšujících se teplotách, která zajistí především bezpečnost při užívání či provozu konstrukcí. Řešením tohoto problému je především vhodná volba vstupních surovin, které jsou proti teplotnímu zatížení odolné. Jedna ze známých možností zvýšení odolnosti betonu při teplotním zatížení je začlenění vláken do struktury betonu. Různé typy vláken přispívají svými funkcemi pro zvýšení požární odolnosti. K nejpoužívanějším typům vláken se řadí na prvním místě vlákna polypropylenová, dále pak ocelová a v poslední době je snaha začlenit do této oblasti také vlákna přírodní z důvodu pozitivních ekologických dopadů.

Z tohoto důvodu bylo v experimentální části cílem studium ověření aktuálních poznatků o možnostech použití vhodných vstupních surovin a různých typů vláken jako opatření při vysokoteplotním zatěžování betonu se zaměřením na ekologické varianty vláken vhodných pro zvýšení požární odolnosti.

4.1. Vliv polypropylenových a ocelových vláken na odolnost betonu proti působení vysokých teplot

Z mnoha studií, které se věnují otázce používání polypropylenových a ocelových vláken, byly zpracovány výsledky a vyhodnocení zajímavé studie zabývající se vlivem ocelových nebo polypropylenových vláken na chování betonu za vysoké teploty sledující odstřelování betonu (spalling) a mechanické vlastnosti. Tato studie koresponduje i s dalšími studii a jejich výsledky. V této studii byly připraveny betonové směsi s dvěma druhy kameniv, s polypropylenovými a ocelovými vlákny s rozdílnou geometrií a dávkováním. Cílem bylo studování mikrostruktury, tepelné a mechanické vlastnosti betonu. [50]

V této studii byl použit portlandský cement CEM I 52,5 N. Byly použity dva druhy kameniv. Prvním typem bylo vápencové kamenivo s 90% čistotou a druhým typem bylo křemičito-vápenaté kamenivo. Frakce byly rozděleny na drobnou 0–4 mm a hrubou 4–20 mm. Byly vybrány 3 typy vláken – monofilamentní polypropylenová vlákna (PP) od Duomix a Krampeharex kruhového profilu, dále vysoce uhlíková galvanizovaná ocelová vlákna (S) Dramix RC–80/30–CP se zahnutými konci. Vlastnosti vláken jsou uvedeny v tabulce č. 4. K dosažení požadované zpracovatelnosti betonové směsi byla použita velmi účinná superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátu Cimfluid 2002. [50]

Tabulka 4: Vlastnosti polypropylenových a ocelových vláken [50]

Typ vlákna	Průměr vlákna [μm]	Délka [mm]	Hustota [kg/m ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
PP Duomix M12	32	12	910	250	3,5-3,9
PP Krampeharex	32	6	910	300	3,7
S Dramix RC-80/30-CP	380	30	7 800	3 070	210

V této studii byly studovány čtyři druhy betonových směsí:

- referenční beton bez vláken:
 - s vápenatým kamenivem (Referenční);
 - s křemičito–vápenatým kamenivem (ReferenčníX);
- beton s polypropylenovými vlákny (CPP);
- beton s ocelovými vlákny (CS);
- beton s kombinací polypropylenových a ocelových vláken:
 - s vápenatým kamenivem (CPPS);
 - s křemičito–vápenatým kamenivem (CPPSX). [50]

Všechny uvedené druhy betonových směsí obsahují 475 kg/m³ s vodním součinitelem 0,38. Výsledky zkoušky konzistence betonů sednutím kužele betonu bez vláken se pohybovaly mezi 160–210 mm a betonů s vlákny od 100 do 150 mm. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v tabulce č. 5. [50]

Tabulka 5: Návrh receptur betonových směsí v kg/m³ [50]

Označení	Cement	Drobné kamenivo	Hrubé kamenivo	Voda	Plastifikační přísada	Ocelová vlákna	PP vlákna
Referenční	475	885	884	181	1	–	–
ReferenčníX	475	816	804	181	0,86	–	–
CPP 0,75	475	885	883	181	1,14	–	0,75
CPP 1,5/12 mm	475	885	883	181	1,14	–	1,5
CPP 1,5/6 mm	475	885	883	181	1,14	–	1,5
CS 60	475	867	866	181	2,85	60	–
CPPS 0,75-30	475	874	873	181	2,42	30	0,75
CPPS 1,5-30	475	874	873	181	2,42	30	1,5
CPPS 0,75-60	475	867	865	181	2,99	60	0,75
CPPSX 1,5-30	475	796	807	181	1,85	30	1,5

Zkoušení betonů bylo prováděno na válcových tělesech o průměru 150 mm a výšce 300 mm s důrazem na zamezení ztráty vlhkosti, proto byla tělesa uložena v prostředí s vysokou relativní vlhkostí při teplotě 20 ± 2 °C po dobu 90 dnů od výroby. Teplotní zatěžování bylo provedeno s nízkou rychlostí zahřívání v elektrické peci. V peci byl realizován ohřev na teploty 300, 600, 750 a 900 °C. Nárůst teploty byl nastaven na 0,5 °C/min a doba výdrže při nejvyšší teplotě byla 1 hodina. [50]

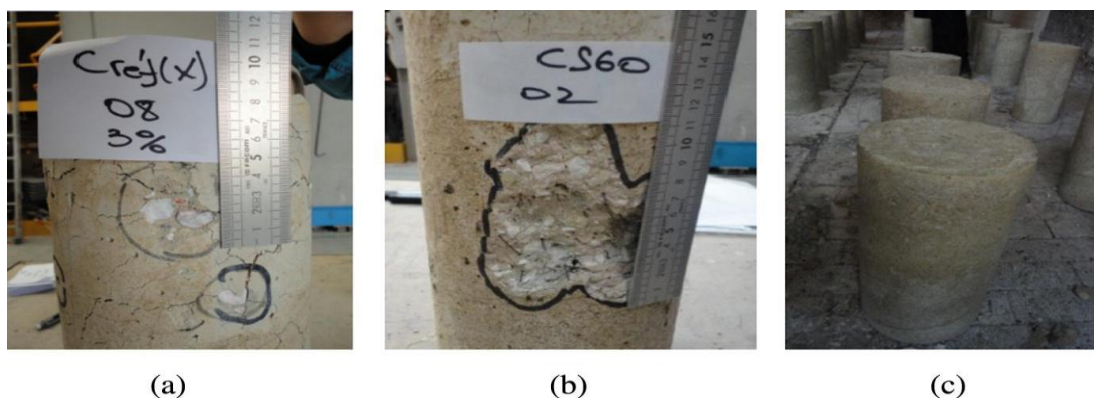
První sledovanou vlastností byla závislost citlivosti na teplotním zatížení, jejichž výsledky uvádí tabulka č. 6. Je zde vidět počáteční vlhkost a rozsah poškození vzorků po teplotním zatížení, které můžeme vidět také na obrázku č. 31. Betony obsahující směs vláken nevykazovaly žádné známky odprýskávání i přes značný obsah vlhkosti. U betonů s křemičito–vápenatým kamenivem (CX a CPPSX 1,5-30) došlo k plošnému odprýsknutí a tvorby husté sítě trhlin. Důvodem bylo méně stabilní kamenivo, které se nad 400 °C začalo rozpadat. Zde je názorný příklad, že i přes přídavek rozptýlené výztuže beton nedokázal potlačit důsledky chování nestabilního kameniva. [50]

U všech těles vyrobených z betonové směsi CS 60 došlo k explozivnímu odprýsknutí. Teplota pece byla 850 °C a teplota středu vzorku byla cca 140 °C. Velikost odprýsknutých kusů se pohybovala od 5 do 30 mm. Tento jev nebyl pozorován jen u této studie, jak je uvedeno v teoretické části. S velkou oblibou se pro eliminace odprýskávání používá přídavek PP vláken, který toto odlupování potlačí.

Tabulka 6: Souhrn poškození vzorků po teplotním zatížení [50]

Označení	Typ porušení			Obsah vlhkosti [%]
	Spalling	Trhliny na povrchu	Trhliny uvnitř	
Referenční	-	-	+	4,7
ReferenčníX	-	+	+	5,2
CPP 0,75	-	-	+	4,1
CPP 1,5/12 mm	-	-	+	5
CPP 1,5/6 mm	-	-	NE*	4,4
CS 60	+	+	-	4,5
CPPS 0,75-30	-	-	NE*	4,7
CPPS 1,5-30	-	-	-	4,8
CPPS 0,75-60	-	-	-	4,7
CPPSX 1,5-30	-	+	+	4,8

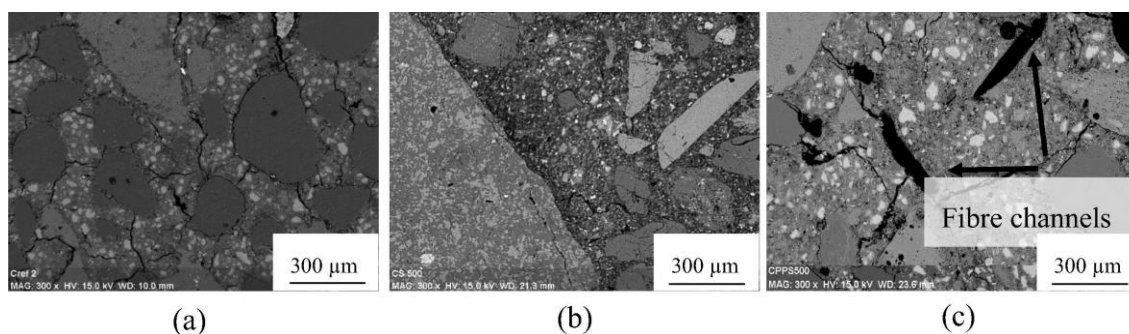
* NE – vzorky, které neprošli zkoumáním



Obrázek 31: Betonové vzorky po vystavení teplotnímu zatížení (a – CX, b – CS60, c – CPPS 0,75–60) [50]

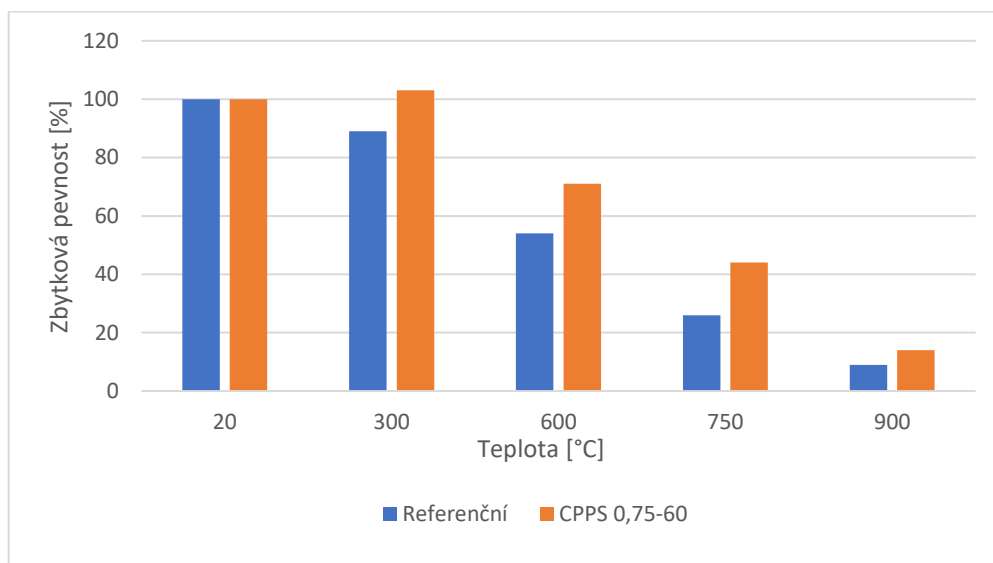
Betony s přídavkem PP (CPP 0,75, CPP 1,5/12 mm a CPP 1,5/6 mm) obsahovaly trhliny, které se šířily od střední části do vnější části válcového tělesa. Tyto trhliny se tvořily během zahřívání a při srovnání trhlín s CPPS byl patrný rozdíl mezi tvarem a šířkou trhlín. Z tohoto lze předpokládat, že ocelová vlákna zabraňovala jejich rozevírání a tvorbě makrotrhlín. [50]

Provedená mikrostrukturální analýza byla založená na pozorování elektronovým mikroskopem (SEM). Obrázek č. 32 ukazuje mikrostrukturu betonu referenčního, CS 60 a CPPS 0,75-60 po zatížení 500 °C. U referenčního betonu se vyskytuje mnohem více trhlín než u zbylých betonů. K tvorbě trhlín došlo na rozhraní cementového tmelu a kameniva. Tvorba těchto trhlín byla snížena přidáním vláken, jak ukazují snímky (b) a (c) na obrázku č. 32. Ocelová vlákna řídila vývoj trhlín a zabraňovala jejich rozevírání do velké šířky. U betonu CPPS 0,75-60 se vyskytovaly kanálky po vyhořelých PP vláknech, které jsou vzájemně propojeny mikrotrhlinami. Tyto mikrotrhliny vznikají expanzí PP vláken během tavení ve špičce vláken, protože jsou místem koncentrace tlaku. Takto vzniká síť trhlinek, jak lze pozorovat na obrázku č. 34 (c) i přes nízkou dávku vláken. [50]



Obrázek 32: Snímky vzorků po vystavení teploty 500 °C (a – CC, b – CS 60, c – CPPS 0,75-60) [50]

Provedení mechanických zkoušek na teplotně zatížených vzorcích umožnilo vyhodnotit vliv přidání PPF a SF na pevnost, tuhost a chování po vystavení vysokých teplot. Vývoj pevnosti v tlaku referenčního betonu a CPPS 0,75-60 je znázorněn na grafu č. 1. Chování lze rozdělit na dvě teplotní části. V první části, kde se měnila teplota betonu z teploty okolí do cca 300 °C, kde docházelo u referenčního betonu k poklesu pevnosti a u betonu se směsí vláken docházelo k zvýšení pevnosti. Tento výsledek je v souladu i s jinými studiemi zabývající se otázkou přidavku vláken s cílem zvýšit požární odolnost. Důvodem tohoto chování mohl být vyšší obsah vlhkosti, který vedl k hydrataci dosud nezhydratovaných zrn cementu a tím nepatrné zvýšení pevností. Druhá část (nad 300 °C) byla charakterizována vysokým poklesem pevnosti v tlaku, který byl způsoben rozdílnou tepelnou roztažností mezi cementovým tmelem a kamenivem, což způsobovalo vývoj trhlin a pokles pevností. Až do teploty 900 °C vykazoval beton s vlákny nižší ztráty pevnosti než beton bez vláken. Při 600 °C byla zbytková pevnost CPPS 70 % z počáteční pevnosti v tlaku. Rozdíl zbytkové pevnosti oproti referenčnímu betonu byl cca 20 %, což není rozhodně zanedbatelná hodnota. Při teplotě 900 °C se zbytkové pevnosti dorovnaly, protože byla vlákna v betonu natolik porušená, a proto přestala plnit svoji funkci. [50]



Graf 1: Zbytková pevnost v tlaku zkoušených referenčních a CPPS 0,75-60 vzorků [50]

4.2. Vliv celulózového vlákna na odolnost betonu proti působení vysokých teplot

Jak vyplývá z teoretické části, velkou snahou je snížit používání uměle vyráběných polymerních vláken, protože jejich výroba vede k vyšší ekologické zátěži. Proto v poslední době sílí snaha vývoje alternativních vláken pro použití do betonu. Jedinečný aspekt přírodních vláken je nízké množství potřebné energie k jejich výrobě. [40]

Z několika analyzovaných studií, které se zabývají použitím přírodních vláken za účelem zvýšení odolnosti betonu proti teplotnímu namáhání byla vybrána studie zabývající se působením vysoké teploty a mechanismy poškození betonu vyztuženého celulózovými vlákny. Vyhodnocení jednotlivých studií byly podobné a prezentují shodné závěry. Prezentují velmi zajímavé výsledky, které byly použity pro vývoj betonu s přírodními vlákny pro využití betonů do ostění tunelů. [43]

U této studie byl jako pojivo použit portlandský cement CEM I 42,5 R. Tento cement byl míchán s vysokoteplotním popílkem ke snížení vytvořeného podílu Ca(OH)_2 . Kamenivo bylo voleno s ohledem na vyšší odolnost proti vysokým teplotám. Jako hrubé kamenivo byl použit drcený vápenec, drobným kamenivem byl křemenný říční písek. Velikost částic hrubého kameniva byla 5–20 mm, u drobného kameniva 0–2 mm. K úpravě konzistence byla použita superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátu. [43]

Vláknová výztuž zde byla ve formě celulózových vláken s modifikací povrchu pro zvýšení adheze s cementovým tmelem. Tato vlákna byla vyrobena z celtisové kůry. Fyzikální a mechanické vlastnosti vláken jsou uvedeny v tabulce č. 7. [43]

Tabulka 7: Fyzikální a mechanické vlastnosti celulózových vláken [43]

Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Protážení při přetržení [%]	Průměr vlákna [μm]	Průměrná délka [mm]	Hustota [kg/m^3]
600–900	9–10	3,5	15–20	2,1–5,3	1 100

V rámci studie byly navrženy dvě receptury betonu – referenční beton bez vláken a beton s přísadkou vláken. Všechny suroviny byly optimalizovány pro konkrétní návrhovou pevnost C 25/30. Konečný návrh betonu je uveden v tabulce č. 8. U vyrobených čerstvých betonů byla konzistence betonu sednutím kužele 180 mm. U receptury CF byla konečná dávka vody upravena pro stejnou konzistenci jako u referenčního betonu. Obsah vzduchu v čerstvém betonu se pohyboval okolo 2 %. Zkušební tělesa byly krychle o hraně 100 mm. Po 24 hodinách byly vyjmuty a umístěny do vlhkého uložení na 28 dní. [43]

Tabulka 8: Návrh receptur betonu s celulóзовými vlákny v kg/m³ [43]

Označení	Cement	Popílek	Drobné kamenivo	Hrubé kamenivo	Voda	Plastifikační přísada	Vlákna
C	266	114	760	1 050	155	3	0
CF	266	114	760	1 050	155*	3	0,9

* konečná hodnota dávky vody byla upravena

Pro teplotní zatížení vyrobených vzorků byla použita odporová pec s maximální teplotou 1 200 °C a průměrnou rychlostí zahřívání 15 °C/min. Počáteční teplota betonových vzorků byla 20 °C. Po zahřátí betonu na nastavenou teplotu (300, 600, 800 a 1 050 °C) byla teplota udržována po stanovenou dobu výdrže (2,5; 4 a 5,5 h). Pec byla poté vypnuta a vzorky byly v peci pomalu ochlazovány na pokojovou teplotu. Mikrostruktura zatížených vzorků a vláken byla analyzována pomocí SEM snímků. [43]

Jak již bylo zmíněno, odpařování vody a rozklad složek betonu způsobuje ztrátu jeho hmotnosti. V tomto případě s rostoucí teplotou postupně až do teploty 200 °C začalo unikat viditelné množství vodní páry, což bylo důsledkem odpařování volné vody z betonu. Tento jev je běžný, který se při zatížení betonu vysokou teplotou objevuje. Po následném zahřívání se hydroxid vápenatý začal postupně rozkládat a při 600 °C zmizela bílá pára a beton byl dehydratován. Odchod vody při takto vysokých teplotách poškodí mikrostrukturu betonu a způsobuje odprýskávání, což je detailně popsáno v teoretické části práce. [43]

Jak je znázorněno na obrázku č. 33, neexistují žádné údaje pro referenční beton zatížený nad teploty 600 °C, protože vzorky tyto teploty nezvládly a došlo k odprýskávání a kompletní destrukci vzorků. Betonové vzorky s vlákny si však zachovaly integritu i při maximální zátěžové teplotě 1 050 °C pro všechny doby expozice teplotního zatížení. Patrná byla také změna barvy vzorků, jak je vidět na obrázku č. 33. [43]



Obrázek 33: Betonové vzorky po teplotním zatížení pro různé teploty a doby výdrže [43]

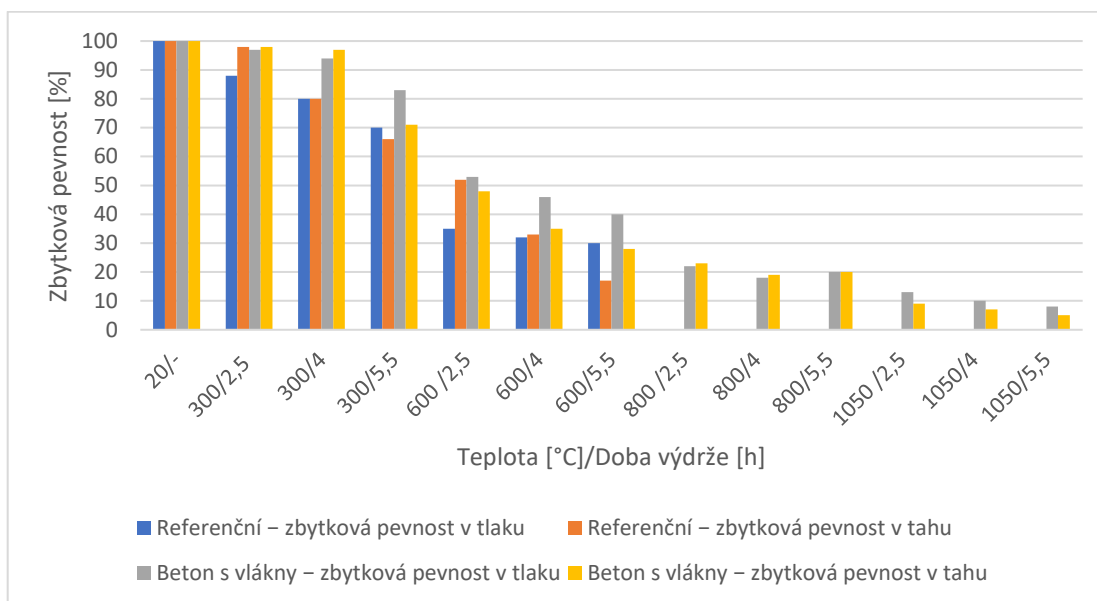
Při zatížení teplotou 300 °C se nevyskytly ani u jednoho betonu žádné makroskopické trhliny. U referenčního betonu se ale začaly objevovat u teploty 600 °C mikrotrhliny a větší póry. U betonu s vlákny se první trhlinky začaly objevovat až při teplotě 800 °C, čímž si udržely stálost a nedocházelo k destrukci struktury betonu a zhroucení. [43]

Dále bylo nutné vyhodnotit mechanické vlastnosti. Zbytková pevnost v tlaku byla kritickým a základním parametrem pro vyhodnocení odolnosti struktury betonu po vysokoteplotním zatížení. [43]

Při pohledu na tabulku č. 9 je hned patrný rozdíl mezi referenčním betonem a betonem, do kterého byla záměrně přidána vlákna. Po shlédnutí grafu č. 2 lze konstatovat, že přídavek celulózových vláken má pozitivní vliv na zlepšení odolnosti proti odlupování betonu a na zbytkové pevnosti při působení vysoké teploty pro různou dobu expozice. Referenční beton si lépe zachovával pevnost v tahu díky tomu, že teplota 300 °C je blízko bodu měknutí celulózového vlákna, jak bylo následně ověřeno. [43]

Tabulka 9: Vliv vysoké teploty na mechanické vlastnosti betonů s celulózovými vlákny [43]

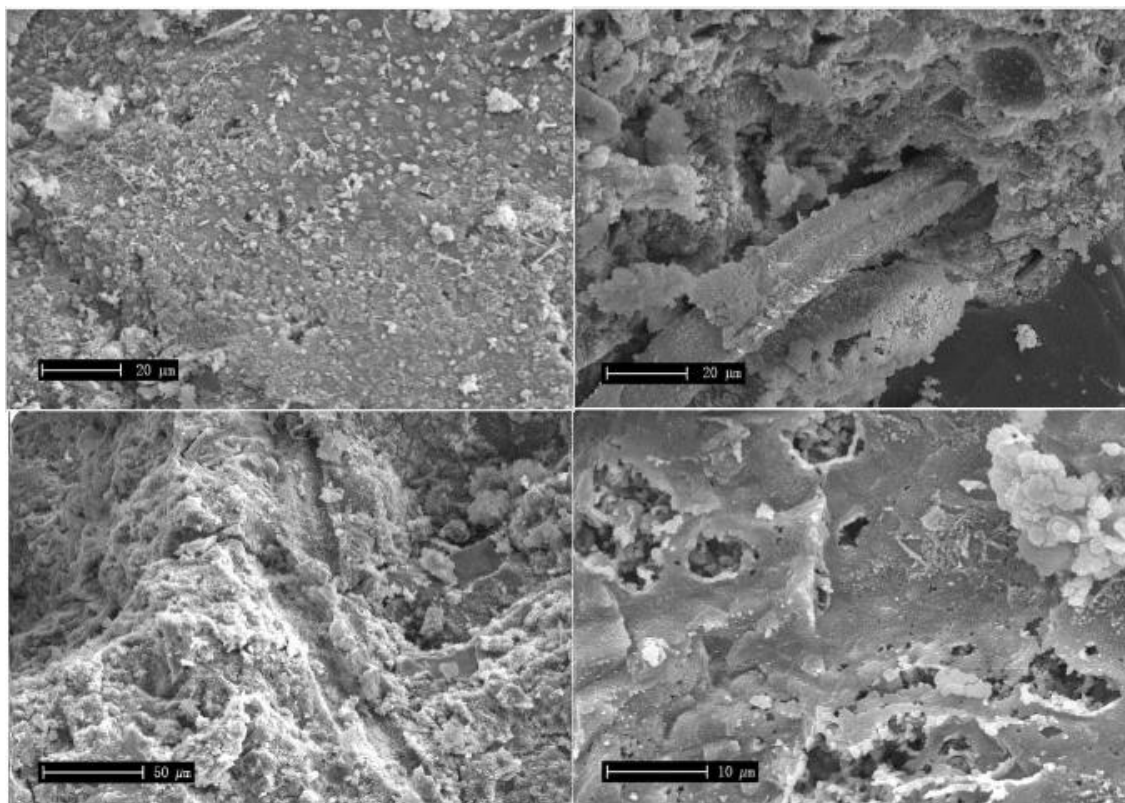
Označení	Teplota [°C]	Doba výdrže [h]	Zbytková pevnost v tlaku [%]	Zbytková pevnost v tahu [%]	
Referenční beton	20	–	100	100	
	300	2,5	88	98	
		4	80	80	
		5,5	70	66	
	600	2,5	35	52	
		4	32	33	
		5,5	30	17	
	Beton s vlákny	20	–	100	100
		300	2,5	97	98
4			94	97	
5,5			83	71	
600		2,5	53	48	
		4	46	35	
		5,5	40	28	
800		2,5	22	23	
		4	18	19	
		5,5	20	20	
1 050		2,5	13	9	
		4	10	7	
		5,5	8	5	



Graf 2: Závislost zbytkové pevnosti na teplotě a době výdrže teplotního zatížení betonů s celulóзовými vlákny [43]

V neposlední řadě bylo třeba se podívat do mikrostruktury pro detailní analyzování vysokoteplotní stability struktury betonu. Dále byl také sledován vývoj fyzikálně mechanických vlastností společně s teplotou a dobou výdrže.

Mikrostruktura betonu s vlákny při 20 °C byla mnohem kompaktnější než u referenčního betonu. Hydratační produkty u betonu s vlákny byly mnohem menší a kompaktnější, než tomu bylo u referenčního betonu bez vláken. Při teplotě 300 °C se u referenčního betonu začínaly objevovat první sítě trhlinek, jenž naznačil i pokles mechanických vlastností. Oproti tomu, jak je také vidět na obrázku č. 34 vpravo nahoře, v betonu s vlákny se objevilo několik nespojených mikrotrhlin, dále zde sledujeme smrštění celulóзовého vlákna a oddělení vlákna od cementové matrice. Některé původně spojené hydratační produkty se mírně rozložily. Při teplotách nad 600 °C (obrázek č. 34 vlevo dole) se většina vláken rozpadla. Důsledkem bylo vytvoření mnoho nespojených pórů v mikrostruktuře cementového tmele. Kromě tohoto můžeme sledovat i více mikrotrhlin propojených do sítí a více rozložené hydratační produkty. Na obrázku č. 34 vpravo dole po vystavení teploty 1 050 °C vidíme rozložené hydratační produkty, které byly ve formě skelné fáze. [43]



Obrázek 34: SEM snímky mikrostruktur CF (vlevo nahoře – 20 °C/–, vpravo nahoře –300 °C/4h, vlevo dole – 600 °C/4h, vpravo dole – 1 050 °C/4h) [43]

5. Závěr

Bakalářská práce je věnována studiu chování cementových betonů při působení teplotního zatížení, které je vyvozeno působením vysokých teplot. V úvodu samotné práce je shrnuto základní názvosloví a pojmy týkající se problematiky požární bezpečnosti a odolnosti, což úzce souvisí s požadavky na beton, který je cílený pro tyto aplikace. Jsou zmíněny požárně technické vlastnosti stavebních hmot a konstrukcí. Hlavní pozornost je věnována samotnému materiálu, kde je zásadní věnovat pozornost vstupním složkám pro výrobu betonu a jejich chování za vysokých teplot a jejich vlivu na výsledné vlastnosti betonu z pohledu požární bezpečnosti a zatížení vysokou teplotou. Na základě dostupné literatury pro tuto specifickou oblast je pozornost směřována především na chování cementového tmele a kameniva. Popsán je tedy vliv vysokých teplot na strukturu, mechanické a fyzikální vlastnosti betonu. Kromě základních vstupních složek pro výrobu betonu je důležitou částí práce pojednání o selhání betonu při narůstajícím tlaku vodní páry, která způsobuje odprýskávání (spalling). Jsou zde uvedeny mechanismy jednotlivých druhů odprýskávání. Důraz je kladen na popis explozivního odprýskávání, které má zásadní dopad na odolnost betonu proti účinkům vysokých teplot a je z hlediska bezpečnosti velmi nežádoucím jevem.

Dominantní část samotné práce tvoří otázka eliminace poškození betonu působením vysokých teplot. Tato část je věnována možnostem použití surovin, které mají pozitivní dopad na požární odolnost betonu při vysokoteplotním namáhání. Je třeba brát ohled na správný návrh betonu, protože i jedna nesprávně zvolená složka betonu může mít katastrofální následky. Na základě získaných poznatků pro zvýšení požární odolnosti betonu je vhodné zajistit vhodnou volbu vstupních složek betonu, například používat cementy s nízkým obsahem portlandského slínku nebo nižší množství portlandského cementu společně s příměsí, protože při hydrataci portlandského slínku se vytváří Ca(OH)_2 , ve kterém při zvýšení teploty dochází k rozkladu a ztrátě vody, což vede v první fázi ke ztrátě soudržnosti a ztrátě pevné struktury cementového kamene. Při volbě kameniva sledujeme zejména jeho teplotní deformace a teplotní stabilitu, což je opět velmi důležité pro soudržnost a zajištění pevné struktury, protože kamenivo tvoří nosnou kostru. Proto studie uvádí doporučení např. vápenatého kameniva před kamenivem s vysokým obsahem křemene, protože kamenivo vápenaté vykazuje dobrou teplotní stabilitu do cca 700 °C a během zvyšování teploty spotřebuje mnohem vyšší množství tepla při svém rozkladu. U kameniva křemičitého dochází k fázovým přeměnám už okolo 574 °C, které beton poškodí. Zajímavou alternativou je použití lehkého uměle vyrobeného kameniva, jenž má ale své úskalí. Díky vysoké nasákavosti voda nahromaděná v kamenivu může zapříčinit odprýskávání betonu.

Zvýšená pozornost je věnována použití rozptýlené výztuže, která funguje jako jedno ze zásadních opatření proti porušení a destrukci betonu při vysokých teplotách a brání poškození vlivem rozpínání vlhkosti uvnitř betonu. Z pohledu druhu vláken a materiálové báze se jedná především o polypropylenová, ocelová a celulózová vlákna.

Studie, které jsou věnovány použití PP vláken do betonu, dospěly k závěru, že PP vlákna při tepelném namáhání betonu usnadňují transport vlhkosti obsažené v betonu, díky tomu, že tvoří propojené sítě z vyhořelých lůžek a vytvořených mikrotrhlin. Použití těchto vláken a jejich pozitivní vliv na odolnost vůči působení vysokých teplot je již známo, ale stále je studován vliv a mechanismy působení těchto vláken ve vztahu k druhu vlákna, geometrii vlákna a dávkování těchto vláken. Při vzrůstu teploty je zásadní zvyšování hustot vzniklých trhlin a v souvislosti s rozvojem trhlin klesající tlak vodní páry. V důsledku toho PP vlákna zlepšují teplotní stabilitu betonu. Funkce těchto vláken je velmi známá a ověřená výsledky mnoha autorů a vlastnosti jsou studovány na běžných konstrukčních betonech, se zaměřením na aplikace, kde je třeba zajistit bezpečnost či odolnost při působení vysokých teplot, respektive požáru. Přednost PP vláken se využívá také u zvyšování požární odolnosti vysokohodnotných (HPC) a ultra vysokohodnotných betonů (UHPC). Díky tomu, že je jejich struktura natolik hutná a kompaktní, nemá vytvořená vodní pára prostor, do kterého by měla možnost expandovat. Z toho důvodu je u těchto druhů betonů vysoká náchylnost k odprýskávání, které vede k selhání betonu. Nejnovější trend vývoje u těchto vláken spěje k snížení bodu tání, aby ani při počátku expanze vodní páry nedocházelo k tlakovému namáhání, protože změna skupenství vody z kapalné fáze na plynou probíhá relativně za nízkých teplot, v závislosti na okolním tlaku.

Také u ocelových vláken bylo prokázáno snížení vytváření trhlin v betonu. Tyto vlákna mají v betonu při působení požáru zcela jinou funkci, než je tomu u polymerních vláken, protože ocelová vlákna řídí vývoj trhlin a zabraňují rozevírání trhlin. Tento efekt snižuje možnost uvolnění energie nahromaděné uvnitř betonu, což vede k vysokému statickému i teplotnímu namáhání a zvýšení tlaku vodní páry uvnitř betonu. Tyto faktory zvyšují riziko odprýskávání. Je tedy nezbytné vzít v úvahu komplexní řešení a vhodně volit jednak druh vlákna, ale také jeho množství.

Kombinace použití PP a ocelových vláken tedy umožňuje využít jejich chování v betonu při teplotním zatížení. PP vlákna přispívají ke vzniku trhlin, zároveň ale ocelová vlákna zabraňují jejich rozevírání a tvorbě hustých sítí trhlin. Na první pohled se jedná o protichůdné chování vláken v betonu na základě materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Ale vhodným návrhem lze z jejich chování vyvodit komplexní spolupůsobení, které

dokáže eliminovat či zabránit masivnímu odprýskávání betonu, které je nežádoucí. Tímto lze beton navrhnout ve smyslu vyšší odolnosti proti působení vysokých teplot.

Velmi zajímavým typem vlákna je celulózové vlákno. Ze závěrů a vyhodnocení publikací zabývajících se použitím celulózového vlákna jako opatření proti působení vysokých teplot na beton lze usoudit, že celulózové vlákno přispívá ke kvalitnější vnitřní struktuře betonu. Z důsledku zpevnění vyplývá pozitivní zlepšení odolnosti betonu proti vysokým teplotám. Celulózové vlákno má dva pozitivní principy fungování těchto betonů. Tím prvním je uvolňování veškeré naabsorbované vody z vlákna, která je naabsorbována při míchání betonu. Během zrání betonu je extrahována do matrice v době hydratace cementu (samošetření betonu) a tím vznikne více kompaktnější matrice betonu s vlákny. Druhým principem je chování při teplotách pod teplotu 600 °C, protože extrahování vody obsažené ve vláknu se celulózové vlákno smrští a vznikne prostor pro rozptýlení tlaku vodní páry s minimální ztrátou pevnosti. Okolo 600 °C začíná degradace vlákna, která viditelně oslabuje mechanické vlastnosti. Při degradaci vlákna dochází k tvorbě mikropórů. Po teplotě 1 000 °C se vnitřní struktura betonu úplně rozkládá, vnitřní mikrotrhliny se spojují do velkých trhlin a dochází ke kolapsu celé struktury. Jedná se o velmi zajímavý efekt, který má potenciál pro využití při působení vysokých teplot.

Studie věnovány využití polypropylenových a ocelových vláken potvrdily závěry o funkčnosti těchto vláken. PP vlákna podpořila vytváření kanálek pro odchod páry a ocelová vlákna zajistila nerozevírání vytvořených mikrotrhlin. Vyskytl se zde problém s tvorbou hustých sítí trhlin a odprýskávání v betonu s méně stabilním kamenivem, který nedokázal vyřešit ani přídavek rozptýlené výztuže. Na provedené mechanické zkoušce byl pozorován vliv přídavku vláken na zvýšení zbytkových pevností ve srovnání s referenčním betonem. Rozdíl zbytkové pevnosti betonu s vlákny oproti referenčnímu betonu po zatížení 600 °C činil 20 %, což není zanedbatelné.

Publikované závěry v o otázce přídavku celulózových vláken do betonu s cílem zvýšení požární odolnosti ukázaly možný a zajímavý směr výzkumu používání přírodních vláken. Z vyhodnocení vyplývá přispění k zvýšení požární odolnosti. Smrštění a degradace celulózových vláken podpořila transport vodní páry z betonu bez následků explozivního odprýskávání. Srovnání zbytkových pevností v tlaku i v tahu referenčního betonu a betonu s vlákny jasně ukazuje po celou dobu zatěžování při zvyšujících se teplotách pevnosti vyšší u betonu s celulózovými vlákny. U teploty 600 °C je rozdíl mezi referenčním betonem a betonem, kde byly použity celulózová vlákna, cca 20 %. Mikrostrukturální snímky potvrzují mechanismus, který se v betonu s celulózovými vlákny odehrává.

Velká pozornost zaměřená na použití celulóзовých vláken v oblasti požární odolnosti poukazuje na pozitivní vliv těchto vláken na odolnost betonu proti působení vysokých teplot. V případě celulóзовých vláken není provedeno tolik studií či výzkumných prací, jako je tomu v případě PP či ocelových vláken, ale závěry, které jsou dostupné jednoznačně poukazují na vhodnost jejich použití. Dalším faktorem je kladný vliv na ekologickou stopu, která je v případě celulóзовého vlákna velmi pozitivní. Zdrojem celulóзовého vlákna může být jednak přírodní zdroj, jako například buničina z měkkého nebo tvrdého dřeva, ale také může pocházet z recyklace, kdy dochází k zpětnému rozvláknění papíru. Celulóзовá vlákna by se v tomto směru jevila jako velmi zajímavý zdroj zvýšení požární odolnosti betonu. Ale je zde ještě nutné provést řadu experimentů a stanovení základních charakteristik, které jsou sledovány v této oblasti návrhu betonu, tj. betonu pro vyšší požární odolnost.

6. Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] BRADÁČOVÁ, Isabela. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. Brno: ERA, 2007. Technická knihovna (ERA). ISBN 978-80-7366-090-1.
- [2] KUPILÍK, Václav. Stavební konstrukce z požárního hlediska. Praha: Grada, 2006. Stavitel. ISBN 80-247-1329-2.
- [3] BRADÁČOVÁ, Isabela. Požární bezpečnost domu. 2., aktualiz. vyd. Brno: ERA, 2008. Stavíme. ISBN 978-80-7366-128-1.
- [4] KUPILÍK, Václav. *Konstrukce pozemních staveb: požární bezpečnost staveb*. 2., aktualiz. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. Stavíme. ISBN 978-80-01-04291-5.
- [5] KODUR, Venkatesh. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. ISRN Civil Engineering [online]. 2014, 2014, 1-15 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1155/2014/468510. ISSN 2090-5114. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2014/468510/>
- [6] Fire Safety Journal [online]. 2007, 42(8) [cit. 2020-02-19]. ISSN 03797112. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711207000148>
- [7] SIČÁKOVÁ, A. a kolektiv, New generation cement concretes – Ideas, Design, Technology and Applications, Košice, červen 2008. ISBN 978-80-553-0040-5
- [8] KRISHNA, D. Anupama, R S PRIYADARSINI a S NARAYANAN. Effect of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of Concrete. Procedia Structural Integrity [online]. 2019, 14, 384-394 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.05.047. ISSN 24523216. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321619300496>
- [9] MA, Qianmin, Rongxin GUO, Zhiman ZHAO, Zhiwei LIN a Kecheng HE. Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. Construction and Building Materials [online]. 2015, 93, 371-383 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815006765>
- [10] XIAO, Jianzhuang, Gert KÖNIG, Zhiman ZHAO, Zhiwei LIN a Kecheng HE. Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire Safety Journal* [online]. 2004, 39(1), 89-103 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1016/S0379-7112(03)00093-6. ISSN 03797112. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711203000936>
- [11] DRZYMAŁA, Tomasz, Wioletta JACKIEWICZ-REK, Mariusz TOMASZEWSKI, Artur KUŚ, Jerzy GAŁAJ a Ritoldas ŠUKYS. Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC). Procedia Engineering [online]. 2017, 172, 256-263 [cit. 2020-02-20]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.108. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817306148>
- [12] Izabela Gaweska. Thermal behavior of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties. Engineering Sciences. Ecole des Ponts ParisTech, 2004. English. <pastel-00001147>
- [13] PEŠKOVÁ, Šárka a Petr PROCHÁZKA. Impact of high temperature against structures of tunnel linings. Prague: Czech Technical University, 2008. CTU reports. ISBN 978-80-01-04081-2.
- [14] Journal of Materials Science [online]. 2004, 39(9) [cit. 2020-03-04]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18>

- [15] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [16] Fire design of concrete structures: materials, structures and modelling: state-of-art report. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. Bulletin. ISBN 978-2-88394-078-9.
- [17] SHUI, Zhonghe, Dongxing XUAN, Wei CHEN, Rui YU a Rui ZHANG. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2009, 23(1), 531-537 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807002516>
- [18] CHEIKH, Zemri, Bachir Bouiadjra MOHAMED, Wei CHEN, Rui YU a Rui ZHANG. Comparison between physical–mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2020, 23(1), 531-537 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00339. ISSN 22145095. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509520300115>
- [19] GMIRA, A., R.J.-M. PELLENG, I. RANNOU, L. DUCLAUX, C. CLINARD, T. CACCIAGUERRA, N. LEQUEUX a H. VAN DAMME. A Structural Study of Dehydration/Rehydration of Tobermorite, a Model Cement Compound. Characterization of Porous Solids VI, Proceedings of the 6th International Symposium on the Characterization of Porous Solids (COPS-VI) [online]. Elsevier, 2002, 2002, 23(1), 601-608 [cit. 2020-03-05]. *Studies in Surface Science and Catalysis*. DOI: 10.1016/S0167-2991(02)80186-0. ISBN 9780444512611. ISSN 22145095. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167299102801860>
- [20] ALAWAD, O.A., A. ALHOZAIMY, M.S. JAAFAR, A. AL-NEGHEIMISH a F.N.A. AZIZ. Microstructure analyses of autoclaved ground dune sand–Portland cement paste. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, 65, 14-19 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.040. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814003572>
- [21] HULL, D. a T.W. CLYNE. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. Cambridge solid state science series. ISBN 05-213-8855 4.
- [22] MASTORI, H., P. PILUSO, J.-F. HAQUET, R. DENOYEL a M. ANTONI. Limestone-siliceous and siliceous concretes thermal damaging at high temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 228 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.052. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819320811>
- [23] TAJRA, Feras, Mohamed ABD ELRAHMAN, Christian LEHMANN a Dietmar STEPHAN. Properties of lightweight concrete made with core-shell structured lightweight aggregate. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 205, 39-51 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.194. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819302272>
- [24] STARIKOV, Nikolaj a Petr PROCHÁZKA. Chemical and mechanical properties of fiber reinforced concretes. Prague: Czech Technical University in Prague, 2008. ISBN 978-80-01-04196-3.

- [25] KOLÍSKO, Jiří. Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů: Influence of short randomly distributed polypropylene micro and macro fibres on properties of cement mortars and concrete. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04072-0.
- [26] LI, Ye, Pierre PIMIENTA, Nicolas PINOTEAU a Kang Hai TAN. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2019, **99**, 62-71 [cit. 2020-03-24]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.02.016. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946518306504>
- [27] AĪTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-867-6939-9.
- [28] KALIFA, Pierre, Grégoire CHÉNÉ a Christophe GALLÉ. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research* [online]. 2001, 31(10), 1487-1499 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00596-8. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884601005968>
- [29] DŮĚENCI, Oğuz, Tefaruk HAKTANIR a Fatih ALTUN. Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 75, 82-88 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.005. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814012173>
- [30] YAN, Zhi-guo, He-hua ZHU a J. Woody JU. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **38**, 610-618 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.019. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812006812>
- [31] RUANO, Gonzalo, Facundo ISLA, Bibiana LUCCIONI, Raúl ZERBINO a Graciela GIACCIO. Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **163**, 571-585 [cit. 2020-03-31]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.129. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817325345>
- [32] Hela, R. Technologie betonu II, Technologie betonu, Studijní opora fast VUT Brno, modul M01, Brno, 2007.
- [33] SVAZ VÝROBCŮ BETONU ČR. Vlákobeton. In: Ebeton [online]. Sunnysoft [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton>
- [34] LAU, A. a M. ANSON. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, 36(9), 1698-1707 [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.024. ISSN 00088846. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884606000809>
- [35] ABDALLAH, Sadoon, Mizi FAN a K.A. CASHELL. Bond-slip behaviour of steel fibres in concrete after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 140, 542-551 [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.148. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817303495>

- [36] DING, Yining, Cecília AZEVEDO, J.B. AGUIAR a Said 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* [online]. 2011 [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.058. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181100198X>
- [37] WANG, Wei-Chien, Her-Yung WANG, Kao-Hao CHANG a Shao-Yu WANG. Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **245** [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118387. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820303925>
- [38] ABDI MOGHADAM, Mehrdad a Ramezan Ali IZADIFARD. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal* [online]. 2020, **113** [cit. 2020-04-01]. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102978. ISSN 03797112. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711219300359>
- [39] MA, Weili, Yuan QIN, Yanlong LI, Junrui CHAI, Xianwei ZHANG, Yingbiao MA a Haimin LIU. Mechanical properties and engineering application of cellulose fiber-reinforced concrete. *Materials Today Communications* [online]. 2020, **22** [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100818. ISSN 23524928. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352492819306117>
- [40] NETINGER GRUBEŠA, Ivanka, Berislav MARKOVIĆ, Anita GOJEVIĆ a Jelena BRDARIĆ. Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 184, 473-484 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.014. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818316696>
- [41] OZAWA, Mitsuo, Sirjana SUBEDI PARAJULI, Yuichi UCHIDA a Bo ZHOU. Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **206**, 219-225 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.056. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819303514>
- [42] ZHANG, Dong, Kang Hai TAN, Aravind DASARI a Yiwei WENG. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2020, 109 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103512. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946520300032>
- [43] GUO, Liping, Wenxiao ZHANG, Wei SUN, Bo CHEN a Yafan LIU. High-Temperature Performance and Multiscale Damage Mechanisms of Hollow Cellulose Fiber-Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2016, 2016, 1-14 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.1155/2016/2503780. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2016/2503780/>
- [44] HOLAN, Jakub, Josef NOVÁK, Petr MÜLLER a Radek ŠTEFAN. Experimental investigation of the compressive strength of normal-strength air-entrained concrete at high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 248 [cit. 2020-04-10]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118662. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182030667X>

- [45] LIU, Jin-Cheng a Zhigang ZHANG, 2020. Neural network models to predict explosive spalling of PP fiber reinforced concrete under heating. *Journal of Building Engineering* [online]. [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101472. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022030200X>
- [46] YANG, Juan, Gai-Fei PENG, Jie ZHAO a Guo-Shuang SHUI, 2019. On the explosive spalling behavior of ultra-high performance concrete with and without coarse aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* [online]. 226, 932-944 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.299. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819319737>
- [47] ZHANG, Hai Yan, Guang Hong QIU, Venkatesh KODUR a Zhen Sheng YUAN, 2020. Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites* [online]. 106 [cit. 2020-05-15]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103483. ISSN 09589465. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946519313265>
- [48] PAN, Zhu, Jay G. SANJAYAN a Daniel L.Y. KONG, 2012. Effect of aggregate size on spalling of geopolymer and Portland cement concretes subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 36, 365-372 [cit. 2020-05-18]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.120. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812003224>
- [49] MALUK, Cristian, Luke BISBY a Giovanni P. TERRASI, 2017. Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Engineering Structures* [online]. 141, 584-595 [cit. 2020-05-26]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.058. ISSN 01410296. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617310337>
- [50] YERMAK, N., P. PLIYA, A.-L. BEAUCOUR, A. SIMON a A. NOUMOWÉ, 2017. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. *Construction and Building Materials* [online]. 132, 240-250 [cit. 2020-06-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181631889X>

7. Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti pro různé horniny [7]	20
Tabulka 2: Přehled změn ve struktuře betonu při zvyšování teploty [7].....	22
Tabulka 3: Vybrané charakteristiky různých typů vláken [25].....	41
Tabulka 4: Vlastnosti polypropylenových a ocelových vláken [50]	46
Tabulka 5: Návrh receptur betonových směsí v kg/m^3 [50]	46
Tabulka 6: Souhrn poškození vzorků po teplotním zatížení [50].....	47
Tabulka 7: Fyzikální a mechanické vlastnosti celulózových vláken [43].....	50
Tabulka 8: Návrh receptur betonu s celulózovými vlákny v kg/m^3 [43]	51
Tabulka 9: Vliv vysoké teploty na mechanické vlastnosti betonů s celulózovými vlákny [43].....	52

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Teplotní křivky podle ČSN 1363-1 a 1363-2 [1]	16
Obrázek 2: Složky cementového tmelu [16]	17
Obrázek 3: Vývoj intenzity rozkladu základních minerálů cementového tmelu [7].....	18
Obrázek 4: Vliv poměru CaO/SiO ₂ a teploty na CSH fáze hydratačních produktů [16].	19
Obrázek 5: Fyzikálně-chemické transformace ve čtyřech různých agregátech [16]	20
Obrázek 6: Povrchová struktura betonových vzorků vystavených zvýšeným teplotám [6].....	22
Obrázek 7: Změna pevnosti betonu v tlaku působením vysokými teplotami (pevnost za normální teploty =100 %) [2]	23
Obrázek 8: Znázornění pevnosti v tahu při zvyšování teploty [5]	24
Obrázek 9: Znázornění modulu pružnosti při zvýšení teplot pro beton s různými kamenivý [5].....	25
Obrázek 10: Vliv zatížení na pevnost v tlaku [15]	26
Obrázek 11: Tepelná vodivost betonů v závislosti na teplotě (B – hutné betony, L–lehké betony, šrafovaná plocha označuje rozptyl měření pro hutné betony) [2]	27
Obrázek 12: Teplotní roztažnost betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony) [2].....	28
Obrázek 13: Měrné teplo betonů v závislosti na teplotě (I – hutné betony, II – lehké betony, III – mokré betony) [2].....	28
Obrázek 14: Spalling při různém množství vlhkosti [46].....	29
Obrázek 15: Plošné odprýskávání po teplotním namáhání [49]	30
Obrázek 16: Schéma explozivního odprýskávání [9]	31
Obrázek 17: Vliv velikosti kameniva na odlupování betonu [48]	32
Obrázek 18: Vliv druhu kameniva na snížení pevnosti v tlaku při zvyšování teploty [15]	34
Obrázek 19: Schématické znázornění vlivu vláken na omezení vzniku a rozvoje trhlin [25].....	35
Obrázek 20: Vlevo – PP monofilamentní vlákna, vpravo – PP fibrilovaná vlákna [32]..	36
Obrázek 21: Kanálky v betonu vzniklé v důsledku tání PP vláken [36]	36
Obrázek 22: Množství trhlin při teplotě 400 °C, kde bílá barva znázorňuje trhliny a lůžka po vlákních naplněná pryskyřicí (vlevo – beton s PP vlákny, vpravo – obyčejný beton) [28].....	37
Obrázek 23: Různé formy a průřezy ocelových vláken [33]	38
Obrázek 24: Podélné a příčné trhliny mezi matricí a ocelovými vlákny po vystavení 900 °C. [36].....	39
Obrázek 25: Poškozená vlákna, která byla vytažena z testovaného betonu [35]	40
Obrázek 26: Skelná vlákna [38].....	41
Obrázek 27: a) PP vlákno, b) Konopné vlákno bez ošetření, c) Konopné vlákno sterilizované, e) Konopné vlákno po 5% NaOH, f) Konopné vlákno po 2,5% NaOH + 2% Na ₂ SO ₃ , g) Konopné vlákno po 5% NaOH + 2% Na ₂ SO ₃ . [40]	42
Obrázek 28: Průřez celulósového vlákna z kůry měkkého dřeva (celtis) [43].....	43
Obrázek 29: Konopná vlákna a) před vystavením vysoké teploty, b) po vystavení vysoké teploty [40].....	44
Obrázek 30: Jutové vlákno v betonu a) při pokojové teplotě a b) při teplotě 200 °C [42]	44
Obrázek 31: Betonové vzorky po vystavení teplotnímu zatížení (a – CX, b – CS60, c – CPPS 0,75–60) [50].....	48
Obrázek 32: Snímky vzorků po vystavení teploty 500 °C (a – CC, b – CS 60, c – CPPS 0,75-60) [50].....	48
Obrázek 33: Betonové vzorky po teplotním zatížení pro různé teploty a doby výdrže [43].....	51
Obrázek 34: SEM snímky mikrostruktur CF (vlevo nahoře – 20 °C/–, vpravo nahoře – 300 °C/4h, vlevo dole – 600 °C/4h, vpravo dole – 1 050 °C/4h) [43].....	54

9. Seznam grafů

Graf 1: Zbytková pevnost v tlaku zkoušených referenčních a CPPS 0,75-60 vzorků [50]	49
Graf 2: Závislost zbytkové pevnosti na teplotě a době výdrže teplotního zatížení betonů s celulózovými vlákny [43]	53