

T A
Č R

Program **Alfa**

PŘÍJEMCE PODPORY:



KLOKNERŮV ÚSTAV, ČVUT V PRAZE

DALŠÍ ÚČASTNÍCI PROJEKTU:

SKANSKA

 **BASF**
The Chemical Company



EV. Č. PROJEKTU: TA01010269

NÁZEV PROJEKTU:

**APLIKOVANÝ VÝZKUM ULTRAVYSOKOHODNOTNÉHO
BETONU (UHPC) PRO PREFABRIKOVANÉ PRVKY STAVEB**

METODIKA 1

**METODIKA PRO NÁVRH UHPC A PRO
MATERIÁLOVÉ ZKOUŠKY**

VERZE 2015

Vypracoval:

Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

Doc. Ing. Petr Bouška, CSc.

Ing. David Čítek

Ing. Petr Huňka, Ph.D.

Ing. Milan Rydval

Ing. Miroslav Vokáč, Ph.D.

V Praze 30. 6.2015

OBSAH

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | Úvod a vlastnosti UHPC | 3 |
| 2. | Zahraníční předpisy | 5 |
| 3. | Vstupní suroviny | 5 |
| 3.1 | Cement | 5 |
| 3.2 | Kamenivo | 6 |
| 3.3 | Příměsi – mikrofilery | 6 |
| 3.3.1 | Příměsi typu II – latentně hydraulické | 6 |
| 3.3.1.1 | Křemičitý úlet (mikrosilika) | 6 |
| 3.3.1.2 | Popílek | 6 |
| 3.3.1.3 | Struska | 7 |
| 3.3.2 | Příměsi typu I - inertní | 7 |
| 3.4 | Přísady-plastifikátory | 7 |
| 3.5 | Vlákna | 7 |
| 4. | Zkoušky materiálových vlastností | 8 |
| 4.1 | Zkoušky čerstvé směsi | 8 |
| 4.2 | Zkoušky mechanických vlastností | 8 |
| 4.2.1 | Pevnost v tlaku | 8 |
| 4.2.2 | Pevnost v tahu | 9 |
| 4.2.2.1 | Zkouška pevnosti příčným tahem | 10 |
| 4.2.2.2 | Zkouška pevnosti v tahu ohybem | 10 |
| 4.2.2.3 | Zkouška pevnosti prostým tahem | 14 |
| 4.2.2.4 | Tahové chování kompozitních materiálů typu UHPFRC | 15 |
| 4.2.3 | Zkouška pevnosti Charpyho kladivem | 17 |
| 4.2.4 | Modul pružnosti | 18 |
| 4.3 | Zkoušky fyzikálních vlastností | 19 |
| 4.3.1 | Mrazuvzdornost | 19 |
| 4.3.2 | Odolnost proti působení CH.R.L. | 19 |
| 4.3.3 | Vodonepropustnost | 19 |
| 4.3.4 | Poissonova konstanta | 19 |
| 4.3.5 | Součinitel teplotní délkové roztažnosti | 19 |
| 4.3.6 | Vliv tepelného ošetřování | 19 |
| 4.3.7 | Smršťování a dotvarování | 20 |
| 5. | Organizace zkoušek při návrhu prvků z UHPC | 21 |
| 5.1 | Zkoušky v rámci vývoje receptury UHPC | 21 |
| 5.1.1 | Zkoušky vývojové | 21 |
| 5.1.2 | Zkouška UHPC typová (průkazní) | 22 |
| 5.2 | Zkoušky při vývoji prvku | 23 |
| 5.2.1 | Vliv orientace vláken na tahové pevnosti | 23 |
| 5.2.2 | Zkoušky UHPC | 26 |
| 5.3 | Kontrolní testy při výrobě prvků | 27 |
| 6. | Bibliografie | 29 |

„Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky“

byla vytvořena s finanční podporou TA ČR“.

1. ÚVOD A VLASTNOSTI UHPC

Tato metodika vznikla s cílem vytvořit první podklad v rámci ČR pro možné využívání nového moderního cementového materiálu, který je v literatuře a v mezinárodním kontextu označován jako „*Ultra-High Performance Concrete*“ (UHPC), pro stavební konstrukce. Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA01010269 Aplikovaný výzkum ultravysokohodnotného betonu pro prefabrikované prvky. Tato metodika navazuje na metodiky „*METODIKA 2 - Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*“^[60], „*METODIKA 3 - Metodika pro navrhování prvků z UHPC*“^[61], které byly zpracovány v rámci téhož projektu.

Odvětví vývoje a používání UHPC je velmi intenzivně rozvíjeno v rámci řady zemí celého světa. Např. v Německé spolkové republice (viz [18]) bylo ze státních prostředků věnováno od roku 2006 do roku 2013 na výzkum v této oblasti přibližně 12 mil. EUR (tj. cca více než 300 mil. Kč). Ani přes toto mezinárodní úsilí neexistují prozatím obecně přijímané, ustálené a akceptované předpisy pro navrhování a využívání tohoto materiálu. V řadě zemí je to prozatím řešeno metodickými dokumenty reflektujícími místní podmínky.

U běžných betonů, kde nosnou kostru tvoří hrubé kamenivo, lze předpokládat určitou limitní úroveň pro dosažení opakovatelné a udržitelné materiálové pevnosti betonu v tlaku na úrovni cca max. 120 MPa. Přítomnost hrubého kameniva je totiž zdrojem imperfekcí jak v kamenivu samotném, tak na kontaktních zónách kameniva s cementovou matricí. Tyto imperfekce limitují dosažení vyšších pevností.

UHPC se významně liší od běžného betonu. Kromě vysoké dávky cementu (600 - 1000 kg/m³) obsahují pouze jemnozrné kamenivo (běžně zrnitost do 1 mm), vlákna (mikrovlákna s průměrem do 0,3 mm a délky do 20 mm), mikroplniva (příměsi), vysoké dávky přísad (superplatifátory adalší). Vyznačují se nízkou hodnotou vodního součinitele (w/c je do cca 0,25) a vysokým obsahem kovových nebo polymerních vláken (obsah 1 – 3 % objemu směsi).

Materiály UHPC (Ultra High Performance Concrete) jsou kromě své specificky jemnozrné struktury zejména vysokopevnostní kompozity na bázi cementu dosahující vysoké pevnosti v tlaku. Obvyklou hranicí uváděnou v zahraniční literatuře je 150 MPa a více. Mají vysokou reziduální pevnost v tahu či v tahu za ohybu po vzniku trhliny s vysokou lomovou energií, a vysokou duktilitou.

Změna v pohledu na granulometrii matrice a rozvoj nových ztekucujících přísad vedla k průlomu a k vývoji nového typu betonu známého pod obecně mezinárodně užívaným pojmem UHPC.

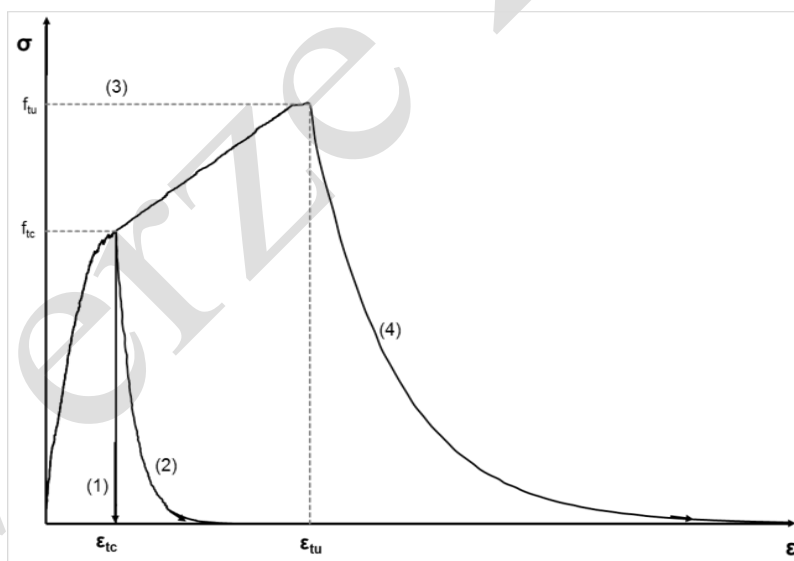
Z hlediska složení patří UHPC „*Ultra-High Performance Concrete*“ do skupiny jemnozrných kompozitních materiálů složených ze silikátového hydraulického pojiva (cementu), mikroplniva (například mletý křemen, vápenec), latentně hydraulických příměsí (mletá struska, popílek, křemičitý úlet), drobného kameniva (běžně velikost zrn do 2 mm, jsou známy receptury s max. zrnem do 8 mm), přísady (superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů a polykarboxylát – éterů, zpomalovačů tuhnutí, retardérů, proti smršťovací přísady) a vody. Poměr jednotlivých pevných složek (kamenivo, cement, mikrosilika, struska, popílek) je volen tak, aby bylo dosaženo co největší hustoty v objemu a zároveň, aby

dosahoval optimálního granulometrického složení z hlediska zpracovatelnosti. Hodnota vodního součinitele u tohoto materiálu se pohybuje obvykle pod hranicí 0,25.

Vhodně navržená cementem pojená matrice dosahuje vysokých hodnot pevnosti v tlaku v rozmezí cca 150-200 MPa, ale je velmi křehká. Pro vyztužení pevné, ale křehké, matrice a pro zvýšení tahových (lomových) vlastností tohoto materiálu je do směsi přidávána nekonvenční rozptýlená vláknová výztuž. Pro dosažení duktilního chování jsou to především vlákna kovová (ocelová), která jsou schopna při dostatečném dávkování zajistit tzv. tahové zpevnění „*strain-hardening*“ a tím také zajistit přenos namáhání v tahu po vzniku trhliny. V případě, kdy je vyčerpána tahová kapacita samotné matrice nebo matrice vyztužené rozptýlenou výztuží dochází k jevu, který je označován jako tahové změkčení „*strain-softening*“ (viz obr. 1).

V určitých limitovaných případech s nižším namáháním lze využít i polymerní vlákna s odpovídající pevností v tahu a vyšším modulem pružnosti než matrice. Z běžně známých vláken tomuto odpovídají zejména vlákna PVA (polyvinialkoholová), případně uhlíková. Dávkování vláken se obvykle pohybuje v rozmezí 1 – 3 % na m^3 směsi a je předmětem optimalizace receptury, aby bylo dosaženo tahového zpevnění „*strain-hardening*“. Např. v doporučení AFGC^[3] je pro zajištění duktilního chování bez nutnosti tradiční betonářské výztuže potřeba minimálně 2 objemová procenta kovových vláken. Vysoký obsah pojiva eliminuje kapilární poréznost vedoucí k dobré odolnosti vláken^[1].

Z hlediska mechanických vlastností jsou materiály označované jako UHPC charakterizovány vysokými hodnotami pevnosti v tlaku (obvykle cca 150 MPa a více^[3]), v prostém tahu (obvykle 8 MPa a více), tahu za ohybu (15 až 50 MPa), modulem pružnosti v tlaku (rozmezí cca 40-55 GPa), ale také dalšími užitnými vlastnostmi jako je vysoká odolnost vůči působení okolního prostředí z důvodů vysoké hutnosti a nízké permeability.



Obr. 1: Pracovní diagram zkoušky v tahu ilustrující chování materiálu UHPC

f_{tu} – mez pevnosti v tahu;

f_{tc} – pevnost v tahu při vzniku trhliny;

ϵ_{tc} – přetvoření při vzniku trhliny;

ϵ_{tu} – přetvoření při dosažení meze pevnosti;

1, 2 a 4 – tahové změkčení;

3 – tahové zpevnění.

2. ZAHRANIČNÍ PŘEDPISY

V současnosti neexistuje v mezinárodním měřítku obecně uznávaný a přijímaný předpis pro materiál a prvky vyráběné z UHPC. Stav vývoje předpisů na mezinárodní úrovni pro navrhování materiálu a prvků z UHPC ke konci roku 2014 je stále opožděn oproti původním předpokladům.

Základním koncepčním materiálem pro další vývoj předpisů pro navrhování a kontrolu je fib Model Code 2010^[1], který vyšel v 2013 v konečném oficiálním znění. Materiálové vlastnosti a základní požadavky na zkoušky jsou popsány v kapitole 5.6 „Fibres/Fibre reinforced concrete“. Model Code 2010 ovšem uvádí vlastnosti materiálů pouze do třídy pevnosti C120/140. Požadavky na navrhování betonových konstrukcí s rozptýlenou výztuží jsou uvedeny v kapitole 7.7 „Verification of safety and serviceability of FRC structures“. Každý další předpis pro navrhování UHPC by měl vycházet z moderní koncepce Model Code 2010 nebo by aspoň neměl obsahovat rozpory s touto modelovou mezinárodní normou, jejíž reálná platnost se očekává přibližně do roku 2030. Všechny budoucí revize národních norem, včetně ČSN EN a speciálních předpisů, budou založeny na koncepci Model Code 2010^[1].

Ve Francii byla v roce 2013 vydána revize předpisu SETRA/AFGC^[2] ve znění^[3]. Toto doporučení pro UHPC předpokládá zejména používání průmyslově vyráběných suchých směsí a neobsahuje podklady pro kombinaci UHPC a betonářské výztuže. Velkou výhodou je naopak popis metod pro průkazní a kontrolní zkoušky.

V Německu bude obdobná revize předpisu vydána nejdříve koncem roku 2014^[8]. Rozpracovaná část byla již publikována jako informativní kapitola o UHPC v BetonKalendru 2013^[10]. Německá škola UHPC se zaměřuje na místně dostupné materiály a umožňuje i kombinaci UHPC s betonářskou výztuží. Podobný postup předpokládáme i v ČR.

Japonské doporučení, které by bylo možno vztáhnout na UHPC^[4] bylo vydáno v roce 2008 a zatím nejsou známy informace o jeho revizi. V tomto doporučení je kladen důraz zejména na duktilitu a „strain-hardening“ chování jako u kovových materiálů, tlakové pevnostní parametry nejsou limitující. Tomu odpovídá i jeho obecný název, který operuje s HPFRCC, tj. „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites“.

3. VSTUPNÍ SUROVINY

Pro výrobu UHPC je nutno použít takové materiály, které optimálním způsobem spolehlivě zabezpečují jeho požadované vlastnosti, především pevnost, duktilitu, trvanlivost, těsnost, modul pružnosti apod.

3.1 CEMENT

Dále uváděné informace předpokládají využití klasického cementu z portlandského slínku. Obvyklý je typ CEM I 52,5 a 42,5 nicméně ostatní typy nejsou apriory vyloučeny. Cement musí vyhovovat aktuálně platným předpisům tj. ČSN EN 197-1^[21]. Typ a dávkování cementu vyplývá z návrhu a optimalizace receptury a není nijak omezen. Oproti běžným betonům je však dávkování výrazně vyšší a pohybuje se dle zkušeností rozmezí 600-1000 kg/m³.

3.2 KAMENIVO

Kamenivo tvoří nosnou kostru UHPC. S ohledem na vysokopevnostní charakter je tedy nezbytné, aby bylo toto kamenivo vysoce jakostní s vysokou pevností a s minimem interních poruch. Protože výroba UHPC vyžaduje daleko větší nároky na kvalitu vstupních surovin a přesnost dávkování, doporučuje se používat tříděné písky z pevných hornin (vyvěřelé horniny, nebo např. křemičitý sklářský či slévárenský písek), který se pak mísí ve vhodném poměru tak, aby bylo dosaženo požadované křivky zrnitosti podle výsledků laboratorních zkoušek a rozboru čar zrnitosti s ohledem na minimální mezerovitost. Kamenivo musí vyhovět požadavkům ČSN EN 12620+A1^[22].

3.3 PŘÍMĚSI – MIKROFILERY

Příměsi jsou jemnozrnné anorganické práškové materiály s max. velikostí zrn do 0,25 mm. Cílem je v rámci granulometrické skladby zajistit co největší hutnost a minimalizovat mezerovitost. Současně přispívají k ovlivnění reologických vlastností čerstvé směsi. Ve smyslu ČSN EN 206^[57] rozlišujeme dva typy příměsí. Typ I je téměř inertní příměs (mletý křemen, kamenná moučka, vápenec) a typ II latentně hydraulická příměs (křemičitý úlet, popílek, vysokopecní granulovaná struska apod.), která je schopna podílet se na hydratační reakci.

3.3.1 PŘÍMĚSI TYPU II – LATENTNĚ HYDRAULICKÉ

V současné době neexistují jasné informace jak příměsi typu II uvažovat ve směsi UHPC vzhledem k vyjádření vodního součinitele. Principy k-hodnoty uvedené v ČSN EN 206^[57] lze využít pouze jako informativní.

3.3.1.1 KŘEMIČITÝ ÚLET (MIKROSILIKA)

Použití křemičitého úletu splňujícího parametry dle ČSN EN 13263-1+A1^[27] je primárně jako mikroplnivo z důvodu vyplnění mikrostruktury. Dle zahraničních zkušeností [3], [10] se projeví latentní hydraulita mikrosiliky zejména při teplotním ošetřování UHPC při teplotách 80-90°C v době tvrdnutí. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a z optimalizace receptury. Velký měrný povrch mikrosiliky zvyšuje požadavek na dávkování vody a použití superplastifikátoru.

3.3.1.2 POPÍLEK

Obdobně jako křemičitý úlet i popílek slouží primárně jako mikroplnivo, případně pro úpravu reologických vlastností. Popílek musí odpovídat a splňovat parametry ČSN EN 450-1^[24] a ČSN EN 450-2^[25] pro použití popílku do betonu. Popílek by měl nejlépe pocházet ze spalování černého uhlí. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

3.3.1.3 STRUSKA

Struska také slouží primárně jako mikroplnivo, případně pro úpravu reologických vlastností. Struska musí odpovídat a splňovat parametry ČSN EN 15167-1^[26]. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

3.3.2 PŘÍMĚSI TYPU I – INERTNÍ

Inertní příměsi slouží primárně jako mikroplnivo pro optimalizaci granulometrie, případně pro úpravu reologických vlastností. Patří sem mletý křemen, kamenné moučky jiného typu, mletý vápenec atd. Příměsi musí splňovat požadavky ČSN EN 12620+A1^[23] na filery do betonu. Požadavky na mleté vápence jsou uvedeny také v ČSN 72 1220^[22]. Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

3.4 PŘÍSADY – PLASTIFIKÁTORY

Pro dosažení dostatečné redukce vody a získání vhodné zpracovatelnosti je nutné použít velmi účinné plastifikátory. Tomuto vyhovují nejlépe přísady na bázi polykarboxylátetherů (PCE). Typ a dávkování vyplývá z návrhu a optimalizace receptury.

3.5 VLÁKNA

Pro zajištění houževnatosti a vysoké duktility materiálu UHPC je nezbytné vyztužit matici všesměrně orientovanou vláknovou výztuží. Dávkování musí být provedeno v dostatečném množství. Obvyklé dávkování je v rozmezí 1-3 % objemu. Ze zkušenosti vyplývá, že jako vhodná se jeví vysokopevnostní (pevnost v tahu 2000 MPa) ocelová mikrovlákná (ČSN EN14889-1^[30]) s průměrem do max. 0,3 mm v délce do cca 20 mm (štíhlostní poměr 60 a více). Vyztužením lze ovlivnit konečné chování materiálu z hlediska přenosu napětí i po vzniku trhliny. Vyčerpáním tahové únosnosti matrice dochází k aktivaci rozptýlené vlákně ve vzniklé trhlíně. Typ a dávkování vláken vyplývá z návrhu a optimalizace receptury ve vztahu k mechanickým požadavkům na materiál pro konkrétní prvek. Využití jiných typů vláken pro zajištění přenosu namáhání po vzniku trhliny (polymerních jako PVA vlákna, skleněných atd.) je nutno kvalifikovaně odzkoušet s ohledem na zajištění duktility a trvalého přenosu napětí vlákny po vzniku trhliny. Ze zkušeností se ukazuje, že tyto typy vláken jsou pro vyztužování UHPC také použitelné. Jejich účinnost však nemusí být dostatečná a je potřebajejich použití vždy prověřit testem. Skleněná vlákna v tomto směru nemusí poskytnout dobré výsledky s ohledem na svoji křehkost a porušení přetržením kvůli dobré soudržnosti s cementovou maticí.

4. ZKOUŠKY MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

4.1 ZKOUŠKY ČERSTVÉ SMĚSI

UHPC materiály se zpracovávají obvykle v tekutém stavu s konzistencí obdobnou SCC betonům. Viskozita směsi je však významně větší než u obvyklých betonů i SCC. UHPC materiál teče pomaleji. Pro samovolné odvzdušnění je potřeba delší doba a případně i delší doba vibrace. Pro hodnocení konzistence dle ČSN EN 206^[57] lze pro test zpracovatelnosti využít klasické metody měření zpracovatelnosti dle ČSN EN 12350-5^[33] nebo pro SCC betony sednutím-rozlítím kužele metodou dle ČSN EN 12350-8^[35]. V souvislosti s rozlitím je vhodné měřit i čas pro stanovení parametru T500. Pro hodnocení průtoku je možné použít metodu V funnel dle ČSN EN 12350-9^[36]. Vliv obsahu vláken na blokaci lze stanovit testy dle ČSN EN 12350-10^[37] nebo ČSN EN 12350-11^[38].

Při hodnocení výsledků měření je nutno vzít v úvahu, že výrazným způsobem reologii ovlivňuje objem vláken ve směsi. S ohledem na unikátnost a jedinečnost možných složení směsi a následných postupů výroby je nutno stanovit si kritéria zpracovatelnosti na základě požadavků na výsledný charakter prvku a postupů při betonážích. Tyto informace je vhodné získat při poloprovozních zkouškách výroby prototypu prvku.

Pro laboratorní testy nebo kontrolní testy lze zvolit kromě normovaných postupů i rychlé informativní testy rozliti s různých komolých kuželů či kroužků jako např. prstenc pro měření tuhnutí Vicatovou jehlou nebo Hagermanův kužel pro testy zpracovatelnosti malt.

Měření objemové hmotnosti pro kontrolu správného dávkování a hutnění lze provádět dle ČSN EN 12350-6^[34].

Změna dávkování vody výrazným způsobem může ovlivnit objemové změny UHPC těsně po výrobě auložení. Pro tento účel je vhodné provést kontrolní měření objemové změny materiálu od samého počátku a tuhnutí a tvrdnutí UHPC. Jako vhodná metoda se ukazuje instalace strunových tenzometrů do různých forem (např. válce či trámce) nebo měření ve specializovaných formách s instalovanými snímači na koncích.

4.2 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

4.2.1 PEVNOST V TLAKU

Pevnost v tlaku je jedním ze základních parametrů charakterizujícím UHPC. Jako minimální limitní hodnota se udává 150 MPa^[2] stanovená na válcích se štíhlostím poměrem min. 1:2. Velikost zkušebních těles není prozatím mezinárodně ustálena. Vysoká pevnost v tlaku totiž klade vysoké nároky na kapacitu zkušební zařízení a velikost těles pro standardní beton by nemuselo být možné zkoušet. Výsledná hodnota pevnosti UHPC v tlaku je závislá na několika faktorech a při uvádění pevnosti v tlaku by měly být tyto parametry uváděny. Mezi tyto parametry patří např. proteplování směsi v počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí, uložení a ošetřování vzorku, koncová úprava tlačných ploch, rychlost zatěžování, ale také především velikost zkušebního tělesa.

Značná nejednotnost ve tvaru tělesa je prozatím i na mezinárodním poli. Dle doporučení AFGC^[3] by nejmenší rozměr zkušebního tělesa měl být roven pětinasobku délky vlákna nebo šestinasobku největšího rozměru kameniva. Jako referenční těleso je uváděn válec o průměru 110 mm a výšce 220 mm, jako alternativu lze použít válec o průměru 70 mm a výšce 140 mm. Pokud je zkoušeno jiné těleso než referenční, je nutné stanovit poměr mezi zkoušeným

a referenčním tělesem. Rychlost zatěžování by dle doporučení AFGC^[3] měla být v rozmezí 0,2 MPa/s až 1,0 MPa/s. Při dodržování doporučení AFGC jsou UHPFRC charakterizovány následující pevností v tlaku: $150 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 250 \text{ MPa}$. Vyšší pevnosti závisí zejména na poměru tekutých částí a pojiva, který se může při použití organických vláken lišit a také na protěplování během provádění^[1].

V japonském doporučení JSCE je uveden průměr válce 100 mm^[4]. Dle německé normy DIN 1045-1 jsou jako referenční vzorky válce s poměrem výšky k průměru $h/\varnothing \approx 2$ až 3 a průměrem větším jak 100 mm^[6]. V publikaci Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton je pevnost v tlaku stanovována na válcích o průměru 100 mm a výšce 300 mm. Pevnosti v tlaku na válcích $\varnothing 100/300$ mm se pohybují v rozmezí $150 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 200 \text{ MPa}$ ^[8].

V našich podmínkách platí ustanovení standardů platných v ČR. Dle ČSN EN 12390-3^[42] by zkušebními tělesy měly být krychle, válce nebo vývrty vyhovující požadavkům norem ČSN EN 12350-1^[32], ČSN EN 12390-1^[40], ČSN EN 12390-2^[41] nebo ČSN EN 12504-1^[48]. Běžně jsou v podmínkách ČR pro stanovení materiálových charakteristik zkoušeny zkušební krychle o hraně 150 mm a zkušební válce s poměrem 1:2, čili válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm dle ČSN EN 12390-3^[42]. Do porušení jsou vzorky zatěžovány konstantním nárůstem síly, pokud je požadován sestupná větev po dosažení maxima, je třeba zkoušku po porušení řídit konstantní rychlostí posunu válce. Při zkouškách na válcích je velmi důležité hodnotit také způsob porušení, tj. zda nedošlo k usmyknutí, či k příčnému tahu. S ohledem na vysoké pevnosti je důležité věnovat zvýšenou pozornost zejména úpravě tlačných ploch. Jako úpravu lze doporučit broušení, které je považováno jako referenční způsob. U krychlí vyráběných v ocelových formách s kontrolovanou rovinností mohou být tlačné plochy přímo z forem. Mezi další úpravy lze aplikovat zakoncování speciální směsí křemičitého písku a vysokopevnostní síry nebo vyrovnávací směsí z cemetové malty pokud bude ověřeno, že výsledky jsou srovnatelné s broušeným povrchem.

S ohledem na vysokou pevnost v tlaku je velikost zkušebních těles také podstatná z hlediska využitelnosti stávajících zkušebních zařízení jejich zatěžovací kapacita.

Vzhledem k předchozím konstatováním a jemnozrnnosti materiálu lze doporučit pro prokazování mechanických pevností UHPC využití těles menších než je dnes běžná betonářská praxe. Pro účely tohoto předpisu lze doporučit použití jako referenční zkušební válce o štíhlostním poměru 1:2 s min. průměrem 100 mm. Lze tedy využít válce 100x200 mm případně i 150x300. S ohledem na jemnozrnnost materiálu lze předpokládat minimální rozdíly ve výsledcích zejména u matrice s vlákny. V případě využití jiných těles (krychle např. 100 mm či trámce) je nutno zkouškou ověřit převodní vztah. Referenčním zkušebním tělesem je váleček.

4.2.2 PEVNOST V TAHU

Stanovení pevnosti v prostém tahu či tahu za ohybu u betonu obecně patří mezi zkoušky, u kterých jsou výsledky závislé na mnoha faktorech a zejména na způsobu provedení zkoušky. U betonů běžných pevností jsou známy tři způsoby stanovení pevnosti v tahu. Test příčným tahem, ohybem anebo prostým tahem. Každý test poskytuje jinou hodnotu. Pro účely materiálu UHPC jsou podstatné v zásadě testy v ohybu či prostém tahu, ze kterých je možno odvodit přímo materiálové charakteristiky pro návrh prvků. Proto také tyto dva testy jsou popsány podrobněji.

4.2.2.1 ZKOUŠKA PEVNOSTI PŘÍČNÝM TAHEM

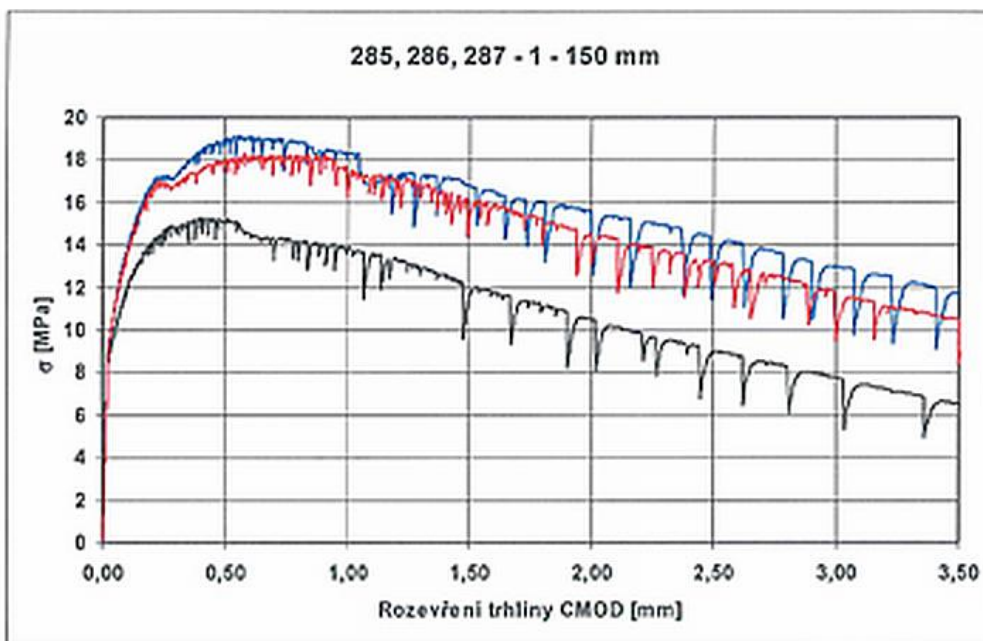
Tento test má pro účely UHPC pouze okrajový význam. V zahraničních doporučeních AFGC^[3] nebo například Deutscher Ausschuss für Stahlbeton^[8] není tato metoda zmiňována. V určitých případech by bylo možno využít tento test pro kontrolní účely. V tomto případě je však nutno stanovit kritéria. Zkušební postup je uveden v ČSN 731318^[51] nebo ČSN 12390-6^[44]. Jsou zde jisté rozdíly. Dle ČSN 731318^[51] je jako referenční zkouškou pro stanovení pevnosti v tahu uváděna zkouška v příčném tahu na krychlích o hraně 150 mm. Dle ČSN EN 12390-6^[44] je referenční těleso válec 150x300 mm. Obecně lze pevnost v příčném tahu stanovit i na válcových tělesech případně na hranolech, ale je nutné popsat velikost těles a případně provést přepočet zjištěné pevnosti na pevnost referenční.

4.2.2.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU OHYBEM

V České republice je pro zkoušku pevnosti betonu v tahu za ohybu u betonu platných pět norem: ČSN 73 1318^[51], ČSN EN 12390-5^[43], ČSN EN 14488-3^[49], ČSN EN 14651+A1^[29], ČSN P 732452^[58]. V podmínkách ČR využívanou metodou je také nenormový test dle DBV Merkblatt STAHLFASERBETON – Oktober 2001^[8] ze kterého vychází i metoda popisovaná v ČSN P732452^[58]. Podstatné pro UHPC materiál vyztužený vlákny je, aby v rámci zkoušky kromě finální mechanické pevnosti byl zaznamenán průběh deformace, tj. průhyb nebo rozevírání trhliny (CMOD). Tomuto požadavku vyhovují prakticky pouze zkoušky dle:

- 1) ČSN EN 14488-3 – čtyřbodový ohyb na trámci 75x125 mm délky nejméně 500 mm při rozponu 450 mm, test řízen posunem břemene 0,25 mm/min., měří se průhyb^[48].
- 2) ČSN EN 14651+A1(obr. 3)-tříbodový ohyb, na trámci 150x150x700 mm při rozponu podpor 500 mm s vrubem h/6 (25 mm) uprostřed, měří se rozevření trhliny případně průhyb, řízení testu rozevřením trhliny^[29].
- 3) ČSN P732452 (viz obr.4) - 4 bodový ohyb, na trámci 150x150x700 mm při rozponu podpor 600 mm bez vrubu, měří se rozevření trhliny, řízení testu posunem břemene 0,2 mm/min^[8].
- 4) Zkouška dle RILEM (též dle MC2010) trámec 150x150x700 rozpětí 500 s vrubem.

Dle výše uvedených standardů je zkouška pevnosti v tahu za ohybu prováděna na zkušebních hranolech o různých rozměrech obvykle 150x150x700 mm. Pro hodnocení pevnosti v tahu za ohybu lze tuto zkoušku provádět na hranolech s vrubem (pouze ČSN EN 14651+A1^[29]) nebo bez vrubu. Provedení vrubu je závislé na způsobu uspořádání zkoušky. Příklad výsledku měření UHPC materiálu metodou dle ČSN EN 14651+A1^[29] na hranolu s vrubem je na následujícím obrázku 2.



Obr. 2: Záznam ohybové zkoušky tříbodovým ohybem na trácích 150x150x700 mm s vrubem 25 mm dle EN 14651. V oblasti rozevření trhliny do 0,5 patrné chování tahového zpevnění (zdroj Kloknerův ústav ČVUT v Praze, AZL 1061)

Zkoušky řízené kontinuální rychlostí přetvoření (průhyb, CMOD, posun válce) umožňují získání kompletního diagramu odolnosti UHPC i po vzniku trhliny.

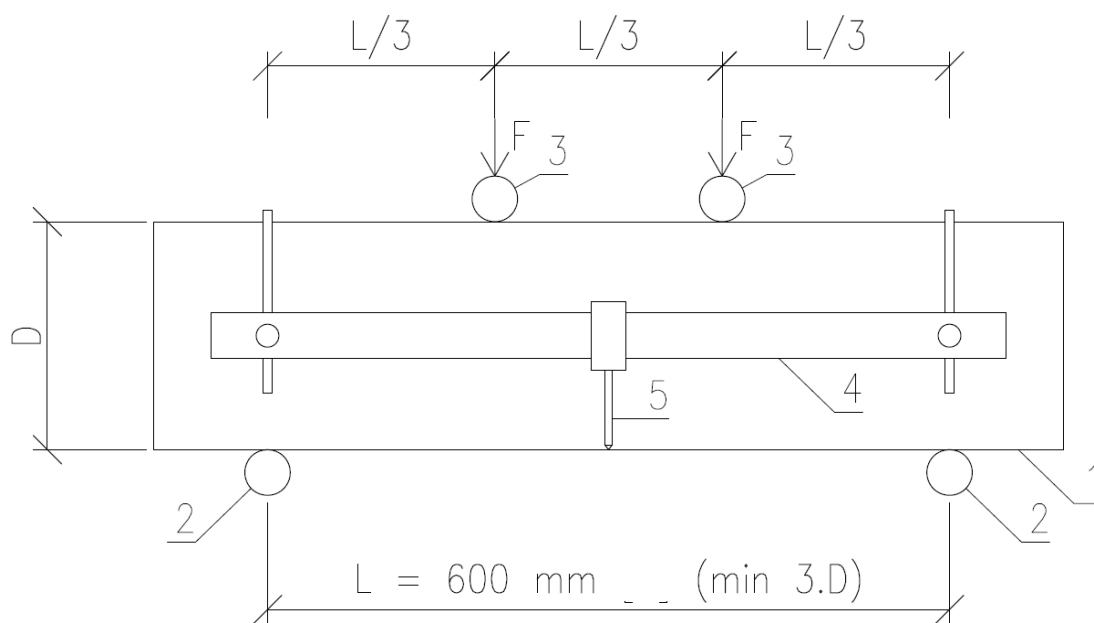
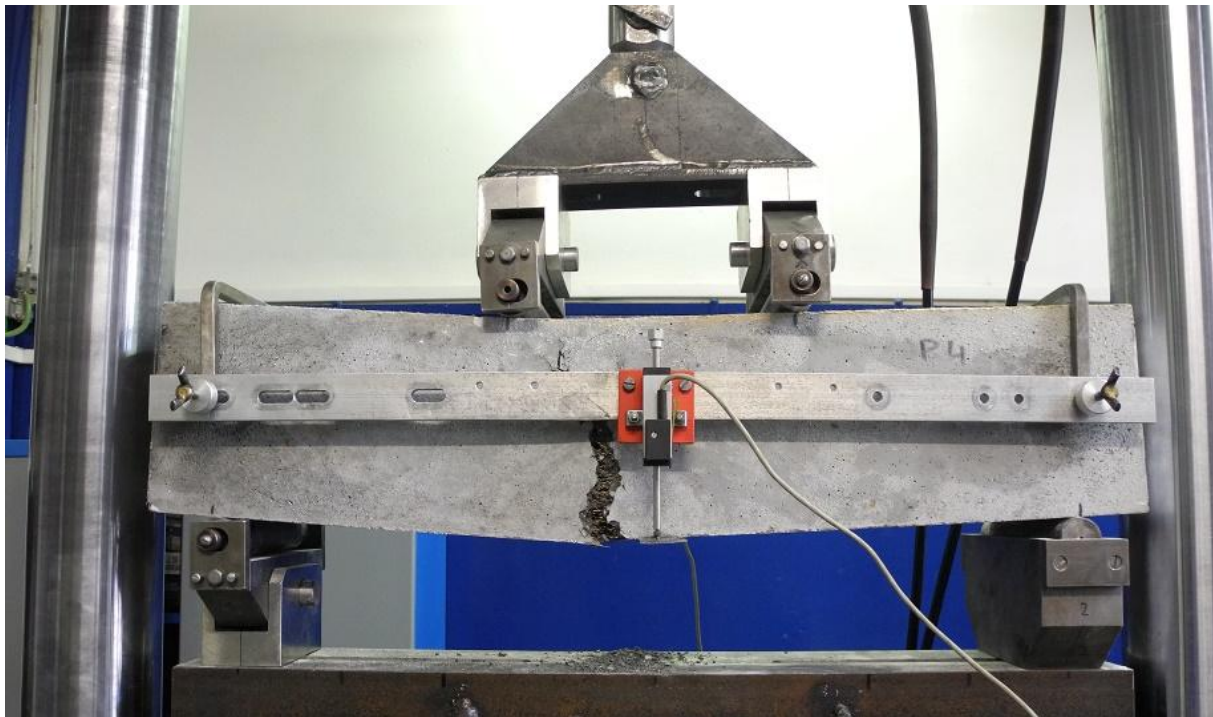
Dle ČSN 73 1318^[51] je zkouška ohybem prováděna čtyřbodovým ohybem na trácích o rozměrech 150 mm x 150 mm x 700 mm. Rozpětí podpor je 600 mm a zatěžovací břemena jsou umístěna v třetinách rozpětí. Deformace se neměří. Tato norma však uvádí informativní převodní vztah mezi pevností betonu v tahu odvozené ze zkoušky betonu v ohybu. Vztah je (1):

$$f_{ct} = 0,65 \times f_{ct,f} \quad (1)$$

Obdobný postup jako v ČSN 731318^[51] je uveden i v ČSN EN 12390-5^[43]. V normě ČSN EN 12390-5^[43] je jako alternativní způsob je uvedena zkouška tahu trojbodovým ohybem na trácích s rozponem $l = 3d$ a zatěžovacím břemenem uprostřed rozpětí. Opět výsledek zkoušky je hodnota $f_{ct,f}$.

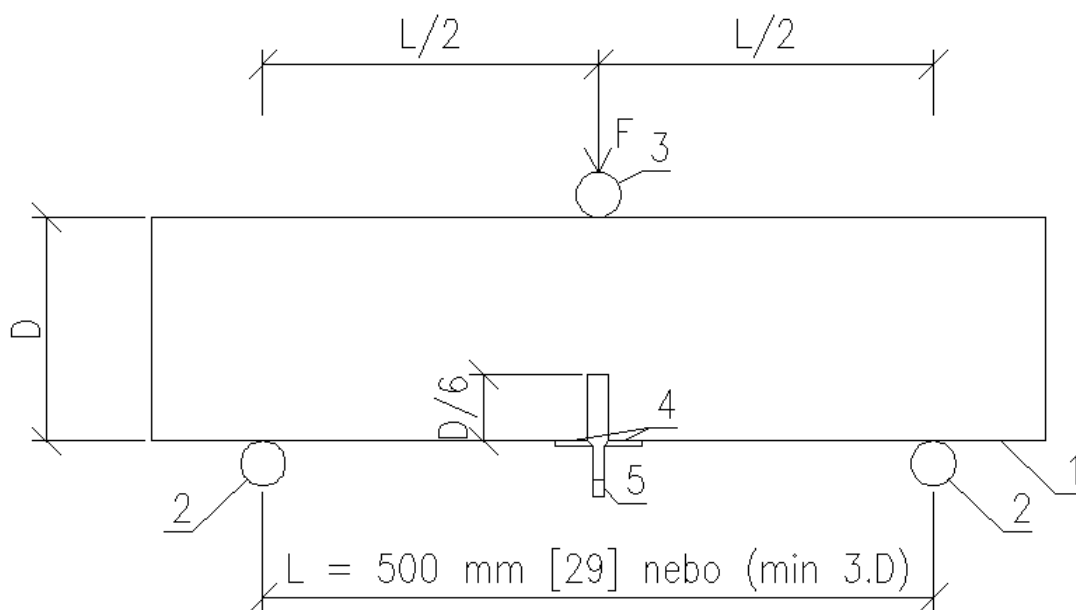
S ohledem na jemnozrnnost materiálu lze pro měření pevností v tahu za ohybu aplikovat i malá tělesa. Je možno využít pro testování cementu dle ČSN EN 196-1^[20] trámečky 40x40x160 mm.

Na základě zkušenosti je však nutno upozornit, že velikost trámce výrazně ovlivňuje výsledek získané pevnosti v tahu za ohybu. Pevnosti zjištěné na malých trácích 40x40x160 mm vykazují 1,5 a 2násobné hodnoty ve srovnání s výsledkem zkoušky na stejném materiálu provedené na trácích 150x150x700 mm s vrubem dle ČSN EN 14651+A1^[29]. U menších tráců se patrně výrazněji projevuje stěnový vliv, který uspořádává směr vláken o stěny forem.



Obr. 3: Uspořádání zkoušky čtyřbodovým ohybem na tělesech bez vrubu dle ČSN P 732452 ^[59]; 1 – zkušební těleso, 2 – podpůrné válečky, 3 – zatěžovací válečky, 4 – roznášecí válečky, 5 – snímač posunutí, F – působící síla, D – výška prvku, L – vzdálenost podpor – foto Kloknerův ústav ČVUT v Praze

Zkouška pevnosti tahu trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem, viz obr. 4, je řízena snímačem rozevření trhliny CMOD („Crack Mouth Opening Displacement“), který je umístěn ve středu šíře trhliny. Dále je prováděno snímání síly ve válci, výsun válce a průhyb ve středu rozpětí obdobným způsobem, jako u zkoušky čtyřbodovým ohybem na trámech bez vrubu. Takto uspořádaná zkouška přímo snímá rozevření trhliny.



Obr. 4: Uspořádání zkoušky trojbodovým ohybem na tělesech s vrubem dle ČSN EN 14 651+A1^[29]; 1 – zkušební těleso, 2 – podpůrné válečky, 3 – zatěžovací válečky, 4 – břity, 5 – snímač CMOD, F – působící síla, D – výška prvku, L – vzdálenost podpor – foto Kloknerův ústav ČVUT v Praze

Referenční metoda pro stanovení materiálových parametrů při odvozování návrhových parametrů použitého UHPC a návrhu prvku doporučuje uvažovat metodu dle ČSN EN 14651+A1^[29]. Obdobou zkoušky ČSN EN 14651, která poskytuje informaci o chování materiálu po vzniku trhliny je test čtyřbodovým ohybem dle ČSN P 732452^[58]. Zkoušky trámů s vrubem poskytují konzervativnější (nižší) výsledky z hlediska maximálních napětí v tahu za ohybu pro stejné materiály. Pro využívání zkoušky čtyřbodovým ohybem je nutné znát vztah mezi výsledky testovacích metod pro konkrétní materiál.

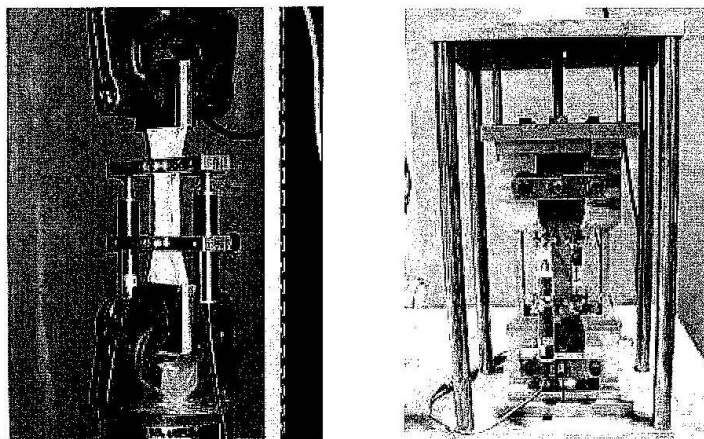
Lze použít i jiné postupy a trámce bude-li potvrzena srovnatelnost výsledků. Jelikož prvky z UHPC jsou obvykle subtilní, je vhodné při jejich vývoji a odvozování materiálových vlastností vzít v úvahu i finální tvar a zvážit potenciální vliv formy a průběhu betonáže na usměrnění vláken (viz popis stanovení K faktoru) na vlastnosti UHPC v prvku. Po úvaze lze tedy metody měření dle ČSN aplikovat na vhodným způsobem navržená a připravená tělesa (vyřezání, betonáže do vhodných forem).

4.2.2.3 ZKOUŠKA PEVNOSTI PROSTÝM TAHEM

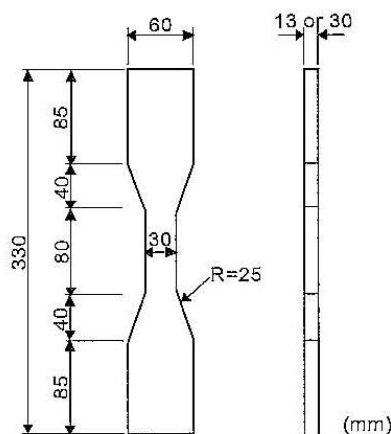
Pevnost v prostém tahu je obecně technicky velmi složitým testem. Obdobně jako při testech v ohybu je nutno získat i u zkoušky v tahu celý pracovní diagram včetně části po vzniku trhliny. V soustavě českých standardů tento zkušební postup není nijak podchycen.

Standards pouze specifikují zkoušku pevnosti prostým tahem, která se provádí na hranolech o průřezu 100 mm x 100 mm nebo na válcích o průměru 100 mm a délky min. 300 mm. Problematické je zejména ukotvení materiálu do zatěžovacího stroje, aby bylo těleso zatíženo pouze osovým tahem, nikoliv kombinací osového tahu a ohybového momentu, který může vzniknout v důsledku excentricity. Zkouška osovým tahem tak, jak je popsána v normě ČSN 73 1318^[51], je u matrice vyztužené vlákny proveditelná jen obtížně, jelikož pro lepení ocelových desek a zkušebních těles by bylo nutné použít epoxidových lepidel s vyšší pevností, než jakou dosahují UHPC materiály.

Tento typ testu jak je popsán, není pro materiál UHPC aplikovatelný a je tedy nutno volit vhodnější způsoby, tj. vycházet z testů v tahu za ohybu. V laboratorních podmínkách lze tento test provést na vzorcích ve tvaru podobném tvaru těles pro zkoušky oceli. Na následujících obrázcích 5 a 6 jsou příklady uspořádání zkoušky a návrh tvaru zkušebního tělesa a jak je uvedeno v materiálu JSCE^[4].



Obr. 5: Způsob provádění tahových zkoušek na tělesech tvaru kost. Převzato z předpisu JSCE



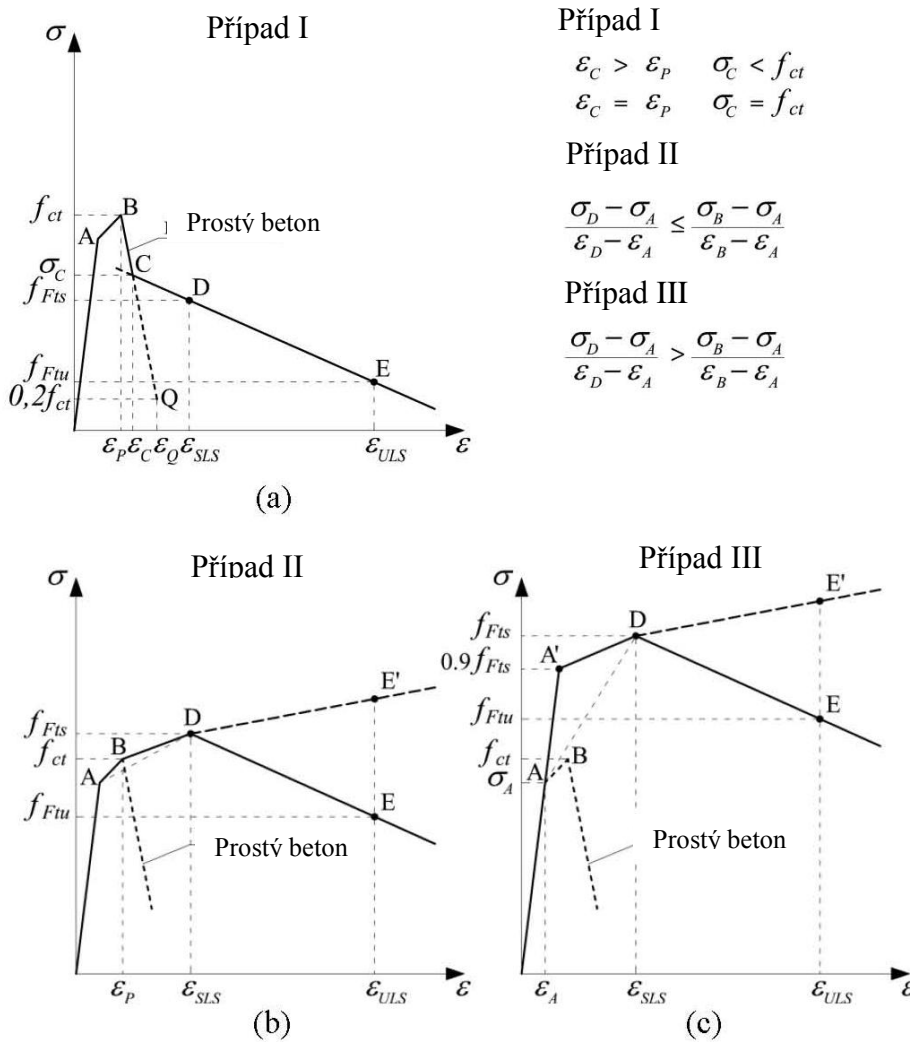
Obr. 6: Návrh tvaru zkušebního tělesa pro zkoušku v prostém tahu dle předpisu JSCE

4.2.2.4 TAHOVÉ CHOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ TYPU UHPFRC

Tahové chování jemnozrnného kompozitního materiálu typu UHPFRC je v pružné oblasti obdobné jako u betonů běžných pevností. Do dosažení hodnoty meze pevnosti v tahu odpovídající tahové pevnosti matrice nevyztužené vlákny je závislost deformace a tahového napětí lineární. U nevyztužené matrice betonů a betonových kompozitů je tahová únosnost vyčerpána po vzniku první trhliny a dochází ke kolapsu nevyztuženého prvku. Toto je jedním z důvodů, proč je beton normálních pevností vyztužován konvenční výztuží. U prvků z UHPC je konvenční výztuž nahrazena výztuží krátkými všesměrně rozptýlenými vlákny (primárně ocelovými). Díky vyztužení křehké matrice je možno používat cementové kompozity i po vzniku trhliny. U jemnozrnných UHPC kompozitních materiálů jsou po vzniku trhliny aktivována vlákna. S postupným rozevíráním a šířením trhlin jsou aktivována vlákna přemostující trhliny. Během šíření a rozevírání se trhlin dochází nejen k aktivaci vláken, ale také k porušení soudržnosti mezi matricí a vlákny. U nekovových, ale i kovových vláken může také dojít k jejich přetržení. Charakter porušení soudržnosti vlákna s matricí nebo vlákna samotného závisí na materiálových a mechanických vlastnostech matrice, kontaktní zóně, kotevní oblasti a vláken.

Množství vláken, jejich délka, štíhlostní poměr, tvar vlákna a typ vlákna, včetně materiálových parametrů, určují nelineární chování materiálu po vzniku trhliny. Při malém stupni vyztužení vlákny dochází k lokalizaci poškození do jedné trhliny, případně do malého počtu mikrotrhlin a porušení konstrukčního prvku. Tento charakter porušení je označován jako tahové změkčení (strain softening). Pokud je materiál schopen přenášet rostoucí zatížení při narůstajícím přetvoření, lze hovořit o tahovém zpevnění (strain hardening).

K tahovému zpevnění dochází po vzniku trhliny a aktivaci vláken za předpokladu, že odpor matrice vyztužené vlákny je vyšší než odpor křehké nevyztužené matrice. Příklady chování materiálu vyztuženého vlákny je na obr. 7^[1].



ε – poměrné přetvoření materiálu pro různá napětí
 σ_{A-D} – napětí celého kompozitu na mezi definované na pracovním diagramu
 $\sigma_A(\sigma_{A'})$ – napětí na mezi pružnosti
 σ_B – napětí na mezi vzniku trhliny (pevnost matrice) – okamžik aktivace
 σ_C – napětí při aktivaci vláken při tahovém změkčení – chování strain softening
 $\sigma_D(\sigma_{E'})$ – napětí na mezi pevnosti
 f_{ct} – napětí na mezi vzniku trhliny matrice = pevnost matrice

Obr. 7: Příklady tahového chování vláknocementových kompozitů dle popisu Modelcode 2010^[1]. Případ I charakterizuje změkčení materiálu (*strain-softening*), případy II a III popisují různé typy tahového zpěvnění (*strain hardening*)

Rozdílné způsoby chování materiálu po vzniku trhliny lze ovlivnit jednak složením samotného materiálu a obsahem vláken, ale také způsobem ukládání čerstvé směsi do bednění.

K tahovému změkčení dochází v případě, kdy při působení tahového napětí dojde k porušení vznikem trhliny v matrici a následné aktivaci vláken. Dosažená hodnota tahového napětí odpovídá prakticky tahové pevnosti samotné matrice. K tomuto může dojít při malém objemovém zastoupení vláken nebo při použití málo efektivních vláken. K aktivaci vláken

dochází až po vzniku a rozvoji dalších trhlin, případně po rozevření trhliny. Aktivace vláken je na diagramu obr. 7a označena jako σ_C . Matematicky lze tento způsob chování materiálu charakterizovat soustavou vztahů uvedených v obr. 7 pro Případ I. Pokud je pevnost v tahu samotné matrice je f_{ct} , pak nemusí platit, že pevnost kompozitu s tahovým změkčením je také f_{ct} . Obvykle se projevuje pozitivní vliv vláken, i když fyzicky nemohou dobře působit. Tahová pevnost dle obr. 7a je ve skutečnosti mírně větší než pevnost f_{ct} samotné matrice.

Tahové zpevnění (strain-hardening) může být charakterizováno různými variantami a mezilehlými tvary diagramů uvedených na obr. 7 (b) (Případ II) a 7 (c) (Příklad III). Matematicky lze tento způsob chování materiálu charakterizovat soustavou vztahů uvedených v obr. 7 pro Případ II a III. U chování dle obr. 7b je velmi pravděpodobné, že UHPC bude do výpočtu zaváděno obvykle také jako tahové změkčení, jelikož pevnost v tahu matrice f_{ct} a hodnota pevnosti při aktivaci vláken σ_B si budou velmi blízké (Příklad II) a rozdíl mezi těmito hodnotami a hodnotou pevnosti na mezi únosnosti σ_D bude malý.

Při aplikaci hodnot K-faktoru, viz kapitola 5.2.1., výše uvedený vztah platit nebude, jelikož snížením hodnot pevnosti v tahu na mezi pevnosti σ_D nebo po vzniku trhliny σ_B dojde k jejímu snížení pod hodnotu pevnosti v tahu na mezi pružnosti σ_A , takže budou platit rovnice, viz rovnice (2), (3):

$$\sigma_B < \sigma_D \times 1/K \quad (2)$$

$$\sigma_A < \sigma_B \times 1/K \quad (3)$$

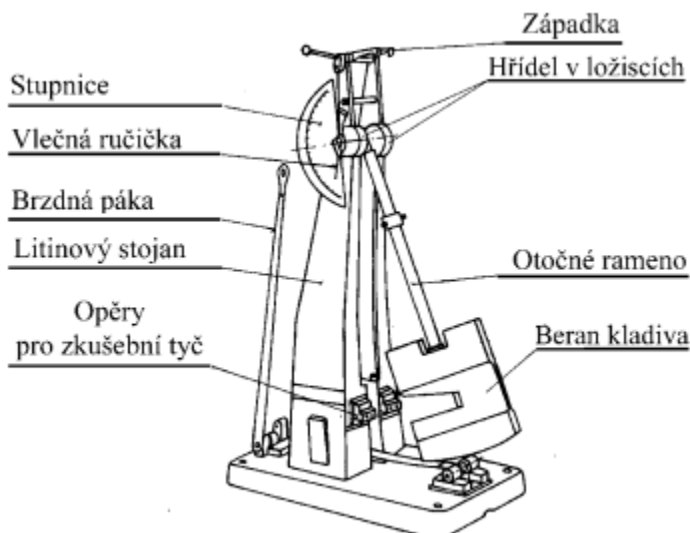
Pokud i při použití redukce residuálních napětí hodnotou K-faktoru bude hodnota napětí při aktivaci vláken σ_B vyšší, než hodnota pevnosti v tahu na mezi pružnosti σ_B , lze toto chování charakterizovat jako tahové zpevnění. K takovému chování dochází při velkém objemovém zastoupení vláken, které je také pro UHPC typické při dávkování na horní hranici obvyklých limitů. Při tomto způsobu vyztužení obvykle nedochází ke vzniku makrotrhliny, ale ke vzniku série mikrotrhlin.

Tahové vlastnosti jsou také závislé na geometrii prvků vyrobených z UHPFRC. Štíhlé prvky jsou charakterizovány tloušťkou prvku e , která je menší než trojnásobek délky vláken. Prvky, které nejsou štíhlé, mají tloušťku prvku e větší než trojnásobek délky vlákna.

Tahová napětí jsou důležitá pro návrh prvků z jemnozrnného kompozitního materiálu UHPC. Z výše uvedených diagramů charakterizujících způsob porušení a aktivace vláken při vzniku trhliny je patrné, že do hodnoty meze pevnosti v tahu $f_{ct, el}$ je závislost mezi tahovým napětím a přetvořením lineární. Po dosažení hodnot meze pevnosti v tahu je pak reziduální tahová pevnost charakterizována závislostí napětí na přetvoření nelineární. Hodnoty přetvoření korespondují se způsobem měření deformace a typem prováděné zkoušky^[3].

4.2.3 ZKOUŠKA PEVNOSTI CHARPYHO KLADIVEM

Zkouška pevnosti tahu použitím Charpyho kladiva patří mezi dynamické zkoušky a doporučením AFGC je tento typ zkoušky akceptován pro stanovení hodnot K-faktoru^[1]. Zkouška Charpyho kladivem je popsána v normě ČSN EN 10045-1^[19].



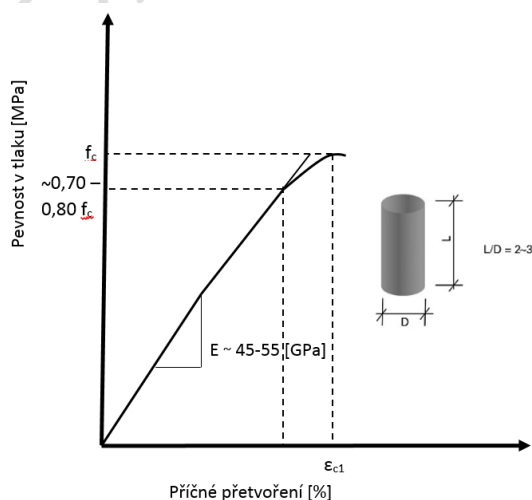
Obr. 8: Schéma Charpyho kladiva

Výsledkem této zkoušky je práce spotřebovaná na přeražení zkoušeného vzorku jako rozdíl potenciálních energií. Tento test může sloužit zejména jako prostředek pro rychlé a informativní zjištění funkce vláken z hlediska rázové odolnosti. Lze tak ověřit pro různé typy vláken a stejnou matici schopnost interakce matrice s nimi (soudržnost) pro absorpci rázové energie.

4.2.4 MODUL PRUŽNOSTI

Zkouška modulu pružnosti je prováděna na tělesech tvaru válce nebo hranolu. V České republice jsou moduly většinou stanovovány na válcových zkušebních tělesech o průměru 150 mm a výšce 300 mm. U zkoušky statického modulu pružnosti v tlaku jsou výsledky závislé nejen na samotném materiálu, ale také na dalších parametrech tak, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1.1. Kromě statického modulu pružnosti v tlaku lze také stanovit dynamický modul a to nedestruktivně pomocí ultrazvuku a elektromagnetické rezonance.

Hodnota pevnosti v tlaku, stejně jako Youngův modul pružnosti v tlaku jsou důležitými faktory pro návrh prvků z UHPC^[3].



Obr. 9: Typický průběh pracovního diagramu při zkoušce v tlaku a modul pružnosti dle [8]

4.3 ZKOUŠKY FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ

4.3.1 MRAZUVZDORNOST

Zkouška lze provést klasicky dle ČSN 731322^[54] jako porovnávací testy na trémciích. Na základě zkušeností lze předpokládat, že vhodně formulovaný materiál s dostatečným obsahem vláken vyhoví na T200 a více.

4.3.2 ODOLNOST PROTI PŮSOBENÍ CH.R.L.

Zkouška lze provést klasicky dle ČSN 731326^[55] nebo metod uvedených v ČSN P CEN/TS 12390-9^[47]. V podmínkách ČR jsou běžně aplikovány metody A a C dle ČSN 731326^[55]. Na základě zkušeností lze předpokládat, že vhodně formulovaný UHPC materiál s dostatečným obsahem vláken vykáže po působení 150 cyklů téměř nulové odpady (méně než cca 100g/m²).

4.3.3 VODONEPROPUSTNOST

Zkouška lze provést klasicky dle ČSN EN 12390-8^[46]. Na základě zkušeností lze předpokládat, že vhodně formulovaný UHPC materiál s dostatečným obsahem vláken vykáže po působení tlakové vody průsaky do max. 1 mm.

4.3.4 POISSONOVA KONSTANTA

Pokud není stanovena měřením jiná hodnota, lze do výpočtu uvažovat hodnotu $\nu = 0,2$ ^[3].

4.3.5 SOUČINITEL TEPLOTNÍ DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI

Pokud není stanoveno jinak, lze uvažovat hodnotu $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$ m/m/°C^[3].

4.3.6 VLIV TEPELNÉHO OŠETŘOVÁNÍ

Mezi hlavní výhody tepelného ošetřování patří rychlejší nárůst pevností, odložení počátku smršťování a dotvarování do doby, kdy je tepelná úprava ukončena a zvýšení trvanlivosti prvků z UHPFRC. Tepelnou úpravu lze provádět v prvních hodinách tvrdnutí, kdy vlivem tepelného ošetřování dochází k urychlení procesu hydratace (proteplení prvního typu). Další možností je provádění proteplování u ztvrdlého cementového kompozitu (proteplení druhého typu). Touto metodou dochází k další hydrataci pojiva a tím ke zvýšení pevnosti cementové matrice a redukci objemových změn. Proteplování je prováděno při teplotě kolem 90°C a vlhkosti blízké saturaci při nastartování směsi. U obou typů proteplování je potřeba dbát opatrnosti, aby nedošlo ke vzniku etringitu, proto je nutné stanovit nejen počátek proteplování, ale také jeho dobu. Při brzké aplikaci může dojít ke snížení pevnosti. Při aplikaci druhého způsobu proteplování získávají prvky jejich finální vlastnosti (dříve než za 28 dní), pevnost v tlaku a tahu je při tepelném ošetřování o cca 10% vyšší než u prvků ve stáří 28 dnů uložených ve vodě. Dle zahraničních zkušeností je celkové smrštění po tepelném

ošetřování konstantní, dotvarování je výrazně redukováno. Díky hydrataci zbývajícího cementového tmele může docházet ke zmenšení pórové struktury a tím ke zvýšení trvanlivosti UHPFRC.

4.3.7 SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ

Charakterizace smršťování v prostředí ČR není ještě podrobně prostudována. S ohledem na rozdílné složení a vysoký obsah cementu nabývá u materiálu UHPC na významu složka autogenního smrštění. Určitou neznámou je i vliv tepelného ošetřování. Při použití tepelné úpravy prvního typu dochází k částečnému smrštění během proteplování. Dle zahraničních zkušeností jsou konečné hodnoty smrštění v zatvrdlém stavu obdobné a srovnatelné s betonem. Hodnoty smrštění na zatvrdlém betonu lze měřit dilatometrickou zkouškou postupem dle ČSN 731320^[53]. Smrštění v plastickém stavu lze u materiálu měřit na specializovaných zařízeních. Tyto testy nejsou zatím normovány ve vývojové fázi je lze však doporučit.

Doporučení AFGC uvádí následující hodnoty konečného smrštění^[3]:

- 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro autogenní smrštění a 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro smrštění vysycháním při uložení těles mimo laboratoř s relativní vlhkostí kolem 50 až 70% pokud nebylo provedeno proteplování
- 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro celkové smrštění při uložení těles mimo laboratoř s relativní vlhkostí 50 až 70% při proteplování v počátečních fázích (první typ tepelné úpravy)
- 550 $\mu\text{m}/\text{m}$ pro celkové smrštění před koncem tepelné úpravy druhého typu, po jehož ukončení nedochází k nárůstu smrštění

Dotvarování UHPC je podobné vysokohodnotným betonům HPC a je obvykle významně nižší než u běžného betonu. Pro tuzemské materiály nejsou zatím známé relevantní informace. Pro konkrétní typ UHPC lze doporučit ověření měřením dle ČSN 731320^[53]. Měření je dlouhodobé a poměrně náročné.

Doporučení AFGC^[3] uvádí informativně následující hodnoty součinitele dotvarování:

- bez tepelné úpravy $\Phi = 0,8$
- s tepelnou úpravou prvního typu $\Phi = 0,4$
- s tepelnou úpravou druhého typu $\Phi = 0,2$

Doporučení [10] publikované v Betonkalender uvádí informativně následující hodnoty součinitele dotvarování:

- bez tepelné úpravy Φ v intervalu 0,6 ... 1,4
- s tepelnou úpravou (ca. 70 °C ... 90 °C) Φ v intervalu 0,2 .. 0,4

5. ORGANIZACE ZKOUŠEK PŘI NÁVRHU PRVKŮ Z UHPC

Při návrhu prvků z UHPC se lze opřít o některé zahraniční publikace jako například AFGC^[3], JSCE-USC^[4], Deutscher Ausschuss für Stahlbeton^[7], Model Code 2010^[1], jejichž autoři se dané problematice věnují již řadulet. Úroveň těchto podkladů z různých zemí je závislá na aktuálnímstupni vývoje tohoto materiálu v dané zemi. V České republice prozatím neexistuje ucelená publikace věnující se problematice UHPC do takové hloubky, jako například francouzské doporučení AFGC. To je způsobeno zejména relativně krátkou dobou několika let intenzivnějšího vývoje tohoto materiálu. Vzhledem k absenci projektových podkladů a zkušeností s tímto novým materiálem, je návrh prvků nebo konstrukce z tohoto typu materiálu nezbytné provádět na základě experimentálně zjištěných dat. Při samotném návrhu prvku je třeba zabývat se komplexní problematikou od složení směsi po samotnou výrobu (betonáž a hutnění) konstrukce a její uvedení do provozu. Mezi hlavní projekční podklady, které je třeba brát v potaz při návrhu, patří pevnost v tlaku, tahu, modul pružnosti, chování prvku po dosažení meze pevnosti v tlaku, objemová hmotnost, pórovitost, stabilita směsi vůči segregaci vláken ke dnu formy, součinitel teplotní a délkové roztažnosti a hodnoty dotvarování a smrštění. K dalším podkladům pak lze třeba zařadit odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek, požární odolnost a další. Tato experimentálně zjištěná data ze zkoušek na zkušebních tělesech jsou pak využita pro statický návrh a posouzení prvků. Pro verifikaci výpočetního modelu je doporučeno provést zkoušku i na modelu konstrukce/stavebního dílu, který je namáhán tak, jak tomu bude v reálné konstrukci. Při sériové výrobě prvků lze z výpočetních modelů navrhnout jednoduché zkoušky, které budou ověřovat spolehlivost vyrobených dílců tak, aby je bylo možné po těchto testech využít i v konstrukcích. Po zabudování prvků z UHPC lze provést sérii zatěžovacích zkoušek, aby bylo možné provést nejen verifikaci modelu, ale také aby bylo možné předejít případné kolizi prvku či konstrukce. Ze získaných dat a měření se pro prvky vytvoří evidenční karty, aby bylo možno v případě nutnosti nahlédnout do „historie“ jednotlivých prvků^[16]. Při návrhu a ověření prvků lze postupovat dle ustanovení ČSN EN 1990.

5.1 ZKOUŠKY V RÁMCI VÝVOJE RECEPTURY UHPC

5.1.1 ZKOUŠKY VÝVOJOVÉ

Při vývoji složení směsi je třeba kromě volby a množství jednotlivých složek věnovat pozornost zejména granulometrickému složení směsi tak, aby byla vytvořena kompaktní struktura matrice s minimem pórů. Při aplikaci vláken je nutno provést úpravu množství drobného kameniva, které bude nahrazeno vlákny. S ohledem na jemnozrnnost materiálu lze při vývoji materiálu UHPC modifikované postupy pro měření čerstvé směsi (zmenšený kužel na zkoušku zpracovatelnosti) i dalších mechanicko fyzikálních vlastností (trámečky 40x40x160 mm) na kterých lze stanovit:

- teplotu čerstvé směsi
- objemovou hmotnost čerstvé směsi
- objemovou hmotnost ztvrdlého jemnozrnného kompozitního materiálu
- dynamický modul pružnosti například pomocí ultrazvuku (3 tělesa)
- pevnost v tahu za ohybu trojbodovým ohybem bez vrubu (3 tělesa)
- pevnost v tlaku na zlomcích trámečků (3 x 2 tělesa)*

- pevnost v tlaku na trámečcích (3 tělesa)
- statický modul pružnosti v tlaku (3 tělesa)
- pevnost v tlaku na trámečcích, na kterých byl stanoven statický modul pružnosti v tlaku (3 tělesa)*
- délkové změny (3 tělesa)

Na základě dosažených výsledků lze případně upravit složení směsi či kvalitu vstupních surovin. Kromě výše uvedených zkoušek je vhodné provést kontrolu distribuce vláken po výšce průřezu a případně upravit složení směsi nebo technologii výroby tak, aby chování směsi nebylo náchylné na segregaci vláken. Kontrolu homogenity lze provést na zlomech trámečků pomocí optické mikroskopické metody na řezné ploše, která bude vytvořena pracovníky poblíž místa vzniku trhliny. Pro odvození chování směsi i po vzniku trhliny a získání tak kompletního diagramu chování materiálu je doporučeno provést také zkoušku na tělesech s vrubem pomocí tříbodového ohybu. Hodnotu lomové energie, bez diagramu odolnosti, lze získat například i pomocí Charpyho kladívka.

5.1.2 ZKOUŠKA UHPC TYPOVÁ (PRŮKAZNÍ)

Průkazní zkouška materiálu UHPC předchází před jeho konečným využitím do konstrukčního prvku případně je prováděna souběžně s výrobou prototypu prvku. Provádění průkazní zkoušky se řídí běžnými požadavky na její zpracování uvedenými např. v ČSN EN 206^[57].

Před zkouškami samotné směsi je nezbytné podrobně charakterizovat vstupní suroviny. S ohledem na zachování určitých jedinečných znalostí lze v rámci zpracování zkoušky některé informace o složení receptury uvést v obecné rovině (např. názvy přísad, zdroje a dávkování vláken, přesné složení receptury a poměry plniv a cementu).

U materiálu UHPC je však potřeba podrobněji popsat chování materiálu v okamžku vzniku a rozevírání trhliny v průběhu tahového namáhání, modul pružnosti či délkové změny konkrétního složení v předpokládaných poměrech ošetřování. Současně je nutno při této zkoušce prověřit reálný postup míchání a dávkování složek. Typovou (průkazní) zkoušku je nezbytné provést na reálném míchacím a dávkovacím zařízení v co nejreálnějších podmínkách provozu.

Pro provedení průkazní zkoušky je nejprve nutno sestavit plán průkazní zkoušky, která kromě základních vlastností (pevnost v tlaku a v ohybu) zohlední také podmínky výroby směsi (popis dávkování), podmínky a postupy výroby konečného prvku a další okolnosti výroby směsi i prvku. Odběr těles je vhodné provést ze tří samostatně provedených záměsí.

V rámci typové (průkazní) zkoušky je tedy nezbytné sledovat minimálně následující parametry.

- teplotu čerstvé směsi
- konzistenci – ČSN EN 12350-8^[35] nebo další testy pro SCC
- objemovou hmotnost čerstvé směsi – ČSN EN 12350-6^[34]
- objemovou hmotnost ztvrdlého jemnozrnného kompozitního materiálu ČSN EN 12390-7^[45]
- pevnost v tlaku na válcích dle ČSN EN 12390-5 (9 těles – 3+3+3 z různých záměsí – štíhlostní poměr válců 1:2, min. průměr 100 mm)^[43]

- informativně v případě dostatečné kapacity zkušebního stroje také pevnost v tlaku na krychlech dle ČSN EN 12390-5 (9 těles – 3+3+3 z 3 různých záměsí)^[43]
- pevnost v tahu za ohybu trojbodovým ohybem s vrubem ČSN EN 14651+A1^[29] (min. 6 těles – 2+2+2 z 3 různých záměsí) pro zjištění závislosti $\sigma \propto x \cdot w$ (závislost zatížení a rozevření trhliny w)
- pevnost v tahu za ohybu čtyřbodovým ohybem bez vrubu postupem dle ČSN P 732452^[58] na trámcích 150x150x700, který je obdobný jako u předpisu DBV^[7] (min. 9 těles – 3+3+3 z 3 různých záměsí) pro zjištění tahové pevnosti a její charakteristické hodnoty
- statický modul pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 1920-10 (min. 6 těles ze tří různých záměsí = 2+2+2 tělesa)^[52]
- délkové změny (smrštění) postupem dle ČSN 731320^[53] po dobu min. 3 měsíce ve dvou různých prostředích (3 - voda, 3- laboratorní, 3- uzavřené proti ztrátě vlhkosti pro ověření autogenního smrštění - tělesa trámce nebo válce)
- zkouška vodotěsnosti dle EN 12390-8^[46] – 3 tělesa
- kontrola distribuce vláken po výšce zkušební krychle (min. 2 krychle) pro zjištění náchylnosti na sedání vláken

Kromě mechanických parametrů je u elementů s předpokládaným exponovaným působením vnějšího prostředí (prostředí typu XF, XD, XA) doporučeno dále zvolit jeden z níže uvedených způsobů ověření korozní odolnosti a provést výrobu těles a zkoušky.

- CH.R.L. dle ČSN 731326^[55] (metody A, C) na válcích 150/50 mm (minimálně 2 ks)
- Mrazuvzdornosti dle ČSN 731322^[54] na trámcích 100x100x400 mm pro požadovaný počet cyklů

Dle potřeby je možno měřit dále teplotní roztažnost, Poissonův součinitel.

Rozhodující jsou vlastnosti stanovené v čase 28 dní po namíchání a uložení těles ve vodě, není-li domluveno jinak.

U pevnosti v tlaku je vhodné zjistit i časový vývoj alespoň ve dvou dalších termínech (např. 2 dny a 90 dní) a kalibrační vztah mezi pevností v tlaku na válci na menších tělesech (např. krychle 100 mm) a tahu za ohybu na trámečcích 40x40x160 mm pro kontrolní výrobní testy.

Průkazní zkouška je zpracovávána tak, aby výsledky mohly být využity pro vytvoření materiálového modelu (zkoušky v ohybu) a odvození charakteristických parametrů materiálu UHPC pro návrh prvků. V rámci zpracování průkazní zkoušky lze doporučit vytvoření kalibračních vztahů mezi normovými tělesy a tělesy menších rozměrů, která lze s výhodou používat následně pro zkoušky výrobní. Jedná se např. o vztah mezi velkými válci 150x300 mm a krychlemi o hraně 100 mm nebo trámcem 150x150x700 mm a trámečkem 40x40x160 mm.

5.2 ZKOUŠKY PŘI VÝVOJI PRVKU

5.2.1 VLIV ORIENTACE VLÁKEN NA TAHOVÉ PEVNOSTI

Konečná pevnost v tahu u finálních prvků do značné míry závisí na ukládání směsi do bednění a to i při dodržení veškerých technických a technologických postupů a pracovní kázně. Vlákna se ve viskózní tekuté fázi orientují ve směru tečení směsi. V oblastech poblíž

stran bednění se vlákna orientují rovnoběžně se stranami bednění. Tento vliv uspořádání vláken rovnoběžně se stranami bednění je nazýván stěnovým efektem. Oblast, ve které dochází k rovnoběžné orientaci vláken se stranami bednění, je menší nebo rovna délce vláken^[3]. Po výšce průřezu dochází k sednutí vláken nejen vlivem vibrace, ale také vlivem stability směsi vůči segregaci vláken a také vlivem gravitace. Uspořádání vláken, jejich poloha a orientace ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti, zejména pak pevnost v tahu. Segregace vláken a nehomogenita distribuce může výsledné vlastnosti ovlivnit jak příznivě, tak i nepříznivě. U subtilnějších prvků je vliv segregace vláken na výslednou tahovou pevnost větší než u prvků masivnějších, kde jsou vlákna všesměrně orientována. V rámci vývoje UHPFRC materiálu se jako způsob řešení problematiky distribuce vláken po výšce průřezu jeví aplikace funkčně vrstvených materiálů tak, aby byla vlákna primárně v tažených oblastech. Návrhem takového prvku by se dal zmenšit i ekonomický dopad na výrobu takového prvku, jelikož vlákna představují jednu z nejdražších složek směsi.

Homogenita distribuce vláken je jedním z technologických problémů, na který je třeba brát ohled při návrhu prvků z UHPC. Kontrola homogenity může být prováděna jak u čerstvé směsi, tak u ztvrdlého kompozitu pomocí destruktivních a nedestruktivních zkoušek.

U čerstvé směsi nelze přesně stanovit rozložení vláken po výšce průřezu, ale lze provádět vizuální kontrolu, případně kontrolu dávkování vláken. Pro stanovení množství vláken v čerstvé směsi lze využít dvou metod. První metodou je využití přístrojů pracujících na bázi magnetu a umožňujících separaci kovových vláken z čerstvé směsi. Další metodou je pracné a zdlouhavé odplavování jemných částic proudem tekoucí vody a následnou separací vláken pomocí magnetu^[13].

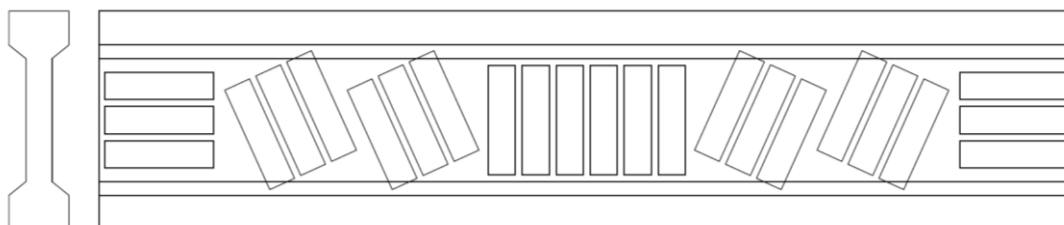
U ztvrdlého kompozitu lze provádět kontrolu jak destruktivními, tak nedestruktivními zkouškami. U nedestruktivních zkoušek je obecně problém v nastavení a kalibraci měřicího přístroje. Celosvětově jsou činěny pokusy spočívající ve využití elektromagnetické indukce^[12], měření elektrického odporu^[13], využití RTG nebo metody fůze. Obecně je ale nedestruktivní stanovení množství a orientace vláken v průřezu problematické, nebo jako u využití RTG finančně náročné.

Stanovení obsahu vláken pomocí kontrolních sond, tzn. destruktivně, je popsáno v normě ČSN EN 14488-7^[50]. Touto metodou lze stanovit množství vláken v objemu vývrtu, ale bez její úpravy ji nelze využít pro kontrolu homogenity distribuce vláken po výšce průřezu^[15]. V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byla vyvinuta optická mikroskopická metoda kontroly homogenity distribuce vláken na řezné ploše. Tato destruktivní metoda je použitelná jak při kontrole stability směsi vůči segregaci vláken ke dnu formy, tak i při kontrole homogenity u prvků vyrobených z UHPC po zkouškách jejich mechanických vlastností.

Při kontrole stability směsi vůči segregaci je možné tuto metodu provést na standardních hranolových či válcových zkušebních tělesech, která jsou rozřezána pilou s diamantovým kotoučem. Na řezných plochách jsou dále vytvořeny sektory o velikosti 10x10 mm. Tyto sektory jsou snímány optickým mikroskopem, který je propojen s PC. Po nasnímání sektorů je prováděno grafické vyhodnocení. Obdobným postupem je tato metoda prováděna i pro kontrolu homogenity u prvků vyrobených z UHPFRC po zkoušce jejich mechanických vlastností. Kontrola probíhá poblíž místa vzniku makrotrhliny, aby bylo možné vztáhnout výsledky kontroly homogenity k výsledkům zkoušek mechanických vlastností. Ze zkušeností vyplývá, že u prvků se stejným objemovým zastoupením drátků je rozdíl mezi prvky, u kterých došlo k segregaci a prvky u kterých k segregaci nedošlo, je v řádu desítek procent v hodnotách jejich únosností v ohybu.

Je ověřenou skutečností že velmi podstatný vliv na orientaci vláken v materiálu prvku má postup betonáže a ukládání UHPC. Vliv orientace vláken na tahovou pevnost je zásadní a je

vhodné ji vzít při návrhu konstrukčního prvku v úvahu. V doporučení AFGC je tento vliv orientace reprezentován hodnotou K-faktoru, který je nutno stanovit z řady ohybových testů popisujících skutečné vlastnosti materiálu v různých místech prvku a v různých směrech působení namáhání (viz obr. 10). Tyto testy je nutno provést v okamžiku návrhu výroby prototypu prvku. Rozdílné hodnoty K-faktoru jsou určeny s ohledem na tahové chování materiálu ve směru hlavních napětí v konstrukci, obr. 10.



Obr. 10: Příklad těles vyřezaných z nosníku pro určení K-faktoru v různé orientaci^[1]

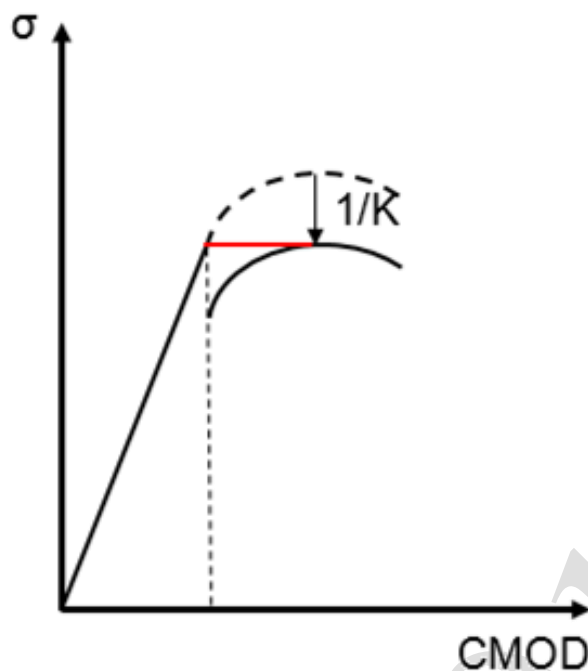
Nejnižší celková hodnota K- faktoru za celý prvek je rozhodující. V potaz jsou brány rozdílné hodnoty K-faktoru. K_{local} koresponduje s lokálními napětími požadujícími dobrou tahovou odolnost v dobře lokalizovaných oblastech, jako jsou například oblasti kolem kotvení předpětí.

K_{global} naopak postihuje větší část konstrukce v oblastech neovlivněných lokálním porušením, jako jsou například oblasti smykového a ohybového napětí desek. K-faktor se do výpočtů zavádí pouze v oblasti po vzniku trhliny, viz obr 9. Snižují se tím hodnoty reziduálních tahových napětí po vzniku trhliny.

Obecně se hodnota K-faktoru stanovuje jako podíl maximálně dosaženého ohybového momentu (M_{max}) k nejvyšší hodnotě z minimálních hodnot ohybového momentu (max. (M_{min})), viz vztah (5):^[1]

$$K = \frac{M_{max}}{\max(M_{min})} \quad (5)$$

Ke stanovení K_{local} pro určitou oblast je vhodné provést min. 3 testy na vyřezaných vzorcích.



Obr. 11: Ilustrace upravy materiálové vlastnosti při aplikaci K-faktoru dle doporučení AFGC

5.2.2 ZKOUŠKY UHPC

Při výrobě prvků z UHPFRC mimo laboratorní podmínky je nutno dodržovat velmi vysokou pracovní kázeň při výběru, skladování a manipulaci s jednotlivými složkami a dodržovat postup dávkování jednotlivých složek i míchání. Spolu s vyráběným prvkem je třeba provést následující kontrolní testy jak na aplikovaném materiálu, tak i na prototypu vyrobeného prvku.

Doporučuje se minimální rozsah takto:

Čerstvá směs:

- rozlítí velkého komolého kuželu dle ČSN EN 12350-8^[35] – každá záměs,
- teplota čerstvé směsi,
- objemovou hmotnost čerstvé směsi – ČSN EN 12350-6^[34],
- výrobu zkušebních těles pro stanovení mechanicko fyzikálních parametrů.

Ztvrdlý UHPC:

- pevnost v tlaku na válcích dle ČSN EN 12390-5^[43] (min. 5 těles pro 28 dní a min. 3 tělesa pro další zvolený čas, výroba dle možnosti z různých záměsí).
- pevnost v tlaku na krychlích o hraně 100 mm nebo 150 mm dle ČSN EN 12390-5^[43] v termínech dle volby (min. 5 těles pro 28 dní a min. 3 tělesa pro další zvolený čas, výroba dle možnosti z různých záměsí). Kalibrace pro kontrolní výrobní testy.
- pevnost v tahu za ohybu trojbodovým ohybem s vrubem ČSN EN 14651+A1^[29] (3 tělesa – dle možnosti různých záměsí), nebo zkouškou pevnosti v tahu za ohybu na trámčích 4 bodovým ohybem dle ČSN P 732452.

- Pevnost v tahu za ohybu a tlaku na sadě malých trámečků 40x40x160 mm dle ČSN EN 196-1^[20] (sada 3 trámečků pro jeden časový termín.). Kalibrace pro kontrolní testy při výrobě.
- statický modul pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 1920-10^[52] (3 tělesa pro časový termín 28 dní, min. 2 tělesa pro ostatní časy v případě potřeby).
- kontrola distribuce vláken po výšce zkušební krychle (min. 2 krychle), Na trámčích nebo válcích lze po jejich odzkoušení také provést kontrolu distribuce vláken optickými metodami (postup KÚ), aby se vyloučila možná segregace vláken ke dnu formy.

Zkoušky na reálném prvku nebo jeho modelu:

- zkouška pevnosti do proušení působením břemen a sil simulujících působení v konstrukci (ohyb, tlak, smyk, kombinace, soustředěné břemeno) nebo dle návrhu zkoušky do zvoleného stupně využití, aby bylo možno provést porovnání s výpočtem – min. 1 zkuškalépe 3 testy na třech různých prvcích – zkoušky provést dle ČSN 732030^[56] a ČSN EN 1990^[31],
- kontrola mechanických vlastností (tlak, tah za ohybu) na vyřezaných částech prvku pro stanovení korekčního faktoru K s ohledem na statický návrh,
- kontrolu distribuce vláken v průřezu po mechanických zkouškách na výřezech v blízkosti lomové plochy (variantně).

Kromě mechanických parametrů je u elementů s předpokládaným exponovaným působením vnějšího prostředí (prostředí typu XF, XD) je v závislosti na výsledku průkazní zkoušky možno i výrobu prototypu doplnit o jeden z níže uvedených způsobů testování odolnosti a provést následující zkoušky:

- CH.R.L. dle ČSN 731326^[55] (metody A,C) na válcích 150/50 mm (minimálně 2 ks)
- Mrazuvzdornosti dle ČSN 731322^[54] na trámčích 100x100x400 mm (minimálně 6 ks pro stanovení hodnot mrazuvzdornosti na zvolený počet cyklů).

5.3 KONTROLNÍ TESTY PŘI VÝROBĚ PRVKŮ

Pro výrobu prvků je nezbytné sestavit kontrolní a zkušební plán s ohledem na základní parametry a hodnotící kritéria při hodnocení testů. Typy testů lze volit z testů uvedených v kapitolách popsaných výše.

Minimální doporučená četnost testů je

- a) Zpracovatelnost a teplota směsi na každou záměs min. 1x.
- b) Pevnost v tlaku – min. 3 vzorky na den míchání (válce nebo krychle nestandardizované – volba dle KZP a stanovených limit plynoucích ze statického návrhu).
- c) Pevnost v tahu za ohybu a tlaku na zlomcích - min. 1 sada trámečků 40x40x160 mm (3 ks) na den míchání (volba dle KZP a stanovených limit).
- d) Zkouška ohybem pro stanovení deformačního diagramu a kontrolu mezí pro rozevírání trhliny – min. 2 a to v úvodu a na konci výrobního cyklu sada 3 ks trámečků (trámce i velikosti 100x100x400 mm nebo 400x40x160 mm – volba dle KZP a stanovených limit plynoucích ze statického návrhu).

V závislosti na prostředí lze doplnit o zkoušku CH.R.L. nebo vodotěsnost po dohodě s projektantem či odběratelem. S ohledem na vysokou odolnost UHPC není tento typ testů zcela nezbytný.

Závislost rozevření trhliny na zatížení – zkouška tříbodovým ohybem dle ČSN EN 14651 (trámce 150x150x700 mm), nebo 4 bodovým ohybem – pouze při pochybnostech o výsledcích z testů dle c).

Ke každému vyrobenému prvku pro jeho zpětnou kontrolu vytvořit záznamový arch, ve kterém by mělo být zaznamenáno:

- označení prvku
- datum a místo výroby prvku
- teplota a relativní vlhkost při výrobě
- složení směsi (číslo receptury)
- postup míchání a ukládání směsi do bednění
- teplotu čerstvé směsi
- zpracovatelnost při výrobě prvku, například rozlitím
- parametry získané mechanickými zkouškami na zkušebních tělesech, pakliže byla odebrána
- záznam o výsledcích zkoušek na stejných prvcích patřících do dané série
- protokoly o jednotlivých zkouškách
- jména a podpisy odpovědných pracovníků

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] fib Model Code for Concrete Structures 2010, ©2013 fib, vyd. Ernst & Sohn
- [2] SETRA/AFGC: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations*, 01/2002
- [3] AFGC/SETRA: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations* (06/2013). Paris CEDEX.
- [4] JSCE, Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks, Rokugo K., (ed.) Concrete Eng. Series, 82, 2008
- [5] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton: Ergänzungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 4 (07/2001). 21. Entwurf. DAfStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2005
- [6] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion*, (2001). ISBN 3-410-65800-9.
- [7] DBV Merkblatt STAHLFASERBETON – Oktober 2001
- [8] Schmidt M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfeste Beton, DAfStb Beton Heft 561, 2008
- [9] Sborník z konference HIPERMAT 3rd International symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Material, Kassel, March 7-9, 2012
- [10] Fehling, Schmidt, Walraven, Leutbecher, Fröhlich: UHPC, BetonKalender 2013
- [11] GRAYBEAL, B. A. - BABY, F. - MARCHAND, P. - TOUTLEMONDE, F. *Direct and Flexural Tension Test Method for Determination of the Tensile Stress-Strain Response of UHPFRC*. Kassel 2012. ISBN: 978-3-86219-264-9.
- [12] FERRARA, L. – FAIFER, M. – TOSCANI, S. *A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fibre reinforced cementitious composites – part 1: method calibration*. Materials and Structures (2012), doi: 10.1617/s11527-011-9793-y.
- [13] LATASTE, J.F. – SIRIEIX, C. – BREYSSE, D. – FRAPPA, M. *Electrical Resistivity Measurement Applied to Cracking Assessment on Reinforced Concrete Structures in Civil Engineering*. NDT & E International (2003) vol 36., Issue 6. ISSN 0963-8695.
- [14] KIM, J. W. – LEE, D. G. *Measurement of Fiber Orientation Angle in FRC by Intensity Method*. Journal of Materials Processing Technology (2008).
- [15] KOLÍSKO, J. - RYDVAL, M. – HUŇKA, P. *UHPC – Assessing the Distribution of the Steel Fibre and Homogeneity of the Matrix*. fib Symposium Tel Aviv, Tel Aviv, Israel. 2013. ISBN 978-965-92039-0-1.
- [16] Kolísko, J. - Tichý, J. - Kalný, M. – Huňka P. – Hájek P. – Trefil, V.: Vývoj ultravysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR, BETON TKS samostatná příloha Betonové konstrukce 21. století betony s přidanou hodnotou, ročník 20. č. 6 samostatná příloha, s. 51-56, ISSN 1213-3116
- [17] Rydval, M. – Kolísko, J – Huňka, P. – Tichý, J.: Závislost únosnosti prvků vyrobených z UHPFRC na distribuci vláken. 20. Betonářské dny v Hradci králové, 27.-28.11.2013, SBN 978-80-87158-34-0/978-80-87158-35-7 (CD)
- [18] Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community, Publication No. FHWA-HRT-13-060, JUNE 2013
- [19] ČSN EN 10045-1 (42 0381) *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*. Praha: Český normalizační institut, 1997. EAN: 8590963420172.
- [20] ČSN EN 196-1 (72 2100) *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [21] ČSN EN 197-1 (72 2101) *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

- [22] ČSN 72 1220 (72 1220) *Mleté vápence a dolomity*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1983.
- [23] ČSN EN 12620+A1 (72 1502) *Kamenivo do betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [24] ČSN EN 450-1 (72 2064) *Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [25] ČSN EN 450-2 (72 2064) *Popílek do betonu - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [26] ČSN EN 15167-1 (72 2090) *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [27] ČSN EN 13263-1+A1(72 2095) *Křemičitý úlet do betonu - Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [28] ČSN EN 13263-2+A1 (72 2095) *Křemičitý úlet do betonu - Část 2: Hodnocení shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [29] ČSN EN 14651+A1 (72 3431) *Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)*. Praha: Český normalizační institut, 2008. EAN: 8590963811147.
- [30] ČSN EN 14889-1 (72 3434) *Vlákna do betonu - Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [31] ČSN EN 1990 (73 0002) *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
- [32] ČSN EN 12350-1 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [33] ČSN EN 12350-5 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [34] ČSN EN 12350-6 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [35] ČSN EN 12350-8 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [36] ČSN EN 12350-9 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [37] ČSN EN 12350-10 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška segregace při prosévání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [38] ČSN EN 12350-11 (73 1301) *Zkoušení čerstvého betonu - Část 11: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlíkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [39] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2006.
- [40] ČSN EN 12390-1 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [41] ČSN EN 12390 - 2 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [42] ČSN EN 12390-3 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843346.
- [43] ČSN EN 12390-5 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. EAN: 8590963843353.
- [44] ČSN EN 12390-6 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. EAN: 8590963858937.
- [45] ČSN EN 12390-7 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [46] ČSN EN 12390-8 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [47] ČSN P CEN /TS 12390-9 (73 1302) *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – Odlupování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [48] ČSN EN 12504-1 (73 1303) *Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [49] ČSN EN 14488-3 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu – Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. EAN: 8590963769554.
- [50] ČSN EN 14488 – 7 (73 1304) *Zkoušení stříkaného betonu – Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006. EAN: 8590963769578
- [51] ČSN 73 1318 (73 1318) *Stanovení pevnosti betonu v tahu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1986. EAN: 8590963310855.
- [52] ČSN ISO 1920-10 (73 1319) *Beton – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 12/2014.
- [53] ČSN 73 1320 (73 1320) *Stanovení objemových změn betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1988.
- [54] ČSN 73 1322 (73 1322) *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*.
- [55] ČSN 73 1326 (73 1326) *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*.
- [56] ČSN 73 2030 (73 2030) *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [57] ČSN EN 206 (73 2403) *Beton – Specifikace, výroba, vlastnosti a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [58] ČSN P 732452 (702452) *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [59] ČSN P 732452 (702452) *Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [60] ČSN EN 1992-2 (73 6208) *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2007.
- [61] Metodika 2–Metodika pro navrhování prvků z UHPC, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014

- [62] Metodika 3 - Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení, výstup projektu TAČR TA 010110269, Kloknerův ústav ČVUT v Praze 2014

Verze 2015