

## Vlastnosti vysokopevnostního betonu s příměsí ocelových vláken

Ing. Martin TIPKA  
Ing. Jindřich ČECH  
Ing. Josef NOVÁK  
ČVUT – Fakulta stavební  
Praha

V současné době existují různé modifikace betonů. Kombinací vysokopevnostního betonu a ocelových vláken vzniká vysokopevnostní drátkobeton. Jeho vlastnosti ovlivňuje mnoho faktorů. Článek se zabývá hodnocením mechanických vlastností vysokopevnostních betonů s příměsí ocelových vláken různého množství a druhu.

Během posledních několika desítek let byla v betonovém průmyslu provedena řada výzkumů, které s sebou přinesly různé modifikace betonů. Významným přínosem se bezesporu stal vysokopevnostní beton (dále HSC – high strength concrete)<sup>1</sup>, který splňuje stále se zvyšující požadavky na nosné konstrukce a na dodržení podmínek trvale udržitelného rozvoje. V současné době se jako velký příslib do budoucnosti jeví, tzv. vláknobeton. Vložená vlákna výrazně eliminují negativní vlastnosti klasického betonu běžných i vyšších pevností. Kombinací obou materiálů vzniká vysokopevnostní vláknobeton.

Vlastnosti vysokopevnostních vláknobetonů jsou podle druhu a množství vláken značně variabilní. Obecně lze konstatovat, že příměs vláken v betonu ve většině případů pozitivně ovlivňuje jeho fyzikálně mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a tahu, smykovou a ohybovou únosnost, tuhost, duktilitu, trvanlivost) a negativně technologii výroby (požadavky na technologickou kázeň při návrhu, výrobě a zpracování čerstvého betonu a následném ošetřování). Predikce konkrétních vlastností vysokopevnostního vláknobetonu je možná pouze na základě znalosti přesného složení čerstvého betonu, především pak na množství a druhu vláken. Vlastnosti je možné prokázat pouze zkouškami.

Dnešní trh nabízí široké spektrum vláken vhodných do betonu, a tak do jisté míry záleží pouze na výrobcí, která vlákna a v jakém množství pro výrobu vysokopevnostního vláknobetonu zvolí. Běžně se můžeme setkat s vlákny syntetickými, skleněnými či uhlíkovými, ovšem v praxi jsou nejrozšířenější vlákna ocelová. Odlišnost druhu vláken neovlivňuje pouze vlastnosti výsledného kompozitu, ale je klíčová pro volbu technologie výroby. Důležitým aspektem v návrhu vláknobetonových konstrukcí je zvolit vždy vlákna pro danou konstrukci optimální. Předpokladem správného navrhování jsou dostatečné znalosti v oblasti návrhu, výroby a vlastností vysokohodnotných betonů s příměsí vláken různých druhů. Článek se snaží poukázat na odlišné vlastnosti a chování vysokopevnostních betonů s příměsí ocelových vláken, tzv. vysokopevnostních drátkobetonů (dále HSSFRC – high strength steel fiber reinforced concrete).

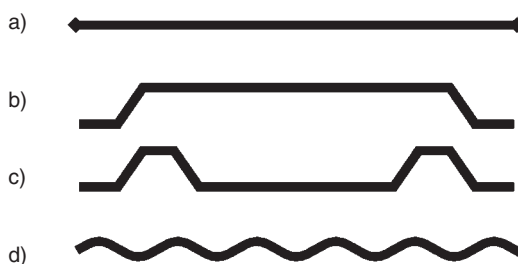
### Ocelová vlákna

S využíváním ocelové výztuže v betonu se začalo koncem 19. století, kdy se ve stavitelství objevil železobeton, v současnosti nejrozšířenější stavební materiál. Důvodem kombinace betonu a oceli byly jejich vlastnosti, které se vhodně doplňují. Není proto překvapením, že i pro vláknobeton se využívají především vlákna na bázi oceli.

V současné době, kdy se využití drátkobetonu v praxi stále rozšiřuje, existuje velké množství ocelových vláken vhodných pro jeho výrobu. Zpracovatelnost čerstvého betonu a účinnost vláken v betonové matici ovlivňují různé faktory. Základním kritériem pro dělení ocelových vláken je druh materiálu použitého pro jejich výrobu [1]:

- skupina I za studena tažený drát,
- skupina II vlákna stříhaná z plechu,
- skupina III vlákna oddělovaná z taveniny,
- skupina IV vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
- skupina V vlákna frézovaná z ocelových bloků.

Významnými aspekty, které ovlivňují zpracovatelnost a konečné vlastnosti HSSFRC, jsou tvar, štíhlost a pevnost vláken. Podle tvaru se ocelová vlákna dělí na přímá a tvarovaná (obr. 1), v obou případech se může využít různých kotveních úprav, které ovlivňují soudržnost vlákna s betonem. Ocelová vlákna se také mohou dodávat s povrchovou úpravou. Štíhlost ocelových vláken, tj. poměr délky a průměru vlákna  $\lambda_f = L/d$ , se pohybuje mezi 30-80. Se zeshňlováním vláken sice roste jejich efektivnost, dochází však k výraznějšímu nakypření kameniva a ke zhoršení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Z hlediska pevnosti rozlišujeme ocelová vlákna běžná (pevnost v tahu 400-1 450 MPa) a vysokopevnostní (pevnost v tahu okolo 2 000 MPa a více).



Obr. 1. Typický tvar ocelových vláken  
a – přímé vlákno s úpravou konce; b – přímé vlákno s jednoduchým hákem; c – přímé vlákno s dvojitým hákem; d – tvarované zvlněné vlákno

Technologický návrh směsi a konečné vlastnosti HSSFRC (včetně chování) mohou být vzhledem k různorodosti ocelových vláken značně variabilní. Důkazem je studie [2], která

<sup>1</sup> Podle ČSN EN 206-1: má pevnostní třídu v tlaku větší než C 50/60 pro obyčejný a těžký beton a LC 50/55 pro lehký beton.




se zabývá hodnocením fyzikálně mechanických vlastností vysokopevnostních betonů s příměsí ocelových vláken různého druhu a množství.

## Vysokopevnostní drátkobetonu

### Složení čerstvého betonu

Pro experimentální studii fyzikálně mechanických vlastností HSSFRC byla vybrána ocelová vlákna tří typů (tab. 1). Typy I a II mají shodný přímý tvar s úpravou konce v podobě jednoduchého háku, vlákno typu III je tvarované vlnité. Významný rozdíl představuje pevnost v tahu, kdy vlákna typu I a III mají běžnou pevnost proti vláknu typu II, které je vysokopevnostní. Ostatní parametry jsou totožné. Důležité to je především u štíhlosti vláken  $\lambda_f$ . Stejně hodnoty poměru  $\lambda_f$  u všech druhů vláken snižují možné riziko ovlivnění výsledných hodnot fyzikálně mechanických vlastností betonu z důvodu rozdílných vlastností čerstvého betonu.

Tab. 1. Typ ocelových vláken

Parametr	Druh vlákna		
	typ I	typ II	typ III
tvar			
materiál	ocel	ocel	ocel
tvar	přímý	přímý	vlnitý
povrch	hladký	hladký	hladký
průřez	kruhový	kruhový	kruhový
kotvení (úprava konce)	háček	háček	žádná
délka $L_f$ [mm]	50	50	50
průměr $d_f$ [mm]	1	1	1
poměr $\lambda_f = L_f / d_f$	50	50	50
pevnost v tahu $f_t$ [MPa]	1 100	1 900	1 100

Tab. 2. Složení betonové směsi

Složka	Vysokopevnostní beton s příměsí vláken			
	typ 0	typ I <sup>20/40/60</sup>	typ II <sup>20/40/60</sup>	typ III <sup>20/40/60</sup>
cement $c$ [kg]	400	400	400	400
voda $w$ [kg]	132	132	132	132
popílek $p$ [kg]	100	100	100	100
kamenivo [kg]	0-2	696,9	696,9	696,9
	2-8	443,3	443,3	443,3
	8-16	638,4	638,4	638,4
vlákna [kg]	0	20/40/60	20/40/60	20/40/60
vodní součinitel $w_w = w/i$	0,33	0,33	0,33	0,33
upravený vodní součinitel $w_w = w/(c + p)$	0,264	0,264	0,264	0,264
superplastifikátor	2,5	10,4/11,6/12,4	10,4/11,6/11,6	10,4/11,6/11,6
zpomalovač tuhnutí	0,2	0,8/2,0/2,4	0,8/2,0/2,4	0,8/2,0/2,4

Pro výrobu zkušebních vzorků byly namíchány betonové směsi s příměsí ocelových vláken různých typů (I, II a III), pro každý v množství 20, 40 a 60 kg·m<sup>-3</sup> betonu, a referenč-

ní směs prostého vysokopevnostního betonu (tab. 2). Zmíněné směsi měly téměř totožné složení, kromě typu a množství obsažených drátků se receptura lišila pouze množstvím jednotlivých přísad (superplastifikátoru, zpomalovače tuhnutí), a to v závislosti na množství a druhu vláken. Důvodem bylo zajištění porovnatelné zpracovatelnosti všech betonových směsí.

### Fyzikálně mechanické vlastnosti

Experimentální zkoušky HSSFRC slouží pro znázornění chování betonu, na základě něhož jsou získávány informace pro navrhování konstrukcí. Fyzikálně mechanické vlastnosti HSSFRC byly ověřeny zkouškami ztvrdlého betonu v souladu s platnými českými normami pro obyčejný beton. Pevnost v tlaku a příčném tahu byla zkoušena na krychlicích o hraně 150 mm, pevnost v tahu za ohybu na hranolech čtvercového průřezu 150x150 mm, délky 700 mm čtyřbodovým ohybem, kdy zkoušený vzorek je zatěžován dvěma osamělými silami působícími ve třetinách rozpětí. Uvedené výsledky představují vždy průměrnou hodnotu ze šesti vzorků.

Pro hodnocení vlastností HSSFRC byly zkoušeny vzorky HSC a HSSFRC s příměsí různých typů ocelových vláken (I, II a III) a různého množství (20, 40 a 60 kg·m<sup>-3</sup> betonu). Při pohledu na obr. 2 je patrné, že pevnost všech HSSFRC dosahuje vyšších hodnot v porovnání s HSC. Důležité však je uvědomit si, v jakých případech má přítomnost vláken v betonové matici výrazný vliv.

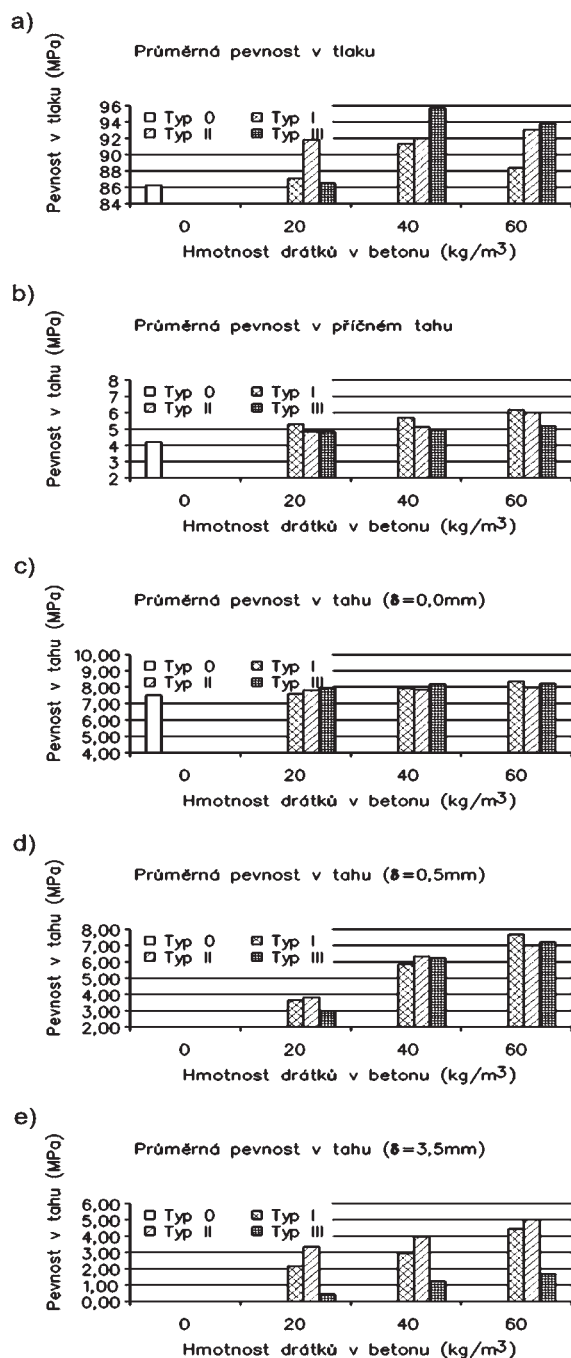
V případě pevnosti v tlaku (obr. 2a) můžeme pozorovat značný nárůst absolutních hodnot (až o 10 MPa) vlivem přidaných vláken. Uvážíme-li však, že představuje zhruba jen 10 % pevnosti v tlaku HSC, není vliv na pevnost v tlaku HSSFRC až tak významný. Za povšimnutí stojí rozdíl pevnosti podle množství přidaných vláken. Betony s obsahem vláken 40 kg·m<sup>-3</sup> ve dvou případech dosahují vyšší pevnosti než betony s obsahem vláken 60 kg·m<sup>-3</sup>. Příčinou může být horší kvalita čerstvého betonu, způsobená nadměrným množstvím ocelových vláken. Při vysokém stupni vyztužení klesá kompaktnost kompozitu, což má negativní vliv na konečné parametry ztvrdlého betonu.

Vliv vláken na pevnost v příčném tahu (obr. 2b) je v porovnání s pevností v tlaku v jistém pohledu zcela opačný.

Maximální nárůst pevnosti dosahuje pouze 2 MPa, nicméně to odpovídá zhruba 50 % tahové pevnosti prostého HSC. V tomto směru má přítomnost vláken v betonu zásadní význam. Při pohledu na chování betonů s odlišným množstvím ocelových vláken lze konstatovat, že vyšší množství pozitivně ovlivňuje pevnost v příčném tahu. Druh vlákna nemá na výsledné hodnoty téměř žádný vliv, pouze betony obsahující vlákna typu III (tvarovaná vlnitá vlákna běžné pevnosti) nedosahují s rostoucím obsahem vláken takových pevností jako betony s ostatními druhy vláken.

Pevnost v tahu za ohybu (zejména v okamžiku rozvoje trhlin) ukazuje, proč jsou vysokopevnostní vláknobetonu s příměsí

nejen ocelových vláken příslibem do budoucnosti. V chování HSC a HSSFRC na úrovni vzniku trhlin (obr. 2c) není viditelný rozdíl, resp. pevnost v tahu za ohybu dosahuje



Obr. 2. Mechanické vlastnosti HPC

u všech typů zkoušených vzorků téměř shodných hodnot. Pozitivní vliv ocelových vláken v betonové matrici lze pozorovat až na úrovni šířky trhliny 0,5 mm, resp. 3,5 mm, kdy HSSFRC vykazují na rozdíl od prostého HSC určitou reziduální pevnost v tahu za ohybu. V případě prostého HSC nastává při dosažení tahové pevnosti v krajních vláčkách křehký lom, jev typický zejména pro betony vyšších tříd. Právě tento negativní jev, který omezuje navrhování nosných konstrukcí z prostého HSC, je možné potlačit přítomností dostatečného množství vláken v betonové matrici. Důležitým faktorem, který ovlivňuje chování betonu po vzniku trhliny, je množství vláken v betonu. Tato skutečnost je nejvíce patrná u pevností na úrovni trhliny 0,5 mm (obr. 2d), kdy betony s obsahem vláken 20 kg·m<sup>-3</sup> vykazují poloviční pevnost proti betonu s obsahem 60 kg·m<sup>-3</sup>. Mimo to lze

předpokládat, že existuje reálné nebezpečí (vzhledem k množství vláken v betonu a jejich tahové pevnosti) chování takového betonu jako prostého.

Technologický postup výroby čerstvého betonu nemusí být vzhledem k malému množství vláken vyhovující, přesněji řečeno, rozptýlení vláken může být značně nerovnoměrné. Vzniklý prvek je výrazně nehomogenní a v lokálních oblastech může dojít k jeho křehkému porušení. Tento negativní jev se dá do jisté míry vyloučit stanovením minimálního obsahu vláken v betonu, jehož hodnota by na základě této studie mohla činit 40 kg·m<sup>-3</sup> betonu. Odlišné chování betonu s příměsí různých druhů vláken lze vysledovat z pevností stanovených na úrovni šířky trhliny 3,5 mm (obr. 2e). HSSFRC, obsahující vlákna typu I a typu II (přímá vlákna), vykazují výrazně vyšší pevnost než beton s příměsí vláken typu III (tvarované vlákno). Důvodem je bezesporu tvar vláken, lze však jen těžko říci, do jaké míry ovlivňuje pevnost v tahu za ohybu tvar jako takový (přímý a tvarovaný) a do jaké míry úprava konce vláken (jednoduchý hák a bez úpravy konce). Za povšimnutí také stojí výraznější vliv vysokopevnostních ocelových vláken na pevnost HSSFRC na úrovni trhliny 3,5 mm.

## Závěr

Cílem článku je seznámit čtenáře s chováním HSSFRC s příměsí různého typu a množství ocelových vláken. V první části je uvedeno dělení podle tvaru vláken a základního materiálu pro výrobu. Druhá část je zaměřena na vyhodnocení mechanických vlastností HSC a HSSFRC, zejména pak na chování HSSFRC s přítomností ocelových vláken odlišného množství a typu.

Experimenty byly zjištěny pozitivní vliv ocelových vláken v betonové matrici na fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. Především hodnoty v příčném tahu a v tahu za ohybu vykazují vyšší pevnosti než u prostého HSC. Významným přínosem se jeví reziduální pevnost po vzniku trhlin, která u prostého betonu chybí. Tvar vláken a odlišná pevnost v tahu nemá až takový vliv na fyzikálně mechanické vlastnosti betonu, nicméně mírně kvalitnější se jeví vlákna přímého tvaru s úpravou konce. Rozdíl je patrný např. u pevnosti v tahu za ohybu při značném rozvoji trhlin. Na závěr je důležité upozornit, že předpokladem zlepšených mechanických vlastností HSSFRC je správný technologický návrh, výroba a ošetřování čerstvého betonu včetně zajištění dostatečného množství a rozptýlení ocelových vláken v betonové matrici.

## Literatura

- [1] PN ČMB 01-2008 Vláknobeton (FC) – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
- [2] Holschemacher, K. – Mueller, T. – Ribakov, Y.: Materials and Design – Effect of Steel Fibers on Mechanical Properties of High – Strength Concrete. Materials and Design, 31 (2010), 2604–2615.
- [3] Vodička, J. – Veselý, V. – Krátký, J.: Specifika z technologie vláknobetonu. Beton TKS, 2010, č. 2.
- [4] ČSN EN 206-1: Beton - část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.

---

**Tipka, M. et al.: Properties of High Strength Concrete with Addition of Different Types of Steel Fibres**

There are different modifications of concrete at present. High strength steel fibre reinforced concrete (HSSFRC) is a combination of two attractive materials: high strength concrete (HSC) and steel fibre reinforced concrete (SFRC). Many aspects have effects on the properties of HSSFRC. This paper deals with the mechanical properties of HSC with the addition of different amounts and types of steel fibres.

---

**Tipka, M. u. a.: Die Eigenschaften von hochfestem Beton mit einer Beimischung von Stahlfasern verschiedener Arten**

Gegenwärtig gibt es verschiedene Modifikationen von Betonen. Durch die Kombination von hochfestem Beton und Stahlfasern entsteht hochfester Stahlfaserbeton (HSSFRC). Die Eigenschaften des HSSFRC werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Dieser Artikel befasst sich mit der Bewertung der mechanischen Eigenschaften hochfester Betone mit einer Beimischung von Stahlfasern verschiedener Menge und Art.

---