

POŽÁRNÍ SPECIFIKA KONSTRUKCÍ Z TEXTILNÍHO BETONU

FIRE SPECIFICS OF STRUCTURES OF TEXTILE-REINFORCED CONCRETE

RICHARD FÜRST¹, MAREK POKORNÝ²

Abstract – Development of concrete constructions is advanced nowadays. Currently, there is much greater requirements for constructions in terms of load-bearing capacity, sizes and visual quality. Therefore, the composite materials are used more often. The motivation for this paper is to approach a behaviour of textile reinforced concrete (TRC) during a fire situation. Main part of TRC are carbon fibres with matrix, mostly from synthetic resins. From the view of fire safety, design of TRC construction is a critical part in terms of the effect of fire. From this reason is necessary to make detailed thermal analysis and describe behaviour of individual components in high temperature. There were some fire experiments in FireLab with in University centre for energy efficient buildings, CTU in Prague performed. These experiments showed critical points of TRC. It is quite important to fix them before they will be used for load-bearing constructions. At the end, there are proposed future experiments, which can describe the behaviour of TRC in more detailed way.

Keywords – textile concrete; carbon fibre; epoxy resin; composite material; high performance concrete

ÚVOD

Vývoj betonových konstrukcí v poslední době velmi pokročil. Zejména v oblasti mechanických, rozměrových a pohledových vlastností, kvůli požadavkům na jejich změny. Základním prvkem pro docílení splnění těchto požadavků jsou především vysokohodnotné betony (HPC – High Performance Concrete), popřípadě ultravysokohodnotné betony (UHPC – Ultra High Performance Concrete), které vynikají svými mechanickými parametry a při vhodném provedení i vyhovující pohledovou kvalitou. Podobně jako u běžných betonových konstrukcí je nutné zvýšit únosnost přidáním tahové výztuže. Vzhledem k požadavku na stále subtilnější konstrukce je vhodné použití **alternativního typu výztuže**, který má dobrou odolnost proti chemické degradaci. Tyto alternativní výztuže nepotřebují masivní tloušťku krycí vrstvy, jako je tomu u konstrukcí s klasickou ocelovou výztuží, neboť jsou **navrženy** pouze s **ohledem na spolupůsobení materiálů**. Nejčastěji jsou proto použity výztuže na bázi textilních vláken z uhlíku, čediče a skla. Základní podmínkou pro použití těchto vláknitých výztuží je zajištění redistribuce napětí do celé plochy vlákna, aby bylo docíleno maximálního využití výztuže.

Tato schopnost je zajištěna přidáním povrchové úpravy, tzv. matrice, po celém jejím povrchu, přičemž na výrobu matrice se používají nejčastěji syntetické pryskyřice. Tato vrstva při plném prosycení primárně zapojuje všechna vlákna do spolupůsobení se zbytkem betonové konstrukce a zároveň má sekundární funkci v podobě ochranné vrstvy zajišťující dodatečnou ochranu proti atmosférické korozi.

Z výše zmíněných materiálů, které dohromady tvoří textilní beton (TRC – Textile Reinforcement Concrete), jsou v současné době v ČR používány především pro nosné konstrukce (jako jsou fasádní pláště a designové pohledové prvky). Vzhledem k mechanickým vlastnostem kompozitu mají konstrukce **vysoký potenciál** pro tvorbu prutových nosných konstrukcí.

Cílem této práce je poukázat na chování těchto konstrukcí, protože ve správné kombinaci materiálů lze využít výrazně subtilnějších konstrukcí s pohledovou kvalitou o vysoké pevnosti.

Tento kompozitní materiál s sebou však nese úskalí týkající se chování těchto konstrukcí za zvýšené teploty, neboť dojde výrazně rychleji k celkovému prohřátí prvku, zejména kvůli absenci krycí vrstvy (tloušťky od cca 5 mm). Dochází tedy k rychlému překročení teploty vzplanutí syntetické matrice. To může negativně přispí-

¹ Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze, Trinecká 1024, 273 43 Buštěhrad, richard.furst@uceeb.cz

² Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze, Trinecká 1024, 273 43 Buštěhrad, marek.pokorny@uceeb.cz

vat k rozvoji požáru v objektu, tudíž klasifikace druhu konstrukce DPxx (dle české legislativy řady ČSN 73 08xx) nemusí být vždy jednoznačná. Zároveň však může mít negativní vliv na samotnou nosnou konstrukci, kde obvykle dochází k masivnímu odštěpení betonu vlivem vzniklých par z odpařené pryskyřice. Z tohoto důvodu byla provedena indikativní požární zkouška (viz kapitola 2).

Sledované mechanické vlastnosti jsou: **charakteristická pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu tří a čtyřbodovým ohybem**. Jejich hodnoty byly změřeny a porovnány s referenčními vzorky vytvořenými ze stejné šarže betonové směsi nevystavené však účinku požáru

1. VLASTNOSTI POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

1.1 Vysokohodnotný beton

Hlavní složku v TRC tvoří vysokohodnotný beton, jehož směs byla vyvinuta v rámci Fakulty stavební ČVUT v Praze [1]. Tato betonová směs při dodržení postupu výroby dosahuje výborných mechanických vlastností za běžné teploty (tab. 1).

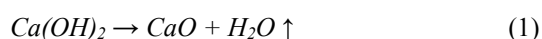
Tab. 1: Mechanické vlastnosti vyzrálé etonové směsi

Veličina	Jednotky	Hodnota
Pevnost v prostém tlaku	MPa	140,0
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	19,3
Modul pružnosti	GPa	49,5

Vzhledem k vysoké tlakové pevnosti je HPC jednou z nejlepších variant, kterou je možné použít pro realizaci subtilních kompozitních konstrukcí z TRC. Vysoká pevnost ale s sebou nese riziko horšího chování za zvýšených teplot. Dle [2] je počítáno zejména s odštěpováním povrchových vrstev, a proto je **nutné** chování, konkrétně této betonové směsi **experimentálně ověřit**.

Na odštěpování má vliv především malý vodní součinitel s následnou absencí pórů, které by mohly odvádět pórové tlaky vodní páry vzniklé při zvýšených teplotách [3]. Po vyzrání je betonová vrstva **parotěsná**, což k riziku odštěpování přispívá negativně.

Jako pojivo do HPC je nevhodnější použití cementů, které mají **větší příměsi** jako je například popílek, struska apod. Cílem je eliminace části portlandského slínku, který při hydrataci vytváří tzv. **portlandit** ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), který při zvýšené teplotě ztrácí vázanou vodu (až 1 % objemového procenta betonové směsi) a dochází tak k objemovým změnám a zároveň se při teplotách vyšších než 500 °C se dále rozkládá podle (1) na [4]:



kde jedním z krizových produktů vzniklých z chemického rozkladu je **voda** v podobě vodní páry, což v kombinaci s parotěsností vyzrálé betonové konstrukce vnáší další riziko odštěpení vlivem nárůstu pórových tlaků.

1.2 Textilní výztuž

Alternativou tradičních kovových výztuží je při správném provedení a kombinaci možné použít výztuž na bázi nekovových vláken. Tato vlákna se sdružují do svazků, tzv. rovingů. V současné době jsou textilní výztuže použity při výrobě nenosných konstrukčních prvků, jako jsou například fasádní panely nebo designové prvky. Nejčastěji jsou použity textilní **výztuže na bázi uhlíku, skla nebo čediče**. Jejich hlavní výhodou je dobrá chemická odolnost proti atmosférické korozi, kde je teoreticky možné navrhovat nosné konstrukce s výrazně subtilnější krycí vrstvou v řádech jednotek milimetrů pouze s ohledem na spolupůsobení materiálů. Ve výsledku je tak možné značně redukovat množství použitého betonu.

Z textilních výztuží dosahuje uhlíkové vlákno nejlepších mechanických vlastností, jako je pevnost v tahu či modul pružnosti (tab. 2). Z hlediska požární odolnosti je uhlík prvkem s nejvyšší teplotní odolností s teplotou tání okolo 3650 °C. Teplota tání je vyšší než teplota, které je běžně dosaženo během požární situace (teploty konstrukcí během požární situace pohybující obvykle do 1000 °C), a nehrozí tudíž, jako u ostatních typů textilií, že by mohlo dojít k roztavení materiálu výztuže. Následkem roztavení by byla konstrukce fatálně oslabena a mohlo by dojít k jejímu kolapsu.

Tab. 2: Porovnání mechanických vlastností textilních výztuží

Veličina	Jednotky	Uhlíkové vlákno [5]	Skelné vlákno [6]	Čedičové vlákno [7]
Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	~2	~2,5	~2,75
Teplota tání	°C	3650	700	1100
Pevnost v tahu	GPa	2,92	3,5	~4,48
Modul pružnosti	GPa	240	77,5	8,89
Průměr vlákna	μm	7-10	12-20	7-15

1.3 Syntetická matrice

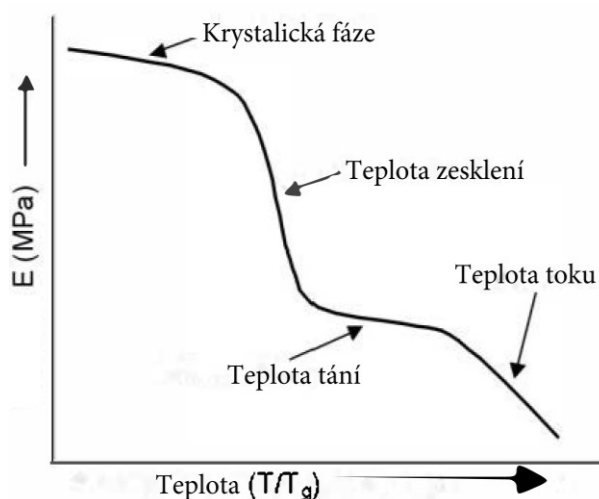
Oba výše zmíněné materiály jsou z hlediska požární odolnosti a mechanických vlastností vyhovující. Je ovšem nezbytné zajistit jejich **spolupůsobení**, jež je zprostředkováno maticí, nejčastěji ze syntetických pryskyřic.

Hlavní funkcí matrice je při plném prosycení svazku redistribuce napětí do všech jednotlivých vláken rovingu. Zároveň syntetická vrstva poskytuje dodatečnou ochranu proti atmosférické korozi nebo mechanickému poškození. Tato schopnost je pozitivní

zejména u výztuží ze skla nebo čediče. Uhlíková vlákna jsou schopna atmosférické korozi odolávat bez dodatečné ochrany.

V současné době se pro matrice textilních výztuží využívají zejména **epoxidové pryskyřice**. Důvodem jsou jejich dobré mechanické vlastnosti za běžné teploty a možnost jejich zpracovatelnosti. Epoxidy často vytvrzují při pokojové teplotě, a proto není potřeba další vytvrzování za vyšších teplot.

Nevýhodou syntetických matic je špatná odolnost proti vysokým teplotám. V případě TRC je tato teplota reprezentována teplotou skleného přechodu, při které dochází k výrazným deformacím a při které předpokládáme vyloučení výztuže ze spolupůsobení, kde dochází k významnému snížení modulu pružnosti (obr. 1). Na výšku teploty skelného přechodu má vliv především molekulová hmotnost a samotná distribuce molekul v polymeru.



Obr. 1: Termomechanická křivka polymeru [8]

Molekulovou distribucí rozumíme statistické určení střední (průměrné) molekulové hmotnosti. Distribuci molekulových hmotností lze vyjádřit tzv. distribuční křivkou, ve které je znázorněna závislost hmotnosti polymeru na velikosti makromolekuly (frakce) a délce makromolekulárního řetězce [9].

2. POPIS EXPERIMENTU

V návaznosti na provedenou rešerši problematiky TRC byla navržena malorozměrová indikativní požární zkouška v požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze. Cílem zkoušky bylo posouzení chování materiálu při zatěžování podle nominální normové teplotní křivky ISO 834, s následným porovnáním mechanických vlastností vzorků nevystavených a vystavených vysokým teplotám.

Zkušební vzorky byly zhotoveny v podobě trámečků a desek ve čtyřech následujících variantách:

- **vzorek A:** 40×160×40 mm; HPC bez textilní výztuže a bez polypropylenových vláken,
- **vzorek B:** 40×160×40 mm; HPC bez textilní výztuže s přidanými polypropylenovými vlákny,
- **vzorek C:** 100×360×18 mm; TRC bez přidaných polypropylenových vláken,
- **vzorek D:** 100×360×18 mm; TRC s přidanými polypropylenovými vlákny.

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, vlastnosti HPC za zvýšené teploty jsou výrazně horší než u běžných betonů. Je to způsobeno nízkým vodním součinitelem (minimální množství záměsové vody). Díky tomu je v betonu malé množství pórů, které by umožňovalo odvod vodních par a uvolňovala tak narůstající párové tlaky uvnitř konstrukce. Proto v případě vzorků řady B a D byly do betonové směsi přidány polypropylenová vlákna. Vzorky byly následně umístěny do vyzděné stěny zkušební pece z pórobetonových tvárnic (obr. 2).



Obr. 2: Uchycení trámečkových vzorků v čelní stěně pece z pórobetonových tvárnic

Pro indikativní zkoušku byla využita středněrozměrová požární pec o rozměrech 1,2 × 0,8 × 0,8 m s přirozeným větráním otvory v bočních stěnách a s pískovým propánovým hořákem umístěným na podlaze ve středu pece (obr. 3).



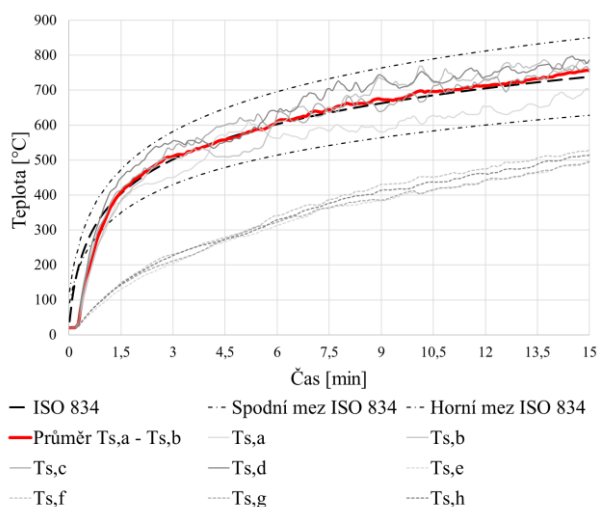
Obr. 3: Středněrozměrová požární pec s čelními stěnami z pórobetonových tvárnic s instalovanými zkušebními vzorky

Měření teplot uvnitř spalovacího prostoru probíhalo za pomoci plášťových termočlánků. Vzhledem k umístění zkušebních vzorků (v horní části pece) byla teplota sledována zejména v úrovni zkušebních vzorků. Pro tyto účely byly umístěny celkem 4 termočlánky typu K tl. 3 mm s koncovkou MTCKK. Tyto termočlánky umístěné v horní části spalovacího prostoru byly označeny $T_{s,a}$ – $T_{s,d}$. Dále byl měřen průběh teplot ve spodní vrstvě spalovacího prostoru. Tyto termočlánky nesly označení $T_{s,e}$ – $T_{s,h}$.

Naměřené teploty v horní vrstvě spalovacího prostoru teplot jsou srovnávány s průběhem teplot podle následující rovnice nominální normové teplotní křivky (2):

$$T = 20 + 345 \times \log(8t + 1) \quad (2)$$

kde T je teplota ve $^{\circ}\text{C}$ a t čas v minutách. Naměřené průběhy teplot ve spalovacím prostoru, obr. 4.



Obr. 4: Průběh teplot uvnitř spalovacího prostoru s porovnáním s ISO 834

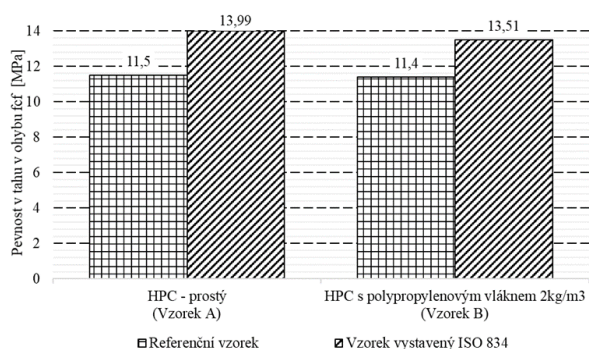
Celková doba zkoušky byla naplánována na 30 minut. Vzhledem k masivnímu odštěpení zkušebních vzorků byla zkouška ukončena po 15 minutách.

3. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V první řadě byla stanovena pevnost v tahu ohybem na trámečkových vzorcích o výše zmíněných rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm. Pevnost v tahu za ohybu je přepočtena podle vzorce (4):

$$f_{cf} = 3/2 \times (F_0 \times l) / d_1 \times d^2 \quad (4)$$

kde f_{cf} je zájmová pevnost v tahu za ohybu v MPa, l vzdálenost podpor, a hodnoty d_1 a d_2 šířky zkušebního tělesa. Dosažené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu jsou znázorněny v grafu na obr. 5.

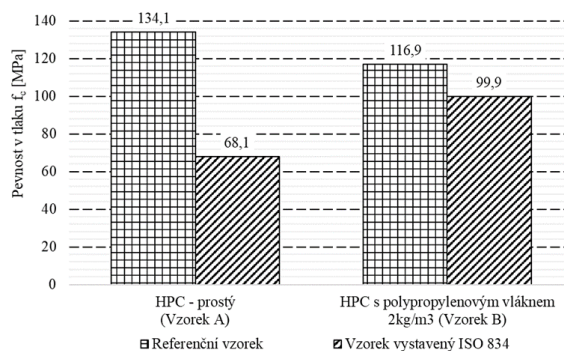


Obr. 5: Naměřené hodnoty pevnosti v tahu za ohybu

Zkouška pevnosti HPC v tlaku se prováděla standardně jako u betonů s běžnou pevností. Jako zkušební tělesa pro zkoušky pevnosti v tlaku sloužily zlomky trámečků $40 \times 40 \times 160$ mm z předešlé zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Vzorek byl rovnoměrně zatížen v lisu až do explozivního porušení. Pevnost vzorku v tlaku byla následně přepočítána podle vzorce (5):

$$f_c = F_t / A_c \quad (3)$$

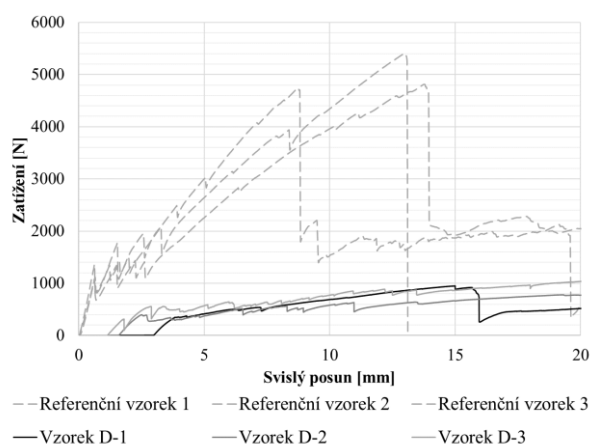
kde f_c je pevnost v tlaku v MPa, F_t velikost síly v kN a A_c plocha průřezu vzorku. Naměřené hodnoty v tlaku na zlomcích zkušebních vzorků jsou znázorněny v grafu obr. 6.



Obr. 6: Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku na zlomcích trámečků

V závěru vyhodnocení zkušebních vzorků byly posouzeny deskové vzorky, které byly umístěny do lisu pro zatížení čtyřbodovým ohybem. Na základě předěšlého vizuálního zhodnocení byl předpokládán negativní výsledek, který se potvrdil.

U deskových vzorků řady C došlo k masivnímu odštěpení, a proto vzorky této řady na čtyřbodový ohyb zkoušeny nebyly. U vzorků řady D došlo pouze k lokálnímu odštěpení, nicméně bylo dosaženo teploty vznícení epoxidové pryskyřice a během 15 minut exponování došlo k jejímu kompletnímu vyhoření. Při absenci spolupůsobení byla síla do vláken přenášena pravděpodobně jen skrze síťové uspořádání uhlíkové výtzuže (svazky vláken jdoucí kolmo přes sebe a tvořící síť). I přesto se se tahová pevnost pohybuje do vzniku první trhliny pro desky vystavené požáru cca **0,2 kN**, pro referenční vzorky cca **1,3 kN** (obr. 7).



Obr. 7: Porovnání referenčních deskových vzorků se vzorky vystaveným zvýšeným teplotám

ZÁVĚR

Z mechanických zkoušek je zřejmé, že zkušební vzorky vystavené zvýšeným teplotám dosáhly menších pevností oproti vzorkům referenčním. U trámečkových vzorků bez polypropylenových vláken došlo k masivnímu odštěpení, průměrně cca 10 mm a zároveň k poklesu tlakové pevnosti cca o cca 49 % oproti referenci. Zkušební vzorky s přidávkou polypropylenových vláken zaznamenaly výrazně menší hodnotu odštěpení, průměrně cca 2 mm. Tyto vzorky nedosahují u referenčních vzorků takových pevností v tlaku, nicméně následný pokles pevnosti v tlaku je cca 14,5 %. Přidáním syntetických vláken se jednoznačně osvědčilo jako vhodné řešení zvýšit odolnost prvků z TRC proti vysokým teplotám za požáru.

V následujících krocích bude účelné se zaměřit na určení ideálního množství polypropylenových vláken, aby bylo odštěpení betonových vrstev co nejmenší, a

vzhledem k tloušťkám krycích vrstev v řádech několika milimetrů.

Nejzásadnější výzvu ale představuje matrice z epoxidových pryskyřic. Pro použití TRC na nosné konstrukce bude potřebné **zabránit** nárůstu teplot nad teplotu zeskenení a zabránit tak ztrátě spolupůsobení. Proto je důležité detailně popsat změnu fázových stavů za zvyšující se teploty, konkrétně použitých epoxidových pryskyřic. K tomu může být použita metoda diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC). Díky tomu bude možné stanovit kritickou teplotu a následně navrhnout opatření, které by zamezilo nárůstu teplot nad limitní hodnotu. To znamená použití dodatečné požární ochrany poskytující tepelnou ochranu nebo zmocnění krycí betonové vrstvy. Případně použití alternativního materiálu matrice, ideálně z nehořlavých materiálů, které podléhají degradaci při vyšších teplotách, oproti syntetickým pryskyřicím.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen za podpory projektu TAČR Zéta, PID: TJ02000119 zpracovaném na UCEEB ČVUT v Praze.

SEZNAM LITERATURY

- [1] VLACH, Tomáš. *Soudržnost uhlíkové a čedičové kompozitní výtzuže s UHPC*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [2] ČSN EN 1992-1-2 (2006) - Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinek požáru*
- [3] AÏTCIN, Pierre-Claude, ČKAIT a ČBS. *Vysokohodnotný beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou beto-nářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 978-80-86769-39-4.
- [4] COLLEPARDI, Mario a ČKAIT. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [5] BHAT, Gajanan. *Structure and properties of high-performance fibers*. Place of publication not identified: Woodhead, 2016. Woodhead Publishing series in textiles, number 187. ISBN 978-0-08-100550-7.
- [6] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2003. ISBN 978-80-214-2443-2.
- [7] PIERO, De Fazio. *Basalt: from earth an ancient material for innovative and modern application*. B.m.: ENEA, Unita Tecnica Tecnologie Trisaia, Laboratorio Tecnologia dei materiali e metrologia. březen 2011
- [8] *Properties & Temperature Effects* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/1-properties-temperature-effects>
- [9] PRESTON, J. *Man-made fibre* [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/man-made-fiber>

