
**VYUŽITÍ POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE PRO KONTROLU HOMOGENITY
DRÁTKOBETONU**

**THE USE OF COMPUTED TOMOGRAPHY FOR CONTROL HOMOGENEITY
OF STEEL FIBER-CONCRETE STRUCTURES**

Leonard Hobst⁹, Petr Bílek¹⁰, Tomáš Zikmund¹¹

ABSTRAKT:

Nevhodným zpracováním a ukládáním směsi během výrobního procesu drátkobetonu jsou vlákna často nerovnoměrně rozložena. Může docházet k seskupení drátků, což snižuje celkovou homogenitu a tím kvalitu drátkobetonových konstrukcí.

Příspěvek se zabývá možnostmi kontroly rozložení vláken ve ztvrdlém drátkobetonu pomocí průmyslové tomografie.

ABSTRACT:

Inappropriate processing of and deposition the mixture during the manufacturing process fiber-concrete structures, the fibers are often unevenly distributed. May experience a grouping of wires, which reduces the overall homogeneity and the quality of steel fiber-concrete structures.

The paper deals with the development for monitoring the distribution of fibers in hardened steel fiber-concrete structures using industrial computed tomography.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Nedestruktivní testování, drátky, homogenita, magnetické metody, průmyslový tomograf, počítačová tomografie

KEYWORDS:

Non-destructive testing, fibres, homogeneity, magnetic methods, industrial tomograph, computed tomography

1 ÚVOD

K jedné z mála metod, které mohou určit přesné rozložení drátků ve vzorcích bez jejich porušení, patří počítačová tomografie. Počítačová tomografie je zobrazovací metoda, která umožňuje trojrozměrně stanovit vnitřní strukturu materiálu. Stejně jako rentgenografie využívá při zobrazení vnitřní struktury materiálu rentgenové záření, ale na rozdíl od rentgenogramu, který je dvojrozměrný, tomografie umožňuje kontrolovaný předmět zobrazit prostorově.

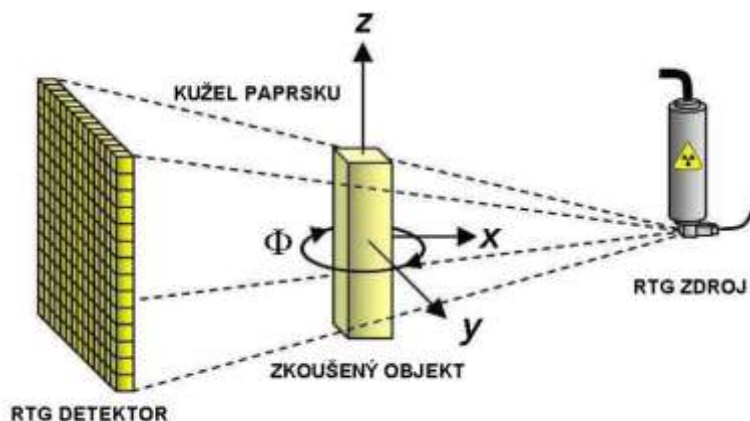
9) Prof. Ing. Leonard Hobst, CSc., VUT v Brně, Fakulta stavební, ÚSZK, Veverí 95, Brno, www.fce.vutbr.cz, tel.: +420 541 147 836, hobst.l@fce.vutbr.cz

10) Ing. et Ing. Petr Bílek, VUT v Brně, Ústav soudního inženýrství, Údolní 53, Brno, www.usi.vutbr.cz, petr.bilek@usi.vutbr.cz

11) Ing. Tomáš Zikmund, CEITEC VUT v Brně, Technická 3058/10, 616 00 Brno, www.ceitec.vutbr.cz, tomas.zikmund@ceitec.vutbr.cz

2 STRUČNÝ PRINCIP POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE

Vzorek umístěný do manipulátoru tomografu se otáčí a je postupně prozařován, přičemž jsou snímány virtuální řezy vzorku (obr. 1). Vhodnými počítačovými softwary lze z těchto rentgenových záznamů matematicky zrekonstruovat prostorový model vzorku. Výsledkem je axonometrické zobrazení. Toto axonometricky zobrazené těleso lze „řezat“ ve všech třech osách a je možné v tělese sledovat vnitřní strukturu při zachování neporušenosti vzorku.



Obr. 1: Schéma průmyslového tomografu

3 LABORATOŘ RENTGENOVÉ MIKRO A NANOTOMOGRAFIE

Pro tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků byla navázána spolupráce se Středoevropským technologickým institutem CEITEC VUT v Brně, který je vybaven počítačovým tomografem GE phoenix v|tome|x L 240. Tomograf je umístěn v laboratoři rentgenové mikro a nanotomografie a je osazen rentgenkou do 240 kV (obr. 2).

Mikrotomografie (μ CT), neboli počítačová tomografie s voxelovým rozlišením (voxel = „třírozměrný pixel“) na úrovni jednotek až desítek mikrometrů, dovoluje snímání vnitřní struktury trojrozměrných předmětů s vysokým prostorovým rozlišením. Pomocí μ CT lze z velké škály typů materiálů získat kompletní informaci o celém objemu předmětu, což je

vhodné pro zjištění tvaru vnějších a vnitřních struktur, nehomogenit, prasklin či porozity materiálu. Mikrotomografie tak nachází kromě různých vědních oborů uplatnění i v celé řadě průmyslových odvětví, včetně strojírenství, elektrotechniky a stavebního průmyslu.

Tomografická stanice má následující základní parametry:

- maximální velikost vzorku – průměr 500 mm x výška 800 mm, (tzn. velikost opsaného válce),
- maximální váha vzorku - 50 kg,
- dosažitelné voxelové rozlišení < 2 μm pro 240kV mikrofokální RTG trubici ~1 μm pro 180 kV nanofokální RTG trubici.

System tomografu:

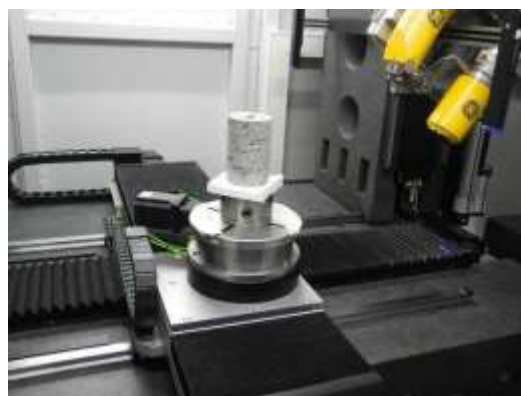
- přesný granitový sedmiosý manipulační systém
- otevřené mikro- (240 kV / 320 W) a nanofokální (180 kV / 15 W) rentgenové trubice s dlouhou životností
- detektor DXR250 typu „flat-panel“, který má velkou aktivní oblast (410 x 410 mm) 2048 x 2048 pixelů (rozměr pixelu 200 x 200 μm) a dynamický rozsah 10 000 : 1,
- vestavěný počítačový klastr a softwarové vybavení s moduly pro rychlou a vysoce kvalitní tomografickou rekonstrukci.

K analýze dat se využívá 3D vizualizační software Volume Graphics Studio Max 2.2, který je vybaven metrologickým modulem pro:

- souřadnicové měření,
- měření tloušťek stěn,
- analýzu defektů/porozit,
- porovnání nominálních a skutečných dat,
- rozšířenou analýzu pórovitosti/inkluzí,
- analýzu vláken kompozitního materiálu.



Obr. 2: GE phoenix v|tome|x L 240



Obr. 3: Válcový vzorek upevněný v manipulátoru

V tomto příspěvku demonstrujeme možnosti μ CT analýzy pro metrologii, defektoskopii, detekce vnější/vnitřní mikrostruktury a reverzní inženýrství a aplikujeme na analýzu vzorku drátkobetonu.

Laboratoř rentgenové mikro a nanotomografie je v plném provozu od září 2012.

4 PODMÍNKY PRO VYUŽITÍ DRÁTKOBETONU

Využívání drátkobetonu pro konstrukce je však podmíněné zárukou, že rozložení drátků v těchto konstrukcích je pravidelné a všesměrné, a že nevznikají místa se zvýšenou koncentrací (shluky), která pak způsobují, že části konstrukce jsou nedostatečně vyztuženy. Pro posouzení kvality rozložení drátků v drátkobetonových konstrukcích jsou vyvíjeny různé destruktivní i nedestruktivní metody, založené na specifických vlastnostech drátků a to především:

- a) na jejich vyšší měrné hmotnosti (ocel vzhledem k betonu)
- b) na specifických magnetických vlastnostech měkké oceli (jiná permeabilita u oceli a betonu)

Na vyšší měrné hmotnosti drátků je založena rentgenografická metoda kontroly, resp. i počítačová tomografie, na různé permeabilitě jsou založeny magnetické a elektromagnetické metody [1].

5 PROBLEMATIKA DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ

Právě jednou z možností kontroly koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích je vyvíjena hloubková magnetická sonda (PeMaSo-2), založená na měření změny magnetického pole v okolí permanentních magnetů, která je vyvolána přítomností drátků.



Obr. 4: Vzorky drátkobetonu

Pro přesnou kalibraci této sondy byla zhotovena celá řada vzorků s různou koncentrací drátků. Některé vzorky však vykazovaly při měření výchyly, které vedly k přesvědčení, že homogenita vzorku vykazuje anomálie. Proto byly dva vzorky podrobeny vyšetření počítačovou tomografií, které mělo prokázat, jak jsou kovová vlákna ve vzorku skutečně rozložena. Jedná se o válcový vývrt \varnothing 100 mm a výšce 150 mm, se středovým vývrtem \varnothing 25 mm pro umístění měřicí magnetické sondy a dále krychle 150 x 150 x 150 mm se dvěma rovnoběžnými vývrty \varnothing 25 mm (obr. 4).

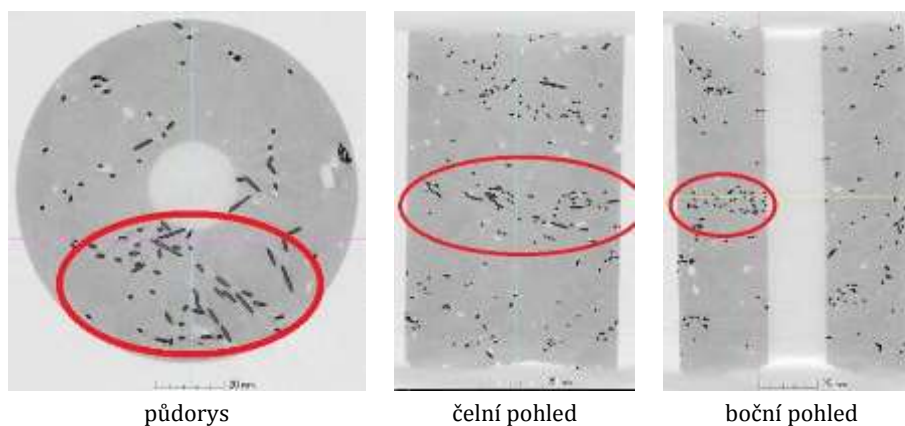
6 TOMOGRAFICKÉ VYŠETŘENÍ DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ

Výstupem této trojrozměrné zobrazovací metody je série 16 bitových obrazů, které představují virtuální řezy vzorkem (tomografické řezy). Tomografické řezy jsou matematicky

počítány (tomografická rekonstrukce) z rentgenových snímků objektu vytvořených během otáčení vzorku o 360°. Otáčení vzorku je typickým znakem pro průmyslové a vědecké laboratorní CT stanice. Naopak u lékařských CT se otáčí zdroj s detektorem kvůli stabilizaci pacienta.

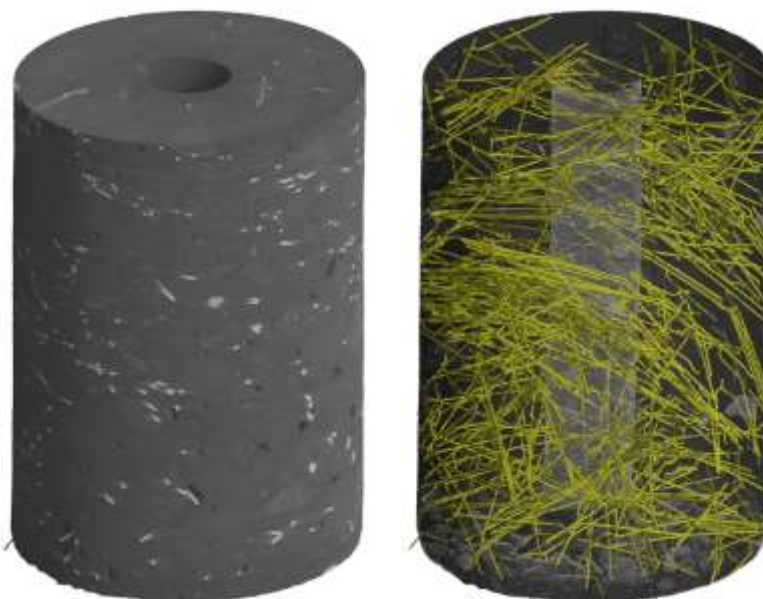
Nejdříve byl odzkoušen válcový vzorek, který byl pevně umístěn do manipulátoru tomografu a po bezpečném uzavření stínících dveří přístroje (obr. 3) došlo k postupnému prozařování vzorku.

Následným matematickým zpracováním jsou rekonstruovány virtuální řezy vzorku. Tato data byla získána s voxelovým rozlišením 100 μm . Vhodnými počítačovými softwary lze z těchto řezů vyseparovat drátky a vytvořit 3D model vzorku. Zpracování tomografických dat trvalo 2 hod.



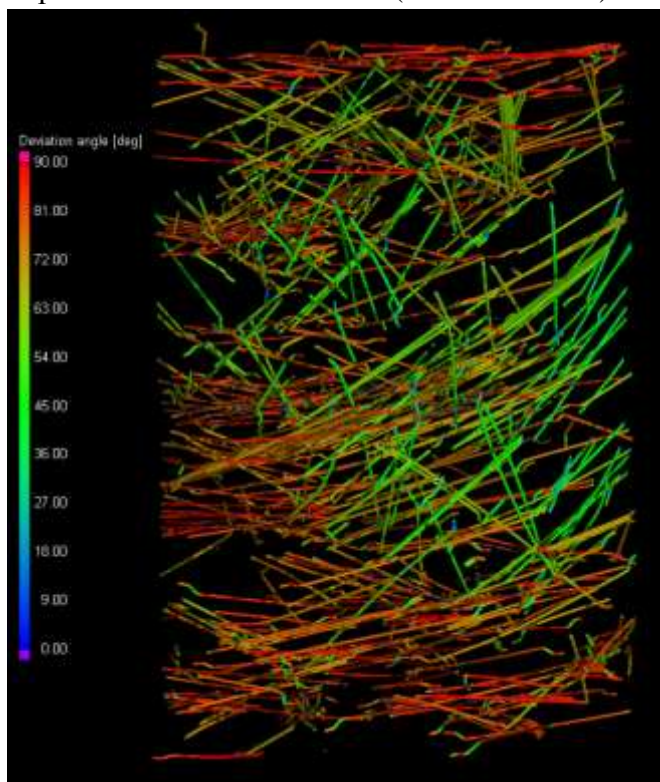
Obr. 5: Jednotlivé CT snímky vzorkem s vyobrazením shluků

Výsledkem je axonometrické zobrazení drátkobetonového válce se zobrazením rozložení jednotlivých drátků. Toto axonometricky zobrazené těleso lze „řezat“ ve všech třech osách (x, y a z) a je možné v tomto tělese najít „anomálie“, které způsobují odchýlné výsledky při kalibraci magnetické sondy (obr. 5).



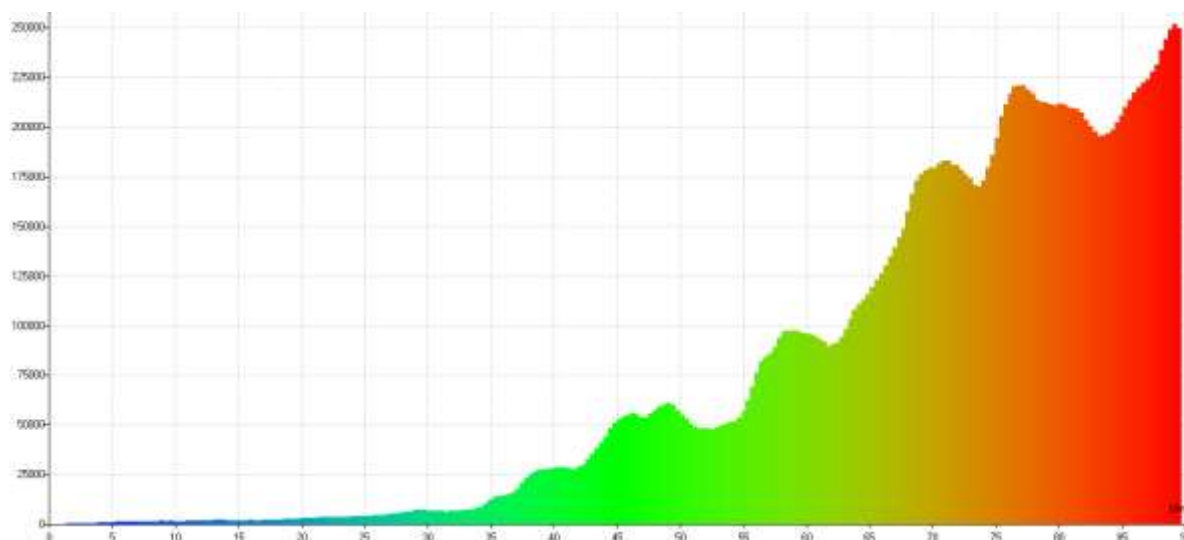
Obr. 6: Axonometrické zobrazení transparentního vzorku válce s drátky

K další analýze tomografických dat se využívá speciální modul 3D vizualizačního software Volume Graphics Studio Max 2.2 pro analýzu vláken kompozitního materiálu, který umožňuje kvantitativní posouzení rozložení drátků (obr. 7 a obr. 10).



Obr. 7: Axonometrické zobrazení separovaných drátků ve válci se směrovou analýzou

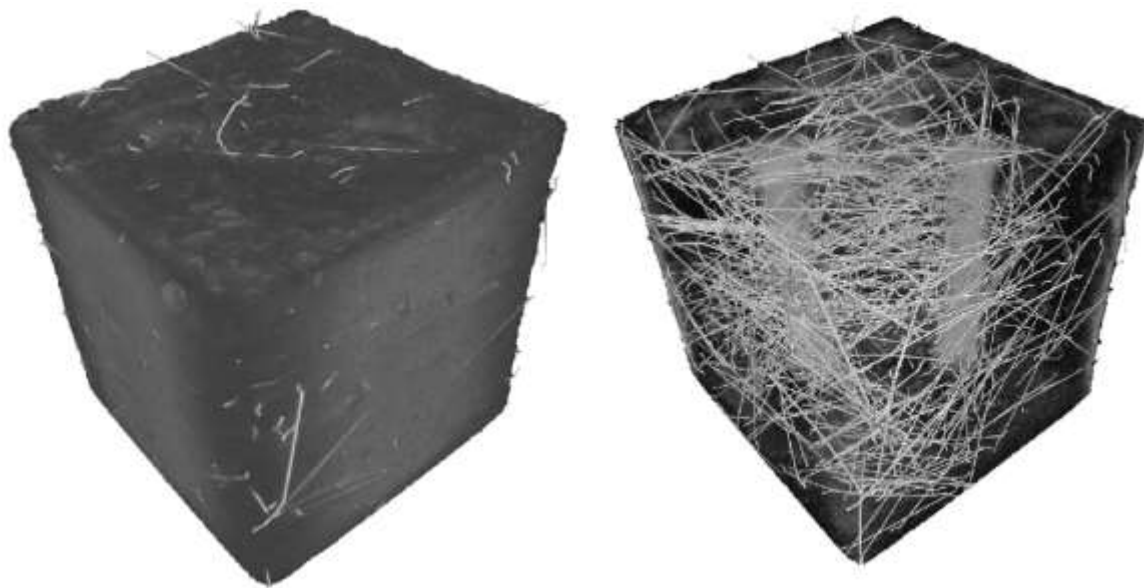
Pro provedenou směrovou analýzu vláken je pak možné zobrazit histogram a určit tak převládající směry orientace vláken (obr. 8).



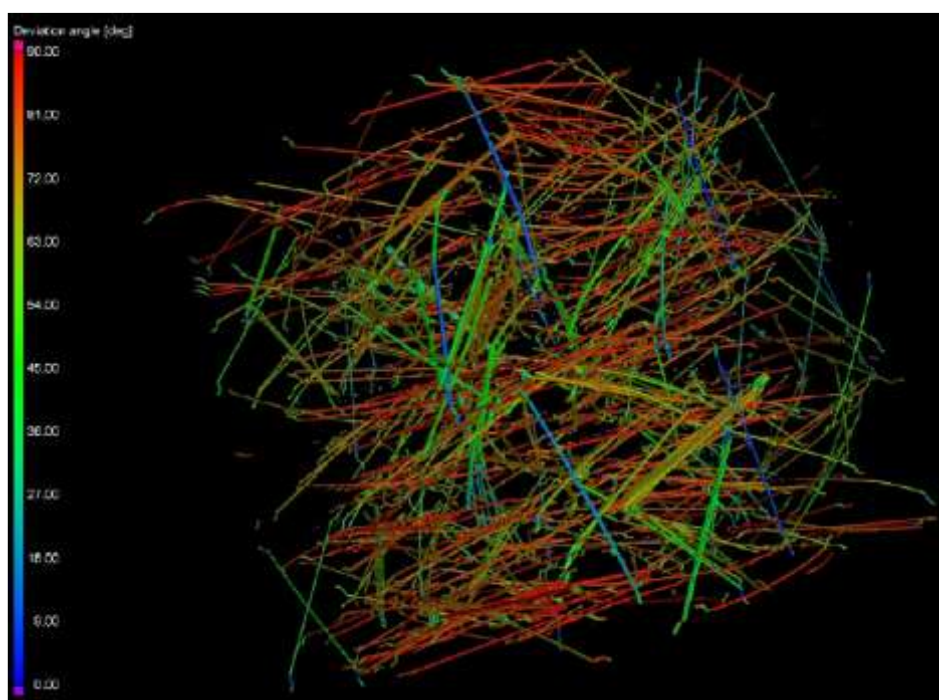
Obr. 8: Histogram směrové analýzy - orientace vláken ve válci

Jako další byla odzkoušena drátkobetonová krychle. Větší rozměry krychle však způsobily, že se snížila rozeznatelnost drátků uvnitř krychle a vnitřek krychle proto nešel jednoznačně

vyhodnotit. Bylo proto využito obdobného tomografu, avšak s vyšším výkonem. Napětí na rentgenec se dalo nastavit až na 300kV. Při vyšším napětí bylo možné s úspěchem prozářit a počítačově zpracovat i krychli (obr. 9).



Obr. 9: Axonometrické zobrazení transparentního vzorku krychle s drátky



Obr. 10: Axonometrické zobrazení separovaných drátku v krychli se směrovou analýzou

7 ZÁVĚR

Kontrola počítačovým tomografem potvrdila předpoklad, že v drátkobetonových vzorcích došlo k nepravidelnému rozmísení drátků (obr. 5 a obr. 6), které při kalibraci magnetické sondy vykazovalo anomálie ve výsledných údajích.

Počítačová tomografie prokázala, že v oblasti kontroly vnitřní struktury stavebních materiálů má velkou vypovídací schopnost. Řadí se k nejpřesnějším nedestruktivním metodám, používaným v technice. Jak však bylo dále ověřeno, má tato metoda i své omezení. I když drátkobetonový válec o průměru 100 mm nebyl pro počítačový tomograf problém, drátkobetonové kostky 150 x 150 x 150 mm jsou již nad možností tomografu s touto maximální energií rentgenu (240 kV) a bylo nutno využít tomografu s rentgenkou o napětí 300 kV.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu FAST/ÚSI-S-12-1 a v rámci CEITEC - Středoevropského technologického institutu s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.

8 LITERATURA

- [1] BÍLEK, P.; HOBST, L. Ověřování homogenity drátkobetonu na kalibračních vzorcích vyvíjenou magnetickou metodou. *Sanace betonových konstrukcí*, 2012, roč. 2012, č. 1, s. 278-284. ISSN: 1211- 3700.
- [2] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; VALA, J. Další vývoj magnetické metody pro testování homogenity drátkobetonové konstrukce. In 19. *BETONÁŘSKÉ DNY 2012*. Sborník ke konferenci. Hradec Králové, ČBS Servis, s. r. o. 2012. p. 479 - 482. ISBN 978-80-87158-32-6.
- [3] HOBST, L.; BÍLEK, P. Various control methods developed for fibre-concrete structures. In *Recent advances in integrity-reliability-failure*. IRF. Funchal, Madeira, Portugal, INEGI. 2013. p. 721 - 730. ISBN 978-972-8826-27-7.
- [4] ZIKMUND, T.; PETRILAK, M.; KAISER, J. Rentgenová počítačová tomografie pro analýzu odlitků, defektoskopii a kontrolu rozměrů. In *Sborník recenzovaných příspěvků 2013 konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví*. 2013. s. 429-438. ISBN: 978-80-214-4777- 6.