NÁVRH ZLOŽENIA ŤAŽKÉHO BETÓNU VO FUNKCII BIOLOGICKÉHO TIENENIA POMOCOU JADROVÝCH ELEMENTÁRNYCH ANALYTICKÝCH TECHNÍK

DESIGN OF HEAVYWEIGHT CONCRETE USED IN RADIATION PROTECTION BY NUCLEAR ELEMENTAL ANALYTICAL TECHNIQUES

Janette Podhorská^{*,1}, Martin Tchingnabé Palou¹

^{*}janette.dragomirova@savba.sk

¹ Slovenská akadémia vied, Ústav stavebníctva a architektúry, Oddelenie hmôt a reológie, Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava 45, Slovenská republika

Abstrakt

Na základe predošlých výskumov v oblasti ťažkých betónov boli pripravené vzorky za použitia dvoch ťažkých kamenív s vysokou objemovou hmotnosťou, portlandského cementu a SCMs. Analýza chemického zloženia plniva aj spojiva bola realizovaná pomocou troch metód a to NAA, PGAA a XRF. Z výsledkov fyzikálno-mechanických vlastností vzoriek je zrejmé, že vzorky po 28 dňoch dosiahli triedu pevnosti betónu C55/67. Hodnoty objemovej hmotnosti betónu sa zisťovali v čerstvom aj v zatvrdnutom stave a značne presahujú 3000 kg m^{-3} . Ostatné sledované vlastnosti preukazujú, že tieto betóny je možné označovať za vysoko pevnostné ťažké betóny. Rovnako použité materiály preukázali dobré aktivačné vlastnosti.

Kľúčová slová

Ťažký betón, NAA, PGAA, XRF

Abstract

High compressive strength heavyweight concrete specimens were prepared using two types of high-density aggregates, Portland cement, and SCMs. Elemental composition of aggregates and cementitious materials were performed by NAA, PGAA, and XRF methods. The mechanical and physical properties confirm that these concretes meet the requirements of concrete strength grade C55/67 after 28 days of curing, which makes them considered High Compressive Strength Concretes. The fresh and dry density values far exceed $3,000 \text{ kg m}^{-3}$. Other properties, tensile strength and modulus of elasticity provide basic evidence to support the idea that these concretes could be considered as High-Performance Heavyweight concretes. Also, the ingredients of the above concrete showed good activation properties.

Keywords

Heavyweight concrete, NAA, PGAA, XRF

1 ÚVOD

Pri navrhovaní ťažkého betónu (HWC) pre funkciu biologického tieniaceho štítu proti ionizujúcemu žiareniu hlavne v jadrových elektrárnach, ale aj v zdravotníckych zariadeniach, urýchľovačoch častíc alebo skladovacích boxoch jadrových odpadov sa musí brať do úvahy kompletne chemické zloženie ťažkého kameniva a cementových materiálov nielen na báze XRF analýzy, ale aj výsledky analýzy pomocou neutrónovej aktivačnej analýzy (NAA) a metódy okamžitého gama-žiarenia aktivačnej analýzy (PGAA). Tieto metódy poskytujú kompletne znalosti o zložení elementárnych prvkov vrátane rádionuklidov, čo umožňuje predpovedať aktivácie vzorky v jadrovom reaktore.

Ťažký betón zostáva zďaleka najpoužívanším materiálom na tienenie ionizujúcich žiarení z reaktorov vďaka svojim konštrukčným vlastnostiam a dobre vyváženej zmesi ľahkých a ťažkých atómových jadier. Je teda účinný ako pri pohlcovaní gama žiarenia, tak aj pri spomaľovaní rýchlych neutrónov elastickým a neelastickým rozptylom

[1], [2], [3]. Ľahké jadrá, najmä vodíkové jadrá, ktoré sú obsiahnuté v chemicky viazanej vode zhydratovaného betónu, tlmia rýchle neutróny v dôsledku veľkého obsahu vodíka [4], [5], [6]. Agregáty obsahujúce kovových prvkov s vysokou atómovou hmotnosťou sú účinné pri zoslabovaní gama žiarení. Navyše vysoká pevnosť ťažkých betónov by mohla poskytnúť ďalšiu výhodu použitia betónovej konštrukcie na dosiahnutie požadovanej nosnosti v porovnaní s konvenčným betónom.

Cieľom tejto štúdie bolo navrhnúť HWC, ktorý dokáže splniť požiadavky funkčných materiálov pre tienenie jadrových žiarení s preukázanou nízkou aktiváciou a vysokými mechanickými vlastnosťami. Práve dôkladný návrh betónových zmesí a ich dávkovanie je pri výrobe ťažkého betónu náročnejším procesom ako pri bežných betónových zmesiach [1], [2]. Výber materiálov podmienený hore uvedenými analýzami elementárneho zloženia suroviny umožňuje vopred stanoviť aktivačné vlastnosti pripravovaného betónu. Následne výber materiálov aj s ohľadom na požadované fyzikálno-mechanické vlastnosti HWC umožňuje výslednému betónu zastávať dvojito úlohu tieniacej funkcie a štruktúrnych vlastností požadovaných pre biologické tienenie. V tejto štúdii sa diskutuje vplyv druhu kameniva a zloženia spojiva s obsahom doplnkových cementových materiálov (SCMs) na objemovú hmotnosť, pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu betónu, navrhnutého betónu za pomoci výsledkov XRF, NAA a PGAA.

2 METODIKA

Jadrové analytické metódy: NAA a PGAA

Základom oboch metód je detekcia charakteristických gama lúčov, emitovaných z jadier zlúčenín ožiareními neutrónov. V prípade NAA ožarovanie a detekcia γ -fotónov prebieha oddelené v priestore a čase. Pod pôsobením neutrónov dochádza ku vzniku rádioaktívneho nového (dcérskeho) jadra a radiačný záchyt (n , γ), z ktorého sú detegované iba rozpadové γ -fotóny. Pri aplikácii PGAA je aktivácia a detekcia γ -fotónov súčasná a analytické signály zvyčajne pochádzajú z radiačného záchytu neutrónov s nižšou energiou.

NAA je značne výhodná pre určovanie stopových prvkov v rozsahu koncentrácií $\mu\text{g/g}$ alebo nižších, zatiaľ čo PGAA je nedeštruktívna metóda na analýzu hlavných prvkov a niektorých stopových prvkov v úrovni $\mu\text{g/g}$, ktoré sa len ťažko merajú inými metódami (napr. H, B, Cl, Gd) [7]. Merania NAA a PGAA sa uskutočnili vo výskumnom reaktore v Budapešti (BRR), zariadenia prevádzkuje Oddelenie jadrovej analýzy a rádiografie v priekopníckom Centre pre energetický výskum Maďarskej akadémie vied. Metódy boli validované mnohými geologickými referenčnými materiálmi a štandardmi a medzi laboratórnym porovnaním [8], pričom obe metódy použili metódu štandardizácie k0. PGAA a tiež NAA vyžadujú iba jednoduchú prípravu vzorky. Priebeh týchto meraní bol publikovaný v [9].

Charakteristika použitých materiálov a ich fyzikálne vlastnosti

Stanovenie hustoty materiálov bolo realizované pomocou automatického plynového pyknometra Quantachrome Pentapyc 5200e. Meranie špecifického povrchu sa realizovalo pomocou analyzátoru sorpcie plynov Autosorb iQ metódou BET. Výsledky sú uvedené v [10]. XRF analýza chemického zloženia je uvedená v [10].

Ako plnivá boli použité prírodné kamenivá baryt (SABAR, s.r.o., Markušovce, Slovensko) pre zmesi CONBA1 a CONMIX1-2 a magnetit (LKAB Minerals, Ltd., Luleå, Švédsko) pre zmesi CONMAG1 a CONMIX1-2. Zloženie kameniva v jednotlivých zmesiach je uvedené v [10]. Použitie kamenivo bolo preosiate na jednotlivé štandardizované frakcie a ich opätovné premiešanie bola definovaná krivka zrnitosti s nominálnou maximálnou veľkosťou zrna kameniva 16 mm, ktorej dôkladný návrh zabezpečuje ideálne rozloženie zŕn kameniva v betóne. Krivka zrnitosti kameniva je uvedená v [11].

Ako spojivo bola použitá zmes portlandského cementu EXTRACEM CEM I 42,5 R (CRH Slovensko, a. s. Rohožník, Slovensko), vysokopecnej trosky-BFS (Kotouč Štramberk, spol. s r. o., Česká republika), metakaolínu - MK L05 Mefisto (České lupkové závody, a.s., Nové Strašecí, Česká republika) a kremičitého úletu - SF (Oravské ferozliatinárske závody, a. s., Itebné, Slovensko). Plastifikátor Stachement 2025(ST2025) (SP; hustota $1065 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, obsah sušiny $30 \pm 1,5 \%$ a hodnota pH 5,0-8,0) (STACHEMA Bratislava, a. s., Slovensko) bol prímiešaný do zámesovej vody v množstve 0,6 kg na 100 kg cementu.

Návrh zloženia vysokopecnostného ťažkého betónu

Pri aplikácii betónovej konštrukcie v jadrovom reaktore má veľký význam pomer a homogenita zloženia betónu vzhľadom na jeho konštrukčnú stabilitu a tieniacu schopnosť. Navyše, prítomnosť niektorých izotopov v betóne pri určitom ožiarení, môže byť nepriamym zdrojom jadrových žiarení. Z tohto dôvodu sa pri návrhu betónu berie do úvahy nielen jeho zloženie, ale aj prítomnosť rádioizotopov v jednotlivých zložkách s ohľadom na ich

rádioaktivačný potenciál po vystavení žiareniu. Na základe analýz použitých materiálov v tejto štúdii boli navrhnuté štyri typy ťažkých betónov, ktoré sa líšili druhom kameniva a ich zmesou, zložením cementového spojiva a SCM. (Tab.1).

Tab. 1 Zloženie jednotlivých zmesí zmesi na 1 m³ [%].

	CONBA1	CONMAG1	CONMIX1	CONMIX2
BA	74,05	-	48,78	48,78
MAG	-	77,94	26,26	26,26
CEM	19,74	16,78	14,22	14,22
BFS	-	-	2,85	2,85
SF	-	-	0,95	0,95
MK	-	-	0,95	0,95
SP	0,12	0,10	0,13	0,13
W	6,10	5,18	5,86	5,86

Postupy výroby vzoriek a metódy ich fyzikálno-mechanických meraní

Miešanie čerstvého betónu sa uskutočňovalo v stavebnej miešačke (AGRO-WIKT BWA-150, 400 V). Čerstvá betónová zmes sa uložila do foriem s rozmermi 100 x 100 x 400 mm, ktoré sa prikryli mokkými tkaninami a igelitom pre zabezpečenie zodpovedajúcej relatívnej vlhkosti pri tuhnutí vzoriek počas 7, 28, 90 a 180 dní.

Pevnosť v tlaku betónu sa zisťovala na telesách s rozmermi 150x150x150 mm, ďalej uvádzaná ako $F_{c,cube}$, a 100x100x400 mm, ďalej uvádzaná ako $F_{c,prism}$. Pevnosť v priečnom tlaku sa zisťovala na zlomkoch trámčových podstavou 100x100x100 mm, ďalej uvádzaná ako $F_{c,lp}$ a pevnosť v ťahu betónu sa zisťovala na telesách s rozmermi 100x100x400 mm, ďalej uvádzaná ako F_{ct} . Skúšobné postupy boli uskutočnené podľa európskej normy EN12390 1-7 v čase 7, 28, 90 a 180 dní. Statický modul pružnosti bol meraný na telesách s rozmermi 100x100x400 mm podľa STN ISO 6784. Dynamický modul pružnosti bol meraný na rovnakých vzorkách pripravených na statický modul ultrazvukovou metódou pomocou zariadenia Ultrasonic Meter Matest. Modul pružnosti bol rovnako ako pevnostné charakteristiky meraný v čase 7, 28, 90 a 180 dní.

3 VÝSLEDKY

Výsledky chemických analýz

Zo skúmaných izotopov sú z hľadiska aktívnych vlastností betónu najdôležitejšie tie s polčasom rozpadu kratším ako rok, avšak dlhším ako mesiac, ktoré v tomto prípade predstavujú nasledovné izotopy: ¹⁴¹Ce, ¹⁸¹Hf, ⁵⁹Fe, ¹²⁴Sb, ⁸⁵Sr, ¹⁶⁰Tb, ⁴⁶Sc, ¹⁸²Ta, ⁶⁵Zn a tiež tri izotopy s veľmi dlhým polčasom rozpadu, ktoré môžeme označiť aj ako izotopy s dlhou životnosťou, a to sú: ($T_{1/2}$): ¹³⁴Cs ($T_{1/2}$ =2,07 r), ⁶⁰Co ($T_{1/2}$ =5,27 r), ¹⁵⁴Eu ($T_{1/2}$ =8,5 r) a ¹⁵²Eu ($T_{1/2}$ =13,5 r).

Chemické zloženie cementu obsahuje z hľadiska aktívnych vlastností zanedbateľné množstvo izotopov s dlhou životnosťou: ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co ¹⁵²Eu a ¹⁵⁴Eu. Prvkov pozostávajúcich z izotopov s dlhým, ale menej ako ročným polčasom rozpadu je vo vzorke niekoľko stoviek µg/g. Z nich treba brať do úvahy najmä koncentráciu železa ⁵⁹Fe s $T_{1/2}$ = 44,5 dňa, ktorého je v použitom cemente 2,13 % hm.

Chemické zloženie jednotlivých SCMs prekvapilo najmä zvýšeným obsahom všetkých troch rádioizotopov s dlhou životnosťou v MK. Z tohto dôvodu bolo použitie MK ako náhrady cementu obmedzené na 5%. Jeden z rádioizotopov s dlhou životnosťou, konkrétne Eu, sa vyskytoval aj v BFS popri hlavných prvkoch Si, Al, Ca a Mg s nízkymi aktívnymi vlastnosťami. Oproti obsahu v cemente je Eu v BFS obsiahnutý päťnásobne.

Chemická analýza barytového kameniva sa vykonala separátne pre frakcie 0/1, 1/2, 2/4, 4/8, 8/16 a plavený koncentrát barytovej rudy s veľkosťou 0,063/0,25, ktorý má vyšší obsah BaSO₄. Baryt obsahuje hlavnú zložku Ba a S. Medzi ďalšie prvky možno zaradiť aj Fe a Mg (Obr. 1). Ako vedľajšie prvky bolo možné detegovať Si, Ti, Al, Mn, Na, K a Sr. Všetky frakcie majú nízky obsah H (175-675 µg/g), B (2,3-28,5 µg/g) a Cl (21-222 µg/g) meraný pomocou PGAA. Pomocou NAA boli detegované aj rádioizotopy s dlhou životnosťou a to konkrétne Co v rozmedzí 5,4 a 6 µg/g, avšak stále je to len polovica koncentrácie nameranej v použitom cemente (Obr. 2). Železa s relatívne dlhým polčasom rozpadu ($T_{1/2}$ =44,5 d) je vo vzorkách okolo 20 % hm.

Obr. 1 Koncentrácia hlavných prvkov v BA [% hm.].

Obr. 2 Koncentrácia Co [µg/g] vo vzorkách BA.

Ostatné prvky s $T_{1/2}$ nižším ako rok, konkrétne Sb (^{124}Sb - $T_{1/2}=60,2$ d) je menej ako 500 µg/g a Sc (^{46}Sc - $T_{1/2} = 83,8$ d) sú nižšie ako 2,8 µg/g. Elementárne zloženie barytového koncentráту sa líši od ostatných frakcií, má zvýšený obsah Ba, S a Sr, vykazuje znížené množstvo všetkých ostatných prvkov ale najmä rádioizotopov s dlhou životnosťou Cs, Co, Eu, ktoré sú pod detekčným limitom NAA, zatiaľ čo obsah Fe je len okolo 1 % hm. Neexistuje žiadna systematická zmena v koncentráciách prvkov s veľkosťou zŕn, s výnimkou obsahu Sb, ktorý sa zvyšuje so zvyšujúcou sa veľkosťou zŕn vo vzorkách barytu.

Chemická analýza magnetitového kameniva bola rovnako ako v prípade barytového kameniva prevedená pre každú frakciu (0/1, 1/2, 2/4, 4/8, 8/16) zvlášť. Ako sa očakávalo, ich hlavným prvkom je Fe medzi 65-69 % hm. (Obr. 3). Okrem Fe bolo možné vo všetkých vzorkách s PGAA merať nízke množstvo Si, Ti, Mn, V, H, B, Gd a Cl. NAA poskytol údaje o koncentracii stopových ale najmä rádioizotopov s dlhou životnosťou. Koncentrácia Cs sa nachádza pod detekčným limitom, zatiaľ čo Eu je pod 1 µg/g. Co má koncentráciu v rozmedzí 99-127 µg/g. (Obr. 4).

Výsledky fyzikálno-mechanických vlastností betónov

Mechanické vlastnosti vzoriek betónu sú uvedené na Obr. 5-8. Mechanické vlastnosti všetkých vzoriek betónu sa zvyšujú so zvyšujúcim sa časom ošetrenia. Z Obr. 6 a 7 je zrejme že, pevnosť v tlaku a pevnosť v ťahu vzoriek sa vyvíja vzhľadom na typ kameniva použitého kameniva. Najvyššie pevnosti dosahuje CONMAG 1 a najnižšie CONBA 1. Pevnosť v tlaku všetkých vzoriek po 28 dňoch zodpovedá hodnote vysokopevnostného betónu [1].

Obr. 3 Koncentrácia hlavných prvkov v MAG [% hm.].

Obr. 4 Koncentrácia vedľajších prvkov v MAG [µg / g].

CONMIX 1 a CONMIX 2 sú betóny vyrobené zo zmesi kameniva s čistým cementom alebo s cementom s pridaním SCMs. To umožňuje posúdiť vplyv SCMs na mechanické a fyzikálne vlastnosti betónu. Tieto výsledky ukazujú, že použitie SCMs zlepšuje mechanické vlastnosti betónu vo všetkých obdobiach ošetrovania. SCMs hrajú v betóne dvojité úlohu. Po prvé, pôsobia ako jemné plnivá vyplňajúce priestor medzi zrnami kameniva a cementovou pastou a po druhé sa podieľajú na chemickej reakcii prostredníctvom alkalického aktivácie alebo puzolánovej reakcie a následnej tvorbe ďalších hydratačných produktov zodpovedných za zvýšenie pevnosti v tlaku [12].

Porovnaním hodnôt pevností v tlaku všetkých skúšok bolo preukázané, že tvar a rozmer skúšobného telesa neovplyvňujú hodnoty pevnosti v tlaku betónu tak výrazne, ako je to zvykom u bežného betónu s objemovou hmotnosťou do $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tieto rozdiely sú značne znížené, a preto nie je možné použiť konvenčné výpočty na stanovenie vzťahu medzi kockovou, valcovou a hranolovou pevnosťou v tlaku (Obr. 5).

Hodnoty objemovej hmotnosti vzoriek zatvrdnutého betónu CONBA 1 sú vyššie ako $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pre CONMAG 1 sú vyššie ako $3500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pre CONMIX 1, CONMIX 2 sa pohybujú od 3286 do $3360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Obr.7).

Najvyššiu objemovú hmotnosť dosahuje z pochopiteľných dôvodov čerstvý betón tým, že je úplne nasýtený vodou. Tá sa časom spotrebovávajú na tvorbu hydratačných produktov v betóne a časť sa odparuje. Následne s poklesom vody klesá aj objemová hmotnosť. Po 90 dňoch od výroby betónu, keď už betón nepodlieha autogénnemu zmršťovaniu v dôsledku vysychania betónu pri hydratácii, sú objemové zmeny v betóne podmienené len zmenami klimatických podmienok.

Obr. 5 Pevnosť v tlaku kocková $f_{c,cube}$, hranolová $f_{c,prism}$ a pevnosť v priečnom tlaku betónu $f_{c,lp}$ [N/mm^2].

Obr. 6 Pevnosť v ťahu betónu $f_{c,f}$ [N/mm^2].

Obr. 7 Objemová hmotnosť betónu [kg m^{-3}].

Hodnoty statického a dynamického modulu pružnosti betónu v tlaku v závislosti od veku tvrdnutia sú znázornené na Obr. 8. S vekom betónu modul pružnosti v tlaku narastá a deformácia betónu sa znižuje [13].

Obr. 8 Statický modul pružnosti betónu E_c [GPa] a dynamický modul pružnosti betónu E_{bu} [GPa].

4 ZÁVER A DISKUSIA

V tejto štúdii boli vytvorené štyri betónové zmesi spadajúce do triedy vysokopevnostných ťažkých betónov. Na výrobu vzoriek bol použitý cementové kompozity a zmes kamenív barytu a magnetitu. Pri návrhu betónu boli zohľadnené výsledky NAA a PGAA rádionuklidov na vyhodnotenie potenciálnych rizík pri použití týchto betónov ako biologického tienenia v jadrových elektrárňach a iných zariadeniach ale aj výsledky XRF. Výsledky ukázali, že tieto betóny pripravené z rôznych zložiek s rôznymi počiatočnými rádionuklidmi majú dobré aktivačné vlastnosti a spĺňajú požiadavky, ako je spracovateľnosť, pevnosť a trvanlivosť ťažkého vysokopevnostného betónu. Všetky vzorky dosiahli vysoké objemové hmotnosti medzi 3190 kg.m^{-3} až 3710 kg.m^{-3} podľa materiálového zloženia, vďaka čomu ich možno považovať za ťažký betón. Taktiež mechanické vlastnosti (pevnosť v tlaku, pevnosť v priečnom tlaku, pevnosť ťahu a modul pružnosti betónu) spĺňajú predpoklady pre vysokopevnostné betóny.

PodĎakovanie

Táto práca bola súčasťou projektov Agentúry na podporu výskumu a vývoja APVV-19-0490, APVV-15-0631 a Slovenskej grantovej agentúry VEGA č. 2/0032/21 a 2/0017/21.

Použité zdroje

- [1] OUDA, Ahmed S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Progress in Nuclear Energy*. 2015, **2015**(79), 48-55. ISSN 0149-1970. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009)
- [2] MOSTOFINEJAD, Davood, Mohammad REISI a A. SHIRANI. Mix design effective parameters on gamma-ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2012, **2012**(28), 224-229. ISSN 0950-0618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.043](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.043)
- [3] PARK, Kyoungsoo, Hyung-Tae KIM, Tae-Hyun KWON a Eunsoo CHOI. Effect of neutron irradiation on response of reinforced concrete members for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design: An International Journal devoted to all aspects of Nuclear Fission Energy*. 2016, **2016**(310), 15-26. ISSN 0029-5493. Dostupné z: [doi:10.1016/j.nucengdes.2016.09.034](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.09.034)
- [4] POMARO, Beatrice, Fabiana GRAMEGNA, Roberto CHERUBINI, Viviana DE NADAL, Valentina A. SALOMONI a Flora FALESCHINI. Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: An experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*. 2018, **2018**(200), 188-197. ISSN 0950-0618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.098](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.098)
- [5] LE PAPE, Yann. Structural Effects of Radiation-Induced Volumetric Expansion on Unreinforced Concrete Biological Shields. *Nuclear Engineering and Design*. North-Holland, 2015, **2015**(295), 534-548. ISSN 0029-5493. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.018](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.018)
- [6] MIRHOSSEINI, Somayehsadat, Maria Anna POLAK a Mahesh PANDEY. Nuclear radiation effect on the behavior of reinforced concrete elements. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, **2014**(269), 57-

65. ISSN 0029-5493. Dostupné z: doi:10.1016/j.nucengdes.2013.08.007
- [7] RÉVAY, TAMÁS BELGYA, Zsolt a Tamás BELGYA. Principles of the PGAA method. Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis: with Neutron Beams. 1. Boston, MA: Springer-Verlag US 2004, 2004, s. 1-30. ISBN 978-0-387-23359-8.
- [8] GMÉLING, Katalin, András SIMONITS, Ibolya SZIKLAI-LÁSZLÓ a Dénes PÁRKÁNYI. Comparative PGAA and NAA results of geological samples and standards. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2014, 2014(300), 507-516. ISSN 0236-5731. Dostupné z: doi:10.1007/s10967-014-3032-2
- [9] DRAGOMIROVÁ, Janette, Martin T. PALOU, Katalin GMÉLING, Ildikó HARSÁNYI a László SZENTMIKLÓSI, Veronika SZILÁGYI, ed. Design of heavyweight concrete used in radiation protection. In: OLEK, J., M.A GLINICKI a D. JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA, ed., C.K.Y. LEUNG. Brittle Matrix Composites 12: Proceedings of the 12th International Symposium on Brittle Matrix Composites. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research, 2019a, s. 195–210. ISBN 978-83-65550-20-0. ISSN -.
- [10] DRAGOMIROVÁ, Janette, Martin T. PALOU a Radoslav NOVOTNÝ. Effect of heavy aggregates on concrete shrinkage. In: DVOŘÁK, Karel a Dominik GAZDIČ, ed. Binders, Materials and Technologies in Modern Construction V: 17th International Conference Silicate Binders (ICBM 2018). Brno: Trans Tech Publications, 2019b, s. 44-49. ISBN 978-80-214-5567-2. ISSN -.
- [11] DRAGOMIROVÁ, Janette, Martin T. PALOU, Eva KUZIELOVÁ, Matúš ŽEMLIČKA, Radoslav NOVOTNÝ a Katalin GMÉLING. Optimization of cementitious composite for heavyweight concrete preparation using conduction calorimetry. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020, 2020(142), 255-266. ISSN 1572-8943. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s10973-020-09530-0
- [12] KUZIELOVÁ, Eva, Matúš ŽEMLIČKA, Eva BARTONIČKOVÁ a Martin T. PALOU. The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement–slag–silica fume–metakaolin. Construction and Building Materials. 2017, 2017(135), 306-314. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.105
- [13] ŠEVČÍK, Patrik a Iveta NAJDENÁ. MODUL PRUŽNOSTI BETÓNU. Stavebnícka ročenka 2010. 1. Bratislava: JAGA Group, 2009, s. 8-11. ISBN 978-80-8076-076-2.