

mgr inż. Marta Skorniewska¹⁾
dr inż. Katarzyna Łaskawiec^{1)*}

Zastosowanie materiałów zmiennofazowych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego

*The application of phase change materials for the production
of autoclaved aerated concrete*

DOI: 10.15199/33.2016.01.16

Streszczenie. Materiały PCM charakteryzują się znacznie większą akumulacją ciepłą niż powszechnie stosowane materiały budowlane. Akumulacja ciepła jest wynikiem nie tylko zwiększenia ich temperatury (ciepło właściwe), ale przede wszystkim jest związana z izotermiczną przemianą fazową (najczęściej topnieniem), charakteryzującą się dużym ciepłem przemiany, tzw. ciepłem utajonym. Materiały PCM pełniłyby w bloczkach ABK rolę akumulatorów ciepła lub chłodu, który pochłaniałby nadwyżki ciepła z różnych źródeł i uwalniał je do pomieszczenia w okresie występowania niskiej temperatury w otoczeniu. W ten sposób ograniczyłyby się wahania temperatury w pomieszczeniu, redukując je do zakresu zgodnego z wymaganiami komfortu cieplnego. W artykule przedstawiono zasadność stosowania materiałów zmiennofazowych PCM w produkcji autoklawizowanych betonów komórkowych ABK oraz wyniki badań wpływu zmiennej ilości materiałów zmiennofazowych PCM na właściwości betonu komórkowego. Badania właściwości betonu komórkowego prowadzono wg EN 771-4.

Słowa kluczowe: materiał zmiennofazowy, PCM, autoklawizowany beton komórkowy, ABK.

Abstract. The materials using PCM characterized by considerably higher the effective heat capacity than the commonly used construction materials. Heat accumulations is due not only to increase their temperature (heat capacity), but it's connected with the isothermal phase change (most melting). It characterized by a heat of transformation, so, latent heat. PCM materials played a role in the AAC blocks heat or cold battery, which would consume surplus heat from various sources and released them into the room during periods of low temperature outside. In the way it reduces the fluctuations of the room temperature, reducing it the extent compatible with the requirements of thermal comfort. In the article the authors present research possibility of the use of phase change materials PCM to the production of autoclaved aerated concrete AAC. Research the influence of the changeable amount PCM on properties autoclaved aerated concrete will also stay in this paper. Research of properties autoclaved aerated concrete will be conducted according to EN 771-4.

Keywords: phase change materials, PCM, autoclaved aerated concrete, AAC.

W krajach UE budownictwo jest konsumentem ok. 40% całkowitej ilości energii finalnej, z czego ok. dwóch trzecich zużywa się na ogrzewanie i/lub chłodzenie pomieszczeń. Obecnie podejmuje się wiele działań mających na celu zarówno zmniejszenie zużycia konwencjonalnych nośników energii, jak również zmianę struktury źródeł energii, co z kolei ma na celu redukcję CO₂ do atmosfery. Zgodnie z zobowiązaniami podjętymi przez Unię Europejską, do 2020 r. emisja CO₂ na jej terytorium powinna się zmniejszyć o 20%, natomiast efektywność energetyczna zwiększyć o 20%. Biorąc pod uwagę wskaźniki dotyczące zużycia energii w budownictwie, widać, że nawet niewielkie jej ograniczenie może istotnie zmniejszyć zarówno globalne zużycie paliw kopalnych, jak też zredukować zanieczyszczenie środowiska naturalnego [1].

¹⁾ Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: k.laskawiec@icimb.pl

Przegrody w obecnie wznoszonych budynkach powinny spełniać nie tylko wymagania związane z trwałością, ale również muszą charakteryzować się odpowiednimi właściwościami fizycznymi (cieplno-wilgotnościowymi, akustycznymi) i ogniowymi. Spełnienie wymagań cieplnych stawianych przegrodom zewnętrznym budynku sprowadza się przede wszystkim do zapewnienia im właściwej izolacyjności oraz pojemności cieplnej. To ostatnie wymaganie wiąże się m.in. z zapisami zawartymi w § 328 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 6 listopada 2008 r. Dodatkowo 18 czerwca 2013 r. został opublikowany Recast dyrektywy EPBD (Energy Performance Building Directive), zgodnie z którym konieczne stało się ustanowienie działań zmierzających do wykorzystania potencjału oszczędności energii w budynkach, dostosowania zabiegów poprawiających efektywność energetyczną oraz zapewnienia opłacalności ekonomicznej.

Miarą pojemności cieplnej materiałów jest ciepło właściwe. W przypadku

powszechnie stosowanych materiałów ściennych, takich jak cegła, beton, gips wielkość ta nie przekracza 1 kJ/kg·K. Istnieją materiały, które mają znacznie większą efektywną pojemność cieplną, wynikającą przede wszystkim z izotermicznej przemiany fazowej, charakteryzującej się dużym „ciepłem utajonym”. Są to tzw. **materiały zmiennofazowe** (PCM) [1]. Substancje, które odpowiadają za efekty PCM w materiałach budowlanych w sposób zintegrowany, to woski parafinowe o dużej czystości. Ich temperatura topnienia wynosi 23 °C [3]. W budownictwie mogą być wykorzystywane materiały, których temperatura przemiany fazowej wynosi 18 – 28 °C [1]. Jest kilka sposobów wbudowania topniejącego wosku w materiały budowlane. Jeden z nich opracowała firma BASF [3]. Jest to mikrokapsułkowanie, podczas którego miliony małych kropek wosku są pojedynczo „pakowane” za pomocą niezniszczalnej powłoki wykonanej ze szkła akrylowego. W przypadku produktu o nazwie Mi-

cronal PCM zastosowane woski upłynniają się w temperaturze 23 °C w środku powłoki kapsułki. Patrząc od zewnątrz, materiał może gromadzić wokół tej powłoki ciepło i oddawać je, a pomimo to ma postać proszku. Kapsułki można łatwo wprowadzić do tynku lub zaprawy jako dyspersję lub proszek. Zalecany przekrój kapsułki wynosi 2 – 20 μm [2].

W artykule przedstawiono wyniki badań sprawdzających możliwość wprowadzenia materiałów zmiennofazowych PCM w postaci mikrogranulek w technologii autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) bez pogorszenia jego właściwości.

Zakres badań

Do badań zastosowano materiał zmiennofazowy w postaci proszku na bazie silnie usieciowanego polimetaakrylanu metylu (tabela 1).

Tabela 1. Właściwości materiału zmiennofazowego

Table 1. PCM properties

Stan skupienia	mikrokapsułki
Kolor	biały
Zapach	bezwonny
pH	7,5 – 8,5
Temperatura zaplonienia	190 °C
Temperatura zapalenia	290 °C
Zapalność	niełatwopalny
Samozapalność	niesamozapalny

Badania wykonano w trzech etapach. Pierwszym były próby laboratoryjne, w których sprawdzono możliwość dozowania różnej ilości materiału zmiennofazowego PCM oraz określono moment jego dodawania do betonu komórkowego. Wykonano beton komórkowy o gęstości 500 kg/m³ i 600 kg/m³. Podczas badań monitorowano proces

wyrastania i wiązania masy betonu. Następnie określono właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego modyfikowanego PCM i bez tego dodatku. Wyniki badań laboratoryjnych stanowiły podstawę do wykonania prób w skali półtechnicznej. W drugim etapie wykonano próby otrzymania betonu komórkowego o gęstości 600 kg/m³ z dodatkiem PCM. Wykonano odlewy z:

- 2% dodatkiem PCM;
- 5% dodatkiem PCM;
- 10% dodatkiem PCM.

Zbadano właściwości użytkowe otrzymanego betonu komórkowego i wybrano receptury do prób w skali technicznej. Trzeci etap badań przeprowadzono u jednego z czołowych producentów ABK. Otrzymano bloczki betonu komórkowego bez dodatku PCM, z którego zbudowano domek referencyjny oraz bloczki betonu komórkowego z 5% i 10% zawartością PCM, z którego zbudowano domek doświadczalny (fotografia).

Przeprowadzono następujące badania wytypowanych betonów:

• **gęstość** wg PN-EN 772-13:2001 *Metody badań elementów murowych – Część 13: Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym*;

• **wytrzymałość na ściskanie** wg PN-EN 772-1+A1:2015-10 *Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie*;

• **mrozoodporność** – wg normy PN-EN 15304:2010 *Oznaczenie odporności na zamrażanie – rozmrażanie autoklawizowanego betonu komórkowego*;

• **współczynnik przewodzenia ciepła** wg PN ISO 8301:1998 *Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w sta-*

nie ustalonym – Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego;

• **reakcja na ogień** wg normy PN-EN 771-4+A1:2015-10 *Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego* oraz Procedury Badawczej nr 34.0 *Oznaczanie zawartości materiałów organicznych w autoklawizowanym betonie komórkowym*, Warszawa, COBRPB „Cebel”, Laboratorium Badawcze, wydanie 2/2006.

Wyniki badań

W pierwszym etapie badań ustalono ilość dodawanego materiału zmiennofazowego PCM. Producent zaleca, by go dozować do suchej masy, której pojemność cieplną chcemy zwiększyć. Przyjęto, że PCM w ilości 2%, 5% i 10% będzie dozowany na masę składników spoiwa (cement, wapno, gips). Ze względu na cenę materiału ok. 11 euro/kg dozowanie na masę wszystkich składników suchych, wchodzących w skład betonu komórkowego, tj. piasku, cementu, wapna, gipsu, byłoby nieekonomiczne, gdyż znacznie zwiększałoby koszty produkcji. Materiał zmiennofazowy dozowano więc do mieszarki wraz ze spoiwem oraz po spoiwie. Moment dozowania nie miał wpływu na masę betonu komórkowego ani jego właściwości. Dodatek materiału zmiennofazowego wpłynął na wodozadržność masy betonu komórkowego. Chcąc utrzymać konsystencję (rozlewność) na poziomie odlewu kontrolnego (bez materiału zmiennofazowego), w większości prób konieczne było zwiększenie ilości wody.

Po procesie autoklawizacji nastąpiło rozformowanie i wstępna ocena mikrostruktury betonów komórkowych. Pro-



Domki (referencyjny i doświadczalny), w których przeprowadzono pomiary: a) podczas budowy; b) w lecie; c) w zimie
Houses (referential and experimental, which they took measurements in: a) during construction; b) in the summer; c) in the winter

ces wyrastania i wiązania masy podczas prób technologicznych wytwarzania ABK z zastosowaniem materiału zmiennofazowego w ilości 2% i 5% był prawidłowy. Przy dodatku materiału zmiennofazowego w ilości 10% zaobserwowano, że masa betonu komórkowego o gęstości 500 kg/m³ osiada w formie na etapie przebywania w komorze wstępnej dojrzewania. Jedynie przy zwiększonej ilości wapna (receptura 3) i 10% PCM materiał nie osiadł. Wyniki badania właściwości użytkowych ABK zamieszczono w tabeli 2 w przypadku gęstości 500 kg/m³ i w tabeli 3 w przypadku gęstości

Tabela 2. Właściwości użytkowe ABK gęstości 500 kg/m³

Table 2. Functional performance of AAC specimens (density 500 kg/m³)

Numer próbki	Receptura	Zawartość materiału zmiennofazowego [%]	Parametry betonu komórkowego		
			ρ [kg/m ³]	$R_{k,L}$ [MPa]	λ [W/(m·K)]
0-1	1	-	500	2,6	0,1044
1		5	500	2,4	0,1011
2		5	500	2,6	0,0942
3		2	500	2,7	0,1026
4	2	500	500	2,4	0,0938
0-2	2	-	500	2,9	0,0999
5		5	500	2,7	0,0959
6		5	500	3,0	0,0986
7		2	500	2,8	0,0977
8	2	500	500	3,4	0,1036
0-3	3	-	500	2,8	0,0931
9		10	500	3,1	0,1074
10		5	500	2,7	0,0907
11		2	500	3,3	0,1023

Tabela 3. Właściwości użytkowe ABK gęstości 600 kg/m³

Table 3. Functional performance of AAC specimens (density 600 kg/m³)

Numer próbki	Receptura	Zawartość materiału zmiennofazowego [%]	Parametry betonu komórkowego		
			ρ [kg/m ³]	$R_{k,L}$ [MPa]	λ [W/(m·K)]
0-1	1	-	600	3,5	0,1128
12		10	600	3,4	0,0966
13		5	600	3,5	0,1090
14		5	600	3,6	0,1060
15		2	600	3,4	0,1050
16		2	600	3,4	0,1024
0-2	2	-	600	3,6	0,1093
17		10	600	4,2	0,1195
18		5	600	3,7	0,1054
19		5	600	4,1	0,1080
20		2	600	4,0	0,1094
21	2	600	3,8	0,1106	
0-3	3	-	600	3,8	0,1087
22		10	600	4,3	0,1089
23		5	600	3,8	0,1030
24		2	600	4,2	0,1049

600 kg/m³, natomiast w tabeli 4 wyniki badania reakcji na ogień.

Stosownie do wymagań załącznika krajowego NA normy PN-EN 771-4, minimalna wartość średniej wytrzymałości na ściskanie przy gęstości 500 kg/m³ wynosi 2,5 MPa, a przy gęstości 600 kg/m³ – 3,0 MPa. Z otrzymanych wyników widać, że wszystkie próbki betonu komórkowego spełniają wymagania normy. Zaobserwowano również, że w przypadku receptury 2 (zwiększona ilość cementu) i 3 (zwiększona ilość wapna) zwiększyła się wytrzymałość betonu komórkowego o gęstości 600 kg/m³ modyfikowanego materiałem zmiennofazowym.

Współczynnik przewodzenia ciepła λ , będący miarą izolacyjności cieplnej,

określa, ile ciepła przenika przez ścianę o powierzchni 1 m², gdy różnica temperatury pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną stroną ściany wynosi 10 °C. Norma PN-EN 1745:2012 określa najwyższe dopuszczalne wartości $\lambda_{10,dry}$ elementów murowych z ABK. W przypadku materiału o gęstości 500 kg/m³ wielkość $\lambda_{10,dry}$ nie powinna przekraczać 0,12 W/(m·K), a materiału o gęstości 600 kg/m³ – 0,15 W/(m·K). Współczynnik przewodzenia ciepła badanych próbek betonu komórkowego spełnia wymagania normowe. Analizując wyniki zebrane w tabelach widać, że λ betonu komórkowego z materiałem zmiennofazowym była mniejsza niż betonu kontrolnego bez materiału zmiennofazowego w przypadku receptury 1 (zwiększona ilość gipsu), a w przypadku receptury 2 (zwiększona ilość cementu) i 3 (zwiększona ilość wapna) mniejsza lub na podobnym poziomie. Oznacza to, że izolacyjność materiału wzrasta. Przy recepturze 2 (zwiększona ilość cementu) w betonie komórkowym modyfikowanym 10% dodatkiem materiału zmiennofazowego widać wzrost współczynnika przewodzenia ciepła, a więc pogorszenie właściwości izolacyjnych.

Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników wybrano próbki betonu do badania **reakcji na ogień**. Zgodnie z normą

Tabela 4. Zawartość materiałów organicznych w wybranych próbkach ABK

Table 4. The content of organic materials in selected samples AAC

Nr próbki	Klasa gęstości	Receptura	Zawartość materiału zmiennofazowego [%]	Zawartość materiałów organicznych [% masy]
0-1	500	1	-	0,0
1			5	0,2
2			5	0,2
0-2			-	0,1
7	2	2	0,2	
8	2	2	0,2	
0-3	600	3	-	0,0
11			2	0,0
0-1	600	1	-	0,2
12			10	0,1
13			5	0,3
14			5	0,3

PN-EN 13501-1+A1:2010 *Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków – Część 1: Klasyfikacja na podstawie wyników badań reakcji na ogień* jest to odpowiedź materiału na określone oddziaływanie termiczne, charakteryzujące jego zdolność do udziału w pożarze. Norma ta przyjmuje, że w przypadku elementów zawierających nie więcej niż 1,0% jednolicie rozmieszczonych materiałów organicznych można deklorować Euroklasę ogniową A1 (wyroby niepalne) bez konieczności badania ich reakcji na ogień. Wyroby te nie stwarzają zagrożenia dymem i nie powodują podczas pożaru powstawania płonących kropeł, co w przypadku betonu komórkowego jest przewagą nad innymi materiałami izolacyjnymi.

Zgodnie z PN-EN 771-4+A1:2015-10 *Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 4: Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego*, w celu sprawdzenia reakcji na ogień oznacza się zawartość materiałów organicznych. W normach polskich i europejskich nie ma metody, która byłaby przydatna w przypadku ABK, dlatego COBRPB „Cebet” opracował metodę oznaczania zawartości substancji organicznych w ABK za pomocą aparatu do analizy termicznej. Metoda polega na oznaczeniu ubytków masy próbki autoklawizowanego betonu komórkowego w określonej temperaturze, rejestrowanych podczas pomiarów w aparacie do jednoczesnej analizy termicznej (DTA/TG/DTG), prowadzonych w atmosferze powietrza

oraz atmosferze azotu. Różnica między ubytkami badanej próbki stanowi zawartość materiałów organicznych (tabela 4) (oznaczenie wykonano wg Procedury Badawczej nr 34.0 *Oznaczenie zawartości materiałów organicznych w autoklawizowanym betonie komórkowym*, Warszawa, COBRPB „CebeT”, Laboratorium Badawcze, wyd. 2/2006).

Badania reakcji na ogień wykazały, że zawartość substancji organicznych w przebadanych próbkach betonu komórkowego z materiałem zmienno-fazowym, wyprodukowanych wg technologii piaskowej, wynosiła 0,0 – 0,3% masy. Zgodnie z PN-EN 13501-1 *Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków – Część 1: Klasyfikacja na podstawie wyników badań reakcji na ogień*, badany beton można określić jako materiał niepalny, o klasie ogniowej A1, który podczas pożaru nie wydziela dymu oraz nie powoduje powstawania płonących kropli/cząstek.

W drugim etapie badań przeprowadzono próby w skali półtechnicznej. Na podstawie wyników badań ze skali laboratoryjnej opracowano trzy receptury betonu komórkowego. PCM dozowano w ilości 5% i 10%. Zbadano właściwości użytkowe otrzymanego betonu komórkowego (tabela 5) i wybrano receptury betonu do prób w skali technicznej.

Tabela 5. Właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego – skala półtechniczna

Table 5. Functional performance of AAC specimens (density 600 kg/m³ – half technical scale)

Receptura	Zawartość materiału zmienno-fazowego [%]	Parametry betonu komórkowego		
		ρ [kg/m ³]	R _{kL} [MPa]	λ [W/(m·K)]
A	5	600	3,9	0,1484
A	10	600	4,3	0,1470
B	10	600	3,6	0,1526

Otrzymane wyniki badań pokazują, że najlepsze właściwości betonu komórkowego uzyskano w przypadku receptury A (w recepturze B zmniejszono o 10% ilość cementu na rzecz wapna w stosunku do receptury A) z 10% dodatkiem PCM. Beton komórkowy spełnia wymagania norm dotyczące wytrzymałości na ściskanie i współczynnika przewodzenia ciepła.

W trzecim etapie badań, tj. podczas prób w skali przemysłowej, wyproduk-

wano bloczki betonu komórkowego bez dodatku PCM, z którego zbudowano domek referencyjny oraz bloczki betonu komórkowego z 5% i 10% zawartością PCM na domek doświadczalny, składający się z dwóch pomieszczeń. W jednym z nich wykonano ściany jednowarstwowe z betonu komórkowego z 5% zawartością PCM, a w drugim ściany jednowarstwowe z betonu komórkowego z 10% zawartością PCM. Zbadano również (zgodnie z EN 771-4) właściwości użytkowe bloczków betonu komórkowego, z których wybudowano domki, tj. wytrzymałość na ściskanie, gęstość, mrozoodporność, współczynnik przewodzenia ciepła, absorpcję wody, skurcz, współczynnik przepuszczania pary wodnej (tabela 6). Wyniki badań pokazują, że dodatek materiału zmienno-fazowego PCM nie pogarsza właściwości betonu komórkowego.

Tabela 6. Właściwości użytkowe autoklawizowanego betonu komórkowego badane zgodnie z EN 771-4 – skala przemysłowa

Table 6. Functional performance of AAC specimens (density 600 kg/m³ – industrial scale)

Nr próbki	PCM [%]	Parametry betonu komórkowego										
		ρ [kg/m ³]	R _{kL} [MPa]	λ [W/(m·K)]	mrozoodporność [%]		skurcz [mm/m]		współczynnik przeniesienia pary wodnej δ [kg/(Pa·m·s)]	średnia absorpcja wody c _{w,s} [g/(m ² ·s ^{0,5})]		
					zmiana R _{kL}	zmiana masy	30 – 6%	całkowity		po 10 min	po 30 min	po 90 min
C0	0	600	3,3	0,1404	0	-0,5	0,04	0,44	0,285 · 10 ⁻¹⁰	210	180	157
C1	10	600	3,2	0,1440	3,0	-0,5	0,04	0,56	0,249 · 10 ⁻¹⁰	233	191	162
C2	10	600	3,3	0,1396	1,2	0,5	0,09	0,48	0,278 · 10 ⁻¹⁰	218	186	161
C3	5	600	3,6	0,1347	1,8	0,2	0,00	0,51	0,314 · 10 ⁻¹⁰	199	168	143
C4	5	600	3,1	0,1422	-1,6	0,7	0,02	0,60	0,303 · 10 ⁻¹⁰	175	154	137

Domki wyposażone zostały w czujniki, które zamontowano w każdym z pomieszczeń na dwa sposoby. W pierwszym przypadku oprzyrządowano bloczek betonu komórkowego, tj. 6 czujników wprowadzono w materiał, a cały bloczek został wbudowany w ścianę. Miało to na celu sprawdzenie, jak zmienia się temperatura w przekroju bloczka i czy podczas badań bloczek nagrzeje się na całej grubości powyżej temperatury 21 °C, tj. temperatury przemiany fazowej PCM. Pozostałe czujniki rozmieszczono w następujący sposób: wewnątrz pomieszczeń jeden czujnik znajdował się na bloczku, a drugi wisiał wolno w środku pomieszczenia. Dwa czujniki umieszczono na zewnątrz pomieszczeń: jeden na bloczku od strony nasłonecznionej, a drugi

od strony pozostającej najczęściej w cieniu. Ze względu na specyfikę materiału zmienno-fazowego i sposób jego działania badania w domkach są kontynuowane.

Wnioski

Wykonane badania potwierdziły możliwość zastosowania materiałów zmienno-fazowych w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego i wykazały, że PCM najlepiej dozować w ilości 5% masy składników spoiwa, ponieważ większa ilość nie zmienia w istotny sposób właściwości betonu komórkowego. Trzeba jednak pamiętać, że większa ilość PCM w bloczku z ABK będzie zwiększać jego akumulację ciepła. Biorąc dodatkowo pod uwagę, że dodatek 10% PCM nie pogarsza właściwości betonu, lepiej dodawać jego zwiększoną ilość. Lepsze i bardziej stabilne właściwości

otrzymano w przypadku betonu gęstości 600 kg/m³. Najważniejszym parametrem betonu z PCM jest współczynnik przewodzenia ciepła λ. PCM nie pogorszył właściwości izolacyjnych betonu komórkowego.

Literatura

- [1] Jaworski M.: Zastosowanie materiałów zmienno-fazowych PCM w budownictwie. *Materiały Budowlane* nr 2/2012, Warszawa, s. 30 – 33.
- [2] Schmidt M. F.: Proste w stosowaniu materiały budowlane wykorzystujące ciepło przemiany fazowej PCM. *Materiały Budowlane* nr 2/2012, Warszawa, s. 34 – 35.
- [3] Balkovic S., Zapotoczna-Sytek G.: *Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Zastosowanie.* PWN, Warszawa 2013.

Przyjęto do druku: 30.11.2015 r.