

Roma GOŁUCH-GÓRECZNA<sup>1,4</sup>, Magdalena URBANIAK<sup>2</sup>, Andrzej K. BŁĘDZKI<sup>3</sup>

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki,

<sup>2</sup>Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn,

<sup>3</sup>Instytut Inżynierii Materiałowej, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

<sup>4</sup>Carbon Fox Sp. z o.o., Rajkowo 13F, 72-005 Rajkowo

e-mail: murbaniak@zut.edu.pl

## Biokompozyty na bazie naturalnego aglomeratu korkowego wytwarzane metodą worka próżniowego

**Streszczenie:** Wielowarstwowe płyty biokompozytów wytworzono metodą worka próżniowego. Materiałem okładzinowym był laminat epoksydowo-szklany z materiałem rdzeniowym z naturalnego aglomeratu korkowego o różnych grubościach. Przeprowadzono porównawcze badania statycznego zginania czteropunktowego i statycznej próby ściskania prostopadłej do płaszczyzny laminowania oraz oznaczono ciężar właściwy wytworzonych biokompozytów warstwowych.

**Słowa kluczowe:** biokompozyt, naturalny aglomerat korkowy, worek próżniowy, kompozyt warstwowy

### BIOCOMPOSITES PROPERTIES BASED ON NATURAL CORK AGGLOMERATE MANUFACTURED BY THE VACUUM BAG METHOD

**Abstract:** Some sandwich composites were manufactured by the method of vacuum bag using glass-epoxy laminates and natural cork agglomerates in different thickness as cladding and core materials. The samples such of biocomposites were subjected to comparative investigations of four-point bending and compression as well as specific weight determinations.

**Keywords:** biocomposite, natural cork agglomerate, vacuum bag, sandwich composite

## 1. WPROWADZENIE

Wzmacniane materiały kompozytowe są obecnie kluczowe we współczesnym świecie, z licznymi zastosowaniami, od najprostszych artykułów gospodarstwa domowego, po zaawansowane aplikacje w przemyśle lotniczym, militarnym, motoryzacyjnym i energetyce wiatrowej. Głównym czynnikiem, jaki wpływa na dynamiczny rozwój konstrukcyjnych materiałów kompozytowych o coraz lepszej jakości jest dążenie do wydajnego wytwarzania materiałów i produktów o jak najlepszych właściwościach wytrzymałościowych, trwałości, sztywności, niskiej masie, czy też odpornych na korozję i ekoprzyjaznych środowisku przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ich eksploatacji [1, 2]. Atrak-

cyjnymi materiałami konstrukcyjnymi spełniającymi wysokie kryteria są warstwowe materiały kompozytowe tzw. kompozyty przekładkowe. Poprzez zastosowanie lekkiego rdzenia w kompozycie zyskuje się niebywałą sztywność w stosunku do ciężaru elementu. Natomiast dzięki redukcji ciężaru w stosunku do tradycyjnych rozwiązań uzyskuje się znaczne zmniejszenie emisji dwutlenku węgla przy produkcji, jak i eksploatacji [3]. Coraz większe zainteresowanie budzą biokompozyty nie tylko ze względu na przyjazny charakter oddziaływania na środowisko naturalne, ale przede wszystkim na wyjątkowe właściwości, których producenci materiałów syntetycznych nie są w stanie odtworzyć. Takimi biokompozytami są sandwicze, których materiał rdzeniowy stanowi naturalny agleme-

rat korkowy. Aglomerat korkowy charakteryzuje się szeregiem unikalnych właściwości, jak odporność chemiczna i biologiczna oraz wysoka izolacyjność termiczna i akustyczna, a także trudnopalność, nieprzepuszczalność dla cieczy i gazów, wysoka odporność na zużycie i temperaturę, a przy tym wszystkim wykazuje jednocześnie mały ciężar właściwy [4,7].

## 2. METODA WYTWARZANIA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Do wytwarzania kompozytowych próbek do badań użyto jednej z najpopularniejszych metod wytwarzania kompozytów, tzn. metody worka próżniowego (rys.1). Metoda worka próżniowego (ang. vacuum bagging) jest modyfikacją metody ręcznej (kontaktowej). Polega ona na szczelnym zamknięciu na formie, ręcznie przesączonych warstw kompozytu mieszanką żywiczną wraz z materiałami pomocniczymi w wysokoelastycznym worku próżniowym oraz odessaniu zbędnego powietrza wraz z ewentualnym nadmiarem mieszanki żywicznej realizowanym przy pomocy pompy próżniowej. Ewentualny nadmiar mieszanki żywicznej odsysany jest do naczynia przejściowego (ang. resin trap). Materiałami pomocniczymi w tej metodzie są kolejno: warstwa odrywana, perforowana folia rozdzielająca oraz tkanina przepuszczająco-absorbpcyjna [8]. Ciśnienie formowania utrzymuje się do mo-

mentu utwardzenia się kompozytu na poziomie 70-80 kPa, a czas utwardzania kompozytu zwykle wynosi ok. dwóch godzin, jednak zależne jest to od zastosowanych komponentów mieszanki żywicznej oraz od temperatury [9]. Zastosowany proces technologiczny wykorzystuje ciśnienie jako docisk do utrzymania wszystkich warstw kompozytu razem. Gdy worek próżniowy jest uszczelniony do formy, ciśnienie wewnątrz, jak i na zewnątrz worka próżniowego jest na poziomie ciśnienie atmosferycznego, lecz po włączeniu pompy próżniowej, ciśnienie wewnątrz worka próżniowego maleje. Siłę docisku kompozytu definiuje różnica między ciśnieniem atmosferycznym, a ciśnieniem wewnątrz worka [10].

## 3. ZASTOSOWANE MATERIAŁY DO WYTWORZENIA BIOKOMPOZYTÓW

Okładzionowymi warstwami wytworzonych kompozytów typu sandwich był laminat zbudowany z kilku warstw rowingowej tkaniny szklanej, przesączonej systemem epoksydowym. Jako materiał rdzeniowy zastosowano naturalny aglomerat korkowy Corecork NL20 o grubościach 6, 10, 15 i 25 mm.

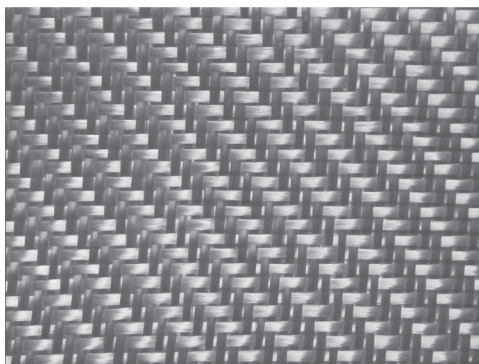
### 3.1. WZMOCNIENIE

Do wytworzenia warstwowych materiałów kompozytowych zastosowano kilka warstw



Rys. 1. Wytwarzanie biokompozytu metodą worka próżniowego

Fig. 1. Manufacture of biocomposite by vacuum bag method



Rys. 2. Tkanina Aeroglass 280 g/m<sup>2</sup>

Fig. 2. Glass fabric Aeroglass 280 g/m<sup>2</sup>

tkaniny szklanej AEROGLOSS o splocie płóciennym o gramaturze 280 g/m<sup>2</sup> i średnicą włókna 13 μm, firmy Havel Composites CZ, ze względu na powszechność stosowania tego typu wzmocnienia w przemyśle (rys.2) [11]. Dużą zaletą tkaniny o takim splocie jest możliwość układania jej nawet na dość skomplikowanych powierzchniach formy, ponieważ układ pasm tkaniny przeplata się i krzyżuje, tworząc strukturę intensywnie sfalowaną, związaną oraz sztywną [8].

### 3.2. OSNOWA

Do wytworzenia próbek kompozytów warstwowych o grubościach przekładek równych 6, 10 i 15 mm użyto system epoksydowy: żywicę Biresin CR122 i utwardzacz Biresin CR122-5, natomiast do pozostałych próbek tzn. 25 mm, zastosowano system epoksydowy: żywicę Biresin

CR132 i utwardzacz Biresin CR132-5 firmy Sika Deutschland GmbH. Systemy te charakteryzują się dobrą zwilżalnością włókien, nietoksycznością oraz wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi już w temperaturze pokojowej. Przeznaczone są do zastosowań w lotnictwie, energetyce wiatrowej, motoryzacji oraz produkcji form [12, 13].

### 3.3. MATERIAŁ RDZENIOWY

Jako materiału rdzeniowego użyto naturalnego aglomeratu korkowego Corecork NL20 o gęstości 200 kg/m<sup>2</sup> (rys.3). Corecork charakteryzuje się znakomitymi właściwościami izolacyjnymi nawet w podwyższonych temperaturach, a to dzięki wyjątkowej budowie komórkowej korka. Ponadto, na istotę materiału jakim jest aglomerat korkowy w żadnym stopniu nie wpływa wilgoć, bowiem cechuje



Rys. 3. Corecork NL20 o gęstości 200 g/m<sup>2</sup>

Fig. 3. Corecork NL20 with a density 200 g/m<sup>2</sup>

się doskonałą wodoszczelnością, zatem nie butwieje i jest chemicznie obojętny. Istotnymi jego cechami są również ogniotrwałość oraz zdolność do tłumienia drgań. Potencjał jaki drzemie w tym materiale jest już szeroko wykorzystywany w różnych gałęziach przemysłu i transportu (od korka do butelki wina po np. metro Inspiro Siemens'a) [4,7].

#### 4. METODY BADAWCZE

Na wytworzonych próbkach kompozytowych przeprowadzono statyczne badania zginania czteropunktowego, statyczne próby ściskania oraz zbadano ciężar właściwy wytworzonych struktur sandwichowych.

##### 4.1. STATYCZNA PRÓBA ZGINANIA CZTEROPUNKTOWEGO

Statyczne próby zginania czteropunktowego polegały na symetrycznym oraz prostopadłym do płaszczyzny laminowania obciążaniu próbki przez dwie równe co do wartości siły (rys.4). Badania zrealizowano zgodnie z normą PN-EN ISO 14125, na maszynie wytrzymałościowej Instron model 8501 Plus przy prędkości zginania 5 mm/min. Wymiary próbek i rozstaw podpór uzależnione były od grubości materiału kompozytowego. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej (22°C) oraz wilgotności na poziomie 45 %.

Rozstaw dolnych podpór ustalano zgodnie z normą PN-EN ISO 14125, wg zależności:

$$L = 22,5 \cdot h \text{ [mm]}$$

Naprężenie zginające wyznaczono ze wzoru (zgodny z normą PN-EN ISO 14125):

$$\sigma = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (1)$$

zaś odkształcenie kształtki wyznaczono ze wzoru (zgodny z normą PN-EN ISO 14125):

$$\varepsilon = \frac{4,7 \cdot s \cdot h}{L^2} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – obciążenie maksymalne [N],  $b$  – szerokość kształtki [mm],  $h$  – grubość kształtki [mm],  $s$  – strzałka ugięcia [mm],  $L$  – rozstaw podpór [mm].

##### 4.2. STATYCZNA PRÓBA ŚCISKANIA PROSTOPADŁA DO PŁASZCZYZNY LAMINOWANIA

Statyczne próby ściskania prostopadłe do płaszczyzny laminowania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 604 na maszynie wytrzymałościowej Instron model 8501 Plus (rys. 5), przy prędkości ściskania 1 mm/min, średniej temperaturze 22 °C oraz wilgotności 45 %. Do badań użyto prostopadłościennych próbek o wymiarach 70 ´ 70 mm i o różnych grubościach.



Rys. 4. Statyczne zginanie czteropunktowe próbki biokompozytu z materiałem rdzeniowym Corecork NL20 o grubości 6 mm  
Fig. 4. Static four-point flexural test of biocomposite sample with Corecork NL20 in 6 mm thickness as a core



Napężenie ściskające ( $\sigma$ ) obliczono ze wzoru:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (3)$$

gdzie: F – obciążenie [N], A – przekrój poprzeczny próbki [mm<sup>2</sup>].

Odształcenie ( $\epsilon$ ) obliczono ze wzoru:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

gdzie:  $\Delta l$  – przemieszczenie [mm], l – nominalna grubość próbki [mm].

#### 4.3. CIĘŻAR WŁAŚCIWY

Ciężar właściwy sandwichowy wyznaczono przy użyciu analitycznej wagi laboratoryjnej

(RADWAG AS 160.R2) z dokładnością do 0,0001 g, na której ważono prostopadłościenną próbkę, o wymiarach 70 × 70 mm o różnych grubościach, mierzonych suwmiarką elektroniczną z dokładnością 0,01 mm. Wszystkie pomiary przeprowadzono w temperaturze pokojowej (22 °C) oraz wilgotności na poziomie 45 %.

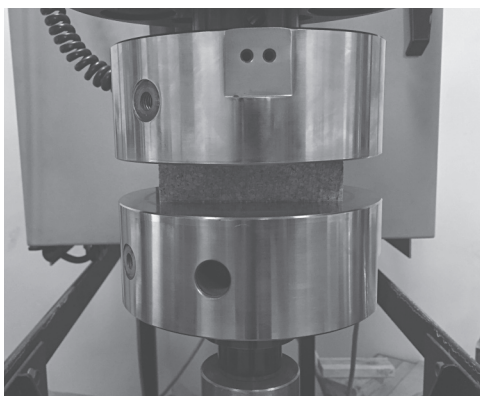
Ciężar właściwy wyznaczono jako stosunek ciężaru próbki do jej objętości:

$$\gamma = \frac{Q}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad (5)$$

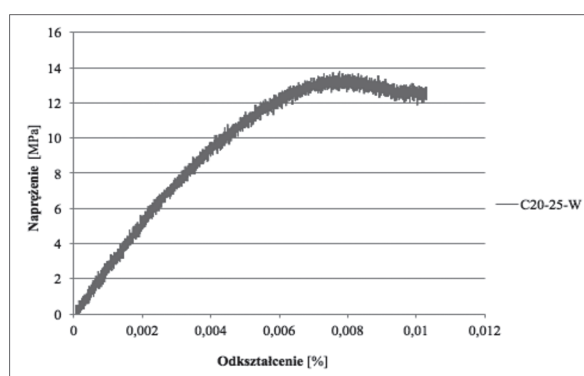
gdzie: Q – ciężar [N], V – objętość [m<sup>3</sup>].

#### 5. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykładowe krzywe napężenie-odkształcenie



Rys. 5. Statyczna próba ściskania próbki biokompozytu z materiałem rdzeniowym Corecork NL20 o grubości 25 mm  
Fig. 5. Static compression test of biocomposite sample with Corecork NL20 in 25 mm thickness as a core

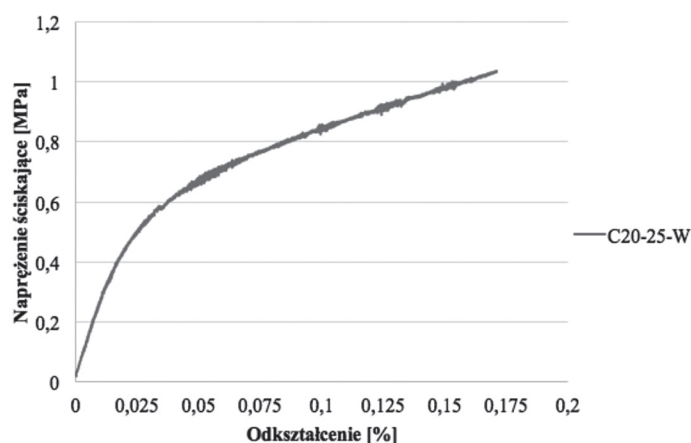


Rys. 6. Przykładowa krzywa zależności napężenia zginającego w funkcji odkształcenia dla biokompozytu z przekładką Corecork NL20 o grubości 25 mm

Fig. 6. Example flexural stress-strain curve for biocomposite with Corecork NL20 in 25 mm thickness as a core

względnie odpowiednio dla prób statycznego zginania czteropunktowego i prób ściskania biokompozytów sandwichowych, o różnych grubościach przekładek naturalnego aglomeratu korkowego 6, 10, 15 i 25 mm, wytworzonych metodą worka próżniowego.

Wyniki przeprowadzonych badań biokompozytów sandwichowych na bazie naturalnego aglomeratu korkowego zestawiono w tabelach 1, 2 i 3, kolejno dla prób statycznego zginania czteropunktowego, ściskania równoległego do płaszczyzny laminowania oraz ciężaru właściwego.



Rys. 7. Przykładowa krzywa zależności napężenia ściskającego w funkcji odkształcenia dla biokompozytu z przekładką Corecork NL20 o grubości 25 mm

Fig. 7. Example compressive stress-strain curve of biocomposite with Corecork NL20 in 25 mm thickness as a core

Tab. 1. Wartości wytrzymałości na zginanie, modułu sprężystości przy zginaniu, odkształcenia przy wytrzymałości na zginanie, obciążenia przy wytrzymałości na zginanie oraz strzałki ugięcia dla biokompozytów o różnej grubości przekładki

Tab. 1. Values of flexural strength, flexural modulus of elasticity, flexural strain, flexural load and bend deflection for biocomposites with different thickness of cores

Próbka*	Wytrzymałość na zginanie $\sigma_z$ [MPa]	Moduł sprężystości przy zginaniu $E_z$ [MPa]	Odształcenie $\epsilon$ przy $\sigma_z$ [%]	Obciążenie F przy $\sigma_z$ [N]	Strzałka ugięcia przy $\sigma_z$ [mm]
C20-25-W	13,3 $\pm 0,7$	2146,8 $\pm 99,1$	0,8 $\pm 0,1$	798,4 $\pm 41,1$	22,8 $\pm 1,4$
C20-15-W	25,9 $\pm 1,4$	3729,6 $\pm 235,4$	0,7 $\pm 0,0$	585,0 $\pm 33,6$	13,6 $\pm 0,3$
C20-10-W	32,2 $\pm 1,7$	3532,6 $\pm 93,0$	0,8 $\pm 0,1$	257,9 $\pm 14,1$	11,4 $\pm 0,4$
C20-06-W	34,7 $\pm 1,9$	2256,2 $\pm 106,8$	1,4 $\pm 0,1$	168,6 $\pm 9,3$	10,8 $\pm 0,3$

Tab. 2. Wartości wytrzymałości na ściskanie, odkształcenia przy wytrzymałości na ściskanie oraz obciążenia przy wytrzymałości na ściskanie dla biokompozytów o różnej grubości przekładki

Tab. 2. Values of compressive strength, compressive strain and compressive load for biocomposites with different thickness of cores

Próbka*	Wytrzymałość na ściskanie $\sigma_c$ [MPa]	Odształcenie $\epsilon$ przy $\sigma_c$ [%]	Obciążenie F przy $\sigma_c$ [kN]
C20-25-W	0,6 $\pm 0,1$	0,07 $\pm 0,020$	1,4 $\pm 0,0$
C20-15-W	1,4 $\pm 0,2$	0,03 $\pm 0,010$	1,3 $\pm 0,3$
C20-10-W	7,1 $\pm 0,4$	0,05 $\pm 0,009$	6,8 $\pm 0,3$
C20-06-W	8,6 $\pm 0,1$	0,04 $\pm 0,002$	4,8 $\pm 0,2$

Tab. 3. Wartości ciężaru właściwego biokompozytów o różnej grubości przekładki

Tab. 3. Specific weight values of biocomposites with different thickness of cores

Próbka*	Ciężar właściwy $\left[\frac{N}{m^3}\right]$
C20-25-W	3282,2 <sub>+/-63,6</sub>
C20-15-W	4102,4 <sub>+/-78,2</sub>
C20-10-W	4356,4 <sub>+/-4,2</sub>
C20-06-W	5248,8 <sub>+/-35,5</sub>

\*oznaczenie nazwy próbek: pierwszy człon oznacza typ materiału rdzeniowego, odpowiednio C20 - Corecork NL20; drugi człon oznacza grubość materiału rdzeniowego wyrażoną w milimetrach; trzeci człon oznacza zastosowaną metodę wytwarzania, odpowiednio W- metoda worka próżniowego SD - odchylenie standardowe.

Najwyższymi wartościami wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na ściskanie, a także ciężaru właściwego charakteryzują się biokompozyty typu sandwich o najmniejszej grubości przekładki naturalnego aglomeratu korkowego Corecork NL20 (tab.1,3). Wartości te ze wszystkich prób maleją wraz ze wzrostem grubości przekładki lekkiej. Spowodowane jest to znaczną różnicą w udziale wzmocnienia i osnowy w strukturze biokompozytu. Mianowicie, im grubsza przekładka lekka, tym udział wzmocnienia i osnowy znacząco maleje, a biokompozyt charakteryzuje się zwiększoną zdolnością do sprężystości i absorpcji energii, przy jednoczesnym zmniejszeniu wytrzymałości mechanicznej i ciężaru właściwego. Charakterystyki naprężenie-odkształcenie, zarówno z próby statycznego zginania czteropunktowego, jak i statycznego ściskania przebiegają w sposób łagodny (rys. 6 i 7). Podczas prób zginania czteropunktowego pęknięciu ulegała jedynie warstwa okładzinowa, natomiast materiał rdzeniowy, którym był Corecork NL20 ulegał zagęszczeniu.

Ponadto, badane biokompozyty wykazują zdolność powrotu nawet do 98 % nominalnych wymiarów po odjęciu obciążenia ściskającego. Zjawisko to jest możliwe dzięki specyficznej budowie komórkowej korka, która zbudowa-

na jest z elastycznych, zamkniętych cel, wypełnionych mieszaniną gazową podobną do składu powietrza atmosferycznego. Dodatkowo, podczas ściskania kształtki nie występuje zjawisko wyboczenia, ponieważ podczas procesu obciążania naturalny aglomerat korkowy zagęszcza się nie niszcząc struktury materiału i nie tracąc swoich właściwości.

## 6. PODSUMOWANIE

Kompozyty warstwowe na bazie naturalnych komponentów charakteryzują się ekologicznością, tj. możliwością do recyklingu oraz biodegradowalnością, a także wykazują właściwości nadające im dodatkowe walory użytkowe, którymi mogą przewyższać tradycyjne, syntetyczne materiały. Zastosowanie naturalnego aglomeratu korkowego w kompozycie warstwowym pozwala uzyskać mały ciężar właściwy, wysoką sprężystość i absorpcję energii, jak również bezpieczeństwo użytkowania wobec braku ostrych krawędzi podczas zniszczenia materiału, co jest cenną cechą produktów, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym i kolejnictwie.

Przeprowadzone badania, wytworzonych w jednakowych warunkach biokompozytów warstwowych, wykazały istotny wpływ zmia-

ny grubości przekładki lekkiej z naturalnego aglomeratu korkowego na wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne sandwichowego biokompozytu. Zależnie od wymaganych właściwości, określenie tego wpływu pozwala na optymalny dobór grubości przekładki lekkiej w danym zastosowaniu sandwichowej struktury biokompozytu.

## BIBLIOGRAFIA

1. Composites review, *Rynek tworzyw wzmocnionych*, 2012, nr 1, s. 5-8.
2. Composites review, *Nowe technologie w lotnictwie cywilnym*, 2012, nr 1, s. 28-31.
3. Ochelski S.: *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2004.
4. Urbaniak M., Gołuch-Góreczna R., Błędzki A.K., Gajdziński S.: *Korek naturalny. Cz. I. Uprawy dębu korkowego, makro- i mikroskopowa morfologia korka*, *Polimery* 2017, vol. 62, nr 5, s. 388-393.
5. Urbaniak M., Gołuch-Góreczna R., Błędzki A.K., Gajdziński S.: *Korek naturalny. Cz. II. Właściwości i zastosowania*, *Polimery* 2017, vol. 62, nr 6, s. 472-480.
6. Urbaniak M., Gołuch-Góreczna R., Błędzki A.K.: *Natural Cork Agglomerate as an Ecological Alternative in Constructional Sandwich Composites*, *BioResources* 2017, vol. 12, No. 3, p. 5512-5524.
7. Pereira H.: *Cork: Biology, Production and Uses*, Elsevier, Amsterdam 2007.
8. Królikowski W.: *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, PWN, Warszawa 2012.
9. Makuliński M.: *Porównanie techniki infuzji i worka próżniowego w praktyce*, *Polimery i kompozyty konstrukcyjne* 2010, s. 461-466.
10. Informacja techniczna firmy WEST SYSTEM, *Vacuum Bagging Techniques*, [http://www.westsystem.com/ss/assets/HowTo-Publications/Vacuum-Bagging\\_Techniques.pdf](http://www.westsystem.com/ss/assets/HowTo-Publications/Vacuum-Bagging_Techniques.pdf), (dostęp 9.06.2017).
11. Informacja techniczna firmy Havel Composites CZ, Glass fabric AEROGLOSS 280 g/m<sup>2</sup>.
12. Informacja techniczna firmy Sika Deutschland GmbH, Żywica CR122 i utwardzacz CH122-5.
13. Informacja techniczna firmy Sika Deutschland GmbH, Żywica CR132 i utwardzacz CH132-5.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 26-07-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 27-09-2017