

ANDRZEJ K. BŁĘDZKI<sup>1)</sup>, KRZYSZTOF GORAĆY<sup>2)</sup>, MAGDALENA URBANIAK<sup>3)</sup>

## Możliwości recyklingu i utylizacji materiałów polimerowych i wyrobów kompozytowych

**Streszczenie** — W artykule przedstawiono sposoby recyklingu kompozytów polimerowych w Europie i w Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem kompozytów duroplastycznych wzmocnianych włóknami szklanymi lub węglowymi. Omówiono sposoby rozwiązywania problemów związanych z recyklingiem kompozytów oraz regulacje prawne w tym zakresie, obowiązujące w Unii Europejskiej.

**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe, duroplasty, recykling, utylizacja.

### POSSIBILITIES OF RECYCLING AND UTYLISATION OF THE POLYMERIC MATERIALS AND COMPOSITE PRODUCTS

**Summary** — The paper describes the methods of recycling of polymer composites in Europe and Poland, with a particular focus on duroplastic composite materials reinforced with glass or carbon fibres. The ways to solve the problems connected with composite recycling as well as the existing European Community regulations in this area have been discussed.

**Keywords:** polymer composites, duroplasts, recycling, utilization.

### PRODUKCJA KOMPOZYTÓW NA ŚWIECIE

Produkcja tworzyw polimerowych wzmocnionych włóknami szklanymi w roku 2011 osiągnęła w Europie poziom 1049 mln ton, zbliżając się tym samym do poziomu produkcji notowanego w najlepszych dla tej branży latach [1]. Całkowitą ilość wytworzonych wówczas kompozytów polimerowych, z podziałem na technologie wytwarzania przedstawia tabela 1.

Rosnące zapotrzebowanie przemysłów elektrotechnicznego i elektronicznego wpływa na wzrost produkcji tłoczysz termoutwardzalnych SMC (*Sheet Molding Compound*) i BMC (*Bulk Molding Compound*) na poziomie 7 % rocznie. Technologia laminowania ręcznego (brak wzrostu) jest natomiast częściowo wypierana przez inne technologie, zwłaszcza przez RTM (*Resin Transfer Molding*). Technologia RTM rozwija się dzięki temu, że zastępuje technologię z otwartymi formami (np. laminowanie ręczne), jak również dzięki szerszemu wykorzystaniu urządzeń RTM do żywic epoksydowych stosowanych w przemyśle samochodowym. Produkty otrzymywane przy użyciu technologii pultruzji znajdują zastosowanie głównie w elementach infrastruktury zamawianych przez instytucje państwowe, technologia ta ma zatem

przed sobą raczej stabilną przyszłość, choć ilość produktów jest nieporównywalnie mniejsza niż innych rodzajów wyrobów. Produkcja płyt z kompozytów wytwarzanych metodą ciągłą rośnie wraz z rozwojem ich głównego odbiorcy — producentów samochodów ciężarowych.

**Tabela 1. Produkcja kompozytów polimerowych w Europie, podział wg technologii wytwarzania. Dane dotyczące roku 2011 oszacowano [1]**

**T a b e l e 1. Production of polymer composites in Europe, divided according to processing technology. Data for 2011 were estimated [1]**

Technologia	2008, kt	2011, kt
SMC	210	198
BMC	70	69
Laminowanie ręczne	202	160
Natryskiwanie włókien	103	98
RTM	106	120
Płyty	69	77
Pultruzja	46	51
Nawijanie	79	86
Odlewanie odśrodkowe	62	69
GMT/LFT termoplasty	95	105
Inne	16	16
Razem	1 058	1 049

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin:

<sup>1)</sup> Instytut Inżynierii Materiałowej, andrzej.bledzki@gmx.de

<sup>2)</sup> Instytut Polimerów, krzysztof.goracy@zut.edu.pl

<sup>3)</sup> Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, magdalena.urbaniak@zut.edu.pl

W dziedzinie rur i zbiorników (wytwarzanych na drodze nawijania i odlewania odśrodkowego), szczegól-

nie dynamicznie rozwija się segment materiałów stosowanych do renowacji rur kanalizacyjnych. Produkcja rur w Europie nadal jednak jest znacznie mniejsza niż w innych regionach świata.

Technologie termoplastów wzmocnionych szklanymi matami (GMT – Glass Fiber Mat Reinforced Thermoplastic) lub włóknami długimi (LFT) rozwijają się dzięki współpracy z przemysłem samochodowym, gdzie zastępując metale znajdują nowe zastosowania.

Udział wykorzystywanych w poszczególnych gałęziach przemysłu kompozytów polimerowych pozostaje niezmienny od lat. Przeważają tu transport – 35 % i budownictwo – 35 % zużycia kompozytów, elektronika i elektrotechnika – łącznie 14 %, sport – 14 %, inne branże 2 %. Główne rynki zbytu dla europejskich producentów surowców, maszyn i przetwórców to Chiny, Indie, Rosja.

**T a b e l a 2. Produkcja kompozytów polimerowych w poszczególnych krajach Europy [1]**

**T a b l e 2. Production of polymer composites in the individual European countries [1]**

	2008, kt	2009, kt	2010, kt	2011, kt
Hiszpania/Portugalia	236	188	217	200
Niemcy	145	118	161	172
Włochy	183	122	154	165
Wlk. Brytania/Irlandia	123	106	130	126
Francja	115	87	116	122
Finlandia/Norwegia/ Szwecja/Dania	69	52	50	52
Belgia/Holandia/ Luxemburg	38	31	40	42
Austria/Szwajcaria	13	13	16	17
Europa Wschodnia*)	136	98	131	153
Łącznie	1 058	815	1 015	1 049

\*) Polska, Czechy, Węgry, Rumunia, Serbia, Chorwacja, Macedonia, w 2011 uzupełnione przez Litwę, Łotwę, Słowację i Słowenię.

Ocena wielkości produkcji kompozytów polimerowych w poszczególnych krajach, tylko na podstawie danych, jest trudna. Oszacowania z różnych źródeł różnią się, wiele zależy także od specyfiki produkcji w danym kraju. Przedstawiane wartości należy zatem interpretować w kontekście kierunków zmian a nie konkretnych danych (tabela 2). W ostatnich latach spadła produkcja kompozytów w Hiszpanii i Portugalii, ale również w Wielkiej Brytanii. Największy wzrost produkcji zanotowano w Niemczech i we Włoszech. Również Austria i Szwajcaria odnotowały wzrost produkcji, choć na odpowiednio niższym poziomie. Dzięki zastosowaniom w elektrotechnice rośnie produkcja kompozytów w krajach skandynawskich, a zwłaszcza w Finlandii. Wzrost produkcji o ponad 10 % zanotowano również w Turcji. W Rosji wzrost zapotrzebowania na kompozyty odnotowano

dzięki rozwojowi przemysłu samochodowego i dużym inwestycjom w infrastrukturę [1]. Światowy rynek wytwórców kompozytów polimerowych jest podzielony między Europę – 25 %, Amerykę 25 % i Azję 50 %.

Od szeregu lat, oprócz kompozytów wzmocnianych włóknami szklanymi stosowane są również kompozyty wzmocniane włóknami węglowymi. Problem recyklingu odpadów takich materiałów również czeka na rozwiązanie, tym bardziej, że poszerza się zakres ich zastosowań, również w przemyśle samochodowym. Przyczyniają się do tego regulacje prawne, ograniczające od roku 2020 emisję CO<sub>2</sub> z pojazdów, co wiąże się bezpośrednio z koniecznością zmniejszenia ich ciężaru. W porównaniu z innymi materiałami kompozyty węglowe umożliwiają ponadto wytwarzanie, w jednym procesie technologicznym, dużych skomplikowanych struktur, co ma znaczenie dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa pasażerów pojazdów.

Rynek włókien węglowych w roku 2009 przeżył kryzys, ale nadal ma bardzo duży potencjał rozwoju (tabela 3).

**T a b e l a 3. Światowa produkcja włókien węglowych [2]**

**T a b l e 3. World production of carbon fibres [2]**

Rok	Wielkość produkcji, t
2008	33 000
2009	24 000
2010	31 000
2011	36 000
2015 (szacowana)	65 000

**T a b e l a 4. Światowa produkcja kompozytów z włóknami węglowymi [2]**

**T a b l e 4. World production of polymer composites with carbon fibres [2]**

Rok	Wielkość produkcji, t
2008	50 810
2009	36 952
2010	47 730
2011	55 429
2015 (szacowana)	100 079

Okolo 98 % wszystkich włókien węglowych znajduje zastosowanie w kompozytach różnych rodzajów. Rynek kompozytów wzmocnianych włóknami węglowymi rozwija się więc równolegle z rynkiem samych włókien, przy czym, ze względu na udział polimerowej osnowy (głównie żywic epoksydowych, fenolowych, poliestrowych i termoplastów) tonażowo jest większy o ok. 35 % (tabela 4). Kompozyty wzmocniane włóknami węglowymi na osnowie z ceramiki, metali itp., nie stanowią tu więcej niż 5 %. Natomiast ponad 90 % polimerów używanych w kompozytach węglowych to duroplasty (tabela 5).

**T a b e l a 5. Udziały poszczególnych duroplastów w produkcji kompozytów z włóknami węglowymi [2]**

**T a b l e 5. Share of polymer matrixes in production of polymer composites with carbon fibers [2]**

Żywice	Udział, %
Epoksydowe	72
Poliestrowe	12
Fenolowe	9
Inne	7

Kompozyty z żywicami epoksydowymi i fenolowymi są stosowane głównie w lotnictwie (29 %) i w rotorach elektrowni wiatrowych (19 %), kompozyty zaś włókien węglowych z żywicami poliestrowymi, ze względu na korzystną relację pożądaných właściwości do ceny, są wykorzystywane przede wszystkim w budowie łodzi (18 %), w rotorach elektrowni wiatrowych (17 %) i lotnictwie (15 %), poza tym w budowie pojazdów, sporcie i budownictwie [2].

W Polsce produkuje się jachty i sprzęt pływający, rotory elektrowni wiatrowych, zbiorniki i rury, tłoczywa, przyczepy, wanny, zjeżdżalnie na kąpieliska, elementy infrastruktury itp., głównie z kompozytów poliestrowo-szklanych, wytwarzanych za pomocą technologii laminowania ręcznego, rzadziej technologii RTM. Oszacowano, że ilość odpadów pochodzących z wymienionych produkcji w Polsce, na początku XXI wieku, przekraczała 2 000 t/r., odpadów poużytkowych natomiast, ponad 20 000 t/r. [3].

Żywice poliestrowe wykorzystywane w kompozytach produkują w Polsce, m.in. Zakłady Chemiczne Organika-Sarzyna S.A. w Nowej Sarzynie, Zakłady Tworzyw Sztucznych „ERG” w Pustkowie, Firma Polynt w Niepołomicach koło Krakowa. W okresie styczeń–maj 2011 firmy te wyprodukowały 28 617 t poliestrów nienasyconych ciekłych, tzn. o ok. 45 % więcej niż w analogicznym okresie roku 2010 [4]. Poziom importu żywic poliestrowych do Polski jest zbliżony do poziomu ich produkcji.

Żywice epoksydowe wytwarzają w Polsce tylko Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzyna” S.A. W okresie styczeń–maj 2011 wyprodukowano 12 611 t żywic epoksydowych, a ich produkcja wzrosła w stosunku do produkcji w analogicznym okresie poprzedniego roku, o ok. 30 % [4]. Przyjmując, że w każdym kompozycie osnowa polimerowa stanowi ok. 30 % masy, można szacować, że do połowy roku 2011 w Polsce wytworzono ok. 200 000 t kompozytów polimerowych (ok. 400 000 t w ciągu całego roku).

#### RECYKLING KOMPOZYTÓW DUROPLASTYCZNYCH – RYS HISTORYCZNY

Pierwsze badania dotyczące recyklingu kompozytów duroplastycznych przeprowadzono w Europie pod koniec lat 80. XX wieku. Do pionierów w tej dziedzinie nale-

ży Institut für Werkstofftechnik Uniwersytetu w Kassel kierowany przez prof. Błędzkiego. Przygotowaną tam w 1991 r. pracę dyplomową [5] nagrodziła regionalna Izba Handlowo-Przemysłowa, a opracowaną w niej recepturę SMC z udziałem regeneratu (nazwa wówczas używana w Niemczech) zastosowano w seryjnej produkcji talerza anteny satelitarnej. W tym samym Instytucie, w 1992 r., we współpracy z firmą FUBA (największym wówczas w Niemczech producentem płyt obwodów drukowanych) przeprowadzono badania nad wykorzystaniem odpadów powstających przy produkcji takich płyt [6].

W kolejnych latach pojawiały się następne, obszerniejsze opracowania: w 1995 r. doktorat na Uniwersytecie w Erlangen, dotyczący recyklingu SMC i BMC [7], w 1996 r. doktorat na Uniwersytecie w Halle na temat recyklingu uniepalnionych duroplastów stosowanych w elektronice [8], w 1996 r. doktorat na Politechnice w Zurichu, opisujący recykling tworzyw wzmocnionych włóknami, w szczególności termoplastów [9] i wreszcie w roku 1997 doktorat wykonany w Institut für Werkstofftechnik Uniwersytetu w Kassel, dotyczący optymalizacji zawartości recyklatu SMC w materiałach kompozytowych [10].

Również w Polsce prowadzono badania nad możliwościami recyklingu duroplastów, np. w Instytucie Chemii Przemysłowej opracowano metodę ekstrakcji laminatów chlorkiem metylenu. Pozwalała ona na odzyskiwanie napelnacza włóknistego z odpadów produkcyjnych i wyrobów kompozytowych oraz granulatu z matrycy polimerowej. Zbudowano nawet instalację o zdolności przetwarzania 100 t odpadów rocznie [11].

W Polsce prekursorem w dziedzinie kompozytów, zwłaszcza tłoczyw BMC, był Instytut Polimerów ówczesnej Politechniki Szczecińskiej. Tam także, w latach 90. XX w., we współpracy z Institut für Werkstofftechnik Uniwersytetu w Kassel, prowadzono badania nad recyklingiem takich materiałów [12–21]. Prace te dotyczyły możliwości zastosowania różnych frakcji recyklatów z SMC w tłoczycach poliestrowych, związanych z tym ograniczeń technologicznych, modyfikacji receptur, płynięcia tłoczywa z recyklatem w formie, itp. Badano również możliwość wykorzystania rozdrobnionych laminatów poliestrowo-szklanych w przekładkach lekkich i polimerobetonach a także proces solwolizy utwardzonej żywicy poliestrowej [22].

Bodźcem do rozwoju prac w tej dziedzinie były niewątpliwie inicjatywy ustawodawców i przemysłu. Najbardziej znane było utworzenie w roku 1991 w Niemczech firmy ERCOM – wspólnego przedsięwzięcia wytwórców surowców i przetwórców SMC, m.in.: BASF, Vetrotex, Menzolit, Owens-Corning. Była to pierwsza w Europie firma zajmująca się na skalę przemysłową wyłącznie zbieraniem i rozdrabnianiem wyrobów z SMC.

ERCOM posiadał instalację do rozdrabniania i frakcjonowania rozdrobnionego SMC o wydajności 1,5 t/h (ok. 6 000 t/r.). Cały proces obejmował kilka etapów, mianowicie:



– rozdrabnianie wstępne, na kawałki o wymiarach ok. 5 × 5 cm, przeprowadzane u klienta, w młynie zainstalowanym na samochodzie ciężarowym;

– rozdrabnianie w młynie młotkowym;

– frakcjonowanie na 6 frakcji: 3 włókniste o wymiarach cząstek <0,5 mm; 0,5–1,25 mm; >1,25 mm i 3 proszkowe o wymiarach ziarna <0,2 mm; 0,2–0,5 mm; >0,5 mm.

Po kilku latach zaniechano jednak produkcji recyklatów, ponieważ zmieniły się uwarunkowania prawne i marketingowe.

W następnych latach powstały podobne firmy mające swoje siedziby w Europie, m.in.: Mecerlec Recyclage (Francja), Valcor, Lonza (Włochy), Milijotek (Norwegia), jak również w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej: R.J. Marshall Company, Premix, Phoenix Fiberglass oraz Azji: JRPS (Japonia) [23, 25–28].

Po roku 2000 kluczowi dostawcy europejscy, wraz z europejskimi związkami handlu kompozytami: EuCIA (*European Composites Industry Association*) [25], opracowali „Europejską Koncepcję Recyklingu Kompozytów” (*European Composite Recycling Concept* – ECRC) [29, 30]. Program ten miał pomóc zgromadzić fundusze potrzebne do rozwoju, walidacji i promowania nowych rozwiązań w zakresie ponownego wykorzystania użytkowych materiałów. Zakładano w nim, że dostawcy kompozytów w całej Europie będą partycypowali w kosztach rozwoju standaryzacji kompozytów i zarządzania odpadami oraz finansowali poszukiwania sposobów utylizacji. Fundusze miały być sponzorowane na uruchomienie projektu „Badań i Rozwoju” obejmującego programy badania, rozwoju i udoskonalania nowych sposobów zbierania i recyklingu odpadów materiałów kompozytowych, jak również poszukiwania rynków zbytu recyklatów. W zamian za finansowe wsparcie, partycypujący w kosztach partnerzy byli upoważnieni do używania na swoich produktach „Zielonej Etykiety Recyklingu FRP” (*Green FRP Recycling Label*) [29]. Program „Europejskiej Koncepcji Recyklingu Kompozytów” ruszył pod koniec 2003 roku [30, 31].

Pomysł akcji „Green FRP Recycling Label” zatwierdzono podczas spotkania Komitetu Zarządzającego EuCIA w Brukseli, w lutym 2001 roku, gdzie opracowano także plan działania. Pierwsze spotkanie EuCIA z Komisją Europejską dotyczyło problemów związanych z Rozporządzeniem 259/53/EWG Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie transportu odpadów oraz transportu odpadów kompozytów poza granice macierzystego kraju do państw, gdzie zbudowano fabryki zajmujące się recyklingiem „Green FRP Recycling Label” i „zielonej” klasyfikacji FRP oraz polimerowych odpadów a także umieszczenie ich na liście Green-Amber-Red w celu ułatwienia transportu do przetwórcy i fabryk poza granice kraju.

Opracowana przez EuCIA „Zielona Etykieta FRP” zakładała prowadzenie działań zmierzających do:

– Utylizacji odpadów z FRP w najbardziej efektywny pod względem finansowym sposób (ponowne użycie,

recykling, odzyskiwanie materiałów i energii, składowanie na wysypiskach, z naciskiem na recykling) uwzględniający poszanowanie wszystkich wymagań środowiskowych postanowionych przez europejskie, narodowe i lokalne władze legislacyjne.

– Poszukiwania nowych, ekonomicznie opłacalnych i dostępnych rynków recyklatów FRP, umożliwiających realizację celów postawionych w regulacjach prawnych Unii Europejskiej (EOV, dyrektywa WEEE).

EuCIA rozszerzało swoją działalność, zyskało ponad 15 000 członków, współpracując z międzynarodowymi organizacjami, takimi jak: Związek Producentów Kompozytów (CFA) w USA i Japońska Wspólnota Wzmocnionych Tworzyw (JRPS) [25].

Głównym zadaniem, jakie postawił przed sobą EuCIA było znalezienie jednej metody pozwalającej na spełnienie wymogów legislacyjnych i skuteczne zarządzanie odpadami FRP, a także uświadomienie wytwórcom oraz użytkownikom, że FRP, w tym także tworzywa termoutwardzalne mogą być przetworzone w sposób przynoszący wymierne korzyści ekonomiczne. Ogólny schemat prac nad „Europejską Koncepcją Recyklingu Kompozytów” uzyskał poparcie szerokiego grona członków zrzeszonych w EuCIA, w tym: CEFIC – reprezentującego wytwórców nienasyconych żywic poliestrowych, APFE – reprezentującego wytwórców włókien szklanych oraz członków European SMC Alliance. Producenci samochodów: BMW, Daimler Chrysler i Renault również zaaprobowali proponowany wówczas schemat działania [32].

Na początku 2004 roku na rynku europejskim pojawiły się produkty FRP oznaczone specjalną „zieloną etykietą”, informującą, iż dany produkt jest zgodny z „Europejską Koncepcją Recyklingu Kompozytów” [32].

Przykładem próby rozwiązania problemów recyklingu kompozytów FRP wzmocnionych włóknem szklanym, był francuski projekt EOL *Pleasure Boat*, dotyczący rozbiórki i recyklingu użytkowych łodzi rekreacyjnych, będący efektem prac prowadzonych od 2002 roku przez *French Nautical Industries Federation* (FIN).

FIN przy poparciu Francuskiej Agencji Ochrony Środowiska i Zarządzania Energią (ADANE) oraz przy współudziale ministerstwa infrastruktury, przemysłu i środowiska, założyła w Normandii pierwsze na świecie centrum rozbiórki i recyklingu łodzi rekreacyjnych – EOL *Pleasure Boat Center* [33], odpowiadające profesjonalnym standardom i przetwarzające siedem jednostek pływających o długości 6–10 m dziennie (1 500 łodzi rocznie o łącznej masie 2 000 ton). Budowę sześciu następnych centrów planowano wzdłuż całego francuskiego wybrzeża, na lata 2006–2012.

Firmami zajmującymi się recyklingiem materiałowym i zastosowaniem recyklatów były także, wspomniane już, Mecerlec, Valcor i Lonza (w Europie) oraz R. J. Marshall, Premix i Phoenix Fiberglass (USA) [25, 27].

W Szwecji prowadzono badania zmierzające do wykorzystania recyklatu przetwarzanego w procesie wtryskiwania, do budowy łodzi [30, 32, 34].

W Japonii prowadzono intensywne prace nad zastosowaniem recyklatów z kompozytów, np. jako dodatków do materiałów budowlanych [24]. Przemysł budowlany zużywający ok. 25 % wszystkich wytwarzanych tworzyw był potencjalnym rynkiem zbytu tworzyw z dodatkiem recyklatów FRP (na ścianki działowe, produkty izolacyjne, płyty pilśniowe, rury, agregaty, cement) [25].

Wielkość produkcji i możliwości recyklingu kompozytów duroplastycznych w latach 90. XX w. przedstawiono w publikacjach [35–38].

### RECYKLING KOMPOZYTÓW – STAN OBECNY

Po okresie dużego zainteresowania recyklingiem kompozytów polimerowych, w latach 90. XX w., przez ponad dekadę prowadzono niewiele prac badawczych, a publikacje na ten temat pojawiały się sporadycznie.

Recykling kompozytów nadal można podzielić na mechaniczny, surowcowy i termiczny, zmieniły się jednak obecnie stosowane rozwiązania. Po niepowodzeniu w realizacji recyklingu mechanicznego przez firmę ER-COM w Niemczech, wzrasta stopniowo udział termicznego recyklingu kompozytów. W roku 2010 powstał pierwszy na świecie system odbioru i recyklingu kompozytów polimerowych, pod nazwą „CompoCycle” (Zajons Zerkleinerungs, Niemcy). Firmy biorące udział w tym systemie gwarantują 100-proc. recykling energetyczny. Rozdrabniane kompozyty są stosowane w charakterze substytutu surowców w cementowni (firmy Holcim). Koszt takiej utylizacji to ok. 114 EUR/t [39, 40]. Zastosowanie systemu CompoCycle w cementowniach pozwala na oszczędność surowców do 67 % i energii do 33 %, a produkt końcowy uzyskuje się w sposób bezpyłowy i bezodpadowy, spełniając przy tym wymogi legislacyjne UE [40]. Od początku działania systemu (czerwiec 2010), do października 2011 r. recyklingowi poddano ok. 3 000 t odpadów produkcyjnych, rotorów elektrowni wiatrowych, a także wyrobów przemysłu środków transportu (samochodowego, lotniczego, wodnego) oraz elementów elektrycznych i elektronicznych. Planuje się, do roku 2014, po rozszerzeniu systemu na całą Europę, poddawanie recyklingowi 20 000 t kompozytów rocznie [29]. Są to jednak niewielkie ilości w stosunku do ilości odpadów. Szacuje się bowiem, że zapotrzebowanie na recykling wzmocnionych duroplastów, z samych tylko śmigieł turbin wiatrowych, sięga obecnie 60 tys. ton rocznie [39].

W zakresie recyklingu materiałowego i energetycznego kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym, na uwagę zasługują osiągnięcia spółki ELG Haniel (Duisburg, Niemcy) [41]. Opracowany przez nią własny system unieszkodliwiania odpadów uzyskał uznanie i certyfikaty agencji ochrony środowiska. ELG Haniel jest, obok koncernu Karl Mayer AG (spółka CFK Valley Stade – Wischhafen – Niemcy) [42], jedną z przodujących firm zajmujących się recyklingiem wspomnianych tworzyw, a ich chronione patentami technologie umożliwiają

tworzenie, na skalę przemysłową, systemu ponownego wykorzystania włókien węglowych z kompozytów.

Również w Japonii od lat poszukuje się metod recyklingu kompozytów, przede wszystkim na bazie żywic poliestrowych i epoksydowych, wzmocnianych włóknem węglowym. Bada się, m.in. różne sposoby recyklingu surowcowego, np. w wyniku glikolizy utwardzonych żywic poliestrowych, degradacji parą wodną i wodą w stanie nadkrytycznym oraz rozpuszczania w silnych rozpuszczalnikach. Prace są kontynuowane, brak jednak w tym kraju systemowych rozwiązań dotyczących recyklingu kompozytów [43].

W Polsce także po 2000 r. prowadzono badania w tym zakresie. Warto wspomnieć prace prowadzone na Politechnice Śląskiej [44, 45], a w ostatnim czasie inicjowane licznymi zapytaniami płynącymi z przemysłu, także w Akademii Morskiej w Gdyni [46, 47].

### RECYKLING KOMPOZYTÓW DUROPLASTYCZNYCH – ASPEKT LEGISLACYJNY UE

Czołowe międzynarodowe organizacje przemysłu i handlu kompozytami: EuCIA [48], EuPC (*European Plastics Converters*) [49] i ECRC (*European Composite Recycling Service Company*) [50], opierając się na dyrektywach Parlamentu Europejskiego przyjęły i opublikowały w czerwcu 2011 r. wspólne stanowisko, stwierdzające, że „duroplasty wzmocnione włóknem szklanym są zdatne zarówno do recyklingu, jak i odzyskiwania energii poprzez utylizację w piecach cementowych w zgodzie z prawem UE” [51].

Podstawą do przyjęcia takiego stanowiska była dyrektywa 2000/53/WE [52] definiująca pojęcie recyklingu i określająca środki, których celem jest przede wszystkim zapobieganie powstawaniu odpadów. Przepisy dyrektywy dotyczą ponownego użycia i recyklingu lub innych form odzysku części pojazdów wycofanych z eksploatacji i określają poziomy recyklingu, mianowicie:

– Do 1 stycznia 2006 r., w odniesieniu do wszystkich pojazdów wycofanych z eksploatacji, ponowne użycie i odzysk – co najmniej 85 %, a ponowne użycie i recykling – do 80 %.

W odniesieniu do pojazdów wyprodukowanych przed 1 stycznia 1980 r., Państwa Członkowskie mogły ustanowić poziomy niższe, ale nie mniej niż 75 % w przypadku ponownego użycia i odzysku oraz nie mniej niż 70 % – ponownego użycia i recyklingu.

– Do 1 stycznia 2015 r. poziomy te powinny osiągnąć wartość, odpowiednio, 95 % i 85 %.

Dyrektywa 2008/98/WE [53] ustanawia natomiast środki służące ochronie środowiska i zdrowia ludzkiego, na drodze zapobiegania i zmniejszania negatywnego wpływu wynikającego z wytwarzania odpadów i gospodarowania nimi, jak również przyczyniające się do zmniejszenia skutków użytkowania zasobów oraz poprawy efektywności takiego użytkowania.

W dyrektywie podano definicje 20 pojęć związanych z postępowaniem z odpadami i ich gospodarowaniem.

Ustalono hierarchię takiego postępowania w odniesieniu do zapobiegania powstawaniu odpadów, przygotowywania ich do ponownego użycia i recyklingu oraz metod odzysku, np. energii i unieszkodliwiania odpadów.

Według tej dyrektywy recykling oznacza proces odzysku, w ramach którego materiały odpadowe są ponownie przetwarzane w wyroby lub materiały i powtórnie wykorzystywane. Taki recykling obejmuje ponowne przetwarzanie materiału organicznego, ale nie obejmuje odzysku energii oraz ponownego przetwarzania na materiały, przeznaczone na paliwa lub do wypełniania wyrobisk.

Obecnie stosowane technologie recyklingu materiałowego i energetycznego, a także, mającego cechy obu tych procesów i procesu przetwórstwa ubocznego, tzw. recykling zespolony (*co-processing*) użytkowych odpadów duroplastów wzmocnionych włóknem szklanym, w opinii organizacji międzynarodowych [48–51] odpowiadają ustaleniom dyrektyw UE. Najlepszym wariantem recyklingu duroplastów wzmocnionych włóknem szklanym jest proces recyklingu zespolonego umożliwiający zasilanie pieców cementowych [51]. Metoda ta, wykorzystująca odpady w charakterze zarówno surowców, jak i paliwa wstępnego, jest zgodna z definicją recyklingu sformułowaną w dyrektywie nr 2008/98/EW i odpowiada także definicji odzysku [53]. W publikacji [54], wydanej przez Europejskie Towarzystwo Cementowe (CEM-BUREAU) oraz w pracach [48–51], przedstawiciele europejskiego przemysłu kompozytów wyrazili przekonanie, że ta technologia jest godnym uznania rozwiązaniem sposobu zarządzania odpadami duroplastów wzmocnionych włóknem szklanym.

#### LITERATURA

- [1] Witten E.: „Composites Marktbericht 2011”, AVK 2011. [2] Jahn B.: „Composites Marktbericht 2011”, Der globale CFK-Markt, AVK 2011. [3] Kowalska E., Wielgosz Z.: *Polimery* 2002, **47**, 110. [4] N. N.: *Polimery* 2011, **56**, 773. [5] Barth Ch.: „Entwicklung eines Duroplastenteiles mit SMC Regenerat”, praca dyplomowa Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel 1991. [6] Kirchner C.: „Wiederverwertung von recycelten aus glasfaserverstärkten Duroplasten”, praca dyplomowa, Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel 1992. [7] Schiebisch J.: „Zum Recycling von Faserverbundkunststoffen mit Duroplastmatrix”, praca doktorska, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen 1996. [8] Hoffmann M.: „Recyclierung von halogenfrei flammwirdigen Duroplastwerkstoffen für die Elektronik”, praca doktorska, Martin Luther Universität Halle Wittenberg 1996. [9] Zogg M.: „Neue Wege zum Recycling von faserverstärkten Kunststoffen”, praca doktorska, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1996. [10] Gorący K.: „Duroplasten mit höheren Gehalten an Partikelrecyclat”, praca doktorska, Shaker Verlag Aachen 1998. [11] Bogdaszewski H., Bartczak T.: „Przetwórstwo odpadów poliestrowych wzmocnionych włóknem szklanym”, *Polimery – Środowisko – Recykling*, Szczecin – Międzyzdroje, 27–29 września 1995. [12] Nowaczek W.: *Polym. Recyc.* 2000, **5**, 91. [13] Nowaczek W.: *Polimery* 1999, **44**, 758. [14] Nowaczek W., Gorący K., Kacperski M.: „Tworzywa poliestrowe z odpadami z kompozytów termoutwardzalnych”, *Polimery – Środowisko – Recykling*, Szczecin – Międzyzdroje, 27–29 września 1995, mat. konf., str. 42. [15] Błędzki A. K., Gorący K.: *Mech. Compos. Mater.* 1993, **29** (4), 473. [16] Rikards R., Gorący K., Błędzki A. K., Chate A.: *Mech. Compos. Mater.* 1994, **30** (6), 781. [17] Gorący K., Błędzki A. K.: „Tworzywa termoutwardzalne modyfikowane recyklatem”, XI Konferencja Naukowa „Modyfikacja Polimerów”, Duszniki Zdrój, 26–30 września 1993. [18] Gorący K., Błędzki A. K.: „Wspomagane komputerowo planowanie eksperymentu i właściwości materiału na przykładzie kompozytu z recyklatem SMC”, Ogólnopolskie Sympozjum „Kompozyty i kompozycje polimerowe”, Szczecin, 22–24 czerwca 1994. [19] Błędzki A. K., Gorący K., Rikards R., Cate A.: „Modelling and Design of Recycled Fiber Reinforced Polymer Composite Material”, 7th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, Haga/Holandia, 28 maj–2 czerwca 1995. [20] Gorący K., Błędzki A. K.: „Właściwości dynamiczne materiałów z recyklatami z tworzyw duroplastycznych”, III Ogólnopolska Konferencja „Kompozyty i Kompozycje Polimerowe”, Świnoujście, 16–18 czerwca 1997. [21] Gorący K., Błędzki A. K., Rikards R.: „Duroplaste mit erhöhtem Anteil am Partikel Recyclat”, 28 Internationale AVK-Tagung, Baden-Baden/Niemcy, 1–3 października 1997. [22] Gorący K.: *Przem. Chem.* 2006, **85**, nr 8–9, 913. [23] „SMC on the road to success” mat. konf. „Automotive Seminar Coventry (U.K.)” 2000; [http://www.smc-alliance.com/SMC\\_on\\_the\\_road\\_to\\_success1.pdf](http://www.smc-alliance.com/SMC_on_the_road_to_success1.pdf). [24] Gorący K.: „Recykling duroplastów” w „Recykling materiałów polimerowych” (red. Błędzki A. K.), WNT, Warszawa 1997. [25] Marsh G.: *Reinf. Plast.* 2001, **45**, 22. [26] Simmons J.: *Reinf. Plast.* 1999, **43**, 64. [27] Mayes J. S.: *JEC Composites* 2005, **17**, 24. [28] Nomaguchi K.: *JEC Composites* 2005, **17**, 22. [29] Kubik J., Mraczný K.: „Kompozyty warstwowe z tworzyw odpadowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2001. [30] Pickering S.: *JEC Composites* 2005, **17**, 27. [31] The Green FRP Recycling Label, <http://www.gprmc.be/PressReleases.htm>, GPRMC JEC 2003 Press release 2003-2. [32] Marsh G.: *Reinf. Plast.* 2003, **47**, 34. [33] Anonim: *JEC Composites* 2005, **17**, 29. [34] „How long does a GRP boat last – and what then?”, mat. konf. „ICOMIA 2002”; <http://web.telia.com/~u87610804/Environment/ICOMIA200201.pdf>. [35] Gorący K., Błędzki A. K.: *Polimery* 1994, **39**, 507. [36] Gorący K., Błędzki A. K.: „Możliwości techniczne i realizacja recyklingu tworzyw usieciowanych”, Ogólnopolskie Sympozjum „Kompozyty i kompozycje polimerowe”, Szczecin, 22–24 czerwca 1994. [37] Błędzki A. K., Gorący K.: *Kunststoffberater* 1995,



40 (5), 33. [38] CompoCycle, <http://www.zajons-zerkleinerung.de/>. [39] EuCIA: „Composites can be recycled”, *Reinf. Plast.*, May–June 2011. [40] Informacja prasowa AVK: Verwertung von Faserverbund Abfällen mit dem Recyclingsystem „CompoCycle” weiter wachsend 2011.

[41] Recycled Carbon Fibre, <http://www.elg.de/>. [42] CFRP Recycling, <http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=64>. [43] Kanemasa N.: *JEC Magazine*, marzec 2011, nr 63. [44] Rutecka M., Śleziona J., Myalski J.: *Kompozyty* 2004, 4, nr 9, 56. [45] Rutecka M., Kozioł M., Myalski J.: *Kompozyty* 2006, 6, nr 4, 41. [46] Jastrzębska M., Jurchak W.: „Odpad poliestrowo-szkłany jako napełniacz kompozytów poliestrowych” w „Polimery i kompozyty konstrukcyjne” (red. Wróbel G.), Wydawnictwo Logos Press, Cieszyn 2011, str. 200–210. [47] Jastrzębska M.: „Wpływ nanonapełniacza NanoBentu® ZW1 na właściwości kompozytów z recyklatem poliestrowo-szkłanym”, „KOMPOZYTY 2011 – Teoria i praktyka”, Spała 27–29 kwietnia 2011. [48] European Composites Indus-

try Association (EuCIA), <http://www.eucia.org>. [49] The European Plastics Converters (EuPC), <http://www.plasticsconverters.eu>. [50] European Composite Recycling Service Company (ECRC), <http://www.ecrc-green-label.org>.

[51] EuCIA: Glass fibre reinforced thermosets: recyclable and compliant with the EU legislation, <http://www.eucia.org/>. [52] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/53/WE z dn. 18.09.2000 r. w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji, Dziennik Urzędowy UE, nr L 269 z dn. 21.10.2000 r. [53] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dn. 19.11.2008 r. w sprawie odpadów, Dziennik Urzędowy UE, nr L 312 z dn. 22.11.2008 r. [54] Sustainable Cement Production – Co-processing of alternative fuels and raw materials in the European cement industry, CEMBUREAU, January 2009, <http://www.cembureau.eu>.

Otrzymano 19 I 2012 r.