

Recykling wyrobów elektroenergetycznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono koncepcję recyklingu odpadów kompozytowych z zastosowaniem gospodarki obiegu zamkniętego. Opisano wieloetapową technologię obróbki mechanicznej surowca odpadowego. Przedstawiono założenia technologii wprowadzania przygotowanego recyklatu do strumienia surowców i wytwarzania materiałów wieloskładnikowych, o obniżonej zawartości surowców pierwotnych, ale wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej zbliżonej do kompozytów (wyrobów izolacyjnych) pierwotnych.

Abstract. The paper presents the concept of recycling and circular economy of composite waste. A multi-stage technology of mechanical processing of the waste material is described. The paper presents the assumptions of the technology of homogenization of the recycle with the raw material stream and the production of multi-component materials with a reduced content of primary raw materials, but with electrical and mechanical strength comparable to primary composites (insulating products).
(Recycling of electrical power products).

Słowa kluczowe: recykling, gospodarka obiegu zamkniętego, kompozyty epoksydowe, izolatory

Keywords: recycling, circular economy, epoxy composites, insulators

Wstęp

W portalach branży tworzyw sztucznych i dedykowanych finansom oraz sytuacji gospodarczej coraz częściej pojawiają się komunikaty o deficycie podaży surowców polimerowych, co skutkuje przerwami w dostawach, wzrostem cen surowców oraz niepewnością producentów. Jest to doskonały moment, by wprowadzić recykling w wyrobach elektrotechnicznych i energoelektrycznych, w których takie działania nie są jeszcze widoczne. Wymogi co do jakości i czystości surowców w tym obszarze sprawiają, że wprowadzenie surowców wtórnych do obiegu jest wyzwaniem badawczym i rozwojowym z perspektywą wieloletnich działań. Oprócz względów rynkowo – ekonomicznych i środowiskowych, kolejnym argumentem są coraz bardziej restrykcyjne regulacje prawne dotyczące konieczności wprowadzania recyklatu do produkcji i zakazu produkcji z użyciem wyłącznie surowców pierwotnych. Obecnie restrykcje dotyczą tworzyw termoplastycznych, ale obserwując ten trend, łatwo przewidzieć perspektywę najbliższych lat, kiedy przepisy recyklingowe uwzględnią tworzywa chemo- i termoutwardzalne oraz elastomery.

Od ponad dwóch dekad, prowadzone są prace nad rozwojem metod mechanicznych, chemicznych i pirolitycznych recyklingu wzmacnianych kompozytów chemo- i termoutwardzalnych, jednakże ich niedoskonałość wymaga ciągłych badań i dopracowania przed wprowadzeniem na skalę przemysłową.

Recykling chemiczny polega na chemicznej depolimeryzacji lub usunięciu matrycy w kompozycie przez rozpuszczanie (solwoliza). Można wyróżnić hydrolizę (z użyciem wody), glikolizę (z użyciem glikoli) oraz trawienie kwasem. Alkohole i woda zwykle używane są w warunkach podkrytycznych lub nadkrytycznych z wykorzystaniem wysokiej temperatury i ciśnienia, by uzyskać lepszą kinetykę i wydajność procesu. Stosowanie tych substancji umożliwia odparowanie ich z powstałego roztworu i jest stosunkowo obojętne dla środowiska. Trawienie kwasem zwykle jest stosowane w warunkach atmosferycznych, ale szybkość zachodzącej reakcji jest mała. Jako katalizator reakcji może być stosowany NaOH i KOH, jednak ich oddzielenie od otrzymanego produktu jest trudne. Glikoliza może być stosowana do depolimeryzacji żywicy epoksydowej. Otrzymane włókno zachowuje większość swoich właściwości mechanicznych. Problem recyklingu chemicznego to przede wszystkim toksyczne ścieki, stosowanie i usuwanie katalizatorów i koszt [1]. W [2]

opisano zagospodarowanie odpadów pochodzących z elektrowni wiatrowych, tj. łopaty turbin wiatrowych. Rozdzielenie żywicy od włókna szklanego przeprowadzono za pomocą infuzji próżniowej używając żywicy o małej lepkości. Wiązania acetalowe lub ketalowe matrycy rozpuszczano w temperaturze poniżej 110°C i ciśnieniu atmosferycznym, przy zastosowaniu lodowatego kwasu octowego. Żywice użyte powtórnie mają małą zawartość pęcherzy i właściwości porównywalne z komercyjnymi epoksydami, które nie nadają się do recyklingu. Jakość powierzchni odzyskanych włókien szklanych jest porównywalna z pierwotnymi włóknami. M. Lejeail i inni [3] opracowali żywicę epoksydową, zawierającą odwracalne wiązania poprzeczne. Reakcja odwrotna Dielsa-Aldera w temperaturze, 80-120°C polega na rozpadzie sieci polimerowej na krótsze odcinki, które następnie można rozpuścić w rozpuszczalnikach, jak kwas octowy, butanol czy toluen. Właściwości produktów po ponownym wykorzystaniu były porównywalne z pierwotnymi kompozytami. W [4] zagospodarowano odpady z procesu skrawania laminatów kompozytowych z płetw do nurkowania z włóknem węglowym poprzez ich bezpośrednie wprowadzenie do osnowy epoksydowej, co spowodowało poprawę niektórych właściwości mechanicznych kompozytów, tj. wytrzymałość na ściskanie, zginanie i udarność, ale zmniejszyło odporność na ścieranie – zmiany proporcjonalne do zwiększania zawartości wypełniacza. W przetwórstwie zaobserwowano znaczne pogorszenie właściwości reologicznych powyżej 20% wypełniacza i niewielki wzrost gęstości oraz brak wpływu na początkową temperaturę rozkładu. M. Oumam i inni [5] wykorzystali do badań kompozyty z żywicy fenolowej, które były wzmocnione włóknami węglowymi (70% masowych), które poddano rozkładowi przez zastosowanie fenolu. Wykazano, że aby odzyskać ok. 95% włókien, należy przez 4 godziny w 390°C poddawać kompozyt działaniu fenolu. Następnie włókna przemyto chloroformem i wysuszono w 60°C. Odzyskane wzmocnienie nie posiadało znacznych zmian powierzchni, a właściwości mechaniczne były zbliżone do pierwotnych (wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga). Autorzy wspominają, że możliwy jest również odzysk matrycy, ale nie było to przedmiotem przeprowadzonych badań. W [6] opisano sposób rozdzielenia kompozytu żywicy epoksydowej z włóknem węglowym na poszczególne składniki przy użyciu kwasu azotowego. W wyniku reakcji odzyskano włókno węglowe o wytrzymałości na rozciąganie mniejszej jedynie o 1,1%. W [7]

zastosowano elektryczny rozkład heterokatalityczny z nietoksycznym elektrolitem, a proces przeprowadzano pod ciśnieniem atmosferycznym i w temperaturze pokojowej. Do badań użyto żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknami węglowymi. Elektrolitem był NaCl, a katalizatorem KOH. Podczas elektrolizy wiązania węgiel – azot (amidowe) w żywicy ulegają rozpadowi, dzięki czemu żywica ulega rozkładowi i możliwy jest odzysk włókien węglowych. Metoda ta pozwala na usunięcie prawie 100% żywicy, co jest trudne w przypadku konwencjonalnych metod chemicznych opartych na solwatalizacji. Odzyskane w ten sposób włókna są długie i dobrej jakości. Utlenianie elektrochemiczne powoduje pęcznienie zewnętrznej warstwy włókien oraz zwiększenie ich chropowatości, co skutkuje niższą wytrzymałością na rozciąganie, ale wyższą międzyfazową wytrzymałością na ścinanie. Jest to jednak proces wykonywany na skalę laboratoryjną. W [8] żywicę epoksydową ekstrahowano w alkoholach (metanol, etanol, propanol) i acetonie, a odzyskane włókna węglowe posiadały 85-99% pierwotnej wytrzymałości, były długie i proste oraz posiadały minimalne defekty. Odzysk włókien węglowych z polietylenu [9] za pomocą propanolu w stanie nadkrytycznym przy ciśnieniu poniżej 50 barów i w temperaturze 450°C. daje włókna o wytrzymałości zbliżonej do pierwotnych. W. Dang ze współpracownikami [10] rozdzielili włókno szklane od żywicy epoksydowej w roztworze kwasu azotowego. Bisfenol F został rozłożony do roztworu bogatego w kwas azotowy, a następnie repolimeryzowany. Autorzy twierdzą, że wytrzymałość na zginanie otrzymanej żywicy jest nieco wyższa niż pierwotnej.

W [11] wykazano możliwość recyklingu mechanicznego żywic termoutwardzalnych wzmocnionych włóknem ciągłym i krótkim przy zachowaniu w recyklicie zarówno wzmocnienia jak i matrycy. Pierwszy etap recyklingu polega na rozdrobnieniu elementów do wielkości 50-200 mm. Następnie są one mielone np. przy pomocy młyna młotkowego. Odpady obrabiano na gorąco i na zimno, później formowano na gorąco. Powstały materiał był następnie zaimpregnowany żywicą poliestrową lub epoksydową i wykorzystany do wytwarzania nowych produktów, np. płyt i rur. W kompozytach recyklingowych zauważono spadek wytrzymałości na zginanie ze względu na słabe wiązanie żywicy z recyklatem, koncentrację naprężeń i niższą kompatybilność włókien w nowym materiale. Ponowne wykorzystanie pozwala na zachowanie ponad 50% pierwotnych właściwości mechanicznych (moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie czy ścinanie). W [12] użyto sproszkowanego kompozytu żywica i włókna, który dodawano do żywicy fenolowej wzmocnionej tkaniną z włókna szklanego. Proszek o średnicy ziaren 21,0 - 78,8 µm użyty do badań był odpadem procesu cięcia i szlifowania.. Mniejszy wymiar ziaren zapewnia lepszą dyspersję wypełniacza w żywicy i zwiększa lepkość mieszaniny. Zwrócono uwagę, że istotnym elementem procesu jest sposób przechowywania zmielonego kompozytu, gdyż sorpcja wody z powietrza negatywnie wpływa na właściwości recyklatu. Dodatek proszku do kompozytu w ilości 1, 3 i 5% wagowych poprawia jego właściwości mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie i zginanie), ale powoduje kruchość materiału. Zmniejsza się stabilność termiczna, ale rozkład termiczny zachodzi w wyższej temperaturze. Zaobserwowano również nieznaczny wzrost gęstości. Ze względu na pogorszenie właściwości reologicznych, nie można było przeprowadzić eksperymentu dla zawartości wypełniacza powyżej 20% wag. Autor [13] badał właściwości włókien szklanych z recyklingu mechanicznego, którymi wzmocniono matrycę poliestrową. Przebadano próbki o długościach 5, 10 i 15 mm i wykazano 18-30% spadek właściwości

mechanicznych, ale wskazano, że metody i parametrów rozdrabniania może znacząco wpłynąć na właściwości włókien. Autorzy w [14] badali trzy kompozyty: polipropylen z 40% włókna szklanego, żywica epoksydowa z 20% włókien węglowych i żywica epoksydowa z 15% włókien aramidowych. Kompozyty te zmielono i wykorzystano jako dodatek do pierwotnej matrycy. Nowe kompozyty mały podobne właściwości mechaniczne jak kompozyty z włókien pierwotnych, wytrzymałość na rozciąganie nieco większą niż kompozytów na bazie włókien pierwotnych. Jedynie dla kompozytu z dodatkiem włókien węglowych z żywicą epoksydową wykazano mniejszą wytrzymałość niż dla kompozytu z nowymi włóknami. Dla kompozytu z dodatkiem PP/włókno szklane moduł Younga jest nieco niższy, a dla kompozytu żywica epoksydowa/włókno aramidowe jest on zbliżony. W [15-17] poruszono aspekt energetyczny recyklingu mechanicznego. Kompozyt cięty i frezowany, a następnie mielony (np. młyn szybkoobrotowy młotkowy), następnie jest rozdzielany na frakcje poprzez wytrząsanie na sitach. Każdy z etapów produkcji wymaga dużego nakładu energii. Okazuje się jednak, że recykling mechaniczny kompozytu i użycie jego produktu jako wypełniacza może skutkować nawet 10 krotnym obniżeniem zużycia energii. Taki recykling zmniejsza ilość odpadów kompozytowych oraz konsumpcję energii w cyklu życia produktu, co w świetle przepisów i kosztów produkcji jest istotnym aspektem.

W ostatnich latach doniesienia literaturowe dotyczą raczej rozwoju metod chemicznych [19-21, 23, 25, 26, 28] i pirolitycznych [18, 27], a praktycznie brak jest postępu w metodach mechanicznych, bądź są one etapem pomocniczym do procesów chemicznych [26] i pirolizy [24]. Prace przeglądowe [22 i 24] opisują metody chemiczne i termiczne, przy czym w [22] wprowadzono pojęcia recyklingu elektrochemicznego i żywic biodegradowalnych. Prace prowadzone są w kierunku optymalizacji metod stworzonych w poprzedniej dekadzie przez dobór parametrów procesowych, tj.: temperatury i stężenia tlenu w termolizie [18], kinetyki pirolizy [27], a w metodach chemicznych selektywne rozpuszczanie wiązań [19, 20, 28] lub solwolizę w podwyższonej temperaturze [21, 25, 26]. We wszystkich opisanych metodach [18 – 27], recykling dedykowany jest odzyskaniu włókien, które po takiej obróbce odznaczają się obniżoną wytrzymałością mechaniczną do 45 – 90 % względem właściwości włókien pierwotnych.

Wprowadzane przez Unię Europejską coraz bardziej restrykcyjne przepisy dotyczące utylizacji odpadów, wymuszają znalezienie nowych metod recyklingu. Szczególnie trudnym zagadnieniem jest recykling materiałów kompozytowych, a opracowane na przestrzeni ostatnich lat metody ich recyklingu opierają się głównie na metodach mechanicznych, chemicznych i pirolizie.

Spalanie tworzyw sztucznych jest kontrowersyjnym tematem, gdyż wiąże się z nieuniknioną emisją szkodliwych substancji do atmosfery. Recykling chemiczny opiera się na długotrwałych procesach rozpuszczania lub/i depolimeryzacji oraz wiąże z zastosowaniem cieczy agresywnych i produkcją ścieków. Recykling mechaniczny opiera się na rozdrobnieniu odpadu. Pozwala na wykorzystanie całego kompozytu jako napelnacza dla nowego materiału. Dzięki temu możliwe jest znaczne zmniejszenie energii niezbędnej do wytworzenia gotowego wyrobu. Zamiana chociaż części wzmocnienia na recyklat pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów produkcji. Recykling mechaniczny nie wymaga specjalnych warunków ciśnienia i temperatury. W literaturze odnajduje się też znacznie mniejszą ilość prac w tym obszarze, co sprawia, że to temat ciągle nie zgłębiany w pełni i wymaga

opracowania technologii, która z powodzeniem mogłaby być stosowana na skalę przemysłową.

Ze względu na powyższą argumentację i znaczącą środowiskową przewagę recyklingu mechanicznego, a także łatwość przyszłego wdrożenia, Autorzy podjęli próby takiej obróbki surowca odpadowego ze wzmocnieniem kwarcowym i włóknem szklanym oraz zagospodarowania recyklatów w kompozytach epoksydowych bez dodatkowej ingerencji chemicznej. W pierwszej kolejności prace ukierunkowano na gospodarkę cyrkularną (GOZ) i otrzymanie produktów energoelektrycznych o parametrach takich samych lub zbliżonych do wyrobów pierwotnych (np. izolatory, ograniczniki przepięć, rury i pręty szkło epoksydowe, wsporniki izolacyjne, drażki i in.). Recyklaty niespełniające wymagań pracy pod napięciem elektrycznym mogą być przekierowane do produkcji elementów wewnętrznej sieci elektrycznej domów modułowych (skrzynki bezpiecznikowe, skrzynki rozdzielcze ogrzewania, przepusty ogniów fotowoltaicznych) wyrobów wyposażenia m.in. obudowy antystatyczne, chemoodporne zbiorniki, lekkie wsporniki i przekładki). Każdy z wytworzonych materiałów kompozytowych z wykorzystaniem recyklatów przebadano pod kątem zawartości surowca wtórnego oraz wytrzymałości mechanicznej i elektrycznej. Wyniki badań znormalizowanych (PN-EN ISO 178:2011 i PN-EN 60243-1:2013-12) przedstawiono w Tab.1.

Prace Laboratoryjne

Surowce odpadowe wytypowane do badań pochodziły z odpadów poprodukcyjnych rur szkło-epoksydowych i izolatorów kompozytowych produkcji Łukasiewicz – IEL, których skład surowcowy jest tajemnicą producenta. Recyklaty przygotowano w linii technologicznej zbudowanej w Łukasiewicz – IEL z Dotacji Celowej SBŁ 2021(rys.1.).



Rys.1. linia technologiczna wieloetapowej obróbki odpadu kompozytowego

Przykładową drogę strumienia recyklatu otrzymanego z procesu obróbki mechanicznej wadliwych wyrobów lub resztek poprodukcyjnych izolatorów kompozytowych z wypełniaczem kwarcowym przedstawiono na rys.2. Ziarno recyklatu nie przekraczało wymiaru 100 µm, by geometrią dorównać standardowym wypełniaczom kwarcowym stosowanym w elektroenergetyce.

Kompozycje z recyklatami homogenizowano przez 30 minut przy pomocy mieszadeł mechanicznych Heidolph RZR 2102 control oraz OS40-Pro z końcówką reologiczną ViscoJet utrzymując jednocześnie temperaturę kompozycji 70 °C w łaźni wodnej. Wszystkie preparaty odgazowywano w suszarce próżniowej laboratoryjnej T= 70°C. Alifatyczna żywica epoksydowa, sieciowana na ciepło bezwodnikiem kwasowym, użyta jako matryca w kompozytach recyklingowych, była identyczna z żywicą używaną w wyrobach pierwotnych (źródło surowca odpadowego). Skład ilościowy ustalano doraźnie, wprowadzając modyfikatory w takiej ilości, by zachować lepkość kompozycji pozwalającą na grawitacyjne odlewanie próbek.

Nazwy kompozycji zawierają kody liczbowe oznaczające udziały wagowe wypełniaczy recyklingowych – oznaczenia i właściwości kompozytów podano w Tab.1. wraz z wynikami badań.



Rys.2. Strumień recyklatu otrzymanego z izolatorów kompozytowych elektrotechnicznych

Wyniki badań

Przebadano kompozyty z matrycą epoksydową wypełnione różnymi udziałami recyklatu z rur (RR) i izolatorów (RI) oraz mączki kwarcowej (Mks). Parametry wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej uznano, jako priorytetowe do oceny potencjału aplikacyjnego kompozytów z re-surowcem różnego pochodzenia. Założono, że realizacja gospodarki obiegu zamkniętego w elektroenergetyce będzie możliwa, jeśli parametry te osiągną wartości nie mniejsze niż 80% wartości analogicznych parametrów dla materiału odniesienia (Epoxy_0). Dla wytrzymałości elektrycznej założenie to spełnione zostało w przypadku materiału zawierającego wszystkie 3 rodzaje wypełniaczy, który jednak odznacza się najniższą wytrzymałością mechaniczną na zginanie. Pozostałe materiały prezentują wytrzymałość elektryczną na poziomie 75% wartości względem materiału referencyjnego i spełniają to założenie w przypadku wytrzymałości mechanicznej.

Tabela 1. Wytworzone kompozyty i ich właściwości

Lp	Kompozyt	Doraźna wytrzymałość elektryczna kV/mm	Wytrzymałość na zginanie MPa	Odchylenie standardowe MPa
1	EPOXY_0	19,8	121,8	20,8
2	Mks16 RI16 RR32	17,4	84,1	9,8
3	EP5 RR 60	14,8	123,3	15,9
4	EP5 RR30 Mks30	14,9	106,4	15,1

Kompozyt Mks16 RI16 RR32 charakteryzuje się też najwyższą jednorodnością – najniższą wartością odchylenia standardowego przy pomiarach mechanicznych. Z dużym prawdopodobieństwem, wytrzymałość mechaniczną tego materiału będzie można zwiększyć wprowadzając ciśnieniowe metody formowania – charakterystyczne dla wytwarzania izolatorów kompozytowych metody wtryskowe – i wdrożyć jako izolator kompozytowy recyklingowy spełniający założenie GOZ.

Podsumowanie

Artykuł opisuje technologię obróbki recyklatu epoksydowego pochodzącego z wyrobów wzmocnianych oraz gamę materiałów kompozytowych wytworzonych z wykorzystaniem takiego surowca wtórnego. Wyniki badań, po odpowiedniej optymalizacji, będą mogły stanowić podstawę opracowań metod zagospodarowania odpadów kompozytowych różnego pochodzenia, w tym łopat turbin elektrowni wiatrowych. Wyroby ze wzmocnianych żywic epoksydowych są masowo stosowane w przemyśle elektrotechnicznym (energoelektrycznym) ze względu na ich niezawodność i dobre parametry użytkowe. Wiąże się to jednak z dużą i stale przyrastającą ilością odpadów, które

nie są biodegradowalne, ani (dotychczas) recyklowane na szeroką skalę. Wtórne zagospodarowanie materiałów odpadowych pochodzących z różnych strumieni procesowych (odpad produkcyjny, produkt wadliwy, produkt zużyty) do produkcji wyrobów analogicznych do pierwotnych, zmniejszy obciążenie środowiska odpadami składowanymi, pozwoli zmniejszyć ilość surowców nowoprodukowanych i koszty zakupu poprzez zastąpienie ich części recyklatem, co jest zgodne z założeniem gospodarki obiegu zamkniętego i Krajowymi Inteligentnymi Specjalizacjami KIS 6.

Rynek wzmacnianych wyrobów epoksydowych jest bardzo szeroki, w Polsce produkuje się i wykorzystuje rury, izolatory, pręty, i in. elementy na szeroką skalę. Konieczność przestawienia produkcji na mniej szkodliwą dla środowiska jest regulowana coraz bardziej restrykcyjnymi przepisami i aktami prawnymi. Obserwując treść Dyrektyw UE przewiduje się, że legislacje te obejmą wkrótce także rynek wyrobów z żywic chemo- i termoutwardzalnych, a wówczas wdrożenie rozwiązań, jakie oferuje niniejszy projekt będzie stanowiło obowiązek przedsiębiorcy. Rynek budownictwa modułowego może wykorzystać materiał recyklingowy na każdym etapie jego obróbki i każdej klasy – elektroenergetyczne układy i obiekty dystrybucji, rozdzielnice, stacje SN), wyposażenie elektroenergetyczne zintegrowane z prefabrykatami budownictwa modułowego (skrzynki, przepusty), elementy wykończenia wnętrz do szybkiego montażu (posadzki, rynnny antystatyczne, i in.)

Autorzy: dr. inż. Krzysztof Kogut, dr inż. Ewa Zawadzka, mgr inż. Henryk Brzeziński, mgr inż. Patrycja Siworska-Żurek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki, Centrum Badawcze Materiałów Elektrotechnicznych, 50 – 369 Wrocław, ul. Skłodowskiej – Curie 55/61 Wrocław, E-mail: krzysztof.kogut@iel.lukasiewicz.gov.pl; ewa.zawadzka@iel.lukasiewicz.gov.pl; henryk.brzeziński@iel.lukasiewicz.gov.pl patrycja.zurek-siworska@iel.lukasiewicz.gov.pl

LITERATURA

- [1] Y. Yanga, R. Booma, B. Irion, D. J. Heerdenb, P. Kuiper, H. Wita, *Recycling of composite materials*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 51, 2012
- [2] M. S. Wu, B. C. Jin, X. Li, S. Nutt, *A recyclable epoxy for composite wind turbine blades*, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 5:3, 2019
- [3] M. Lejeail, H. R. Fischer, *Development of a completely recyclable glass fiber-reinforced epoxy thermoset composites*, Journal of Applied Polymer Science, 138, 49690, 2021
- [4] C. Thomas, P.H.R. Borges, T.H. Panzera, A. Cimentada, I. Lombillo, *Epoxy composites containing CFRP powder wastes*, Composites: Part B, 59, 2014
- [5] M. Oumam, A. K Abourriche, A. M Abourriche, M. Birot, R. Pailler, R. Naslain, H. Hannache, *Chemical recycling of carbon fibers-reinforced phenolic resin composites by phenol in subcritical conditions*, IOSR Journal of Applied Chemistry, 7, 11, 2014
- [6] Y. Liu, L. Meng, Y. Huang, *Recycling of carbon/epoxy composites*, Journal Applied Polymer Science, 95, 2004
- [7] J. H. Zhu, P. Y. Chen, M. N. Su, C. Pei, F. Xing, *Recycling of carbon fibre reinforced plastics by electrically driven heterogeneous catalytic degradation of epoxy resin*, Green Chemistry, 21, 2019
- [8] R.P. Hernanz, J.G. Serna, C. Dodd, *Chemical recycling of carbon fiber composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions*, Journal Supercrit Fluids, 46, 2008
- [9] J.R. Hyde, E. Lester, S. Kingman, *Supercritical propanol, a possible route to composite carbon fibre recovery: a viability study*, Composites Part A, 37, 2006
- [10] W. Dang, M. Kubouchi, H. Sembokuya, *Chemical recycling of glass fiber-reinforced epoxy resin cured with amine using nitric acid*, Polymer, 46, 2005
- [11] R. D. Adams, A. Collins, D. Cooper, M. Wingfield-Digby, A. Watts-Farmer, A. Laurence, K. Patel, M. Stevens, R. Watkins, *Recycling of Reinforced Plastics*, Applied Composite Materials, 21, 2014
- [12] X. Nie, A. Boakye, Z. Jia, P. Ma, *The mechanical properties of the multi-axial warp-knit/resin matrix composites containing powder waste*, Journal of Industrial Textiles, 47, 5, 2018
- [13] J.A.T. Palmer, *Mechanical recycling of automotive composites for use as reinforcement in thermoset composites*, Materials Science, 2009
- [14] C.E. Kouparitsas, C.N. Kartalis, P.C. Varelidis, *Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites*, Polymer Composites, 23, 2002
- [15] A. H. Aström, *Model for end of life treatment of polymer composite materials*, Praca doktorska, 2005, Department of Machine Design Royal Institute of Technology
- [16] T. Suzuki, J. Takahashi, *Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars*, 9th Japan International SAMPE symposium, Tokio, Japonia, 2005
- [17] J. Takahashi, N. Matsutsuka, T. Okazumi, *Mechanical properties of recycled CFRP by injection molding method*, 16th International conference on composites materials, Kyoto, Japonia, 2007
- [18] J. Yang, J.Liu, W. Liu, J. Wang, T.Tang, *Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen-oxygen atmosphere*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 112, 2015
- [19] Y. Wang, X. Cui, H. Ge, Y. Yang, Y. Wang, C. Zhang, J. Li, T. Deng, Z. Qin, X. Hou, *Chemical Recycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites via Selective Cleavage of the Carbon-Nitrogen Bond*, ACS Sustainable Chem. Eng. 2015, 3, 12
- [20] H. Yan, Ch. Lu, D. Jing, Ch. Chang, N. Liu, X. Hou, *Recycling of carbon fibers in epoxy resin composites using supercritical 1-propanol*, New Carbon Materials, Volume 31, Issue 1, 2016
- [21] J. Jiang, G. Deng, X. Chen, X. Gao, Q. Guo, Ch. Xu, L. Zhou, *On the successful chemical recycling of carbon fiber/epoxy resin composites under the mild condition*, Composites Science and Technology, Volume 151, 20, 2017
- [22] J. Zhang, V. Chevali, H. Wang, Ch. Wang, *Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling*, Composites Part B: Engineering, Volume 193, 2020
- [23] S. Kumar, S. Krishnan, *Recycling of carbon fiber with epoxy composites by chemical recycling for future perspective: a review*, Chemical Papers volume 74, pages 3785–3807, 2020
- [24] S. Goparaj, T. Karki, *A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis*, SN Appl. Sci. 2, 433, 2020
- [25] Z. Deng, J. Yue, Z. Huang, *Solothermal degradation and reuse of carbon fiber reinforced boron phenolic resin composites*, Composites Part B: Engineering, Vol. 221, 2021
- [26] M. Xing, Z. Li, G. Zheng, Y. Du, C. Chen, Y. Wang, *Recycling of carbon fiber-reinforced epoxy resin composite via a novel acetic acid swelling technology*, Composites Part B: Engineering, Volume 224, 2021
- [27] S. Yousef, J. Eimontas, N. Striugas, M. Praspaliauskas, M. Abdelnabi, *Pyrolysis Kinetic Behaviour of Glass Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composites Using Linear and Nonlinear Isoconversional Methods*, Polymers 13(10), 2021
- [28] Q. Zhao, X. Li, Z. Tian, H. Ma, X. Hou, Y. Wang, Y. Wang, *Controlling degradation and recycling of carbon fiber reinforced bismaleimide resin composites via selective cleavage of imide bonds*, Composites Part B: Engineering, Volume 231, 2022