

<sup>a</sup>Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska; <sup>b</sup>Anmet, Szprotawa, Polska;  
<sup>c</sup>Politechnika Warszawska, Polska; <sup>d</sup>Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Niemcy;  
<sup>e</sup>Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP, Wildau, Niemcy

## Reusing and recycling of composite wind turbine blades.

A review of current practices and prospects. Part 1. Academic research

# Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd obecnych praktyk i perspektywy. Część I. Badania naukowe

DOI: 10.15199/62.2024.2.2

Dokonano przeglądu nowych materiałów stosowanych do produkcji łopat turbin oraz procesów monitorowania konserwacji i stanu strukturalnego tych łopat, a także technologii chemicznego, termicznego i mechanicznego ich recyklingu.

**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe, łopaty turbin wiatrowych, globalne projekty dotyczące recyklingu, potencjalne trendy rozwojowe, praktyczny odzysk i ponowne wykorzystanie, włókna węglowe z recyklingu

A review, with 34 refs., of new materials for manufacturing the turbine blades, processes for monitoring maintenance and structural health of the blades as well as chem., thermal and mech. blade recycling technologies.

**Keywords:** polymer composites, wind turbine blades, global recycling projects, potential development trends, practical recovery and reuse, recycled carbon fibers

Recykling łopat turbin wiatrowych stanowi duże wyzwanie. Wykorzystanie wielu różnych materiałów, a także szybka zmiana wymiarów, a tym samym konstrukcji łopat, prowadzi do powstawania odpadów wielomateriałowych.

The recycling of wind turbine blades remains challenging as hitherto. The utilization of many different materials as well as the rapid change in dimensions and thus blade designs lead to multi material waste. Since the expansion of wind



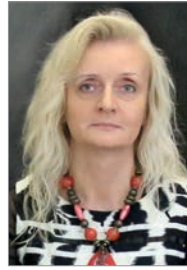
Prof. dr hab. inż. Andrzej K. BŁĘDZKI (ORCID: 0000-0003-3579-7534) studia rozpoczął na Politechnice Łódzkiej, a ukończył je w roku 1968 na Uniwersytecie Halle-Merseburg, gdzie w 1971 r. uzyskał stopień doktora. Po przeniesieniu się na Politechnikę Szczecińską (obecnie Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie), gdzie w 1987 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego, odbył liczne staże naukowe, m.in. w Fundacji Humboldta. W 1988 r. objął stanowisko profesora na Uniwersytecie w Kassel, a w 1993 r. Prezydent RP nadał mu tytuł profesora. Obecnie działa jako senior profesor w ZUT w Szczecinie. Od 2020 r. pełni funkcję przewodniczącego Sekcji Materiałów Niemetaliowych w Komitecie Inżynierii Materiałowej i Metalurgii PAN. Specjalność – inżynieria materiałowa, szcze-

gólnie biokompozyty termoplastyczne i duroplastyczne, kompozyty samowzmacniane, recykling, przetwórstwo tworzyw termoplastycznych i duroplastycznych.

Prof. Andrzej K. BŁĘDZKI PhD Eng. (ORCID: 0000-0003-3579-7534) he started his studies at the Lodz University of Technology and graduated in 1968 from the University of Halle-Merseburg, where in 1971 he obtained a PhD After moving to the Szczecin Technical University (currently the West Pomeranian University of Technology in Szczecin), where in 1987 he obtained a habilitated doctoral degree, he completed numerous research internships, including the Humboldt Foundation. In 1988, he took up the position of professor at the University of Kassel, and in 1993, the President of the Republic of Poland awarded him the title of professor. Currently, he works as a senior professor at ZUT in Szczecin. Since 2020, he has been the chairman of the Section for the Non-metallic Materials in the Committee of Materials Engineering and Metallurgy of the Polish Academy of Sciences. Specialty – materials science and engineering, especially thermoplastic and duroplastic biocomposites, self-reinforced composites, recycling, processing of thermoplastic and duroplastic materials.

\* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, al. Piastów 19, Szczecin 70-310, Polska; tel.: +48-091-449-4411, e-mail: andrzej.bledzki@zut.edu.pl



Dr hab. inż. Magdalena URBANIAK, prof. ZUT (ORCID: 0000-0002-0701-6908), w roku 1999 ukończyła studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie). W 2005 r. uzyskała stopień doktora w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna na tym samym wydziale. Od 2022 r. jest profesorem uczelni ZUT. Obecnie jest członkiem Rad Dyscyplin Naukowych – Inżynieria Mechaniczna (od 2019 r.) i Inżynieria Materiałowa (od 2023 r.) ZUT w Szczecinie. Od 2020 r. jest także członkiem i sekretarzem Sekcji Materiałów Niemetaliowych w Komitecie Inżynierii Materiałowej i Metalurgii PAN. Od 2020 r.

pełni funkcję kierownika Katedry Mechaniki na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie. Specjalność – kompozyty i biokompozyty duroplastyczne, lekkie wielowarstwowe biokompozyty; badania właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych.

PhD DSc Eng. Magdalena URBANIAK, associate professor (ORCID: 0000-0002-0701-6908), in 1999, she graduated from the Faculty of Mechanical of the Szczecin Technical University (currently the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin). In 2005, she obtained a doctoral degree in the building and maintenance of machines, and in 2020 was habilitated doctoral degree in the discipline of mechanical engineering at the same faculty. She obtained the title of associate professor in 2022. Currently, she is a member of the Science Discipline Councils – Mechanical Engineering (since 2019) and Materials Engineering (since 2023) of West Pomeranian University of Technology in Szczecin. Since 2020, she also became a member and secretary of the Section of Non-metallic Materials in the Committee of Materials Engineering and Metallurgy of the Polish Academy of Sciences. Since 2020, she is the head of the Department of Mechanics at the Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin. Specialty – duroplastic composites and biocomposites, lightweight sandwich composites; research on mechanical properties and behavior of composite materials.

Ponieważ rozwój energetyki wiatrowej jest fundamentalną częścią ogólnoświatowej strategii dekarbonizacji, do 2030 r. w UE należy rocznie instalować 17 GW nowych mocy energii wiatrowej. Rozbudowa i modernizacja starszych elektrowni wiatrowych znacznie zwiększy zapotrzebowanie na łopaty turbin wiatrowych do 2050 r.<sup>1)</sup> W związku z tym należy zbadać nowe podejścia do wydłużenia żywotności łopat turbin wiatrowych, a także nowe technologie recyklingu w celu zminimalizowania ilości odpadów łopat wirnika.

Obecnie najczęściej używane łopaty są przygotowywane ręcznie, metodą infuzji żywicy lub technologią prepreg, w zależności od długości łopaty i obszaru zastosowania (na lądzie lub poza nim)<sup>2)</sup>. Najbardziej korzystne jest wykorzystanie prepregów, które pozwalają na wysoki stopień automatyzacji i zwiększają szybkość przetwarzania w produkcji łopat turbin wiatrowych, ponieważ infuzja włókien nie jest już konieczna, ale także podnoszą koszt łopat.

Na ogół przygotowane kompozytowe łopaty turbin wiatrowych mają żywotność 20–25 lat. W tym okresie łopaty ulegają uszkodzeniu z powodu wpływu środowiska i następuje ich rozwarstwienie. Rozdzielenie się sąsiadujących ze sobą warstw jest powszechnie występującym uszkodzeniem<sup>2)</sup>. Istnieją jednak różne sposoby przewycięzania tego procesu, który zmniejsza maksymalną żywotność łopat<sup>3)</sup> (rys. 1).

## Opracowanie nowych materiałów na łopaty turbin wiatrowych

Najważniejszym celem badań jest opracowanie nowych materiałów, ponieważ można osiągnąć zarówno wydłużenie żywotności łopat, jak i łatwiejsze rozdzielanie żywicy osnowy i włókien w procesach recyklingu. Dlatego też Mishnaevsky<sup>4)</sup> badał nowe materiały powłokowe, które zapewniają zoptymalizowane właściwości antykorozyjne. Materiały te są oparte na poliuretanach lub przenikających się sieciach poliuretanów i epoksydów i mogą zawierać ograniczone warstwy lepko-sprężyste w wielowarstwowych powłokach<sup>4)</sup>. Ponadto Abend i współpr.<sup>5)</sup> opracowali samoregenerujące się polimery, które mogą być stosowane jako składniki żywicy osnowy łopat turbin wiatrowych, jak pokazano w projekcie BioLightHeal realizo-

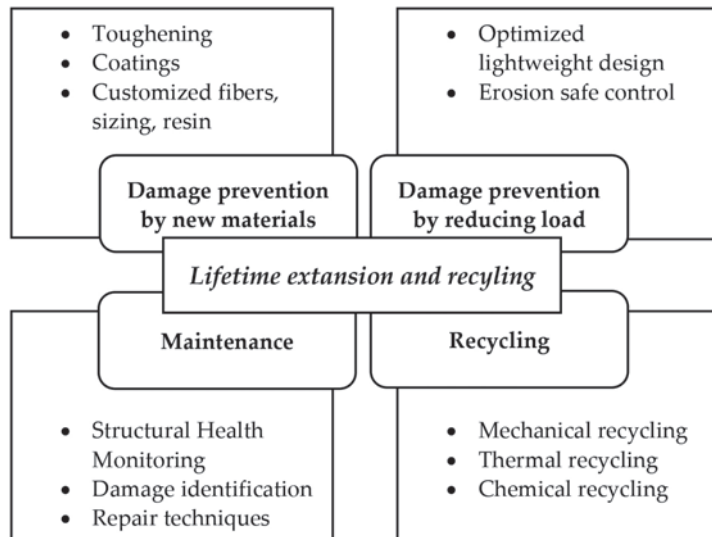


Fig. 1. Approaches for lifetime extension of wind turbine blades

Rys. 1. Możliwości do wydłużania żywotności łopat turbin wiatrowych

energy is a fundamental part of the worldwide decarbonization strategy, till 2030 within the EU 17 GW of new wind energy capacity per year have to be installed. The expansion and repowering of older wind power plants increase the needed amount of wind turbine blades till 2050 dramatically<sup>1)</sup>. Thus, new approaches for the extension of the lifetime of wind turbine blades as well as new recycling technologies for have to be investigated in order to minimize the amount of rotor blade waste.

Currently the most often used blades are either prepared via hand lay-up, resin infusion or prepreg technologies, depending on the blade length and application area (on-shore or off-shore)<sup>2)</sup>. Most advantageous is the utilization of prepregs that allow a high degree of automatization and increases the processing speed for wind turbine blade production as infusion of the fibers is no longer necessary but also increase the cost of the blades.

However, the prepared composite wind turbine blades have a service life of 20 to 25 years. During this period the blades are damaged due to environmental impacts resulting in delamination between different layers of the blades. This



Mgr inż. Andrzej ADAMCIO w roku 1991 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze. Jego praca magisterska dotyczyła analizy konstrukcyjno-badawczej resoru kompozytowego, który zbudował z włókien szklanych i żywicy poliestrowej. W 1995 r. podjął pracę jako kierownik serwisu maszyn górniczych w KGHM Polska Miedź, gdzie pracował do 1998 r. Od 1999 roku prowadzi swoją firmę PW ANMET Andrzej Adamcio, zajmującą się recyklingiem metali. Specjalność – recykling śmigieł elektrowni wiatrowych.

Andrzej ADAMCIO in 1991, he graduated from the Mechanical Faculty of the Higher Engineering School in Zielona Góra. His master's thesis focused on the structural and research analysis of a composite spring constructed from glass fibers and polyester resin. In 1995, he took on the role of manager of mining machinery service at KGHM Polska Miedź, where he worked until 1998. Since 1999, he has been running his own company, PW ANMET Andrzej Adamcio, specializing in metal recycling. Speciality – the recycling of wind turbine blades.



Mgr Marcin SOB CZYK ukończył studia w zakresie energetyki wiatrowej, kształtowania środowiska i zrównoważonego rozwoju na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Początkowo pracował jako deweloper projektów, tworząc nowe parki wiatrowe w Polsce. Następnie jako On-Site Manager brał udział w budowie parków wiatrowych w całej Europie, w tym za kołem podbiegunowym, a także w Afryce Północnej. Łącznie odpowiadał za budowę ponad 20 parków wiatrowych składających się łącznie z ponad 200 turbin wiatrowych. Następnie pracował także jako kierownik serwisu parku wiatrowego. Obecnie jako Project Manager w firmie Anmet odpowiada za realizację projektów związanych z pozyskiwaniem łopat do recyklingu oraz wspiera dystrybucję produktów ze śmigieł. Specjalność – energetyka wiatrowa.

M.Sc. Marcin SOB CZYK graduated in wind energy, environmental management and sustainable development at the University of Adam Mickiewicz in Poznań. Initially, he worked as a project developer, creating new wind parks in Poland. Then, as On-Site Manager, he participated in the construction of wind parks throughout Europe, including the Arctic Circle, as well as in North Africa. In total, he was responsible for the construction of over 20 wind parks consisting of over 200 wind turbines. Then he also worked as a wind park service manager. Currently, as a Project Manager at Anmet, he is responsible for the implementation of projects related to obtaining blades for recycling and supports the distribution of propeller products. Speciality – wind energy.

wanym przez konsorcjum Fraunhofer IAP, Friedrich Schiller University Jena i firmę thermoPre ENGINEERING GmbH. Samonaprawiające się komponenty na bazie mocznika zostały zastosowane w osnowach termoplastycznych i termoutwardzalnych w połączeniu z tkaninami z włókna szklanego jako materiałem wzmacniającym i wykazały właściwości samonaprawiające się przy temp. powyżej 80°C<sup>6</sup>). Te materiały pozwalają również na lepsze oddzielenie włókien i żywicy osnowy w procesach recyklingu ze względu na odwracalne wiązania w sieci polimerowej. Ponadto Uhlig i współpracownicy<sup>7, 8</sup>) wykazali, że duża odporność żywic na pękanie prowadzi do znacznie większej trwałości żywic epoksydowych niż dotychczas stosowanych w łopatach turbin wiatrowych. Niemniej jednak zawsze konieczne jest wyważenie właściwości termicznych, mechanicznych i chemicznych.

Oprócz badań nad żywicami na osnowie polimerowej badano również wpływ włókien. Mishnaevsky i współpracownicy<sup>9, 10</sup>) przedstawili możliwość wykorzystania hybrydowych struktur bazaltowych, szklanych i węglowych w łopatach turbin wiatrowych i wykazali, że struktury hybrydowe zapewniają większą sztywność i mniejszy ciężar dzięki zwiększeniu zawartości węgla, ale skutkują mniejszą wytrzymałością w porównaniu ze zwykłymi kompozytami polimerowymi z włóknem szklanym.

## Konserwacja i monitorowanie stanu struktury łopaty

Wszystkie wspomniane materiały są niezbędne do zmniejszenia masy łopat turbin wiatrowych. W związku z tym stale opracowywane są nowe konstrukcje łopat, zwłaszcza w przypadku dużych łopat, aby nieustannie zwiększać ich efektywność. Chociaż nowe materiały zapewniają lepsze właściwości mechaniczne, zwiększona długość łopat prowadzi do większych naprężeń, a tym samym do szybszego zmęczenia materiału. W związku z tym wymagane są również nowe techniki wykrywania pęknięć i uszkodzeń łopat turbin wiatrowych. Doskonały przegląd obecnie dostępnych technik przedstawia opracowanie Kong i współpracownicy<sup>11</sup>). Badania koncentrują się na technikach ultradźwiękowych, akustycznych, elektromagnetycznych, termograficznych, radiograficznych i szerograficznych.

*separation of adjacent plies is a common failure process, based on the low through-thickness strength of the laminates<sup>2</sup>). To overcome this constraint that limits the maximum service life, different options exist<sup>3</sup>) (Fig. 1).*

## Development of new materials for blades

*The development of new materials in this context is most important because both lifetime extension and an easier separation of matrix resin and fibers for recycling processes can be achieved. Therefore, new coating materials were studied by Mishnaevsky<sup>4</sup>) that provide optimized anti-corrosion properties. These materials are based on polyurethanes or interpenetrating networks between polyurethanes and epoxides and can contain constrained viscoelastic layers within multilayer coatings<sup>4</sup>). Additionally, Abend et al.<sup>5</sup>) prepared self-healing polymers that can be used as components in matrix resins of wind turbine blades as shown in the project BioLightHeal by a consortium of Fraunhofer IAP, Friedrich Schiller University Jena and the thermoPre ENGINEERING GmbH. The urea based self-healing components were used in thermoplastic and thermosetting matrices in combination with glass fiber fabrics as reinforcement material and showed self-healing properties above 80°C<sup>6</sup>). These materials also allow a better separation of fibers and matrix resin in recycling processes due to the reversible bonds within the polymeric network. Furthermore, Uhlig et al.<sup>7, 8</sup>) showed that a high fracture toughness of resins leads to much higher durability of epoxy matrix resins as utilized in wind turbine blades. Nevertheless, a balancing of thermal, mechanical, and chemical properties is always necessary.*

*Beside the research on polymer matrix resins, the impact of the fibers was also studied. Thus, Mishnaevsky et al.<sup>9, 10</sup>) presented approaches for the utilization of basalt, glass and carbon fiber hybrid structures in wind turbine blades and demonstrated that hybrid structures provide higher stiffness and lower weight by increasing the carbon content but resulting in lower strength as compared with usual glass fiber polymer composites.*



Mgr inż. Szymon DEMSKI (ORCID: 0000-0001-7355-407X) w roku 2020 ukończył studia I stopnia, a w 2021 r. studia II stopnia na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Jest doktorantem Szkoły Doktorskiej tej samej uczelni. Specjalność – polimerowe kompozyty włókniste, nanokompozyty. MSc Eng. Szymon DEMSKI (ORCID: 0000-0001-7355-407X) graduated with a degree in engineering in 2020 and a master's degree in 2021 at the Faculty of Materials Science and Engineering of Warsaw University of Technology. He is a PhD student at the Doctoral School of the same university. Specialty – fiber reinforced polymers, nanocomposites.



Prof. dr hab. inż. Anna BOCZKOWSKA (ORCID: 0000-0002-3694-1342) w roku 1989 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W 2000 r. uzyskała stopień doktora, a w 2011 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. W 2018 r. otrzymała tytuł profesora. Jest dziekanem Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Specjalność – kompozyty, polimery, nanomateriały, materiały inteligentne; badania materiałów kompozytowych w zakresie opisu zależności pomiędzy parametrami wytwarzania a mikrostrukturą i właściwościami. Prof. Anna BOCZKOWSKA PhD Eng. (ORCID: 0000-0002-3694-1342) graduated from the Faculty of Materials Science and Engineering at the Warsaw University of Technology in 1989. In 2000, she obtained a doctoral degree, and in 2011, she obtained a habilitated doctoral degree at the same faculty. In 2018, she received the title of professor. She is the dean of the Faculty of Materials Science and Engineering at the Warsaw University of Technology. Specialty – composites, polymers, nanomaterials, intelligent materials; research on composite materials in terms of describing the relationship between manufacturing parameters and microstructure and properties.

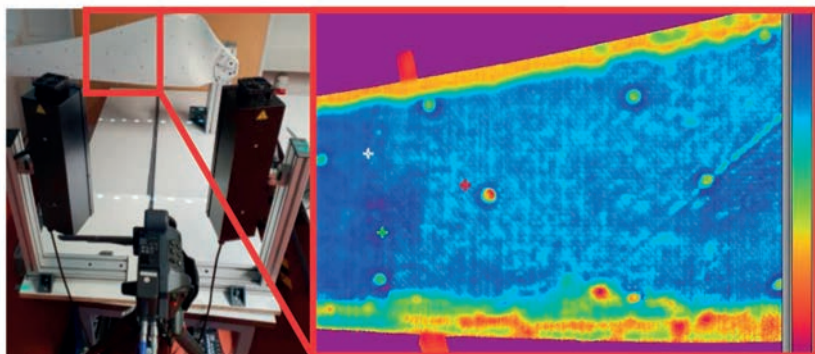


Fig. 2. Experimental setup for active thermography for damage detection of wind turbine blades

Rys. 2. Konfiguracja eksperymentalna aktywnej termografii do wykrywania uszkodzeń łopat turbin wiatrowych

Aktywna termografia jest szczególnie interesująca w przypadku zastosowań komercyjnych, ponieważ duże obszary mogą być stosunkowo łatwo kontrolowane, jak pokazano w projekcie „ThermRep” konsorcjum z udziałem instytutu Fraunhofera IAP i Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, a także Berliner Nanotest und Design GmbH<sup>12)</sup> (rys. 2). Solimine i współpr.<sup>13)</sup> proponują nową metodę wykrywania uszkodzeń z wykorzystaniem dźwięku łopaty w powietrzu. We wnętrzu łopaty montowane są mikrofony w celu wykrycia zmian ciśnienia akustycznego w pustej przestrzeni łopaty, wskazujących na jej uszkodzenie. W związku z tym do wykrywania uszkodzeń nie jest konieczna zewnętrzna stymulacja. Jednak system ten jest nadal przedmiotem badań ze względu na złożone metody przetwarzania sygnału<sup>13)</sup>.

Aby zminimalizować koszty konserwacji, opracowano różne koncepcje monitorowania stanu konstrukcji w celu ułatwienia wykrywania uszkodzeń. Obejmują one wykorzystanie tensometrów, czujników światłowodowych lub interferometrów laserowych, zawsze w zależności od długości łopaty i miejsca pracy<sup>14)</sup>.

## Recykling łopat turbin wiatrowych

Najczęściej stosowany komercyjnie recykling łopat turbin wiatrowych obejmuje rozdrabnianie łopat, spalanie osnowy organicznej i ponowne wykorzystanie pozostałych krótkich

## Maintenance and structural health monitoring of blades

All these materials are needed to increase the lightweight potential of wind turbine blades. Hence, new blade designs especially for large blades are continuously under development to increase the efficiency constantly. Although new materials provide better mechanical properties the increased blade length leads to higher stress and thus to faster material fatigue. Hence, also new techniques for fracture and damage detection of the wind turbine blades are required. An excellent overview about currently available techniques provides Kong et al.<sup>11)</sup>. The research is focused on

ultrasonic, acoustic, electromagnetic, thermographic, radiographic, and shearographic techniques. Active thermography is particularly interesting for commercial applications, as large areas can be inspected relatively easily, as shown in the project “ThermRep” of a consortium with Fraunhofer IAP and Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg as well as the Berliner Nanotest und Design GmbH<sup>12)</sup>, Fig. 2. New approaches of Solimine et al.<sup>13)</sup> deal with damage detection using the airborne sound of the blades. Therefore, internal microphones are applied to the blade in order to detect variations in the sound pressure level of the blade cavity indicating damage of the blade. Thus, no external stimulation is necessary for damage detection. Nevertheless, this system is still under investigation due to complex signal processing methods<sup>13)</sup>.

To minimize the costs for maintenance further different structural health monitoring concepts were developed to support damage detection. This includes the utilization of strain gauges, optical fiber sensors or laser interferometers, always depending on the blade length and operational site<sup>14)</sup>.

## Recycling of blades

The most common commercially utilized recycling of wind turbine blades contains of shredding the blades, combustion of the organic matrix and reuse of the remaining short fibers as fillers<sup>15)</sup>. This process is cheap but leads to a massive downcycling of the fibers and no reuse of the organic com-



Prof. dr inż. Holger SEIDLITZ (ORCID: 0000-0003-0024-1624) w roku 2013 uzyskał stopień doktora na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki w Chemnitz. W 2015 r. otrzymał stanowisko młodszego profesora na Brandenburgskiej Politechnice Cottbus-Senftenberg. W 2019 r. został profesorem zwyczajnym na Brandenburgskim Uniwersytecie Technologicznym w Cottbus-Senftenberg oraz dyrektorem Działu Materiałów Polimerowych i Kompozytów PYCO w Instytucie Fraunhofera Badań Stosowanych Polimerów IAP w Wildau pod Berlinem. Specjalność – lekkie konstrukcje na bazie kompozytów polimerowych.

Prof. Dr.-Ing. Holger SEIDLITZ (ORCID: 0000-0003-0024-1624) in 2013, he obtained a PhD from the Faculty of Mechanical Engineering of University of Technology Chemnitz. In 2015, he

has been granted a junior professorship at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg. In 2019 he became full professor for Polymer-based Lightweight Design at Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg as well as division director Polymeric Materials and Composites PYCO at the Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP in Wildau near Berlin. Specialty – lightweight structures based on polymer composites.



Dr Mathias KÖHLER w roku 2015 uzyskał stopień doktora chemii metaloorganicznej na Wydziale Chemii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Friedricha Schillera w Jenie. Od 2016 r. pracuje w Instytucie Fraunhofera Badań Stosowanych Polimerów IAP, gdzie obecnie jest kierownikiem grupy „testy strukturalne i analityka” w Dziale Materiałów Polimerowych i Kompozytów PYCO. Specjalność – opracowywanie żywic do konstrukcji lekkich.

Dr. Mathias KÖHLER, Group Manager; in 2015 obtained a PhD in metalorganic chemistry from the Faculty of Chemistry and Earth Sciences of the Friedrich Schiller University Jena. Since 2016 he is working at the Fraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP. Currently, he is group manager of the group ‘structural testing and analytics’ at the Research division Polymeric Materials

and Composites PYCO of the Fraunhofer IAP. Specialty – resin development for lightweight structures.

włókien jako napełniaczy<sup>15</sup>). Ten proces jest względnie tani, ale prowadzi do destrukcji włókien i uniemożliwia ponowne wykorzystanie składników organicznych w nowych materiałach. W związku z tym nie można osiągnąć zamkniętego cyklu recyklingu. Aby pokonać tę barierę i wykorzystać recyklaty jako nowe źródło surowców i zamknąć ekonomiczne cykle materiałowe w celu zmniejszenia śladu węglowego łopat turbin wiatrowych, obecnie bada się trzy główne obszary technologii recyklingu. Oprócz alternatywnych metod termicznych badane są również metody chemiczne w celu odzyskania większości materiałów organicznych albo jako monomerycznych/oligomerycznych składników do bezpośredniego ponownego wykorzystania w nowych materiałach lub jako jednostek węglowych do syntezy nowych podstawowych chemikaliów. Ponadto badane są nowe technologie recyklingu mechanicznego w celu uzyskania lepszego oddzielenia żywicy i włókien. Rani i współpr.<sup>16</sup>, Mishanaevsky<sup>3</sup>) oraz Paulsen i współpr.<sup>17</sup>) opublikowali obszernie przeglądy prac na ten temat, wskazując zalety i wady najpopularniejszych metod. Wszystkie metody obejmują w pierwszym etapie rozdrabnianie łopat w celu zwiększenia powierzchni dla kolejnych procesów termicznych lub chemicznych, a tym samym skrócenia czasu procesu recyklingu.

### Technologie recyklingu termicznego

Kluczowym punktem wszystkich procesów recyklingu termicznego jest degradacja organicznych części materiałów kompozytowych i przekształcenie ich w gaz, ciecz lub inne ciało stałe. Najbardziej powszechny jest proces pirolizy, który jest przeprowadzany w niskich temp. 300–1000°C w atmosferze obojętnej lub w środowisku o bardzo małej zawartości tlenu<sup>16</sup>). Jednak parametry procesu pirolizy mają ogromny wpływ na jakość odzyskiwanych włókien oraz skład, a także ilość odzyskanych frakcji gazowych, ciekłych i stałych. Smoleń i współpr.<sup>18</sup>) wykazali, że piroliza zmniejsza wytrzymałość włókien węglowych o 20%, ale laminaty zawierające włókna węglowe z recyklingu mają o 35% większą wytrzymałość na zginanie. Wynika to z pozostałości niecałkowicie zdegradowanej żywicy osnowy, która pozostaje na powierzchni włókien, częściowo utlenionych włókien i większej chropowatości powierzchni włókien, co zapewnia lepszy kontakt między żywicą osnowy a włóknem<sup>18</sup>). Dlatego też wykorzystanie włókien węglowych z recyklingu w kompozytach może być korzystne.

Ponadto Kavaliauskas i współpr.<sup>19</sup>) zbadali metodę wykorzystującą technologię plazmową do formowania mikrometrycznych włókien z rozdrobnionych łopat turbin wiatrowych. Generator plazmy o mocy 68 kW wytwarzał plazmę na bazie powietrza o temp. 2300°C. Proces został przeprowadzony w specjalnym chłodzonym reaktorze plazmowo-chemicznym, a powstałe mikrowłókna o długości 200 µm zostały zebrane za pomocą drucianej siatki mikrometrycznej. Wykazano, że podczas procesu nie powstały żadne toksyczne gazy ani produkty degradacji żywicy osnowy. Dodatkowo, mikrowłókna zawierały tylko 30% masy oryginalnego rozdrobnie-

ponents in new materials. Hence, no closed recycling cycle can be achieved. To overcome this barrier and to secure recycles as new source of raw materials and close economic material cycles in order to reduce the carbon footprint of wind turbine blades, three main fields of recycling technologies are currently researched. Beside alternative thermal methods also chemical are investigated to recover most of the organic material either as monomeric/oligomeric components for direct reuse in new materials or as carbon units for synthesis of new basic chemicals. Additionally, new mechanical recycling technologies are investigated to get better separation of matrix resin and fibers. Rani et al.<sup>16</sup>, Mishanaevsky<sup>3</sup>) as well as Paulsen et al.<sup>17</sup>) et al. provide excellent overviews about this topic facing the advantages and disadvantages of the most common methods. All methods contain in a first step the shredding of the blades to increase the surface for subsequent thermal or chemical processes and hence, reduce the process time for recycling.

### Thermal recycling technologies

The key point of all thermal recycling processes is to degrade the organic parts of composite materials and transform them into molecular form either as gas, liquid, or remaining solids. Most common is the pyrolysis process that is performed at low temperatures between 300°C and 1000°C in inert atmosphere or at very low oxygen environments<sup>16</sup>). However, the parameters of the pyrolysis process effect dramatically the quality of the recovered fibers and the composition as well as the amount of the regained gaseous, liquid, and solid fractions. Smolen et al.<sup>18</sup>) showed that pyrolysis decreases the strength of the carbon fiber by 20% but laminates containing these recycled carbon fibers have a 35% higher flexural strength. This is a result of residual not totally degraded matrix resin which remains on the surface of the fibers, partly oxidized fibers and a higher surface roughness of the fibers yielding a better contact between matrix resin and fiber<sup>18</sup>). Hence, the utilization of recycled carbon fibers in composites can be advantageous.

Furthermore, Kavaliauskas et al.<sup>19</sup>) investigated a method containing a plasma technology to form micrometric fibers out of shredded wind turbine blades. Therefore, a plasma generator with a power of 68 kW generated an air-based plasma with a temperature of 2300°C. The process was carried out in a special cooled plasma-chemical reactor and the resulting 200 µm microfibers were collected with a micrometric mesh wire. It was shown that during the process no toxic combustion gases or degradation products of the matrix resin were formed. Additionally, the microfibers contained only 30% of the mass of the original shredded material after tempering above 900°C, indicating the formation of inorganic SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO species. As confirmed via IR spectroscopy only environmentally friendly microfibers were formed during the plasma process. This material was supposed to be used as filler in concrete, insulation material or to produce catalysts<sup>19</sup>).

nego materiału po wygrzewaniu w temp. powyżej 900°C, co wskazuje na tworzenie się nieorganicznych związków SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO. Jak potwierdzono za pomocą spektroskopii IR, podczas procesu plazmowego powstały tylko mikrowłókna przyjazne dla środowiska. Ten materiał miał być używany jako wypełniacz do betonu, materiał izolacyjny lub do produkcji katalizatorów<sup>19</sup>.

Inne podejście do recyklingu termicznego obejmuje proces ze złożem fluidalnym. Ta metoda jest stosowana do uzyskiwania czystych włókien poprzez ekstrakcję żywicy osnowy w procesie utleniania z odzyskanych części kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Złoże z piasku kwarcowego jest podgrzewane do 650°C i fluidyzowane gorącym powietrzem, w tych warunkach odparowuje organiczna część kompozytu<sup>15, 16</sup>. Odzyskane włókna wykazują tylko 60–70% wytrzymałości włókien pierwotnych, ale nadal mogą być wykorzystywane w innych zastosowaniach, jak przedstawili Rahimizadeh i współpr.<sup>20</sup>.

Do odzyskiwania włókien w niższych temperaturach można zastosować pirolizę mikrofalową. Ten proces jest przeprowadzany w sposób porównywalny do zwykłej pirolizy, ale z wykorzystaniem mikrofal generowanych przez 3 magnetrony o mocy 1 kW w celu podgrzania materiału kompozytowego do temp. 300–600°C w atmosferze azotu, wg opisu Akessona i współpr.<sup>21</sup>. Ponieważ polimery mają niską przewodność cieplną, piroliza mikrofalowa może być przeprowadzana w niższych temperaturach, również z powodu jednorodnego rozkładu temperatury osiąganego przez promieniowanie mikrofalowe<sup>17, 21, 22</sup>. Lester i współpr.<sup>23</sup> odzyskali włókna węglowe za pomocą pirolizy mikrofalowej, która zapewniła im lepszą wytrzymałość na rozciąganie i moduł, ale spowodowała zmiany w topologii powierzchni.

Jako że parametry procesu zależą głównie od ogólnego składu materiału kompozytowego, zwłaszcza od rodzaju włókien i ich zawartości, to ogólny poziom gotowości technologicznej TRL (*technology readiness level*) dla tej technologii recyklingu może już wynosić 7 i różne firmy chemiczne wykorzystują tę technikę do recyklingu łopat turbin wiatrowych, jak opisano powyżej i pokazano we współpracy między Brandenburskim Uniwersytetem Technologicznym Cottbus-Senftenberg a firmą Global EnerTec AG<sup>17, 24</sup> (rys. 3).

### Technologie recyklingu chemicznego

Procesy recyklingu chemicznego to najczęściej metody solwolizy. W związku z tym do depolimeryzacji usieciowanej sieci polimerowej osnowy żywicy wykorzystuje się środek solwolizujący, taki jak woda, wodne roztwory zasad, aminy, alkohole lub ketony, uzyskując monomeryczne lub oligomeryczne jednostki żywicy rozpuszczone w środku solwolizującym obok włókien wolnych od żywicy<sup>17, 22</sup>. Ten proces jest zwykle przeprowadzany w temperaturze wrzenia czynnika solwolizy (zwykle poniżej 200°C), aby zwiększyć szybkość reakcji depolimeryzacji<sup>17</sup>. Co więcej, proces recyklingu można przeprowadzić pod zwiększonym ciśnieniem, aby jeszcze bardziej przyspieszyć reakcję<sup>16</sup>. Dodatkowo, Ibarra i współpr.<sup>25</sup>

Another approach of thermal recycling involves a fluidized bed process. This method is used to yield clean fibers by extracting the matrix resin via an oxidation process from copped composite parts of wind turbine blades. A silica sand bed is heated up to 650°C and fluidized by hot air, vaporizing the organic part of the composite<sup>15, 16</sup>. The remaining fibers provide only 60% to 70% of the strength of virgin fibers but can still be utilized in high-end applications as shown by Rahimizadeh et al.<sup>20</sup>.

To recover fibers at lower temperatures microwave pyrolysis can be used. This process is carried out comparable to normal pyrolysis but utilizing microwaves generated by three magnetrons with a power of 1 kW to heat the composite material to temperatures between 300°C and 600°C in inert nitrogen atmosphere described by Akesson et al.<sup>21</sup>. Since polymers have a low thermal conductivity the microwave pyrolysis can be performed at lower temperatures, also because of a homogeneous temperature distribution achieved by microwave irradiation<sup>17, 21, 22</sup>. Lester et al.<sup>23</sup> recovered carbon fibers via microwave pyrolysis that provided better tensile strength and modulus but showed changes in the surface topology.

Since process parameters depend mainly on the general composition of the composite material like kind of fibers and fiber content, the overall TRL level for this recycling technology can be seen already at 7 and different chemical companies use this technique for recycling of wind turbine blades already as described above and shown by a cooperation between the Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg and the Global EnerTec AG<sup>17, 24</sup> (Fig. 3).

### Chemical recycling technologies

Chemical recycling processes are most commonly solvolysis methods. Therefore, a solvolysis agent like water, aqueous bases, amines, alcohols, or ketones are utilized to depolymerize the crosslinked polymer network of the matrix resin yielding monomeric or oligomeric units of the resin dissolved in the solvolysis agent beside the resin free fibers<sup>17, 22</sup>. This process is normally carried out at the boiling temperature of the solvolysis agent (usually below 200°C)



Fig. 3. Recycled/pyrolyzed carbon fiber by Global EnerTec AG (right) and new thermoplastic compound containing recycled carbon fibers (left)

Rys. 3. Włókno węglowe z recyklingu/pirolizowane przez firmę Global EnerTec AG (po prawej) i nowy związek termoplastyczny zawierający włókna węglowe z recyklingu (po lewej)

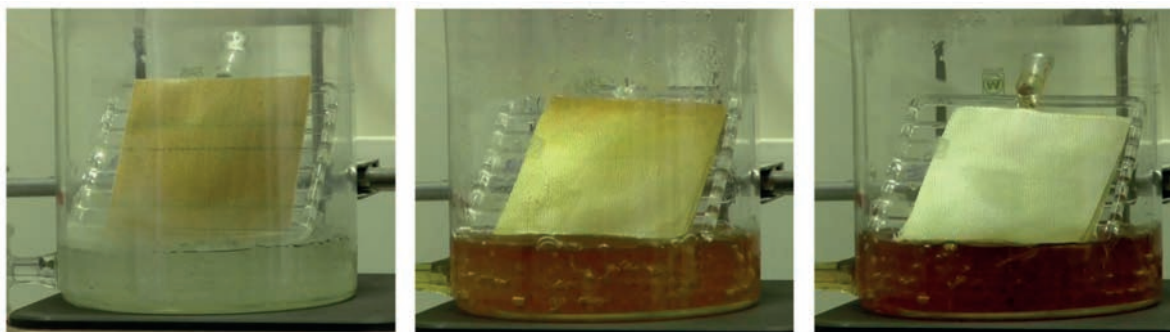


Fig. 4. Total chemical degradation of phenolic resin of a glass fiber reinforced laminate at the beginning (left), after 30 min (middle) and after 60 min (right) using an amino alcohol recycling agent

Rys. 4. Całkowita degradacja chemiczna żywicy fenolowej laminatu wzmocnionego włóknem szklanym na początku (po lewej), po 30 min (w środku) i po 60 min (po prawej) przy użyciu do recyklingu środka aminoalkoholowego

w celu odzyskania z kompozytów bardzo czystych włókien węglowych zastosowali warunki nadkrytyczne z wykorzystaniem wody i alkoholu benzylowego. Odzyskane włókna miały taką samą wytrzymałość na rozciąganie i tylko o 12% mniejszą sztywność w porównaniu z włóknami pierwotnymi. Zazwyczaj w procesach solwolizy nadkrytycznej stosuje się temp. 250–490°C i ciśnienie 4–31 MPa w zależności od systemu<sup>16</sup>. Te metody recyklingu chemicznego zostały opatentowane i były intensywnie badane przez Bauera i współpracowników. Najbardziej obiecujące procesy opracowano dla żywic epoksydowych, benzoksazynowych i fenolowych, wykorzystując aminoalkohole jako czynnik recyklingu i odzyskując, ze względu na koszty, większość czynnika po całkowitej degradacji żywicy osnowy poprzez destylację<sup>26–28</sup> (rys. 4).

Wybór zoptymalizowanej temperatury, ciśnienia i rodzaju czynnika solwolizy zależy od żywicy osnowy, a także włókien użytych w materiale kompozytowym. Dlatego też nie dla wszystkich żywic osnowy możliwy jest proces recyklingu chemicznego. Ogólnie rzecz biorąc, do szybkiej chemicznej degradacji sieci polimerowej niezbędne są polarne wiązania chemiczne, takie jak wiązania estrowe lub amidowe<sup>3</sup>.

Największą zaletą chemicznego recyklingu kompozytów jest możliwość odzyskiwania włókien o pełnej długości w stosunkowo niskich temperaturach i odzyskiwania składników monomerycznych lub oligomerycznych do nowych formuł żywic lub syntezy polimerów. Co więcej, Cousins i współpr.<sup>29</sup> podali, że proces ten jest odpowiedni zarówno dla termoutwardzalnych, jak i termoplastycznych materiałów osnowy. Kolejnym wyzwaniem jest częściowa degradacja rozmiaru i powierzchni włókien, powodująca w niektórych przypadkach kolejne etapy procesu zmiany rozmiaru włókien pochodzących z recyklingu przed ich ponownym użyciem<sup>22, 29</sup>.

Poziom TRL tej technologii recyklingu, sięgający 5–6, jest stosunkowo niski ze względu na różne parametry wymagane dla różnych systemów kompozytowych, w dużej mierze zależne od zastosowanej żywicy osnowy<sup>17</sup>. Choć ten proces nie jest jeszcze wykorzystywany komercyjnie, można osiągnąć zamkniętą pętlę recyklingu, jak pokazano na rys. 5, co odzwierciedla ogromny potencjał tej technologii<sup>30</sup>. Niemniej jednak, obecnie trwają badania nad zwiększeniem skali i rozwojem przemysłowych procesów recyklingu chemicznego. Przykładowo, firma Swancor nawiązała współpracę z firmą

to increase the speed of the depolymerization reaction<sup>17</sup>. Furthermore, the recycling process can be performed under increased pressure to accelerate the reaction speed even more<sup>16</sup>. Additionally, supercritical conditions using water and benzyl alcohol were investigated by Ibarra et al.<sup>25</sup> to recover very clean carbon fibers from composites. The recovered fibers had equal tensile strength and only 12% lower stiffness compared to virgin fibers<sup>25</sup>. Typically, temperatures between 250°C and 490°C and pressure of 4 MPa to 31 MPa depending on the system is used for supercritical solvolysis processes<sup>16</sup>. These methods of chemical recycling processes have been patented and were studied intensely by Bauer and coworkers. Most promising processes were developed for epoxide, benzoxazine and phenolic resins utilizing amino alcohols as recycling agent and recovery of most of the agent after total degradation of the matrix resin via distillation due cost reasons<sup>26–28</sup> (Fig. 4).

The choice of optimized temperature, pressure, and the kind of solvolysis agent depends on the matrix resin as well as the used fibers within the composite material. Hence, not for all matrix resins a chemical recycling process is possible. In general, polar chemical bonds like ester or amid bonds are necessary for fast chemical degradation of the polymer network<sup>3</sup>.

Most advantageous on the chemical recycling of composites is the possibility to recover full-length-fibers at relatively low temperatures and regain monomeric or oligomeric components for new resin formulations or polymer synthesis. Furthermore, the process is suitable for both thermosetting and thermoplastic matrix materials as described by Cousins et al.<sup>29</sup>. Still challenging is the partially degradation of the sizing and surface of the fibers causing in some cases subsequent process steps for resizing of the recycled fibers before reusing them<sup>22, 29</sup>.

The TRL level of this recycling technology of 5 to 6 is relatively low due to different parameters needed for different composite systems massively depending on the used matrix resin<sup>17</sup>. Although the process is not yet commercially used, a closed recycling loop can be achieved as shown in Fig. 5, which reflects the great potential of this technology<sup>30</sup>. Nevertheless, upscaling and development of industrial chemical recycling processes are currently under investigation. For example, Swancor initiated a collaboration with Siemens Gamesa for the development of a chemi-

Siemens Gamesa w celu opracowania procesu recyklingu chemicznego zwanego technologią recyklingu CleaVER dla łopatek turbin wiatrowych opartych na żywicy EzCiclo, która jest termoutwardzalną żywicą epoksydową nadającą się do recyklingu i ponownego użycia<sup>31</sup>.

Aby połączyć zalety technologii recyklingu termicznego i chemicznego, analizowane są również procesy hybrydowe. Wei i współpr.<sup>32</sup> wprowadzili innowacyjną hybrydową metodę recyklingu

termochemicznego jako połączenie wstępnej obróbki solwolizy w temp. 100°C, a następnie pirolizy niskotemperaturowej w temp. 425°C i procesu utleniania w temp. 550°C. W przypadku solwolizy sugeruje się użycie kwasu octowego w celu odzyskania wysokiej jakości czystych włókien o wyższej wytrzymałości na rozciąganie. Jednak również te technologie hybrydowe są obecnie na bardzo niskim poziomie TRL i nie są dostępne komercyjnie<sup>32</sup>.

### Technologie recyklingu mechanicznego

Recykling mechaniczny to najbardziej powszechna technologia recyklingu na rynku, z poziomem TRL wynoszącym 9<sup>17</sup>. Pierwszym krokiem w tej technologii jest zwykle zastosowanie noży szczękowych, które są narzędziami do cięcia łopatek turbin wiatrowych i mogą obsługiwać elementy o dużych rozmiarach i dużej objętości materiałów kompozytowych, co pokazali Jensen i współpr.<sup>33</sup>. Stosowane są również różne kruszarki, młyny, rozdrabniacze lub młynki do wszystkich rodzajów łopatek turbin wiatrowych. Kruszenie lub rozdrabnianie łopatek turbin wiatrowych prowadzi do powstania małych fragmentów, które są następnie mielone na bardzo drobne materiały. Następnie proszki bogate w żywicę o małej gęstości są oddzielane od cięższego materiału włóknistego za pomocą mechanicznego przesiewania<sup>15</sup>. Uzyskany materiał może być wykorzystywany do produkcji nowych części z tworzyw sztucznych lub jako wypełniacz w budownictwie. Tak więc 100 t odpadów kompozytowych może zastąpić 200 t każdego piasku i wapienia, a także 450 t węgla w procesie produkcji cementu, o czym wspomina niemiecka cementownia Holcim i duńska firma Fiberline<sup>3,17</sup>. Odzyskany materiał może być również stosowany w kompozytach geopolimerowych, badanych przez Pławecką i współpr.<sup>34</sup>, które zapewniają dużą odporność chemiczną i pogodową oraz szybszy czas wiązania

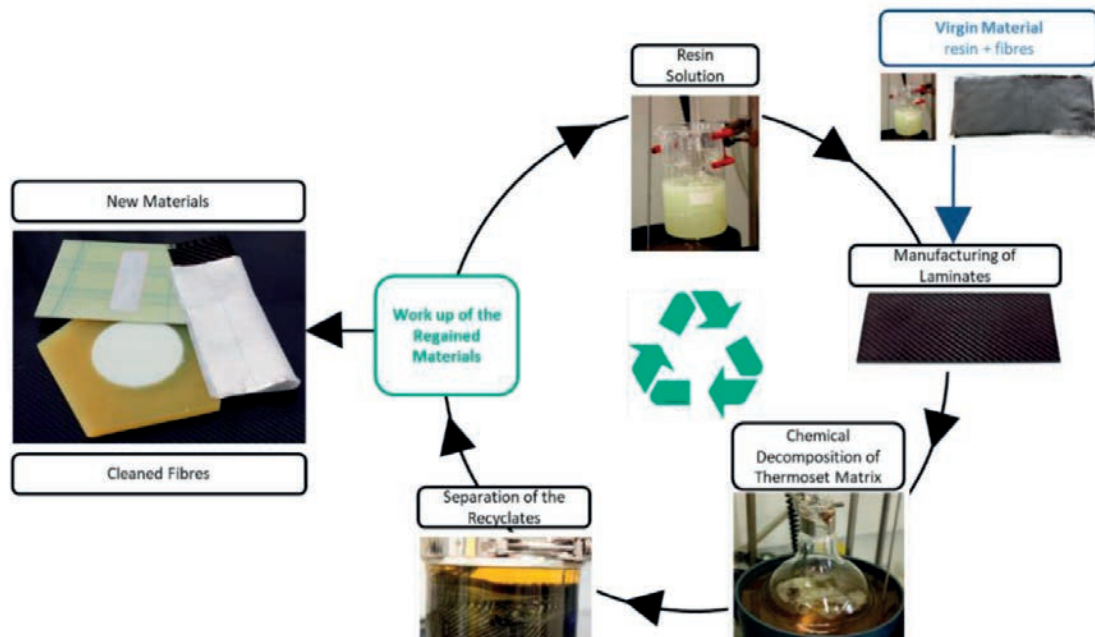


Fig. 5. Closed recycling loop using chemical recycling processes for wind turbine blades

Rs. 5. Zamknięta pętla recyklingu wykorzystująca procesy recyklingu chemicznego łopatek turbin wiatrowych

cal recycling process called CleaVER recycling technology for wind turbine blades based on EzCiclo resin, that is a recyclable and reusable thermosetting epoxy resin<sup>31</sup>.

To combine the advantages of thermal and chemical recycling technologies also hybrid processes are investigated. Wei et al.<sup>32</sup> introduced an innovative hybrid thermo-chemical recycling method as combination of a solvolysis pre-treatment at 100°C and subsequent low-temperature pyrolysis at 425°C and oxidation process at 550°C. For the solvolysis the usage of acetic acid is suggested to recover high quality clean fibers with higher tensile strength. However, also this hybrid technologies are at very low TRL currently and not commercially available<sup>32</sup>.

### Mechanical recycling technologies

This is the most common recycling technology on the market and with TRL 9 already intensely researched<sup>17</sup>. The first step normally involves jaw cutters, which are tools for sectioning wind turbine blades and can handle large sizes and volumes of composite materials shown by Jensen et al.<sup>33</sup>. There exist also different crushers, mills, shredders, or grinders for all kinds of wind turbine blades. The crushing or shredding of wind turbine blades lead to small fragments that are subsequently grinded into very fine materials. Afterwards, the low-density resin-rich powders are separated from the heavier fibrous material via mechanical sieving<sup>15</sup>. The resulting material can be used either for production of new plastic parts or as fillers in building industry. Thus, 100 t of composite waste can replace 200 t of each sand and limestone as well as 450 t of coal in the production process of cement as mentioned by the German cement factory Holcim and the Danish company Fiberline<sup>3,17</sup>. The recovered material can also be used in geopolymer composites investigated by Pławecka et al.<sup>34</sup>, that provide high chemical and weather resistance and a faster onset on setting time than con-



niż beton. Dłatego frakcje odpadowe zmielonych łopat turbin wiatrowych miesza się z wodnym alkalicznym roztworem szkła wodnego sodowego i pozostawia do konsolidacji w temp. 75°C przez 24 h. Uzyskany geopolimer o zawartości 5–15% odpadów z łopat miał wytrzymałość na ściskanie równą 50 MPa. Ta wartość była porównywalna z referencjami geopolimerowymi bez odpadów z łopat. Próbkę z odpadami z łopat zapewniały jednak absorpcję wyższą o ok. 10%. W związku z tym wykorzystanie odpadów z łopat turbin wiatrowych jako wypełniacza w geopolimerach drastycznie obniżyłoby cenę geopolimerów<sup>34</sup>). Jednak zastępowanie piasku materiałem włóknistym z mechanicznie przetworzonych łopatek turbin wiatrowych pozostaje do tej pory głównym zastosowaniem materiału recyklingowego<sup>16</sup>).

Podsumowując, recykling mechaniczny może być tylko etapem pośrednim, po którym muszą nastąpić procesy recyklingu termicznego lub chemicznego, aby zamknąć pętlę recyklingu i stworzyć zrównoważoną produkcję łopat turbin wiatrowych. Przemysł proponuje nowe zastosowania dla materiałów pochodzących z recyklingu łopat turbin wiatrowych, ale nadal istnieje duże zapotrzebowanie na wnikliwe badania ze względu na rozwój odnawialnych źródeł energii i związanych z tym problem odpadów.

## Finansowanie

Niniejsze badania zostały sfinansowane przez niemieckie Federalne Ministerstwo Gospodarki i Klimatu w ramach projektu RIK (numer referencyjny: 34220501). Ponadto projekt WIR!-WI+R - ThermRep (numer referencyjny: 03WIR2504), a także projekt BioLighHeal (numer referencyjny: 13XP5173) zostały sfinansowane przez niemieckie Federalne Ministerstwo Edukacji i Badań Naukowych.

crete. Therefore, waste fractions of milled wind turbine blades are mixed with a aqueous alkaline sodium water glass solution and allow to consolidate at 75°C for 24 h. The resulting geopolymer with 5% to 15% content of blade waste had a compressive strength of 50 MPa. This value was comparable to geopolymer references without blade waste. But the samples with blade waste provided an about 10% higher absorbability. Hence, the utilization of wind turbine blade waste as filler in geopolymers would decrease the price for geopolymers drastically<sup>34</sup>). However, the substitution of sand by fiber material from mechanically recycled wind turbine blades remains up to now the main application for the recycling material<sup>16</sup>).

Summarizing, the mechanical recycling can only be an intermediate step and must be followed by thermal or chemical recycling processes to close the recycling loop and to create a sustainable wind turbine blade production. Nevertheless, the industry invents steadily new applications for recycled materials from wind turbine blades, but there is still a continuing high demand for research due to the expansion of renewable energies and the associated waste problem.

## Funding

This research received funding by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action within a RIK project (reference number 34220501) Additionally, the project WIR!-WI+R – ThermRep (reference number: 03WIR2504) as well as the project BioLighHeal (reference number: 13XP5173) was funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

Received/Otrzymano: 18-12-2023

## REFERENCES/LITERATURA

- [1] M. Bošnjakovic, M. Katinic, R. Santa, D. Maric, *Appl. Sci.* 2022, **12**, 8653; doi: 10.3390/app12178653.
- [2] A. Boyano, J.M. Lopez-Guede, L. Torre-Tojal, U. Fernandez-Gamiz, E. Zulueta, F. Mujika, *Materials* 2021, **14**, 593; doi: 10.3390/ma14030593.
- [3] L. Mishnaevsky Jr., *Materials* 2021, **14**, 1124; doi: 10.3390/ma14051124.
- [4] L. Mishnaevsky Jr., *Wind Energy* 2019, **22**, 1636; doi: 10.1002/we.2378.
- [5] M. Abend, S. Zechel, U.S. Schubert, M.D. Hager, *Molecules* 2019, **24**, 3597; doi: 10.3390/molecules24193597.
- [6] [https://www.werkstofftechnologien.de/fileadmin/media/projekte/Biologisierung/Projektsteckbriefe\\_AChEMA/BioLightHeal\\_BMBF\\_Praesentation\\_Achema\\_08\\_2022\\_Englisch\\_C2.pdf](https://www.werkstofftechnologien.de/fileadmin/media/projekte/Biologisierung/Projektsteckbriefe_AChEMA/BioLightHeal_BMBF_Praesentation_Achema_08_2022_Englisch_C2.pdf), access 16.09.2023.
- [7] C. Uhlig, M. Bauer, J. Bauer, O. Kahle, A.C. Taylor, A.J. Kinloch, *React. Funct. Polym.* 2018, **129**, 2; doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2017.10.004.
- [8] C. Uhlig, O. Kahle, O. Schäfer, D. Ewald, H. Oswaldbauer, J. Bauer, M. Bauer, *React. Funct. Polym.* 2019, **142**, 159; doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2019.06.012.
- [9] L. Mishnaevsky Jr., G. Dai, *Compos. Struct.* 2014, **117**, 156; doi: 10.1016/j.compstruct.2014.06.027.
- [10] L. Mishnaevsky Jr., K. Branner, H.N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, B.F. Sørensen, *Materials* 2017, **10**, 1285; doi: 10.3390/ma10111285.
- [11] K. Kong, K. Dyer, C. Payne, I. Hamerton, P.M. Weaver, *Renew. Energy Focus* 2023, **44**, 390; doi: 10.1016/j.ref.2022.08.005.
- [12] <https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/report/im-blickpunkt/reparieren-statt-entsorgen/reparieren-statt-entsorgen.html>, access 16.09.2023.
- [13] J. Solimine, C. Niezrecki, M. Inalpolat, *Struct. Health Monit.* 2020, **19**, 1711; doi: 10.1177/1475921719895588.
- [14] K. Fischer, D. Coronado, *VGB PowerTech* 2015, **7**, 51.
- [15] M.Y. Khalid, Z.U. Arif, M. Hossain, R. Umer, *Renew. Energy Focus* 2023, **44**, 373; doi: 10.1016/j.ref.2023.02.001.
- [16] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, S. Zafar, *Compos. B Eng.* 2021, **215**, 108768; doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.
- [17] E.B. Paulsen, P. Enevoldsen, *Energies* 2021, **14**, 4247; doi: 10.3390/en14144247.
- [18] J. Smoleń, P. Olesik, J. Jała, A. Adamcio, K. Kurtyka, M. Godzierz, R. Kozera, M. Koziół, A. Boczkowska, *Polymers* 2022, **14**, 2925; doi: 10.3390/polym14142925.
- [19] Z. Kavaliauskas, R. Kezelis, V. Grigaitiene, L. Marcinauskas, M. Milieška, V. Valincius, R. Uscila, V. Snapkauskienė, D. Gimžauskaite, A. Baltušnikas, *Materials* 2023, **16**, 3089; doi: 10.3390/ma16083089.
- [20] A. Rahimizadeh, M. Tahir, K. Fayazbakhsh, L. Lessard, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 2020, **131**, 105786; doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105786.
- [21] D. Åkesson, Z. Foltynowicz, J. Christéen, M. Skrifvars, *J. Reinf. Plast. Compos.* 2012, **31**, 1136; doi: 10.1177/0731684412453512.
- [22] A. Dorigato, *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2021, **4**, 116; doi: 10.1016/j.aiepr.2021.02.002.
- [23] E. Lester, S. Kingman, K.H. Wong, C. Rudd, S. Pickering, N. Hilal, *Mater. Res. Bull.* 2004, **39**, 1549; doi: 10.1016/j.materresbull.2004.04.031.
- [24] <https://www.b-tu.de/news/artikel/18930-nachhaltiges-und-ressourcenschonendes-recycling-von-kunststoffabfaellen>, access 16.09.2023.
- [25] R.M. Ibarra, M. Sasaki, M. Goto, A.T. Quitain, S.M.G. Montes, J.A. Aguilar-Garib, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2014, **17**, 369; doi: 10.1007/s10163-014-0252-z.
- [26] Pat. USA 2019241713 (A1), 08.08.2019.
- [27] Pat. USA 2019177471 (A1), 13.06.2019.
- [28] Pat. CN107849289 (A), 27.03.2018.
- [29] D.S. Cousins, Y. Suzuki, R.E. Murray, J.R. Samaniuk, A.P. Stebner, *J. Clean. Prod.* 2019, **209**, 1252; doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.
- [30] J. Beauson, A. Laurent, D.P. Rudolph, J.P. Jensen, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, **155**, 111847; doi: 10.1016/j.rser.2021.111847.
- [31] <https://www.compositesworld.com/products/swancor-launches-recyclable-thermosetting-epoxy-resin>, access 16.09.2023.
- [32] Y. Wei, S.A. Hadigheh, *Compos. B Eng.* 2023, **260**, 110786; doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110786.
- [33] J.P. Jensen, K. Skelton, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **97**, 165; doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.
- [34] K. Pławecka, J. Przybyła, K. Korniejenko, W.-T. Lin, A. Cheng, M. Łach, *Materials* 2021, **14**, 6539; doi: 10.3390/ma14216539.