

^aZachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska; ^bAnmet, Szprotawa, Polska;
^cPolitechnika Warszawska, Polska; ^dBrandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Niemcy;
^eFraunhofer Institute for Applied Polymer Research IAP, Wildau, Niemcy

Reusing and recycling of composite wind turbine blades.

*A review of current practices and prospects. Part 3**. Various proposals offered by small and middle companies*

Ponowne wykorzystanie i recykling kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Przegląd obecnych praktyk i perspektywy. Część III**. Różne propozycje oferowane przez małe i średnie firmy

DOI: 10.15199/62.2024.2.4

Przedstawiono sposoby ponownego wykorzystania łopat turbin wiatrowych przez małe i średnie firmy (m.in. polską firmę Anmet) oraz dokonano przeglądu różnych propozycji recyklingu. Zaprezentowano nowe możliwości systemów rozdrabniających oraz obiekty architektury, budownictwa drogowego, a także bloki geotechniczne, platformy pływające i wieże widokowe. Uwzględniono także kompozytowe płyty wiórowe oraz odzysk włókien węglowych w procesie pirolizy odpadów.

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 32 refs., of various new proposals for recycling and reusing of wind turbine blades by small companies (including the Polish Anmet company). New projects on shredding blades as well as on architecture objects, road construction, geotechn. blocks, floating platforms and observation towers were presented. Prodn. of composite chipboard panels and recovery of carbon fibers by waste pyrolysis were also included.

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

W recyklingu kompozytowych łopat turbin wiatrowych ważną alternatywą są innowacyjne rozwiązania w zakresie zmiany wykorzystania całych łopat turbin wiatrowych¹⁾. Continuum Composite Recycling (Dania) ponownie wykorzystuje kompozyty uzyskane z łopat turbin wiatrowych, stosując technologię transformacji neutralnej uwzględniającą emisję CO₂. Firma wykorzystuje głównie części z włókna szklanego/poliuretanu, które są mechanicznie przekształcane w surowe, podstawowe elementy. Następnie przygotowywane są unikatowe mieszanki i produkowane są panele o dużej gęstości. Panele kompozytowe mogą mieć zastosowanie w budownictwie lub mogą być formowane w procesie prasowania w produkty codziennego użytku, takie jak fasady, drzwi przemysłowe i blaty kuchenne²⁾.

Enel Green Power (Rzym, Włochy) i Energy Vault (Lugano, Szwajcaria) oferują alternatywne metody wyko-

Another alternative is innovative repurposing solutions of whole wind turbine blades¹⁾. Continuum Composite Recycling (Denmark) reuses composites obtained from wind turbine blades via a CO₂-neutral transformation technology. The company works mainly with glass fiber/polyurethane parts, which are mechanically transformed into raw, basic constituents. Afterwards, unique blends are prepared, and high-density panels are manufactured. Composite panels can be used in the construction industry or formed into day-to-day products such as facades, industrial doors and kitchen countertops through the pressing process²⁾.

Enel Green Power (Rome, Italy) and Energy Vault (Lugano, Switzerland) offer alternative ways to utilize wind turbine blades. The first proposed solution is to make products from shredded blades for the construction industry or furniture manufacturing. The other, more innovative, solution is to manufacture composite blocks as a part of the EVx system, a solution for storing energy developed by Energy Vault. The EVx system relies on gravity's power and water's movement to store and discharge electricity, with composite blocks manufactured from recycle³⁾.

** Part 2/Cz. II Przem. Chem. 2024, 103, No. 2, s. 234

* 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

rzystania łopat turbin wiatrowych. Jednym z proponowanych rozwiązań jest wytwarzanie wyrobów z rozdronionych łopat dla przemysłu budowlanego lub produkcji mebli. Innym, bardziej innowacyjnym rozwiązaniem jest produkcja bloków kompozytowych z recyklatu w ramach systemu EVx (rozwiązanie magazynowania energii opracowane przez Energy Vault). System EVx opiera się na wykorzystaniu siły grawitacji i ruchu wody w celu magazynowania i odprowadzania energii elektrycznej³).

Naukowcy z Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Windesheim (Zwolle, Niderlandy) we współpracy z producentem żywicy AOC (Zwolle, Niderlandy) i specjalistą ds. gospodarki odpadami SUEZ (Paryż, Francja) opracowali inną metodę ponownego wykorzystania kompozytów ze zużytych łopat turbin wiatrowych EoL. Opracowana metoda nosi nazwę techniki *push-pultrusion*. W tej metodzie paski lub płatki powstałe w wyniku cięcia łopat turbin wiatrowych wykorzystuje się w nowych wyrobach, takich jak ściany oporowe, meble, belki prowadzące i maty dźwigowe. Opracowana technika wykorzystuje do 70% materiału pochodzącego z recyklingu, charakteryzuje się niskim śladem węglowym i nadaje się do wdrożenia przemysłowego¹).

Sieć Re-Wind Network, w skład której wchodzi University College Cork, Queens University Belfast, Georgia Tech i Munster Technological University, zbudowała kładkę dla pieszych, wykorzystując jako jej dźwigary dwie przetworzone łopaty wiatrowe LM 13.4 firmy Nordex (Rockstock, Niemcy). Kładkę o rozpiętości 6 m i szerokości 2 m, zainstalowano w kamieniołomie w Draperstown w Magherafelt w Irlandii Północnej⁴.

Inna koncepcja przygotowana przez Re-Wind opisuje budowę 8,5-metrowej kładki dla pieszych w Cork (Irlandia Północna). Jeszcze innym przykładem jest koncepcja wykorzystania zużytych łopat turbin wiatrowych do budowy konstrukcji mostowej, opracowana w ramach pracy magisterskiej Johannya Kullberga i Davida Nygrena na Politechnice Chalmers w Göteborgu (Szwecja). Zakładała ona zastosowanie odcinków dwóch łopat o długości 20 m, ułożonych równolegle obok siebie nad przeszkodą, ale niepołączonych konstrukcyjnie, tj. pracujących jako niezależne belki⁵).

Ponowne wykorzystanie i różne propozycje recyklingu łopat turbin wiatrowych firmy Anmet

Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio ze Szprotawy (Polska) powstało w 1999 r. jako firma zajmująca się recyklingiem metali. Dostarcza ona kompleksowe rozwiązania dla właścicieli i operatorów farm wiatrowych w zakresie cięcia, transportu i recyklingu łopat, a od 2015 r. firma rozszerzyła swoje usługi o recykling wyeksploatowanych łopat turbin wiatrowych. Firma Anmet opracowała także technologię odzyskiwania włókien węglowych z łopat turbin wiatrowych i pracuje nad nowymi materiałami i produktami wykonanymi z kompozytów po ich recyklingu⁶).

The researchers from Windesheim University of Applied Sciences (Zwolle, Netherlands) in partnership with resin manufacturer AOC (Zwolle, Netherlands) and waste management specialist SUEZ (Paris, France), developed another repurposing method for EoL composite wind turbine blades. The developed method is called the “push-pultrusion technique”. In this method, strips or flakes obtained by cutting wind turbine blades are manufactured in new components, e.g. a retaining wall, furniture, guiding beams and crane mats. The developed technique uses up to 70% of recycled material, has a low carbon footprint and is ready for industrial implementation¹).

Re-Wind Network, comprising the University College Cork, Queens University Belfast, Georgia Tech and Munster Technological University, constructed a footbridge using two repurposed LM 13.4 wind blades from Nordex (Rockstock, Germany) as bridge girders. The Blade Bridge, with a span of 6 m and a 2 m width, was situated in a quarry in Draperstown, Magherafelt in Northern Ireland⁴).

Another conception prepared by Re-Wind describes the construction of an 8.5-m footbridge in Cork (North Ireland). Another example is a concept for using used wind turbine propellers to build a bridge structure developed as part of the master’s thesis of Johanna Kullberg and David Nygren at Chalmers University of Technology in Gothenburg (Sweden). It assumed the use of sections of two propellers 20 m long, arranged in parallel side by side over an obstacle, but not structurally connected, i.e. working as independent beams⁵).

Various proposal for recycling and reusing of wind turbine blades by Anmet firm

Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio from Szprotawa (Poland) was set up in 1999 as a company dealing with metal recycling. It provides complex solutions for owners and operators of wind turbine farms as far as blade shredding, transport and recycling is concerned. Since 2015, the company has widened its range of services to include recycling of used-up wind turbine blades. Anmet has developed its own technology of recovering carbon fiber from turbine blades and is investigating new materials and products made from recycled composites⁶).

During its operation, Anmet gained new partners who help the company to further develop and to maintain its quality. In 2019, in cooperation with a German partner, the trademark Wings For Living⁷ was created. It is responsible for the promotion and global distribution of furniture and other products made by Anmet from recycled blades. GP Renewables⁸ followed suit in 2020. It supports the mother company with its expertise and ability to build business relationships with customers. At the end of 2022, another trade mark GP Reblade⁹ was created to even more

W toku działań firma Anmet pozyskała nowych partnerów, którzy pomagają dalej rozwijać się w zakresie i jakości działalności firmy. Najpierw, w 2019 r. powstała we współpracy z niemieckim partnerem marka *Wings for Living*⁷⁾, która zajmuje się promowaniem i dystrybucją na cały świat wykonanych przez firmę Anmet mebli oraz wyrobów z recyklingu łopat. Od 2020 r. dołączyła także grupa GP Renewables⁸⁾, która wspiera wiedzą oraz pomaga w budowaniu relacji biznesowych z klientami. Z końcem 2022 r. stworzono także wspólnie markę *GP Reblade*⁹⁾, aby jeszcze skuteczniej docierać do klientów i świadczyć usługi na jak najwyższym poziomie.

Firma Anmet została laureatem Polsko-Niemieckiej Nagrody Gospodarczej w 2021 r., zorganizowanej przez Polsko-Niemiecką Izbę Przemysłowo-Handlową (AHK Polska) w Warszawie. Wspólnie z niemieckim partnerem Anmet uruchomił projekt ponownego wykorzystania i rynkowego recyklingu łopat turbin wiatrowych. W ten sposób powstało *Wings for Living*, które sprzedaje meble z łopat do użytku zewnętrznego. Designerskie meble znalazły już swoich pierwszych klientów i cieszą się coraz większą popularnością¹⁰⁾.

Projekt *DecomTools* rozpoczęty w 2018 r. (Interreg Region Morza Północnego – nr projektu 20180305091606) obejmował fazę likwidacji morskich farm wiatrowych. Przedstawiono trzy koncepcje dla wycofanych z eksploatacji łopat: procedura w piecach cementowych, polegająca na pirolizie i polegająca na zmianie przeznaczenia, przy czym wszystkie trzy koncepcje miały swoje specyficzne zalety i wady¹¹⁾.

Cięcie łopat

Cięcie łopat prowadzone jest za pomocą linowej piły ramowej, która mocowana jest bezpośrednio do ramienia koparki gąsienicowej o wadze 18–30 t. Mocowanie odbywa się przy użyciu uniwersalnych złączy odpowiednich dla danego typu maszyny. Lina diamentowa posiada specjalnie dobrane koraliki z ostrzami o odpowiednim kształcie i wymiarach. Konstrukcja piły umożliwia cięcie łopat o średnicy w piąście do 4 m.

Cięcie odbywa się na mokro z natryskiem wody. Na ogół wykonuje się 2–4 cięć, tak aby uzyskać odcinki o długości do 12 m. Taka długość umożliwia transport łopat za pomocą zwykłych samochodów typu ciągnik siodłowy z naczepą. Podczas jednego cięcia powstaje 0,5–3 kg wiórów kompozytowych. Aby ograniczyć zapylenie środowiska, wióry wychwytywane są przez rozpylaną wodę i trafiają w postaci zawiesiny na rozłożoną matę filtracyjną, gdzie są osadzane. Średnica wiórów kompozytowych waha się w zakresie 0,1–5 mm. Na jedno cięcie używa się średnio 1 m² włókniny. Włókninę zabiera się wraz z pociętymi łopatom i po wysuszeniu oddaje się do utylizacji. Włóknina stanowi w 80% materiał z recyklingu. Na jedno cięcie zużywa się 20–50 L wody. W projektowaniu jest obecnie system umożliwiający używanie wody w obiegu zamknię-

successfully reach clients and serve them at the highest level.

Anmet was awarded by Polish-German Chamber of Industry and Commerce (AHK Polska) in Warsaw, in 2021. Together with a German partner, Anmet implemented a project on how to recycle wind turbine blades. This is how Wings for Living was created. It sells outdoor furniture made with recycled blades. Designer furniture is getting more and more popular with the customers¹⁰⁾.

As DecomTools project started in 2018 (Interreg North Sea Region – Project Number 20180305091606) it had a focus on decommissioning phase of offshore wind farms. It provided three circular concepts for decommissioned blades: cement kiln route, pyrolysis, and repurposing, with all three having their special pros and cons¹¹⁾.

Shredding blades

Blades are cut into shreds with a frame saw, which is mounted directly on the arm of a tracked excavator (mass 18–30 t). The saw is connected to the excavator with universal connectors, specific for the machine. The diamond wire has specially selected beads with cutting elements of an appropriate shape and size. The construction of the saw enables cutting blades with the diameter at the hub of 4 m.

The cutting process occurs under water flow. Typically, from 2 to 4 incisions are made to prepare components with the length of up to 12 m. This length allows blades to be transported with universal articulated trucks with a trailer. Between 0.5 and 3 kg of composite chip is produced during one cut. Chip is captured by the sprayed water and goes as a mixture on a filtration mat. The diameter of composite chip is between 0.1 and 5 mm. An average of 1 m² of non-woven fabric is used for one incision. The non-woven fabric is collected together with blades and after drying it is utilized. 80% of the fabric is made of recycled materials. Between 20 and 50 L of water are used for one incision. At the design stage there is a circular system that uses water in a closed circuit (recovery of approximately 80% of water). The system will consist of: a rubber basin placed under the blade during cutting, flexible screens that prevent water from splashing, a tank with a pump and a filtration system. The whole system is an original invention of Anmet from Szprotawa (Poland). The system will enable to cut blades in locations with the most rigorous standards of environmental protection.

Architecture

Small architecture is a method of recycling blades, in which furniture for indoor or outdoor use is made. Small architecture includes benches, deck chairs, swings, tables, bicycle sheds, bus stops, sheds with solar panels, plant pots, retaining walls, bicycle stands, sculptures, e.g. a fish or a giraffe. All of these objects contain a minimum of 80% material from the blades. The structure is

tym (odzysk ok. 80% wody). System będzie się składał z gumowego basenu umieszczonego w miejscu cięcia pod łopata, ekranów elastycznych osłaniających przed rozpryskiem wody, zbiornika z pompą oraz systemu filtracyjnego. Cały system jest konstrukcją autorską Przedsiębiorstwa Wielobranżowego Anmet Andrzej Adamcio ze Szprotawy (Polska). Użycie tego systemu będzie umożliwiać cięcie łopat w miejscach o najbardziej rygorystycznych wymogach ochrony środowiska.

Architektura

Jedną z metod recyklingu łopat jest wykonywanie z nich tzw. małej architektury, czyli różnego rodzaju mebli z przeznaczeniem do użytku zarówno zewnętrznego, jak i wewnątrz pomieszczeń. Do małej architektury zaliczają się: ławki, leżaki, huśtawki, stoliki, wiaty rowerowe, przystanki autobusowe, wiaty z fotowoltaiką, donice, murki oporowe, stojaki rowerowe, rzeźby artystyczne (np. ryba, żyrafa). Wyroby te wykonane są co najmniej w 80% z materiału łopat. Uzupełnieniem takich konstrukcji są deski kompozytowe wykonane z materiałów z recyklingu odzieży lub drewna. Używane są też tu nieduże ilości stalowych elementów w postaci złączy śrubowych, rur, płaskowników, profili. W procesie produkcji używa się niewielkich ilości farb i żywic w celu naprawy powierzchni i nadania im estetycznego wyglądu. Trwałość elementów architektonicznych szacuje się zwykle na kilkadziesiąt lat. Konstrukcje powstają na podstawie projektów własnych. W ramach współpracy z Uniwersytetem Zielonogórskim stworzono koncepcje dużych form artystycznych składających się z kilkadziesiątu łopat. Koncepcje te mają odgrywać rolę atrakcji turystycznych, szczególnie na terenach z niewielką szatą roślinną oraz na terenach pustynnych. Powierzchnie boczne łopat mogą posłużyć do zamocowania paneli fotowoltaicznych. W jednej z tych koncepcji (*WINGS*) do jej budowy wykorzystuje się 20 i więcej łopat w całości i bezodpadowo.

Szesnaście wzorów użytkowych „Mała architektura z łopat elektrowni wiatrowych” jest zastrzeżonych w EUIPO (Urząd Unii Europejskiej ds. Własności Intelektualnej), nr 006996617. Odpady powstające przy produkcji małej architektury oddawane są do recyklingu lub służą do produkcji paliwa alternatywnego.

Przykłady obiektów małej architektury z łopat elektrowni wiatrowych przedstawiono na rys. 1, obiektów

complemented with composite planks made from recycled clothing or wood. A small number of steel elements, such as bolts, pipes, flat bars and profiles, is also used in the structure. A small amount of paints and resins are used to repair surface and for the structure to look nice. The life of the product is estimated to be several dozen years. The structures are made according to our own design. Some concepts consisting of several dozen blades were created in cooperation with the University of Zielona Góra. The designs are supposed to play the role of tourist attractions, particularly in terrain with little vegetation and in desert. The side planes of blades can be used to mount photovoltaic panels. In the “WINGS” concept, 20 and more blades are used as whole elements, without any waste.

Sixteen designs in the category “Small architecture from wind turbine blades” are patented in EUIPO (European Union Intellectual Property Office) – number 006996617. The waste generated during the production of small architecture is further recycled and used to produce an alternative fuel.

Some examples of small architecture built from wind turbine blades are shown in Fig. 1a and 1b, some engineering objects are presented in Fig. 2–4 and 6–9 and objects of art can be seen in Fig. 5.



(a)



(b)

Fig. 1. (a) A bench in front of European Parliament Edifice in Brussels, (b) a table with a chair

Rys. 1. (a) Ławka przed gmachem Parlamentu Europejskiego w Brukseli, (b) stół wraz z siedziskiem



(a)



(b)

Fig. 2. (a) A stairs, (b) a deck

Rys. 2. (a) Schody, (b) pomost



Fig. 3. Bus stop

Rys. 3. (a) Przystanek, (b) wiata



(a)

(b)

Fig. 4. A cellar: (a) look from outside, (b) look from inside

Rys. 4. Piwniczka: (a) widok z zewnątrz, (b) widok wewnątrz

inżynierskich na rys. 2–4 i 6–9, a obiektów artystycznych na rys. 5.

Designerskie meble znalazły już swoich pierwszych klientów i cieszą się coraz większą popularnością. Sprzedano ponad 350 mebli, które trafiły do Polski, Niemiec, Niderlandów, Grecji, Anglii, Francji, Czech oraz Austrii i Szwajcarii. Ceny można znaleźć u dystrybutora.

Podczas WindEurope Annual Event 2022 w Bilbao (5–7 kwietnia 2022 r.) firma Anmet prezentowała swoje meble na stanowisku promocyjnym oraz wzięła udział w panelu, podczas którego informowała o tych rozwiązaniach¹².

Firma Anmet wraz z Instytutem Sztuk Wizualnych Uniwersytetu Zielonogórskiego przedstawiła meble, które wcześniej zaprojektowały studentki tej uczelni na wystawę czasową Województwa Lubuskiego w ramach stoiska Polski na EXPO Dubai 2020^{13, 14}), a także podczas 4 Design Days w dniach 26–29 stycznia 2023 r. w Katowicach¹⁵).

Firma Anmet otrzymała wyróżnienie jako innowacyjne mikroprzedsiębiorstwo za najciekawsze innowacje wprowadzone na rynek w latach 2019–2021 podczas gali Kongresu Gospodarczego Marszałka Województwa Lubuskiego, która odbyła się 13 października 2022 r. Ponadto firma Anmet otrzymała nagrodę za współpracę międzynarodową, dzięki wygenerowaniu innowacji procesowych i produktowych przy odzyskiwaniu włókien węglowych oraz powtórnym wykorzystaniu łopat turbin wiatrowych. W wyniku wykorzystania materiałów powstały m.in. nowy rodzaj płyty



Fig. 5. Garden embellishment – a fish

Rys. 5. Ozdoba ogrodowa – figura ryby

Designer furniture has found its first customers and is getting to be more popular. 350 furniture units have been sold in Poland, Germany, the Netherlands, Greece, England, France, Czech Republic, Austria and Switzerland. Prices can be found at the distributors’.

During the annual event of WindEurope 2022 in Bilbao (5–7 April 2022), Anmet presented its furniture at a promotion outlet and participated in a panel, where it talked about its solutions¹².

Anmet, together with the Institute of Visual Arts from the University of Zielona Góra, presented furniture designed by students in the university’s competition, as part of Poland’s contribution to EXPO Dubai 2020^{13, 14}) and during 4 Design Days, 26–29 January 2023 in Katowice¹⁵).

Anmet was awarded as an innovative micro-company for the most interesting innovation implemented 2019–2021, at the gala evening of Business Congress organized by the marshal of Lubuskie region, on 13 October 2022. Anmet was awarded for international cooperation which resulted in process and product innovations owing to the recovery of carbon fiber and recycling of wind turbine blades. The recovered and recycled material was used to produce a new kind of oriented strand boards (OSB) that contained shredded blades, furniture, small architecture, construction blocks and geotechnical blocks for reinforcement of hills and landslides¹⁶).

Road construction

Another method of reusing blades is building different types of bridges and foot bridges with distances between supports of up to 100 m. The first structure of this kind in the world was a foot-bicycle bridge completed in December 2021. The total length was 22 m with the distance between supports of over 16 m. The bridge was made with two 11 m LM 23 blades connected with steel flanges. The bridge rests on 10 steel truss elements (each element is individually fitted), bolted to the side plane of blades. It is made from composite planks, with steel railing. Even now, it is the longest structure of this kind in the world. The weight of the

OSB z udziałem mielonych łopat, meble i mała architektura oraz bloki konstrukcyjne i geotechniczne do umocnień zboczy i osuwisk¹⁶.

Budownictwo drogowe

Kolejną metodą powtórzonego wykorzystania łopat jest budowa różnego rodzaju mostów i kładek o rozpiętościach do 100 m. Pierwszą taką konstrukcją na świecie była kładka rowerowo-pieszka oddana do użytku w grudniu 2021 r. w Szprotawie (woj.

lubuskie). Całkowita długość kładki wyniosła 22 m, szerokość 4,25 m, a rozpiętość między podporami ponad 16 m. Kładkę wykonano z dwóch 11-metrowych odcinków łopat LM 23 połączonych stalowymi kołnierzami. Pomost ze stalowymi barierkami, spoczywający na 10 stalowych żebrach kratownicowych (każde z 10 żeber indywidualnie dopasowano do miejsca montażu) przykręconych do powierzchni bocznych łopaty, został wykonany z desek kompozytowych. Jak dotychczas jest to najdłuższa tego typu konstrukcja na świecie. Ciężar kładki wynosi 6 t. Przygotowanie łopat do wykonania kładki polegało na dokonaniu oględzin stanu łopat, odnowieniu pokrycia lakierniczego, wywierceniu otworów w miejscu mocowania żeber do łopaty. Konstrukcję przęsła kładki zgłoszono do opatentowania bądź już otrzymano patent w Polsce¹⁷, Danii¹⁸, Niderlandach¹⁹, Niemczech²⁰ i Wielkiej Brytanii²¹.

Projekt architektoniczny kładki dla pieszych i rowerzystów (rys. 6) wykonano w Politechnice Rzeszowskiej. Prace były w połowie finansowane w projekcie PARP nr POIR.02.03.02-08-0004/19-00 „Alternatywa utylizacji turbin wiatrowych starszej generacji. Wykorzystanie kompozytowych łopat do budowy mostowych obiektów inżynierskich”. Kładkę wykonano w firmie Anmet.

Dwubiegowa kładka dla pieszych i rowerzystów, wykonana na podbudowie łopaty turbiny wiatrowej, została przerzucona przez rzekę Szprotawę dla ułatwienia komunikacji między ulicami Sienkiewicza i Chrobrego. Jest to pierwszy taki projekt zrealizowany w Polsce^{5, 22–25}.

Zaletą konstrukcji jest jej lekkość oraz odporność na warunki atmosferyczne, przede wszystkim elementu nośnego wykonanego z łopaty, która to nie wymaga konserwacji. Opracowano kolejne projekty koncepcyjne kładki o rozpiętości między podporami 50 m. W założeniu kładka ma być zawieszona na linach, a pylony mają być wykonane z łopat. Przewiduje się możliwość przejazdu karetki pogotowia przez taką kładkę. Dla uproszczenia budowy opracowano uniwersalne żebra wykonane ze stali, które nadają się do zastosowania do każdego rodzaju łopaty i mogą być takie same na całej długości kładki. Przy wykonaniu dźwiga-



(a)



(b)

Fig. 6. A bridge for pedestrians and cyclists over the river Szprotawa

Rys. 6. Kładka dla pieszych i rowerzystów nad rzeką Szprotawa

bridge is 6 t. The preparation procedure involved checking the condition of the blades, painting blades with lacquer, drilling holes for mounting the elements to the blades. The structure of the span was patented or the patent is pending in Poland¹⁷, Denmark¹⁸, Netherlands¹⁹, Germany²⁰, the UK²¹.

The bridge for pedestrians and cyclists (Fig. 6) was designed in Rzeszow University of Technology. 50% of the works was financed by PARP nr POIR.02.03.02-08-0004/19-00 “The alternative of utilizing wind turbines of older generation. The reuse of composite blades for building bridges”. The bridge was made in Anmet.

The 22 m long and 4.25 m wide two-way bridge for pedestrians and cyclists was made in 2021 using wind turbine blades and was placed across the river Szprotawa to facilitate transport. It is the first project of this kind implemented so far in Poland^{5, 22–25}.

The advantage of bridge is the fact that it is light and that it is resistant to elements. This is particularly true of the load-bearing component made from a blade, which does not need to be maintained. We have new concept designs of bridges where the distance between supports is 50 m. In the concept, the bridge is supposed to be hanging on ropes and pylons are to be made from blades. Additionally, an ambulance will be able to pass through the bridge. For simplicity, the girders will be universal and made of steel. They can be used for any type of blade and they are the same along the whole length of the bridge. The girders are made of blades, too. There is a small amount of waste generated when drilling holes and when cutting blades to the right length. The remaining part of the blade is used to build architecture elements. In terrain that is difficult to reach, it is possible to float the bridge (after it has been sealed) to its destination where it will be mounted.

Geotechnical blocks

A high potential can be found in using blades shredded into layers for building reinforcement of road or rail track embankments. Blades are cut into layers that are

rów z łopat powstaje bardzo niewielka ilość odpadów, głównie przy wierceniu otworów montażowych i cięciu łopat na długość. Pozostałość po cięciu łopaty jest wykorzystywana do budowy elementów małej architektury. Ponadto kładka może być zastosowana w miejscach trudno dostępnych, gdzie istnieją warunki do spławienia kładki (po uprzednim uszczelnieniu) do miejsca montażu.

Bloki geotechniczne

Duży potencjał tkwi w wykorzystaniu łopat pociętych w plastry do wznoszenia umocnień nasypów drogowych, kolejowych i innych. Wykonywanie ich polega głównie na pocięciu łopat na plastry o długości ok. 0,6 m prostopadle do osi łopat i pogrupowaniu ich wymiarowo. Tak powstałe bloki ustawia się schodkowo jeden za drugim i wypełnia dowolnym materiałem dostępnym w pobliżu budowy. Nie trzeba stosować specjalnych rodzajów kruszyw, jak w przypadku gabionów.

Materiał łopat jest odporny na warunki atmosferyczne oraz na kontakt z glebą. Na budowę 1 km konstrukcji o wysokości 2 m z bloków geotechnicznych trzeba użyć 3000 bloków o łącznej wadze ok. 180 t, co odpowiada średnio 30 łopatom o długości 30 m każda. Opracowanie bloku do zastosowań geotechnicznych zostało zgłoszone do opatentowania bądź otrzymało patent w Polsce²⁶⁾ (rys. 7a), Niemczech²⁷⁾ i USA²⁸⁾. Projekt taki powstał przy współudziale Politechniki Rzeszowskiej.

Pływające platformy

Platforma to rozwiązanie umożliwiające budowę pływaków wykonanych z długich odcinków łopat. Wykonanie ich polega na pocięciu łopaty na odcinki o wymaganej długości i połączeniu ich konstrukcją w postaci lekkiej kratownicy. Przy projektowaniu platform ocenia się sztywność konstrukcyjną łopat, mając także na uwadze koszty budowy. Poszycie łopat zapewnia wystarczającą szczelność całej konstrukcji platformy. Dla zapewnienia niezatapialności wewnątrz łopaty można wypełnić styropianem lub pianką z recyklingu. Miejsca cięcia zakleja się, używając żywicy i mat szklanych. Wyporność konstrukcji wykonanej do testów w firmie Anmet wynosi 6 t. Konstrukcja wykonana została z dwóch odcinków łopaty typu VESTAS 66. Odcinki wycięte ze środkowej części łopaty mają długość po 11,3 m i ważą łącznie 2 t. Konstrukcja pływa już od roku (rys. 8). Zanurzenie bez obciążenia wynosi 0,45 m. Użycie odcinków łopat wyciętych przy piasku umożliwia zwiększenie wyporności o 30%. Platformy mogą być wykorzystywane do budowy pływających farm fotowoltaicznych, platform kąpielowych, pływających pomostów lub domów na wodzie. Pokład pomostu można wykonać z drewna lub kompozytu.

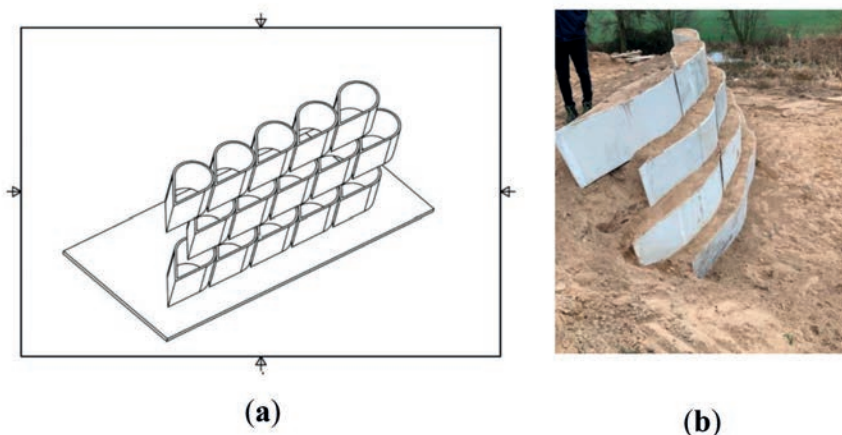


Fig. 7. Gabion: (a) according to patent²⁶⁾, (b) during construction

Rys. 7. Gabion: (a) schemat wg patentu²⁶⁾, (b) w trakcie budowy

approximately 0.6 m long perpendicular to the blade axis and grouped according to their size. Then they are placed stepwise, one on top of another. The space in-between is filled with any material available locally. No special aggregate has to be used, like for gabions.

Blade material is resistant to elements and soil. For 1 km of the element 2 m high, you can use 3000 geotechnical blocks with a total weight of 180 t, which is roughly equivalent to 30 blades 30 m long. This solution has either been patented or patent is pending in Poland (Fig. 7a)²⁶⁾, Germany²⁷⁾ and the USA²⁸⁾. This solution was designed in cooperation with Rzeszow University of Technology.

Floating platforms

This solution enables to build floating buoys from long blade elements. Blades are cut to make elements with the required length. They are connected using a light truss. The stiffness of blades is used to the constructor's advantage. Therefore stiff blades become a part of the structure. Thus, the cost can be lowered. The texture of blade material ensures necessary tightness. To make the element floatable, the inside space between blades can be filled with polystyrene or with recycled foam. The places of the cut are covered with resin and glass mats. The displacement of the structure made in Anmet was 6 t. The structure was made with two elements of VESTAS 66 blades. The elements were 11.3 m long and their total weight was 2 t. The structure has been floating on water for one year now (Fig. 8). The draught without cargo was 0.45 m. The use of elements cut out of blades close to the hub can increase displacement by 30%. Platforms can be used to build floating solar farms, recreation swimming platforms, floating bridges or houses on water. The deck can be made of wood or composite material.



Fig. 8. A floating platform

Rys. 8. Pływająca platforma



Fig. 9. The concept of an observation tower

Rys. 9. Koncepcja wieży widokowej



Fig. 10. Chipboard panels made from recycled end-of-life composites

Rys. 10. Płyta kompozytowo-wiórowa

Wieże widokowe

Wieża widokowa opiera się na dwóch całych łopatach. Materiał łopaty jest w tym przypadku wykorzystany w 100%. W konstrukcji wieży wykorzystuje się ponadto stal, drewno, kompozyt z recyklingu (deski kompozytowe). Wieże można budować zarówno z większych, jak i mniejszych łopat, oraz z różnej ich liczby. Koncepcja jest jeszcze nie zrealizowana (rys. 9).

Płyty kompozytowo-wiórowe

Płyta składa się z mielonego kompozytu pochodzącego ze zmieszanych łopat elektrowni wiatrowych lub innych konstrukcji kompozytowych, z wiórów drzewnych i żywic syntetycznych. Płyta zwykle zawiera 5–60% mas. rozdrobnionego kompozytu. Pozostałe składniki to wióry drzewne i kleje syntetyczne standardowo używane przy produkcji płyt wiórowych. Technologia wytwarzania jest dokładnie taka sama jak w przypadku standardowych płyt wiórowych, dzięki temu płyty z użyciem kompozytów można produkować w istniejących zakładach przy niewielkiej ingerencji w proces produkcyjny. Mielenie kompozytu jest skutecznie prowadzone w wielu krajach, a maszyny do procesu są ogólnie dostępne.

Firma Anmet za płytę wiórową z zawartością kompozytów otrzymała wyróżnienie w konkursie „Innowacja branży kompozytowej 2022” podczas spotkania Członków i Sympatyków Polskiego Klastra Technologii Kompozytowych, które odbyło się 1 grudnia 2022 r. Płyta wiórowa tej firmy charakteryzuje się tym, że zawiera 5–60% mas. rozdrobnionego kompozytu szklano-epoksydowego, szklano-poliestrowego lub innego kompozytu zbrojonego włóknami oraz 0–90% mas. cząstek organicznych. Rozdrobniony kompozyt pochodzi z recyklingu łopat elektrowni wiatrowych, jachtów lub innych konstrukcji i wyrobów kompozytowych lub też stanowi mieszaninę kompozytów²⁹.

Płyta (rys. 10) powstała we współpracy z Katedrą Leśnictwa i Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz ośrodkiem badań fizy-

Observation tower

An observation tower is made of two complete blades. In this case, the blade material is used 100%. The observation tower concept also uses steel, wood and recycled composite (composite planks). Towers can be built using smaller and larger blades with any number of them. That concept has not as yet been implemented (Fig. 9).

Composite chipboard panel

The panel is made from ground composite that comes from shredded blades, other composite structures, wood chip and synthetic resins. The board can contain from 5 to 60% of fragmented composite. Other ingredients include wood chip and synthetic glues commonly used to produce chipboards. Since the manufacturing technology is the same for standard chipboards, composite chipboards can be made in the existing facilities with little intervention in the production process. The grinding of composite can be done in many countries, as the machinery is widely accessible.

Anmet was awarded for its composite chipboard in the competition “Composite Innovation of 2022” during a meeting of members and followers of Polish Cluster of Composite Technologies that took place on 1 December, 2022. The invented chipboard is characterized with the fact that it contains between 5 and 60 wt.% of fragmented glass-epoxy, glass-polyester or another composite and from 0 to 90 wt.% of organic particles. Fragmented composite comes from recycled blades, yachts or other composite structures. It can also be a mixture of all the above²⁹.

The panel (Fig. 10) has been done in collaboration with the Forestry and Wood Technology department at the University of Life Sciences (Poznań, Poland) and the wood materials physical and mechanical testing center at Koszalin University of Technology (Poland)³⁰. The board's European patent is pending EP 22166241³¹.

Approximately 300 mln m³ of chipboard panels are produced in the world annually, including about

ko-mechanicznych materiałów drzewnych Politechniki Koszalińskiej³⁰). Płyta jest zgłoszona do europejskiego patentu³¹).

Na świecie rocznie produkuje się ok. 300 mln m³ płyt wiórowych, z czego w Chinach ok. 200 mln m³. Do 2021 r. włącznie w elektrowniach wiatrowych na świecie użyto 2,5 mln t kompozytów. Przy produkcji płyt wiórowych na poziomie 150 mln t/r (ciężar właściwy płyt wiórowych to ok. 0,75 t/m³) bez trudu całą ilość kompozytów zawartych w łopatach można by użyć do produkcji płyt wiórowych i to w ciągu jednego roku. Płyty takie można wielokrotnie mielić i powtórnie wytwarzać z nich ten sam produkt. Dodatkowe zalety użycia mielonego kompozytu w przemyśle wytwórczym płyt to oprócz oszczędności drewna zmniejszenie zużycia wody, energii, zmniejszenie emisji lotnych substancji organicznych (VOC), zwiększenie trwałości płyt, odporności na ogień i wodę. Zastosowanie kompozytu nie pogarsza przydatności płyty do obróbki.

Odzysk włókien węglowych w procesie pirolizy

Wytworzenie 1 t włókien węglowych wiąże się z emisją ponad 20 t CO₂, a odzysk włókien z kompozytu w procesie pirolizy powoduje emisję 1 t CO₂³²). Włókna węglowe w łopatach ułożone są równolegle do siebie i biegną na całej długości łopaty. Najczęściej włókna są umiejscowione na krawędzi zejścia, natarcia i w części środkowej po obu stronach łopaty. W pasach środkowych o szerokości ok. 500 mm i grubości od 50 mm blisko piasty do 10 mm przy końcu łopaty znajduje się ok. 80% włókien węglowych, pozostała ilość jest umiejscowiona na krawędzi natarcia i zejścia łopaty. W jednej łopacie długości 50 m znajduje się średnio 5 t włókien węglowych. W celu ich odzyskania pasy kompozytu zawierające włókna należy wyciąć z łopaty.

Takie pasy należy pociąć na długości odpowiednie do wielkości komory pirolitycznej. Warstwy z włóknem węglowym dodatkowo są jeszcze pokryte ok. 10-milimetrową warstwą kompozytu szklanego, który przez rozwarstwianie należy oddzielić od kompozytu węglowego. Proces pirolizy odbywa się wg dostępnych technik w temp. 500–550°C. W wyniku pirolizy trwającej ok. 60 min otrzymuje się sztywne bloki włókien węglowych z 10-proc. zawartością zwęglonej żywicy.

Wiązki włókien oddziela się, poddając bloki obróbce przez odpowiednie prasowanie, a następnie włókna tnije się na odpowiednie powtarzalne odcinki. W zależności od potrzeby włókna są wygrzewane w temp. 500°C do całkowitego usunięcia zwęglonej żywicy. Na oczyszczenie 1 kg włókien potrzeba 10 kW mocy i przetrzymywania ich przez 30 min w temp. 500°C. W wyniku prowadzonej pirolizy w firmie Anmet uzyskano włókna węglowe w wiązkach o długości 1500 mm ułożone równolegle obok siebie (rys. 11). Tak otrzymane włókna węglowe pocięto i poddano badaniom wytrzymałościowym w Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej.



Fig. 11. Carbon fibers obtained in pyrolysis process which were cut out of the central strap in wind turbine blade

Rys. 11. Włókna węglowe otrzymane w procesie pirolizy, wycięte z pasa centralnego łopaty turbiny wiatrowej

200 mln m³ in China. 2.5 Mt of composites have been used globally in wind turbines until 2021. Given the production of chipboard at the level of 150 Mt/year and its specific gravity of about 0.75 t/m³, the total composite material present in blades can be used up to produce chipboard panels in one year only. Panels can be ground and reused many times to manufacture the same product. Other advantages of this technology include: saving wood, reduction of water and energy consumption, reduced emissions of VOCs, improved durability of the product, improved resistance to fire and water. Panels with composite material can still be processed just like standard material.

Recovery of carbon fiber in pyrolysis

The production of 1 t of carbon fiber involves the emission of over 20 t of CO₂. However, the recovery of carbon fiber in pyrolysis leads to the emissions of 1 t of CO₂³²). Carbon fibers in a blade are placed in parallel and run along the whole length of the element. Fibers are usually placed at the trailing and leading edges and in the middle part of the blade. The middle part (approximately 500 mm wide and 50 mm thick close to the hub) contains about 80% of carbon fibers. The rest can be found in trailing and leading edges of the blade. One 50 m long blade usually contains 5 t of carbon fiber. To recover carbon fiber, some straps of the composite need to be cut out of the blade.

Such straps should be cut to the length equivalent to the pyrolysis chamber. Layers made of carbon fiber are additionally covered with a 10 mm layer of glass composite and these two should be separated. Pyrolysis according to the known techniques occurs between 500 and 550°C. Following pyrolysis lasting for about 60 min, we obtain demi-stiff block of carbon fiber, with 10% content of charred resin.

Through special pressing, we can separate strands of fibers which are later cut repeatedly to the desired length. The heat treatment at 500°C continues until all charred resin is removed. To clean 1 kg of fiber, you need 10 kW and

Badania potwierdziły wysoką wytrzymałość włókien popirolitycznych, na poziomie 80–90% wytrzymałości włókien nowych. Kolejnym etapem prac nad włóknami było wykonywanie z nich włókien. Pierwsze testy przeprowadzono w Wytwórni Włóknin Technicznych. W wyniku przeprowadzonej próby wytworzono ok. 100 m² włókniny wykonanej z włókien węglowych popirolitycznych i odpadowych włókien polipropylenowych. Włóknina zawiera 50% włókien węglowych, reszta to włókna PP z recyklingu.

Włókniny charakteryzują się dobrą wytrzymałością i nadają się do wykorzystania w procesie produkcyjnym do wytwarzania kompozytów termoplastycznych węglowych. Testy dowiodły, że włókninę węglową w mieszance z włóknami termoplastycznymi bez trudu można produkować na uniwersalnych liniach produkcyjnych przeznaczonych do produkcji włóknin igłowanych.

30 min at 500°C. Owing to pyrolysis technique applied by Anmet, carbon fibers that were 1500 mm long and parallel were obtained (Fig. 11). This carbon fiber was later cut and tested at Warsaw University of Technology at the Faculty of Materials Engineering.

The tests confirmed high strength of post pyrolysis fibers at the level of 80–90% of strength of virgin product. The successive step was to make a non-woven fabric from the fibers. The first tests were conducted at Wytwórnia Włóknin Technicznych. Approximately 100 m² of fabric was manufactured from post pyrolysis carbon fiber and from recycled polypropylene fiber. The fabric contained 50% of carbon fiber and the rest was recycled PP.

The fabric shows a good strength and can be used to make carbon thermoplastic composites. The tests showed that the carbon fabric mixed with thermoplastic fiber can be easily produced on universal production lines normally used to manufacture geotextiles.

Received/Otrzymano: 18-12-2023

REFERENCES/LITERATURA

- [1] <https://www.compositesworld.com/articles/recycling-end-of-life-composite-parts-new-methods-markets>, access 20.03.2023.
- [2] <https://www.compositesworld.com/news/continuum-targets-facility-capacity-transforms-composite-materials-to-advance-wind-blade-recycling>, access 20.03.2023.
- [3] <https://www.compositesworld.com/news/partnership-integrates-recycled-turbine-blade-materials-into-energy-storage-system>, access 20.03.2023.
- [4] <https://www.compositesworld.com/news/re-wind-network-constructs-experimental-pedestrian-bridge-using-wind-turbine-blades->, access 20.03.2023.
- [5] T. Siwowski, M. Rajchel, M. Kulpa, A. Adamcio, *Materiały Budowlane* 2021, 9, 48.
- [6] <https://www.anmet.com.pl/about-us/?lang=en>, access 20.03.2023.
- [7] <https://wings-for-living.com>, access 20.03.2023.
- [8] <https://gp-renewables.energy>, access 20.03.2023.
- [9] <https://gp-renewables.energy/gp-reblade>, access 20.03.2023.
- [10] <https://ahk.pl/medien/aktuelles/news-details/upcycling-startup-anmet-gewinnt-deutsch-polnischen-wirtschaftspreis-2021>, access 20.03.2023.
- [11] <https://northsearegion.eu/media/22651/three-circularity-concepts-for-wind-turbine-blades-v.pdf>, access 20.03.2023.
- [12] <https://windeurope.org/annual2022>, access 20.03.2023.
- [13] <https://www.expo2020dubai.com>, access 20.03.2023.
- [14] <https://mpromotion.com.pl/2022/01/wystawa-województwa-lubuskiego-expo-dubaj-2020>, access 20.03.2023.
- [15] <https://www.4dd.pl/2023/pl>, access 20.03.2023.
- [16] <https://lubuskie.pl/wiadomosci/19412/oto-najbardziej-innowacyjne-lubuskie-firmy>, access 20.03.2023.
- [17] Pat. pol. PL 430403 (2019).
- [18] Pat. DK PA 20207042 (2020).
- [19] Pat. NL 1043707 (2022).
- [20] Pat. DE 2020062508595000DE (2020).
- [21] Pat. UKP2545/KPP/D-GB (2020).
- [22] <https://www.theverge.com/2022/2/11/22929059/recycled-wind-turbine-blade-bridges-world-first>, access 20.03.2023.
- [23] T. Siwowski, M. Rajchel, M. Kulpa, A. Adamcio, *Mosty* 2022, 1, 24.
- [24] <https://borynam.wixsite.com/zwiedzamyszprotawe/k%C5%82adka-pierwsza-na-%C5%9Bwiecie>, access 20.03.2023.
- [25] <https://zagan.naszemiasto.pl/w-szprotawie-powstala-pierwsza-w-polsce-kladka-ze-smigla/ar/c15-8531383>, access 20.03.2023.
- [26] Pat. pol. P.435138 (2022).
- [27] Pat. DE 10 2021 120 413 A1 (2022).
- [28] Pat. USA 2022/0065221 A1 (2022).
- [29] <https://kompozyty.net/nagrody-w-konkursie-innowacja-branzy-kompozytowej-2022%EF%BF%BC%EF%BF%BC>, accessed 6.03.2023.
- [30] <https://www.compositesworld.com/news/anmet-launches-chipboard-panels-made-from-recycled-composites>, access 20.03.2023.
- [31] Pat. EP 22166241 (2022).
- [32] <https://renewable-carbon.eu/news/natural-fibres-show-outstandingly-low-co2-footprint-compared-to-glass-and-mineral-fibres>, access 20.03.2023.