

Numer targowy

Lightweight

Composites Magazine

Nr 2-3/2022

**Działania Małopolski na rzecz wodoru.
Wyzwania. Działania. Realizacje**

Wodór. Kompozyty. Przyszłość

**Blaski i cienie projektowania
konstrukcji betonowych
ze zbrojeniem niemetalicznym**

KOMPOZYT-EXPO®

**28-29 WRZEŚNIA 2022,
EXPO KRAKÓW**

ISSN 2720-6009
www.lightweight.pl

Lightweight

Composites Magazine

Nr 2-3/2022

ISSN 2720-6009

Lightweight

Composites Magazine

Nr 2-3/2022
ISSN 2720-6009

Redaktor Naczelny

Dr inż. Andrzej Czulak

Redaktor prowadzący

Dr Adrian Gorgosz

Sekretarz Redakcji

Marta Czulak

Edycja

Aleksandra Winiarska

Rada Naukowa

Prof. dr hab. inż. Anna Boczkowska

Dr hab. inż. Anna Dolata, prof. PŚ

Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Prof. dr hab. inż. Natalia Sobczak

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl

Dr inż. Albert Langkamp

Dr inż. Andrzej Czulak

Współpraca wydawnicza



AT Wydawnictwo
ul. Zachodnia 9/49
30-350 Kraków

Wydawca



Gofar Sp. z o.o.
ul. Galicyjska 36
32-087 Zielonki



Spis treści

1. Kompozyt-Expo®

Działania Małopolski na rzecz wodoru. Wyzwania. Działania. Realizacje Rozmowa z Panem Jozefem Gawronem, Wicemarszałkiem Województwa Małopolskiego	5
Andrzej Czulak Wodór. Kompozyty. Przyszłość	8
Kai Steinbach Modern lightweight system design for innovations in hydrogen mobility	11
Christopher Gardel The Epoxy-Toolbox – The mixture makes the system	12
Micael Peterhans Mäder innovates for the world of today and tomorrow	13

2. Polski Klaster Technologii Kompozytowych

Polski Klaster Technologii Kompozytowych – intensywny czas rozwoju	14
--	----

3. Nauka i technologia

Renata Kotynia Blaski i cienie projektowania konstrukcji betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym	16
Magdalena Pękalska Analiza potencjalnych materiałów pochodzenia ceramicznego stanowiących dodatek osnowy granulatu kompozytowego wykorzystywanego do druku 3D	26
Marcin Knutelski Inteligentne pomiarowe kompozyty FRP	29
Grzegorz Pelczar Charakterystyka mechaniczna dodatków w kompozytach polimerowych z recyklingu kabli	34

4. Produkty

Artur Wójcik Wysokowydajne płyty do wysokiej jakości lekkich konstrukcji w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, morskim i wiatrowym	39
Agnieszka Bereska Noma Resins – spersonalizowane produkty dla branży kompozytowej	41
Marcin Sobczyk Płyty włórowe z udziałem mielonych śmigieł	43
Jacek Sykulski Innovative Polish start-up providing two advanced technologies of producing composite elements for two different markets	44

5. Rozwiązania dla branży

Sylwia Biel Bezpieczeństwo pożarowe – metody badań	47
Beata Lubos The support of Industry Contact Point (ICP) – Clean and Smart Mobility for entrepreneurs and scientists interested in the implementation of composite projects	48

Szanowni Partnerzy, Członkowie, Koleżanki i Koledzy,

w Waszych rękach znajduje się kolejny numer Magazynu branżowego Lightweight.pl, tym razem połączony z największymi targami przemysłu kompozytowego w Polsce – KOMPOZYT-EXPO® 2022.

Międzynarodowe Targi Materiałów, Technologii i Wyrobów Kompozytowych KOMPOZYT-EXPO® to miejsce prezentacji produktów, innowacyjnych technologii, nawiązywania kontaktów biznesowych, którym towarzyszą pokazy maszyn i urządzeń przeznaczonych do produkcji ultralekkich produktów kompozytowych.

To święto branży materiałów i technologii kompozytowych przyciągnie jak zwykle wielu producentów, pasjonatów, projektantów i ekspertów tych nowoczesnych i ciągle perspektywicznych materiałów i pozwoli na wymianę wiedzy oraz doświadczeń pomiędzy uczestnikami.

W tym roku jako Polski Klaster Technologii Kompozytowych jesteśmy partnerem Międzynarodowych Targów w Krakowie i wspólnie z firmami i instytucjami należącymi do Klastra oraz z Partnerskim Klastrem Composites United e.V. organizujemy warsztaty eksperckie, a przy współpracy z Urzędem Marszałkowskim Województwa Małopolskiego, konferencję.

Tematem przewodnim konferencji będzie: *Accelerate the Process: Hydrogen – Composites – Future* i dotyczyć będzie rozwoju technologii wodorowych, ich promocji, wdrażania oraz współpracy w tym zakresie.

Na pierwszy panel o charakterze politycznym zaprosiliśmy prelegentów, którzy na co dzień zajmują się tworzeniem polityk i warunków do implementacji określonych rozwiązań wodorowych w praktyce. Poruszona zostanie tematyka obecnych uwarunkowań oraz trendów, które wpływają na określone decyzje wśród decydentów – zarówno na płaszczyźnie krajowej, jak też międzynarodowej. Zaprezentowane zostaną również koncepcje współpracy międzyregionalnej, szanse na wspólne projekty oraz strategię działania, za jakimi należy aktywnie podążać celem zbudowania silnego ekosystemu energetycznego wokół wodoru jako paliwa przyszłości. Wśród gości nie zabraknie przedstawicieli władzy regionalnych i krajowych z całej Europy, a także urzędników instytucji europejskich.

Na drugi panel zaprosiliśmy praktyków, czynnie biorących udział w opracowywaniu, testowaniu i popularyzowaniu technologii wykorzystujących wodór w różnego rodzaju projektach. Dołączą do nich przedstawiciele biznesu – firmy z Polski i Europy, które działają w branżach dostarczających rozwiązania służące jego produkcji, magazynowaniu czy transportu.

Z kolei w drugim dniu Targów warsztaty eksperckie będą dotyczyć:

- technologii wodorowych, kompozytów w branży budowlanej i kolejnictwie;
- materiałów i technologii kompozytowych w sporcie i rekreacji;
- rozwiązań dotyczących recyklingu materiałów kompozytowych.

Równocześnie, razem z Klastrem Composites United e.V., stworzyliśmy wspólne stoisko, na którym oprócz prezentacji oferty polskich i niemieckich firm, zorganizowaliśmy obszary spotkań B2B pozwalające na swobodną dyskusję dotyczącą przyszłych, wspólnych projektów międzynarodowych z programu Horyzont Europa. Polski Klaster Technologii Kompozytowych zadbał również o wsparcie merytoryczne tych dyskusji.

To pierwsze wspólnie organizowane wydarzenie jest początkiem intensywnej współpracy pomiędzy wszystkimi Partnerami Międzynarodowych Targów Materiałów, Technologii i Wyrobów Kompozytowych KOMPOZYT-EXPO®.

Dr inż. Andrzej Czulak

Redaktor naczelny





Działania Małopolski na rzecz wodoru

Wyzwania. Działania. Realizacje

Rozmowa z Panem Józefem Gawronem, Wicemarszałkiem Województwa Małopolskiego
Rozmawiał: dr inż. Andrzej Czulak, Redaktor Naczelny

Czy wodór możemy rozpatrywać w kategorii realnej alternatywy dla używanych obecnie tradycyjnych źródeł energii?

Zdecydowanie mogę odpowiedzieć twierdząco na to pytanie, chociaż potrzebujemy jeszcze kilku lat do realizacji wizji, w której wodór mógłby stać się kluczowym źródłem energii. Obecnie zauważalne jest globalne dążenie do przejścia na odnawialne źródła energii, wśród których wodór zajmuje istotną pozycję. Priorytetem staje się realizacja polityk wchodzących w skład Europejskiego Zielonego Ładu, którego częścią jest opublikowana w lipcu 2020 r. przez Komisję Europejską *Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu* podparta w późniejszym czasie przez szereg pro-wodorowych założeń z pakietu *Fit for 55*. Wodór ma stać się istotnym ogniwem w łańcuchu procesów prowadzących do skutecznej transformacji energetycznej Europy i osiągnięcia dwóch kluczowych celów – wzrostu poziomu bezpieczeństwa energetycznego oraz pozyskiwania energii przyjaznej środowisku. To są tematy, co do których aktualności nie trzeba nikogo przekonywać.

Jakie w takim wypadku znaczenie dla planów wzmacniania i rozbudowy małopolskiego ekosystemu innowacyjności oraz bezpieczeństwa energetycznego ma wodór?

W Małopolsce również nie odsuwamy myślenia o wspomnianych wyzwaniach na później. Strategia

Rozwoju Województwa „Małopolska 2030” czy też Regionalna Strategia Innowacyjności Województwa Małopolskiego 2030 to dokumenty, w których wyraźnie zaznaczona jest konieczność inwestycji i wspierania rozwiązań opartych o odnawialne źródła energii. Wodór nie jest tutaj wyjątkiem wyjętym poza nawias tych działań. Szczególnie duży potencjał można dla niego dostrzec przez pryzmat regionalnych inteligentnych specjalizacji. Technologie wodorowe mogą stanowić o sile aż trzech inteligentnych specjalizacji i być istotną częścią łańcuchów wartości tworzących się w ich obrębie. Te domeny to Nauki o życiu (Life Science),



Chemia oraz przede wszystkim Energia zrównoważona. Rozwój innowacyjności i konkurencyjności podmiotów z tej ostatniej wiąże się nie tylko ze sprzedażą produktów i usług nabywcom, ale z szerszym celem dalszego przekształcania Małopolski w region energetycznie zrównoważony, m.in. w oparciu o wzmacnianie potencjału wodorowego. To przybliży nas do celów, o których opowiadałem w kontekście wyzwań stojących przed sektorem energetycznym Unii Europejskiej.

Czy wspomniany potencjał przekłada się już na praktyczne rozwiązania stosowane powszechnie, czy wciąż mówimy bardziej o planach i założeniach?

Te dwie sfery funkcjonują obok siebie jednocześnie. Branża wodorowa wciąż jest w Polsce, a co za tym idzie również w naszym regionie, w początkowej fazie swojej ekspansji. Nadal staramy się zachęcać środowiska najbardziej zaangażowane w jej rozwój czy też krzewienie określonych idei do wspólnej debaty, dzielenia się pomysłami czy podejmowania współpracy – tak w wymiarze lokalnym, jak również międzynarodowym. Na początku czerwca w Krakowie gościliśmy konferencję „Accelerate the process: Hydrogen as the new fuel of growth”. To wyjątkowe w skali kraju wydarzenie, przygotowane dzięki obecności Małopolski w Inicjatywie Awangarda, umożliwiło integrację najważniejszych europejskich podmiotów zainteresowanych praktycznym wdrożeniem technologii wodorowych. Czołowi naukowcy, technolodzy i przedstawiciele biznesu z Niemiec, Szkocji, Słowenii czy Włoch mieli okazję podzielić się swoją wiedzą i spostrzeżeniami z partnerami w Małopolsce. Nie zabrakło również naszych regionalnych akcentów, co tylko potwierdza moje słowa o istotnym dążeniu Małopolski do bycia w awangardzie w tym temacie.

O jakich akcentach mowa?

Podczas Konferencji wystąpili między innymi przedstawiciele firm Orlen Południe oraz Grupa Azoty. Oba przedsiębiorstwa to pionierzy i jednocześnie potentaci w obrębie omawianych zagadnień. Połowa wodoru produkowanego w Polsce powstaje w fabrykach Grupy Azoty, w dużej mierze na potrzeby własnej syntezy chemicznej. Oprócz bycia stroną *Polskiego porozumienia wodorowego*, Grupa Azoty aktywnie działa też w Europejskim Sojuszu na rzecz Czystego Wodoru, a jej bieżąca strategia na lata 2021–2030 stawia wodór na piedestale priorytetów rozwo-

jowych. Udział w budowie europejskiego rynku wodorowego to też podstawa wartego niemal 3 mld złotych ambitnego projektu dekarbonizującego „Zielone Azoty”. Z kolei mający swoją siedzibę w Trzebini Orlen Południe buduje pierwszy w Polsce hub wodorowy. Tylko do roku 2030 przeznaczy 7,4 mld zł na inwestycje, które umożliwią koncernowi rozwój w obszarze nisko- i zeroemisyjnego wodoru, opartego o odnawialne źródła energii i przetwarzanie odpadów komunalnych. Jednym z efektów tej polityki będzie budowa ponad 100 stacji tankowania wodoru, czyli elementu infrastruktury istotnego z punktu widzenia osób jeżdżących ekologicznie. Na pierwszej z nich już teraz mogą Państwo zatankować w Krakowie. Warto zwrócić uwagę, że cały projekt realizowany będzie również w Czechach i Słowacji.

Wspomniane projekty oraz szeroko rozumiana działalność pro-innowacyjna w obszarze wodoru często łączą się z wątkiem współpracy o ponadregionalnym charakterze. Czy wynika to z naturalnych uwarunkowań, czy jest to raczej konieczność związana z faktem, że technologie wodorowe dopiero wchodzą do szerszej świadomości i użytku?

Cieężko jest mi komentować strategię poszczególnych przedsiębiorstw, ale samo podejście na pewno przynosi korzyści niezależnie od możliwych motywacji. Doświadczamy tego na szczeblu polityk regionalnych, gdzie zabiegamy o pozyskanie partnerów, którzy byliby skłonni wesprzeć nas w promocji dostępnych form odnawialnych źródeł energii. Taka filozofia leży również u podstaw funkcjonowania podmiotów pokroju Polskiego Klastra Technologii Kompozytowych, polskiego klastra kluczowego z Krakowa, który intensywnie inwestuje w technologie służące transportowi i przechowywaniu wodoru. Klaster jest naszym partnerem strategicznym w nowej inicjatywie realizowanej pod auspicjami Inicjatywy Awangarda, którą jest Pilot Wodorowy (Hydrogen – H₂). To wspólne przedsięwzięcie, w którym bierze udział ponad 20 europejskich regionów połączonych chęcią przyspieszenia rozwoju gospodarki wodorowej na Starym Kontynencie i stworzenia szans biznesowych dla podmiotów chcących działać w tym sektorze – głównie małych i średnich przedsiębiorstw. Małopolska jest jednym z trzech regionów współkoordynujących ten Pilot, co jest dla nas bardzo prestiżowym i znaczącym wyróżnieniem.

Czyli szans na skok technologiczny w obrębie wodoru powinniśmy upatrywać głównie we współpracy międzynarodowej?

W głównej mierze tak, ale też nie do końca. Warto bowiem w tym miejscu wspomnieć, że jedną z najbardziej znaczących inicjatyw w ostatnim czasie w dziedzinie wodoru było powołanie do istnienia Śląsko-Małopolskiej Doliny Wodorowej w ramach założeń *Polskiej Strategii Wodorowej*. Stanie się ona ponadregionalnym miejscem uruchamiania konkretnych przedsięwzięć w ramach gospodarki wodorowej, obejmujących produkcję, przechowywanie, dystrybucję i końcowe wykorzystanie wodoru. To szereg rozwiązań przyszłości, które my będziemy mieli już dzisiaj.

Jak w takim razie kształtują się najbliższe plany i działania związane z dalszą popularyzacją i rozwojem wętków wodorowych w naszym regionie?

W dniach 28–29 września 2022 r., przy współpracy z Polskim Klastrem Technologii Kompozytowych oraz przy czynnym uczestnictwie Województwa Małopolskiego, odbędzie się kolejne wydarzenie dedykowane w dużej mierze właśnie wodorowi – 11. Międzynarodowe Targi Materiałów, Technologii i Wyrobów Kompozytowych. W dniu ich rozpoczęcia zaplanowano konferencję wodorową zatytułowaną *Accelerate the Process: Hydrogen+Composites+Future*, która stanowi naturalną

kontynuację czerwcowego spotkania w ramach współpracy z Inicjatywą Awangarda. Tym razem silny akcent postawiony zostanie nie tylko na wodór w biznesie i nauce, ale również na jego polityczne znaczenie, czego wyrazem będą prezentacje przygotowane przez osoby odpowiedzialne za wdrażanie polityki wodorowej w praktyce, w różnych częściach Europy. Z kolei drugi dzień Targów upłynie pod znakiem spotkania partnerów wspomnianego Pilota Wodorowego. Kraków został wybrany na miejsce jego oficjalnej inauguracji, podczas której każdy z regionów przedstawi swój profil wodorowy, omówione zostaną pierwsze projekty demonstracyjne realizowane w ramach Pilota oraz przedyskutowane zostaną aspekty organizacyjne. Część spotkania inaugurującego będzie otwarta dla publiczności, dlatego zachęcam przedsiębiorców do wzięcia w nim udziału. Może to być okazja do nawiązania wartościowych kontaktów z potencjalnymi kontrahentami czy ośrodkami technologicznymi. Na sam koniec dodam, że w momencie udzielania tego wywiadu Małopolska jest na etapie składania wniosku aplikacyjnego do Europejskiego Sojuszu na Rzecz Zielonego Wodoru. To organizacja wyznaczająca strategiczne kierunki w obrębie rozwoju wodoru dla państw Unii Europejskiej i my zamierzamy być jej częścią.

Dziękuję za rozmowę.

ANDRZEJ CZULAK

Wodór. Kompozyty. Przyszłość

Wodór

Zmiany w transformacji energetycznej jeszcze nigdy nie były tak ważne dla Polski i Europy jak teraz. Połączenie energii z czystego wodoru z energią pochodzącą z odnawialnych źródeł – mogą wspólnie poprawić nasz system energetyczny i zbudować niezależność energetyczną dla każdego kraju i całej Unii Europejskiej, zmniejszając zużycie paliw kopalnych i zapewniając bardziej odporny system energetyczny oraz bezpieczeństwo dostaw.

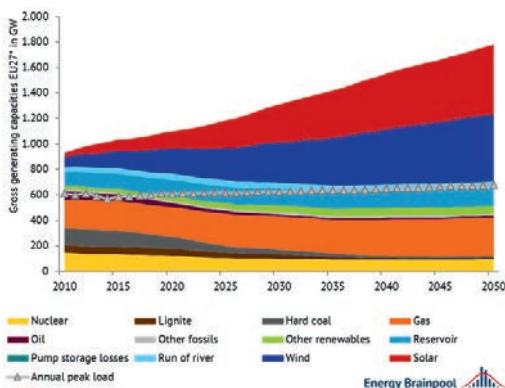
Od 2020 roku widzimy, że coraz więcej europejskich krajów wyraża swoje ambicje, aby otworzyć możliwości wykorzystania wodoru jako zrównoważonego źródła energii, które przyczyni się do realizacji programu dekarbonizacji. W lipcu 2020 r. Komisja Europejska opublikowała „Strategię wodorową na rzecz neutralnej klimatycznie Europy” zgodnej z europejskim zielonym ładem, która ustanawia strategiczny cel polegający na zainstalowaniu co najmniej 40 GW z elektrolizatorów wodoru do 2030 r. i wyprodukowaniu do 10 milionów ton wodoru pochodzącego ze źródeł odnawialnych.

Pokłosiem strategii wodorowej było również opublikowanie w grudniu 2021 r. pakietu „Fit for 55”, obejmującego rewizję dyrektywy w sprawie odnawialnych źródeł energii, a także pakietu dotyczącego wodoru i gazu zdekarbonizowanego, mającego na celu wsparcie rozwoju rynku wodoru w Europie. Zgodnie z długoterminowymi oczekiwaniami Komisji Europejskiej, wodór powinien zaspokajać około 25% całkowitego zapotrzebowania UE na energię. Oczekuje się, że zielony wodór zmniejszy emisję dwutlenku węgla poprzez:

- zastąpienie dzisiejszego szarego wodoru, produkowanego obecnie z gazu ziemnego, zielo-

nym bez emisji gazów cieplarnianych podczas produkcji;

- zmniejszenie zużycia paliw kopalnych w sektorach trudnych do obniżenia emisyjności i energochłonnych, takich jak branża metalurgiczna i ceramiczna;
- zasilanie pojazdów ogniwami paliwowymi lub silnikami przystosowanymi do pracy z wodorem, których produktem ubocznym jest jedynie woda;
- magazynowanie energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, takich jak słońce i wiatr.



Rys. 1: Zainstalowane moce wytwórcze w UE-27 plus NO, CH i UK według nośników energii (źródło: Energy Brainpool, 2021; EU Reference Scenario, 2016; entso-e, 2021).

Jak pokazano na rysunku 1, oczekuje się, że do 2050 r. produkcja energii elektrycznej w UE wzrośnie o około 1000 GW. W tym samym okresie szacuje się, że wykorzystanie węgla i ropy naftowej do produkcji energii elektrycznej zostanie niemal całkowicie wycofane. W sumie szacuje się, że

do 2050 r. energia słoneczna i wiatrowa będzie stanowić około 45% całkowitej produkcji energii elektrycznej w UE. Zwiększona obecność energii odnawialnej oznacza potencjalne obniżenie cen energii elektrycznej, ale także większą stabilność dostaw energii – oba te czynniki wskazują na rosnącą rolę wodoru jako nośnika energii.

Gospodarka oparta na wodorze jest nowa i bardzo złożona, a jej rozwój będzie silnie zależał od połączenia pomiędzy różnymi systemami energetycznymi. Różni odbiorcy energii (ogrzewanie, przemysł, transport) muszą współpracować i współdziałać, aby różne źródła (energia elektryczna, wodór, gaz ziemny, biogaz, biopaliwa, itp.) były stale wykorzystywane w sposób jak najbardziej efektywny.

Kompozyty

Kompozyty są lekkie, wytrzymałe i trwałe oraz oferują znaczną elastyczność w projektowaniu, co czyni je praktycznie jedynym ekonomicznym rozwiązaniem do przechowywania i transportu wodoru. Ze względu na niską gęstość (objętościową gęstość energii), wodór musi być sprężony (lub skroplony), jeśli chcemy go przechowywać w niewielkiej transportowalnej objętości. W przypadku wysokociśnieniowych zbiorników sprawia to, że rozwiązania bazujące na klasycznych materiałach są niezwykle ciężkie i raczej nie sprawdzają się w zastosowaniach mobilnych.

Przechowywanie wodoru w zbiornikach kompozytowych pod ciśnieniem jest podstawą technologii ogni paliwowych, umożliwiających czystą mobilność w samochodach osobowych, ciężarowych, pociągach, statkach, a w przyszłości także w samolotach.

Wielkość rynku zbiorników wodorowych wyniosła 15,83 miliarda USD w 2021 r. i oczekuje się, że w kolejnych latach skumulowany roczny wskaźnik wzrostu (CAGR) będzie wzrastał o 5,2% rok do roku. Wzrost przychodów rynku jest napędzany przede wszystkim przez takie czynniki, jak rosnące zapotrzebowanie na paliwa o niskiej emisji i paliwa transportowe, rosnące zużycie ropy naftowej i wzrost zapotrzebowania na wodór ze strony rafinerii ropy naftowej ze względu na surowe przepisy dotyczące czystszych paliw.

Rosnące zapotrzebowanie na zbiorniki do przechowywania wodoru w transporcie jest kolejnym czynnikiem, który ma napędzać wzrost rynku. Zbiorniki wodorowe stają się coraz bardziej po-

pularne, dzięki ogniwoom paliwowym, ponieważ są bardziej opłacalne i mają lepszą wydajność w stosunku do innych źródeł energii, co pokazuje również wykres przewidywanej produkcji samochodów napędzanych wodorem (Rysunek 2). Jednak od zbiorników instalowanych w pojazdach wymaga się niskich kosztów, niewielkiej masy i dobrych parametrów bezpieczeństwa.



Rys. 2. Roczna światowa produkcja pojazdów napędzanych wodorem (w tys. sztuk). Źródło: IHS Markit, Statista, Estin&Co, Jec.

Przyszłość

Oprócz bezpiecznych, lekkich i ekonomicznych zbiorników wysokociśnieniowych, jednym z głównych wyzwań, jest również opracowanie rurociągów pozwalających na tani przesył mieszanek z wodorem na duże odległości.

Tradycyjnie, od ponad wieku, rury i kształtki wykonywane są ze stali, najczęściej węglowej, jednak rosnące ceny rudy żelaza, a także wady tej grupy materiałów skłaniają inżynierów do poszukiwania nowych, alternatywnych materiałów, które z powodzeniem mogą zastąpić ciężką i podatną na korozję stal. Od ponad dekady udział w rynku zdobywają rurociągi polietylenowe o gładkich ścianach wewnętrznych. Ich doskonałe parametry i niezawodność w połączeniu z niską wagą, szybkim montażem i bezpiecznymi połączeniami sprawiły, że znalazły szerokie zastosowanie w transporcie materiałów niebezpiecznych. Dodatkowo polietylen zwłaszcza jako HDPE oferuje dobrą odporność na przenikanie wodoru. Jednak dużą niedogodnością przy stosowaniu materiałów izotropowych jest brak możliwości dostosowania właściwości materiału do

Andrzej Czulak

występujących obciążeń, co stanowi ogromny problem przy transporcie medium o podwyższonej temperaturze i ciśnieniu. Taką możliwość dają kompozyty, w których zazwyczaj łączy się dwa lub więcej komponentów o uzupełniających się właściwościach.

Spośród różnych kombinacji najlepsze właściwości mechaniczne uzyskuje się poprzez połączenie bardzo wytrzymałych, włókien z jednorodnym polimerem, w postaci tzw. kompozytów wzmocnianych włóknami ciągłymi. W przypadku wysokociśnieniowych rur i zbiorników do transportu gazu, kompozyty wzmocnione włóknami oferujące wysoką wytrzymałość i sztywność, są łączone z czystym termoplastem zapewniającym niską przepuszczalność gazu. Dwu- lub wieloskładnikowy charakter materiału pozwala na wykorzystanie pożądaných właściwości składników,

przy jednoczesnym ograniczeniu właściwości niekorzystnych.

Jednak, żeby zapewnić bezpieczeństwo w przyszłym stosowaniu rurociągów oraz zbiorników kompozytowych do transportu i przechowywania wodoru, konieczne są: standaryzacja rozwiązań uwzględniająca wymagania regionalne; przygotowanie systemów monitoringu; bezpieczna i powtarzalna technologia produkcji pozwalająca na stworzenie precyzyjnego systemu działającego w Polsce, Niemczech oraz w we wszystkich krajach Unii Europejskiej. Tą tematyką będziemy się zajmować w projekcie demonstracyjnym „Hydro-Comp” należącym do projektu pilotażowego „Hydrogen”, w ramach Inicjatywy Awangarda, którego inicjatorami był Polski Klaster Technologii Kompozytowych, Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik oraz Region Małopolska.

Reklama

MARR
Małopolska Agencja
Rozwoju Regionalnego SA

VII Małopolskie Forum Finansowe

Kraków, Stara Zajezdnia, ul. św. Wawrzyńca 12
11 października 2022 r., godz. 9:00

Patronat
Ministerstwo
Finansów

Patronat honorowy
Władze Kwartalnik Marzec Władze Małopolski
MAŁOPOLSKA
govtech
Polska

Partner merytoryczny
PARP
Grupa PFR
BGK
BANK GOSPODARSTWA
KRAJOWEGO
Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Partner
arp
Agencja
Rozwoju
Regionalnego
SA
FABLAB
MAŁOPOLSKA
Fundacja
Inteligentna
Małopolska
CTT
Politechnika Krakowska
Klaster
LifeScience
Kraków

Patronat medialny
RADIO
KRAKÓW
TVP3
KRAKÓW
DZIENNIK POLSKI

KAI STEINBACH

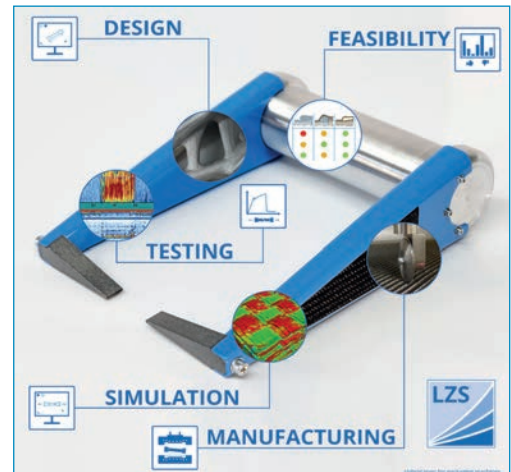
Head of Engineering, Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH

Modern lightweight system design for innovations in hydrogen mobility

Lightweight Engineering is the key to success of competitive structures and systems in hydrogen mobility and many other industries. At the Kompozyt Expo 2022 in Krakow the team of LZS (Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH) contributes a presentation **“How to select the hydrogen tank solution? – Materials and Technologies”**, which deals with the engineering task of hydrogen tanks. With a special focus on the use of fibre composite technologies, the questions are discussed in detail: What type of hydrogen shall be used?, How should the tank look like?, Which materials can be used?, Which technologies are available?

What are your challenges regarding cost-efficient competitive structures?

We are glad to support you as one of the leading development partners in the field of “function-integrative lightweight system design in multi-material design”. We use a cross-material and cross-product systemic solution approach that covers the entire development chain. In addition to profound composites competences, this also includes adapted joining techniques, smart materials, adaptronic structures, and networks with sensors and actuators.



The interdisciplinary development team of engineers and technicians combines excellent competences in the fields of aviation, automotive and vehicle design, rail vehicle technology as well as mechanical and plant engineering. The service portfolio ranges from feasibility analysis to design, material characterisation, structural and process simulation, prototype production, manufacturing, and component testing. Product development is accompanied by certified quality management.

**Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH**

+49 351 44696010, kai.steinbach@lzs-dd.de

Marschnerstrasse 39, 01307 Dresden
www.lzs-dd.de

CHRISTOPHER GARDEL

Technical Sales Engineer Reactive Polymers & Flame Retardants

The Epoxy-Toolbox – The mixture makes the system

Our POLYVERTEC® EPOXY-TOOLBOX, is the one reactive polymer toolbox in which we can achieve over 50 composites systems with only 3 base resins and 16 hardeners. From low viscosity for Infusion, over bi-stage systems for SMC, or long stabilized systems for prepregs. Everything you need in just one Toolbox. Moreover, all expanded over our ability to personalize every system to your specific needs.

The properties of POLYVERTEC® COMPOSITE SYSTEMS can be adapted within wide limits to meet the different requirements of processing procedures as well as the properties of the finished fiber composite component. For the production of high-quality infusion and RTM molds (tooling), POLYVERTEC® Q-TOOL HT can be easily processed as a quartz-based polymer concrete in a casting process.

We are developing customer-specific “tailor-made” products in trustful, direct cooperation with you as our customer and combine your requirements with our know-how. We respond to current market needs and new technical challenges with a high degree of flexibility, thus achieving a high degree of customer satisfaction and customer loyalty.

POLYVERTEC® COMPOSITE SYSTEMS can be combined in many ways with other STRUKTOL® products, such as POLYPHLOX® Flame Retardant modifiers based on halogen-free phosphorus compounds to improve the fire behavior of the material and composite parts made from it. The STRUKTOL® POLYDIS® and POLYCAVIT® Tougheners additives are used to increase tackiness (Tackifier) and impact strength (Toughener). Bio-based polyester resins and complete systems for the composites industry finalize our solutions for a wide range of products and applications.

**Schill+Seilacher “Struktol” GmbH**

Moorfleeter Strasse 28
22113 Hamburg
struktol.de



MICAEL PETERHANS

Manager Technical Support

Lightweight nr 2-3/2022

ISSN: 2720-6009

KOMPOZYT-EXPO®

Mäder innovates for the world of today and tomorrow

Mäder Composites is one of the leading manufacturers of flame-retardant resins and gelcoats. As a major international key player in technical coatings and composites, the Mäder group offers its customers global and innovative solutions in demanding industrial markets. Mäder develops and produces TOTAL EN 45545 solutions for railway vehicles.

Mäder offers high-quality resins for hand lay-up and for vacuum infusion processes. The latter allows for lightweight high-performance parts (up to 50% weight savings compared to hand lay-up), such as front ends of trains. In addition, we have highly productive solutions adapted for RTM/RTM light, which are usually used for interior parts.

Our products are designed to ensure compliance with relevant regulations like the European EN 45545 norm. We offer a wide range of systems. In railway transportation, special care must be taken when it comes to fire protection. Therefore, we developed our products to reach the highest fire protection level and to fulfill all customers' requests regarding mechanical properties and humidity resistance. The weight of the parts is also an additional important parameter that can be improved through different innovations (product development, construction improvement). Some case studies like the two mentioned in this article can illustrate the ability of Mäder to support our customers on this topic.

In a previous project with a worldwide OEM, Mäder applied cork as a core material for railway interior components like floors and sidewall panels. This sandwich structure consists of two skins laminated with fibreglass mats separated by a cork core from the company Amorim. This construction enhances thermal and acoustic insulation and reduces weight



Sidewall panel. Sandwich structure made up of fibreglass laminates separated by a cork core.

by up to 30%. Nuvopol Gelcoat 37-05 TGP and laminating resin Giralithe Ditra 2109-10 XP have been used.

Another way of weight savings is to propose improved products dedicated to this topic. Our researchers have developed Nuvocryl FR 60-100 for vacuum infusion process, an unfilled and inherent fire-retardant resin that can be used in combination with glass and/or carbon fibre. By applying carbon fibre fabrics, we can save weight by increasing strength and ensuring a reduction of thickness. The possible applications are very diverse and individual. We guarantee full fire classification in particular R17 HL3 in combination with Nuvopol Gelcoat 37-05 TGP and with the corresponding paintings, such as the three-layer system Arthane 51FR, Arthane 101 and Barniz Arthane AG.

Beyond railway applications, we offer suitable products for applications in the manufacture of buses, marine mass transport as well as wind power. For further information contact us by mail: j.kiehl@mader-group.com

Polski Klaster Technologii Kompozytowych – intensywny czas rozwoju

Polski Klaster Technologii Kompozytowych (PKTK) jako Krajowy Klaster Kluczowy miał kolejne bardzo intensywne miesiące, które w znaczący sposób przyczyniły się do rozwoju współpracy międzynarodowej i poszerzenia horyzontów firm i instytucji należących do Klastra.

W maju 2022 roku przedstawiciele PKTK wzięli udział w największych targach materiałów i wyrobów kompozytowych JEC Paris, co pozwoliło nie tylko zapoznać się z obecnymi trendami na rynku, ale również pogłębić współpracę z wiodącym branżowym Klastrem niemieckim Composites United e.V. W ramach Targów JEC w Paryżu został podpisany list intencyjny, który zarysowuje zakres współpracy pomiędzy naszymi klastrami. Planowane jest zatem promowanie dalszego rozwoju wysokowydajnych kompozytów włóknistych, działania propagujące na rzecz materiałów i struktur kompozytowych oraz reprezentowanie wspólnych interesów w komitetach krajowych i międzynarodowych.

Zaraz po targach w Paryżu przedstawiciele PKTK uczestniczyli w ramach platformy ClusterXchange (w której aktywnie działa nasz Klaster) z francuskim klastrem I-Trans z obszaru mobilności. W ciągu 3-dniowych spotkań powiązanych z prezentacjami działalności obu Klastrow oraz ich członków i partnerów, określiliśmy wspólne cele współpracy, możliwe projekty oraz kolejne kroki i działania. Wymiana pozwoliła nam, jako organizacji wizytującej, lepiej poznać rynek francuski (przemysł kolejowy, zrównoważone systemy transportu multimodalnego i miejskiego) oraz jego potencjał. Przedstawiliśmy również polski rynek, jego potencjał oraz zdefiniowaliśmy obszary synergii pomiędzy naszymi klastrami. Ze strony klastra i-Trans w spotkaniu wzięli udział: Amélie Espérou,

Amandine Caux, Ludivine Deloux, Camille Briant, Odile S., Danijela Dorić, Jean-Maxime Boulanger, Philippe Gouvaert i Thibaut Gilliart. Polski Klaster Technologii Kompozytowych reprezentowali Jacek Sykulski i Andrzej Czulak.

W dniach 30 maja–2 czerwca 2022 – dzięki wsparciu Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości, Polski Klaster Technologii Kompozytowych był obecny na jednych z największych na świecie targów poświęconych tematyce rozwoju przemysłu. Na stoisku narodowym, zaprezentowana została ogólna działalność PKTK, jak również za-interesowanych Członków naszego Klastra (AMAR-GO Sp. z o.o., Bosmal Sp. z o.o., Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji, Carbon Design Sp. z o.o., LOTAMS Sp. z o.o., Pietrucha Sp. z o.o., Politechnika Warszawska, Rymatex Sp. z o.o., TAPS Maciej Kowalski, Urząd Marszałkowski Małopolski). Wszystkie firmy i instytucje mogły się zaprezentować w ramach umowy klastrowej.

Na początku czerwca 2022, wspólnie z Urzędem Marszałkowskim Województwa Małopolskiego, zorganizowaliśmy konferencję, której tematem przewodnim był wodór i technologie mu pokrewne. Wodór jest obecnie jednym z najszerzej omawianych zagadnień w kontekście zrównoważonych źródeł energii i transformacji w obrębie gospodarki, która umożliwi szybsze i lepsze korzystanie z jego produktów i pochodnych. Sam wodór wydaje się istotnym czynnikiem zmiany w kontekście wzrastających cen energii pochodzącej ze

źródeł konwencjonalnych czy wojny prowadzonej przez Rosję w Ukrainie, która również destabilizuje sektor energetyczny. Wodór doskonale wpisuje się ponadto w działania Komisji Europejskiej zmierzające do osiągnięcia bezpieczeństwa energetycznego przy pomocy tzw. czystej energii. W bardziej lokalnym ujęciu, technologie wodorowe to ważny komponent energii zrównoważonej, która jest jedną z siedmiu małopolskich, inteligentnych specjalizacji. W gronie prelegentów znaleźli się przedstawiciele władz Małopolski, zagraniczni goście z regionów współpracujących z Polskim Klastrem Technologii Kompozytowych, przedstawiciele biura Inicjatywy Awangarda z Brukseli i Komisji Europejskiej oraz reprezentacja regionalnego przemysłu, który odgrywa czołową rolę jako pionier technologii wodorowych.

W ostatnich miesiącach Polski Klaster Technologii Kompozytowych, działając we współpracy z Małopolską oraz Regionami Lombardią i Słowenią, przygotował wniosek projektu pilotażowego „Wodór” w ramach Inicjatywy Awangarda. W pierwszej kolejności należy wyjaśnić, co to jest Inicjatywa Awangarda – Vanguard Initiative to stowarzyszenie regionów europejskich, które zobowiązały się do stymulacji wzrostu gospodarczego oraz ilości miejsc pracy poprzez kierowaną przez przemysł współpracę międzyregionalną, współtworzenie i współinwestowanie, w oparciu o inteligentne specjalizacje. Podstawową działalnością Inicjatywy Awangarda jest realizacja jej projektów pilotażowych, które zostały opracowane przy aktywnym udziale klastrów, parków naukowych, instytutów badawczych i uniwersytetów z regionów członkowskich. Wszystkie projekty pilotażowe znajdują się blisko rynku i dlatego mają wysoki potencjał komercyjny. Oznacza to, że pilotaże koncentrują się na zastosowaniach na poziomie postprototypowym (> TRL5), z potencjałem do pełnego wdrożenia na rynku w okresie od 3 do 5 lat. Od momentu rozpoczęcia działalności w 2013 r., Inicjatywa Awangarda została uznana za silny i wpływowy głos na rzecz regionalnej perspektywy przemian przemysłowych.

Małopolska, a dzięki temu Polski Klaster Technologii Kompozytowych należy do tej Inicjatywy i dzięki temu może w niej intensywnie pracować. Przygotowany wspólnie wniosek, jak wskazuje tytuł „Wodór”, dotyczy szeroko pojętej inicjatywy dotyczącej wodoru i w ramach tego projektu pilotażowego będą realizowane następujące tematy:

- produkcja wodoru i technologia produkcji, plus standaryzacja,
- dywersyfikacja działalności gospodarczej w kierunku wodoru i komercjalizacja produktów,
- możliwości zastosowania wodoru (mobilność, wykorzystanie energii w gospodarstwach domowych i przemyśle),
- dystrybucja i eksport wodoru,
- wymagania dotyczące umiejętności w zakresie technologii wodorowych,
- tworzenie i tłumaczenie wiedzy.

17 czerwca w Brukseli odbyło się coroczne spotkanie przedstawicieli regionów zrzeszonych w ramach Inicjatywy Awangarda w formule High Level Directors Meeting. W agendzie, oprócz dyskusji dotyczących planów rozwojowych stowarzyszenia czy dalszego wspierania budowy innowacyjnych łańcuchów wartości, znalazł się ważny punkt powiązany z nowym projektem pilotażowym. Podczas głosowania nad przyjęciem propozycji nasz pilot utrzymał 26 z 30 możliwych głosów i został zaakceptowany do realizacji.

Obecnie Polski Klaster Technologii Kompozytowych mocno angażował się w przygotowanie **Targów Kompozyt-Expo®** w Krakowie w dniach 28–29 września 2022, w ramach których zaplanowane jest wspólne stoisko klastrowe z niemieckim klastrem Composite United e.V. Organizowany jest panel ekspertów koncentrujący się na współpracy międzynarodowej oraz na uzupełnianiu brakujących ogniw w przerwanym łańcuchach dostaw. Planowane są również prezentacje techniczne partnerów obu Klastrów oraz ponownie cały czas gorący temat materiałów kompozytowych przeznaczonych do przechowywania i transportu wodoru.

Skontaktuj się z nami: kontakt@kompozyty.net

Dr inż. Andrzej Czulak
Redaktor Naczelny

RENATA KOTYŃIA

Katedra Budownictwa Betonowego
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechnika Łódzka

Blaski i cienie projektowania konstrukcji betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym

Wprowadzenie

Zbrojenie niemetaliczne popularnie zwane *fiber reinforced polymer* (FRP) zostało wprowadzone na rynek budowlany ponad dwadzieścia lat temu, jako alternatywa tradycyjnych prętów stalowych do zbrojenia betonu. Z uwagi na szereg wątpliwości dotyczących charakterystyki tego materiału, brak jednoznacznych standardów jakości produkcji oraz jeszcze do niedawna brak procedur projektowych, inżynierowie budownictwa podchodzili do tego zbrojenia dość sceptycznie.

Jest jednak szereg powodów, które świadczą o korzyściach wynikających ze zastosowania tego zbrojenia, takich jak trwałość, a szczególnie brak zdolności korozyjnych, neutralność elektromagnetyczna, wysoka wytrzymałość na rozciąganie oraz bardzo niski ciężar właściwy prętów FRP w porównaniu z tradycyjną stalą zbrojeniową. Bezsprzecznie, odporność chemiczna zbrojenia FRP jest cechą zdecydowanie wyróżniającą w porównaniu ze stalą. Brak oficjalnych norm do projektowania konstrukcji z betonu zbrojonych prętami FRP stanowił do niedawna poważną barierę w stosowaniu tego materiału w praktyce inżynierskiej. Zbrojenie niemetaliczne po raz pierwszy zostało wprowadzone do procedur projektowych w Japonii w 1992 roku, z późniejszymi aktualizacjami w latach 1993, 1997 [N1]. Źródłem pierwszych europejskich wytycznych był w 1996 roku projekt „Eurocrete”, w tym samym roku powstały normy kanadyjskie i amerykańskie z późniejszymi aktualizacjami. Jedyne jak dotąd kompleksowe ujęcie filozofii projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych kompozytami FRP przedstawiono w Fib Bulletin 40 [N2].

Zbrojenie stalowe a niemetaliczne

Wbrew dość popularnym opiniom o łatwości zaprojektowania konstrukcji żelbetowej, na zbrojoną prętami kompozytowymi, w pracy zwrócono uwagę na szereg ograniczeń związanych z tym procesem ze szczególnym uwzględnieniem problemów z jakością produkcji tego zbrojenia, jego wysoce anizotropową budową, sprężysto-liniową charakterystyką oraz przede wszystkim przyczepnością zbrojenia FRP do betonu, które warunkują spełnienie podstawowych założeń przyjętych w procedurach normowych. Autorka sygnalizuje w pracy istotne problemy, które powinny być uwzględnione w procesie projektowania, wykonywania oraz użytkowania konstrukcji betonowych ze zbrojeniem niemetalicznym.

Zasadniczym problemem w decyzji o zastosowaniu takiego zbrojenia jest akceptacja kruche go zniszczenia, które pozbawione plastycznej fazy pracy elementu, powinno być uwzględnione w procedurach projektowych. Kolejnym istotnym aspektem jest poziom bezpieczeństwa konstrukcji, określony wartościami częściowych, materiałowych współczynników bezpieczeństwa, zależnych od różnych typów oddziaływań i oczekiwanych odpowiedzi konstrukcji, które w konstrukcjach zbrojonych kompozytami są znacząco inne, niż zachowanie tradycyjnych konstrukcji żelbetowych [N9].

Kompozytowe pręty znalazły więc zastosowanie w konstrukcjach poddanym wpływom agresywnego środowiska, w którym stal ulega przyspieszonej korozji. Z licznych przykładów warto wymienić środowisko morskie, agresywne środo-

wisko chemiczne w miejscach produkcji chemikaliów, elementy podziemne budowli narażone na działanie wody gruntowej (często również obfitej w sole z substancji odladzających) i w końcu cienkościenne elementy betonowych zbrojone prętami FRP ze zmniejszoną grubością betonowej otuliny w porównaniu z otuliną wymaganą w konstrukcjach zbrojonych stalą.

Ważną cechą różniącą zbrojenie niemetaliczne od stalowego jest odporność na pole magnetyczne, a tym samym możliwość jego zastosowania w fundamentach dużych silników, magnetycznych systemów skanujących oraz w systemach kolei magnetycznej. Zakłócenia elektromagnetyczne stanowią coraz większy problem, szczególnie w branżach telekomunikacyjnej oraz militarnej. Ze względu na neutralność elektromagnetyczną kompozytu FRP, zastosowanie tego materiału w wymienionych budowlach jest coraz częstsze.

Wysoka wytrzymałość zbrojenia FRP może być wykorzystana przy potrzebie optymalizacji zbrojenia niektórych elementów konstrukcyjnych, należy jednak pamiętać, że wytrzymałość ta może nie być w pełni wykorzystana. Wysoką wytrzymałość prętów FRP, dla niższych naprężeń w konstrukcji, można jednak osiągnąć poprzez sprężanie kompozytu, takie zabiegi są jednak znacznie bardziej kosztowne, a przy udziale zbrojenia kompozytowego na ogół finansowo nieopłacalne.

Mniejsza waga zbrojenia wykonanego z prętów FRP, a tym samym całej konstrukcji, w niektórych przypadkach może być atutem, ale nie jest to kluczowy czynnik decydujący o wyborze tego rozwiązania. Zazwyczaj masa samego betonu jest duża, a zatem zmniejszenie wagi zbrojenia nie będzie miało znacznego wpływu na ciężar konstrukcji, jednakże niska masa zbrojenia pozwala na zwiększenie prędkości wykonywanych prac oraz brak potrzeby korzystania z ciężkiego sprzętu do montażu siatek zbrojeniowych.

Łatwość cięcia zbrojenia z prętów FRP, szczególnie włókien szklanych, czyni ten materiał idealnym do tymczasowego zbrojenia elementów

betonowych, takich jak ściany szczelinowe, które następnie mogą zostać częściowo zniszczone przez maszyny drążące. Zastosowanie zbrojenia stalowego wyklucza wykorzystanie maszyn drążących, które uległyby szybkiemu zużyciu przy wierceniu wielkośrednicowych otworów.

Należy nadmienić, iż przy projektowaniu konstrukcji z takim zbrojeniem nie można pominąć problemu spadku nośności na skutek działania długotrwałych obciążeń, czy w końcu całkowitej utraty nośności szczególnie w wypadku prętów szklanych (*glass fiber reinforced polymer* – GFRP). Pręty z włóknami węglowymi i aramidowymi są mniej podatne na to zjawisko.

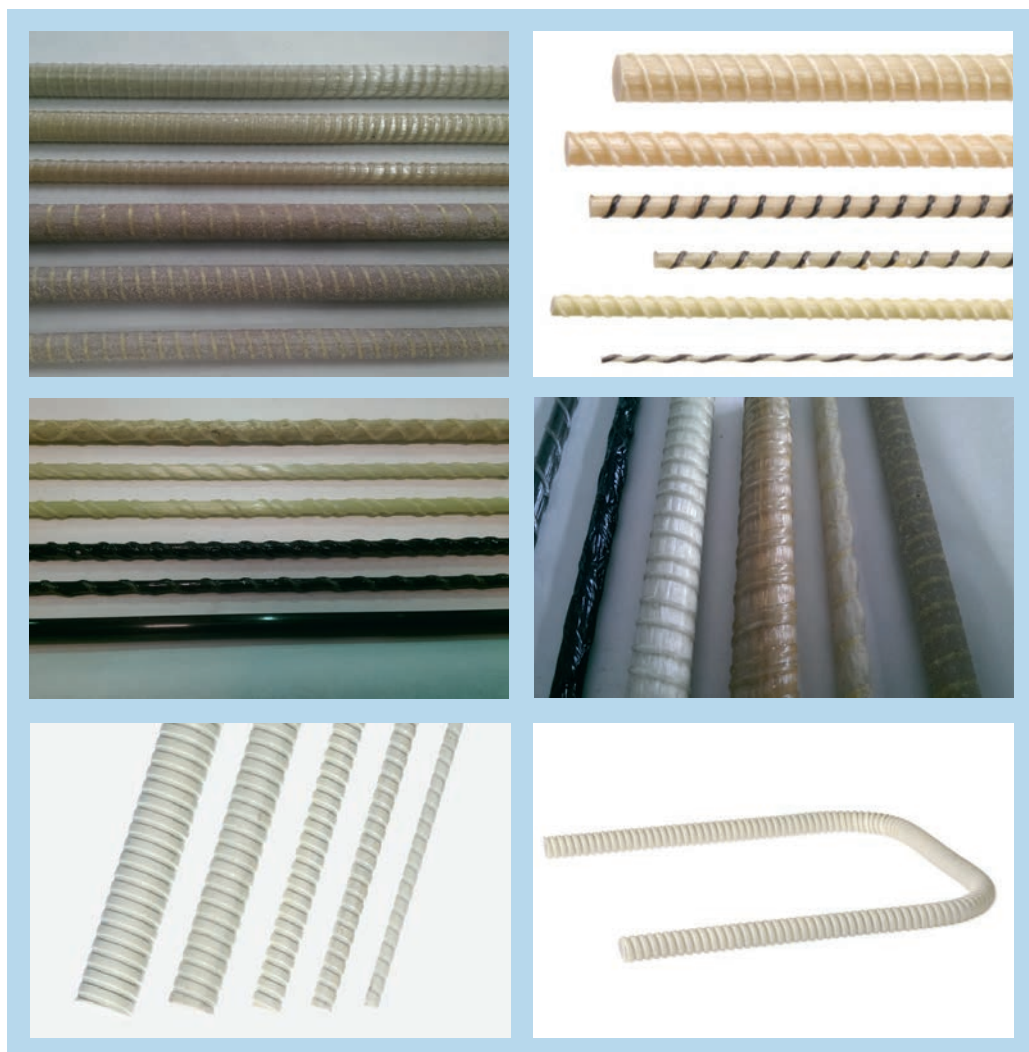
Właściwości prętów kompozytowych

Zbrojenie niemetaliczne wykonywane jest z długich, ciągłych włókien o wysokiej wytrzymałości i sztywności, impregnowanych i spajanych przez polimerową żywicę o niskim module sprężystości. Aby uzyskać wymagane właściwości materiału, można zastosować specjalnie wybrany układ włókien lub kombinację różnych ich typów. Ponadto, w celu uzyskania odpowiedniej przyczepności prętów mających zastosowanie, jako zbrojenie betonu, stosuje się różne techniki wykańczania powierzchni kompozytu takie jak: posypka z piasku kwarcowego, spiralny prostokątny lub ukośny opłot wokół rdzenia pręta, opłot dwukierunkowy, uźebrowanie prostokątne, ukośne jedno i dwukierunkowe, o stałym lub zmiennym skoku żeber, ryflowanie powierzchni w celu nadania bruzd, wyciskanie dodatkowego profilu na powierzchni pręta, a także kombinacja kilku metod np. cienki opłot z posypką kwarcową w celu osiągnięcia jak najlepszej przyczepności do betonu.

Gęstość prętów kompozytowych jest wynikiem gęstości obu składników (włókien i żywicy). Ze stawienie ciężarów objętościowych powszechnie produkowanych prętów przedstawiono w Tablicy 1. Z porównania tych gęstości do stali wynika, że są od 3,5 do 6 razy lżejsze. To wyraźnie obniża koszty transportu i montażu takiego zbrojenia na budowie.

Tablica 1. Ciężary objętościowe zbrojenia niemetalicznego

Matryca \ FRP	CFRP	AFRP	CFRP	Stal
Poliester	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7850
Żywica	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Winyloester	1440-1630	1300-1410	1730-2150	



Rys. 1. Przykłady zbrojenie niemetalicznego [M1, M2, M3, M4, M6]

Tablica 2. Typowe współczynniki rozszerzalności cieplnej dla stali i materiałów FRP

Kierunek	Stal	Stal nierdzewna	GFRP	CFRP	AFRP
podłużny, α_L	11	10 do 16,5	6 do 10	-9 do 0	-2 do -6
poprzeczny, α_T	11	10 do 16,5	21 do 23	74 do 104	60 do 80

Współczynnik rozszerzalności termicznej prętów FRP zależy od typu zastosowanego włókna, typu żywicy i ich wzajemnych proporcji w materiale. Rozważając wpływ podwyższonej temperatury, polimerową matrycę oraz włókna szklane należy traktować, jako izotropowe, a włókna węglowe i aramidowe jako anizotropowe.

Ujemne wartości wydłużenia prętów węglowych i aramidowych oznaczają wydłużenie się pręta przy spadku temperatury i skrócenie pręta przy wzroście jego temperatury. Przyjmuje się, że beton zwykły jest materiałem izotropowym o współczynniku rozszerzalności termicznej wynoszącym od 7×10^{-6} do $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Tablica 3. Porównanie prętów stalowych, szklanych i węglowych [M2, M4, M6, M7]

Parametr	Stal B550	GFRP ComBAR®	GFRP ComRebar®	GFRP PREFA	CFRP PREFA	C-GFRP PREFA	GRFP V-Rod	GRFP V-Rod
f_{tk} (MPa)	550	>1000	>1000	>1100	>1850	>1100	>1000	1596
f_{yk} (MPa)	500	-	-	-	-	-	-	-
ϵ_u (‰)	2,18	16,7	20	22	19,7	14,7	15,9	7,4
E_t (GPa)	200	60	50	50	94	75	63	600
γ (g/cm ³)	7,85	2,2	2,2	2,1	1,7	2,1	2,2	2,2
α_{tl} , (1/K)	0,8-1,2 $\times 10^{-5}$	0,5-2,2 $\times 10^{-5}$	2,2 $\times 10^{-5}$	0,6-3,0 $\times 10^{-5}$	0,0-3,0 $\times 10^{-5}$	0,6-3,0 $\times 10^{-5}$	0,6-3,0 $\times 10^{-5}$	0,6-3,0 $\times 10^{-5}$
$\varnothing$, (mm)	6-80	8-32	4-30	6-18	6-18	12-18	3-16	3-14
typ	żeberka	żeberka / żywica	spiralnie nawinięte włókno + posypka kwarcowa					

f_{tk} – wytrzymałość na rozciąganie; f_{yk} – granica plastyczności; ϵ_u – graniczne odkształcenie na rozciąganie; E_t – moduł sprężystości wzdłuż włókien; γ – gęstość; α_{tl} – współczynnik rozszerzalności termicznej; $\varnothing$ – średnica

Tablica 4. Charakterystyka wytrzymałościowa prętów na rozciąganie

Właściwość	Stal	GFRP	CFRP	AFRP
Moduł sprężystości podłużnej, (GPa)	200	35 do 60	100 do 580	40 do 125
Wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien, (MPa)	450 do 700	450 do 1600	600 do 3500	1000 do 2500
Wytrzymałość na rozciąganie w poprzek, (%)	5 do 20	1,2 do 3,7	0,5 do 1,7	1,9 do 4,4

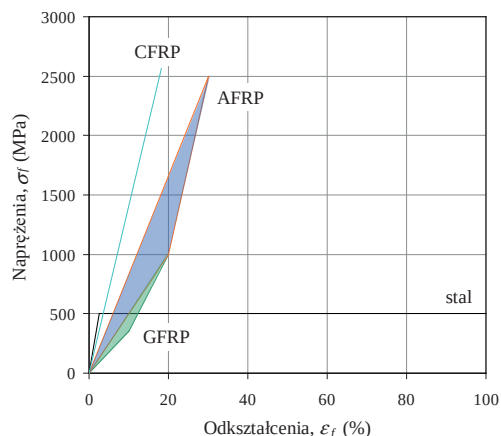
Temperaturą kluczową przy rozważaniu zastosowania zbrojenia kompozytowego z prętów FRP jest temperatura zeszklenia (T_g). Jej wartość jest uzależniona od typu żywicy – dla poliestrowej wynosi od 70 do 100 °C, dla estru winylowego wynosi od 70 do 163 °C, a dla żywic epoksydowych od 95 do 175 °C. W praktyce, przekroczenie wyżej opisanych wartości skutkuje zmianą właściwości matrycy, a tym samym całego pręta. Przyczepność między prętem FRP, a betonem jest uzależniona od właściwości matrycy na powierzchni pręta.

Problemy związane z odpornością ogniową kompozytów FRP są bardziej dotkliwe w zamkniętych przestrzeniach, budynkach czy tunelach niż w otwartych, np. mostach. Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, nie zaleca się stosowania prętów polimerowych do zbrojenia elementów i obiektów, dla których kluczową rolę odgrywa ogniotrwałość.

Doraźne badania prętów kompozytowych na rozciąganie wykazują, że ich wytrzymałość jest ściśle związana ze średnicą pręta, a wzrost średnicy z 9,5 mm do 22,2 mm powoduje redukcję wytrzymałości na rozciąganie prętów szklanych na poziomie 40%. Porównanie własności prętów

FRP o stosunku włókien do objętości całego kompozytu V_f od 0,50 do 0,75 i stali zbrojeniowej zamieszczono w tablicy 4.

Na rysunku 2 i w tablicy 5 przedstawiono porównanie charakterystyk wytrzymałościowych dostępnych na rynku budowlanym prętów FRP i stali zbrojeniowej.


Rys. 2. Charakterystyka $\sigma_f - \epsilon_f$ zbrojenia kompozytowego wzdłuż włókien

Tablica 5. Doraźne cechy mechaniczne prętów CFRP, GFRP i AFRP

Cecha	E-glass żywica	Kevlar 49 żywica	Carbon żywica
Procentowy udział włókien	0,55	0,60	0,65
Gęstość (kg/m ³)	2100	1380	1600
Moduł sprężystości podłużnej (GPa)	39	87	177
Moduł sprężystości poprzecznej (GPa)	8,6	5,5	10,8
Moduł ścinania (GPa)	3,8	2,2	7,6
Górna granica współczynnika Poisson'a	0,28	0,34	0,27
Dolna granica współczynnika Poisson'a	0,06	0,02	0,02
Wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien f_{fu} (MPa)	1080	1280	2860
Wytrzymałość na rozciąganie w poprzek włókien (MPa)	39	30	49
Wytrzymałość na ścinanie (GPa)	89	49	83
Graniczne odkształcenia na rozciąganie wzdłuż włókien (%)	2,8	1,5	1,6
Graniczne odkształcenia na rozciąganie w poprzek włókien (%)	0,5	0,5	0,5
Wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien f_{fcu} (MPa)	620	335	1875
Wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien (MPa)	128	158	246
f_{fcu} / f_{fu}	0,57	0,26	0,66

Czynniki, które mogą wpłynąć na ostateczną trwałość zbrojenia niemetalicznego obejmują: wysoką wilgotność, zasadowość otoczenia, stężenie chlorków, temperaturę, korozję karbonatyzacyjną w betonie, kwasowość środowiska, wpływ UV.

Konstrukcje betonowe poddawane są cyklicznym procesom nagrzewania-ochładzania, zamarzania-rozmarzania oraz nasączenia i wysuszenia. Wszystkie wymienione czynniki występując łącznie mogą prowadzić do degradacji konstrukcji zbrojonych kompozytami FRP. Matryca odporna jest na działanie silnych alkaliów, a jej podstawową funkcją jest zapewnienie zabezpieczenia włókien przed niekorzystnym wpływem środowiska betonu i zewnętrznego.

Badania zbrojenia CFRP wykazały niewielką degradację tego materiału w środowisku chlorków i podwyższonej wilgotności, podczas gdy pręty GFRP i AFRP poddane tym samym czynnikom wykazywały spadek wytrzymałości na rozciąganie do 50%. Zasadowość betonu może mieć negatywny wpływ na włókna szklane, chyba że w celu ochrony zastosowane zostaną odpowiednie żywice polimerowe. Najwyższą trwałość w tym środowisku mają włókna węglowe, następnie aramidowe, a najbardziej wrażliwe są włókna szklane. Roztwór wody obecnej w porach jest znacznie bar-

dziej agresywny niż otoczenie samego betonu. Do czynników wpływających na poziom agresji alkaliów można zaliczyć: podatność włókien na działanie alkaliów; ochrona włókien przez żywice; jakość połączenia żywicy z włóknami; temperatura kompozytu; stężenie alkaliów.

Procedury projektowe i opracowania dotyczące projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych prętami niemetalicznymi opublikowano w formie norm, raportów i zaleceń w Japonii (JMC-1995, JSCE-1997 [N1]), Kanadzie (ISIS-2007 [N2], CSA-S806-2012 [N3, N8]), Stanach Zjednoczonych (ACI 440.1R-15 [N4]) i Europie (CNR DT/2003/2006 [N5]) i Fib Bulletin-2007 [N6]), aneks do Eurokod 2 (CEN/TC 250/SC 2/WG1 N110, 2017 [N7]) oraz Model Code 2010. Final draft. fib Bulletin, 65, 2012 [N12].

Projektowanie konstrukcji z tym zbrojeniem opiera się zasadniczo na modyfikacjach istniejących zaleceń obowiązujących dla konstrukcji żelbetonowych w obu stanach granicznych: nośności i użytkowości. Jednak zasadniczą zmianą w podejściu do tej analizy jest sprężysto-liniowa charakterystyka wytrzymałościowa materiałów kompozytowych FRP, którą uwzględniła się przez wprowadzenie odpowiednich współczynników redukcji w konstrukcjach zbrojonych prętami FRP.

Samo uwzględnienie współczynników nie jest w pełni wystarczające, ponieważ nie zapewnia należytego bezpieczeństwa konstrukcji i nie oddaje charakteru jego pracy. Kruche zniszczenie elementów z tym zbrojeniem jest wynikiem dwóch typów zniszczenia: zmiążdżeniem betonu w ściskanej strefie przekroju lub zerwaniem tego zbrojenia, żadne z nich nie zapewnia nawet w najmniejszym stopniu plastycznej pracy konstrukcji. Rodzi się zatem kolejny problem związany z niezawodnością konstrukcji, który dodatkowo komplikuje analizę takich konstrukcji. Wprowadzenie takiej analizy zwłaszcza w konstrukcjach zbrojonych kompozytami FRP jest konieczne, gdyż zmienia jednocześnie filozofię ich projektowania, zgodnie z którą:

- zmiążdżenie betonu, jako najbardziej typowy mechanizm zniszczenia na zginanie, podczas gdy zerwanie zbrojenia FRP należy uznać, za bardzo rzadki mechanizm zniszczenia,
- zastosowanie częściowych współczynników bezpieczeństwa (tzw. materiałowych) w elementach zginanych może okazać się nieskuteczne w obliczu zniszczenia elementu przez utratę nośności ściskanej strefy betonu,
- nośność konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym zależy od stosunku obciążeń stałych do zmiennych, od wytrzymałości betonu na ściskanie i stopnia zbrojenia podłużnego.

Dodatkowe problemy związane z projektowaniem konstrukcji zbrojonych prętami niemetalicznymi pojawiają się w analizie pracy takich elementów w długim czasie ich użytkowania. Doświadczenia w tym zakresie opierają się na ogół na badaniach doraźnych lub kilkuletnich, które są podstawą do przewidywań zachowania takich konstrukcji w długim czasie, dlatego konieczne jest potwierdzanie tych założeń w długoterminowych badaniach konstrukcji ze zbrojeniem niemetalicznym.

Stan graniczny nośności na zginanie – aneks do EN 1992-1-1: CEN/TC 250/SC 2/WG

Podstawowe założenia normy CEN [N6] obejmują:

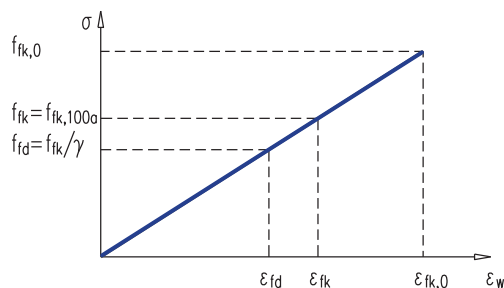
- nie dopuszcza stosowania gładkich prętów do zbrojenia betonu, niezależnie od tego z jakiego typu włókien zostały wykonane,
- zasady projektowania wg CEN [N6] obowiązują jedynie dla prętów o ściśle określonych parametrach wytrzymałościowych obejmujących: długotrwałą wytrzymałość na rozciąganie

$f_{fk,100a}$ w zakresie od 300 do 1500 MPa, moduł sprężystości E_f w zakresie od 40 to 200 GPa oraz stosunek $f_{fk,100a}/E_f$ w zakresie od 0,005 to 0,015,

- z uwagi na silnie anizotropową budowę tego zbrojenia podane w normie cechy wytrzymałościowe odnoszą się jedynie do kierunku włókien, podczas gdy w kierunku do nich prostopadłym, wartości te są znacząco niższe.

Zakłada się, ponadto, że norma obowiązuje dla poniższych warunków:

- elementów betonowych o grubości poniżej $h < 200\text{ mm}$, jeśli zlokalizowane są w środowisku o średniej rocznej temperaturze mniejsze niż 13°C ,
- elementów betonowych o grubości nie mniejszej niż $h \geq 200\text{ mm}$, jeśli zlokalizowane są w środowisku o średniej rocznej temperaturze mniejszej niż 20°C ,
- elementów betonowych, których temperatura zbrojenia $t_f \leq 65^\circ\text{C}$ przez krótki czas ekspozycji i $t_f \leq 55^\circ\text{C}$ przez więcej niż 100 godzin w roku,
- wszystkie typy zbrojenia FRP powinny mieć temperaturę zeszklenia $T_g > 100^\circ\text{C}$, moduł sprężystości i długotrwałą wytrzymałość na rozciąganie $f_{fk,100a}$ opisaną na zbrojeniu w celu łatwej identyfikacji na budowie,
- w projektowaniu uwzględnia się długotrwałą wytrzymałość na rozciąganie $f_{fk,100a}$ (Rys. 3).



Rys. 3. Obliczeniowa charakterystyka zbrojenia FRP.

Z uwagi na brak plastycznych własności zbrojenia kompozytowego odkształcalność konstrukcji z betonu z takim zbrojeniem może być zapewniona odpowiednio dużymi dopuszczalnymi odkształceniami tego zbrojenia spełniającymi warunek minimalnej krzywizny przekroju $1/r \geq 0,0078/d$.

Dla większości prętów FRP dopuszczalny zakres naprężeń zmęczenia zależy od górnej granicy naprężeń rozciągających podanych w dokumencie ETPS dla danego typu zbrojenia. Aby zagwaranto-

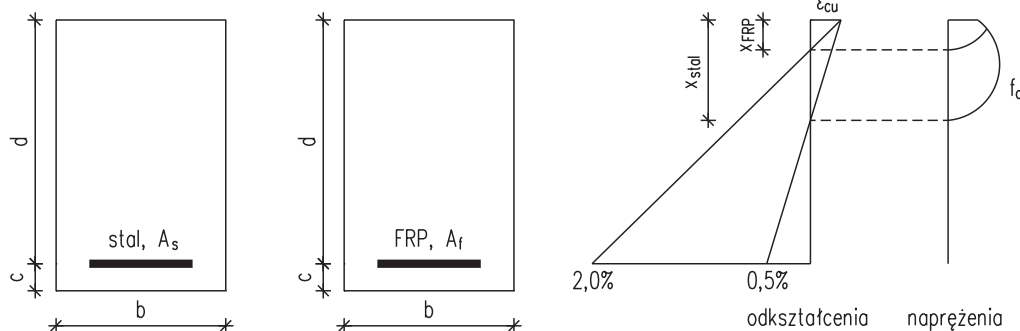
wać bezpieczną pracę elementu poddanego obciążeniom zmęczeniowym, wymaga się, aby dopuszczalny zakres naprężeń cyklicznych dla górnej granicy naprężeń równej $0,5 f_{fk,100a}$ przy 2 milionach cykl obciążeń, nie był niższy niż $0,1 f_{fk,100a}$. Załącznik CEN [N6] nie dotyczy konstrukcji sprężonych przy użyciu cięgien FRP. Wartości minimalnej grubości otuliny $c_{min,b}$ podane są w ETPS. Ponieważ zbrojenie FRP nie ulega korozji chlorkowej ani karbonatyzacyjnej, nie wymaga się spełnienia warunku minimalnej grubości betonowej otuliny z uwagi na warunki środowiska $c_{min,dur}$. Ze względu na niebezpieczeństwo korozji galwanicznej na styku włókien węglowych i stali, zaleca się unikania kontaktu zbrojenia CFRP z elementami stalowymi.

Aneks do normy EN 1992-1-1 [N9] opracowywany przez Komitet CEN/TC 250/SC 2/WG jest propozycją poszerzenia zakresu normy podstawowej dla konstrukcji betonowych zbrojonych prętami niemetalicznymi. Nośność przekroju obciążonego momentem zginającym i siłą podłużną wyznacza się według aneksu CEN/TC 250/SC 2/WG [N6] na podstawie tych samych założeń, co dla przekroju żelbetowego. Zachowane są przy tym założenia obliczania nośności granicznej przekroju obowiązujące dla elementów żelbetowych, w obszarach, gdzie kierunek zbrojenia pokrywa się z kierunkiem naprężeń głównych. Podstawowe założenia właściwe dla betonu poniżej klasy C50/60 według CEN [N6] są następujące:

- zasada zachowania płaskiego przekroju obowiązuje w całym zakresie obciążeń;
- odkształcenia zbrojenia i otaczającego je betonu są jednakowe w strefie ściskanej i rozciąganej;
- rozważane są wyłącznie naprężenia normalne;
- nie uwzględnia się wytrzymałości betonu na rozciąganie;

- naprężania w betonie ściskanym są funkcją odkształceń betonu $\sigma_c - \varepsilon_c$, która może być przyjmowana, jako paraboliczno-prostokątna, dwuliniowa lub prostokątna z wartością graniczną $\varepsilon_{cu} = 0,35\%$ (Rys. 4);
- naprężenia w zbrojeniu FRP są opisane funkcją liniową (Rys. 4);
- Zakładając w stanie granicznym nośności jednocześnie osiągnięcie granicznego odkształcenia betonu w skrajnym włóknie strefy ściskanej ε_{cud} (zmiażdżenie betonu) i granicznego odkształcenia w zbrojeniu rozciągany FRP ε_{fd} (zerwanie pręta) (Rys. 4), określa się największy zasięg strefy ściskanej, popularnie nazwany granicznym zasięgiem strefy ściskanej x_b (w języku angielskim: *balanced compressive concrete depth*) lub x_{lim} według EN 1992-1-1:2008 [N9] (x_{FRP} dla prętów FRP lub x_{stal} – dla zbrojenia stalowego, Rys. 4). Takiemu stanowi odkształcenia odpowiada graniczny stopień zbrojenia ρ_{fb} , gdzie: $\rho_f = A_f/(bd)$ – stopień zbrojenia podłużnego, A_f – pole powierzchni zbrojenia głównego, b – szerokość przekroju, d – wysokość użyteczna przekroju.

To oznacza, że elementy zbrojone na zginanie zbrojeniem FRP, bliskim granicznemu stopniowi zbrojenia są silnie rozciągane na wysokości przekroju oraz doznają znacznie większych odkształceń przekroju w strefie rozciąganej przez co osiągną większe ugięcia w porównaniu z elementami zbrojonymi stalą. W takim wypadku doskonałym rozwiązaniem problemu nadmiernych odkształceń rozciąganej strefy przekroju jest wprowadzenie sprężenia zbrojenia kompozytowego, które na skutek wprowadzenia siły ściskającej w rozciąganej strefie przekroju, zabezpiecza go przed nadmiernymi odkształceniami i ugięciami.



Rys. 4. Stan odkształcenia i naprężenia przekroju zbrojonego FRP i stalą.

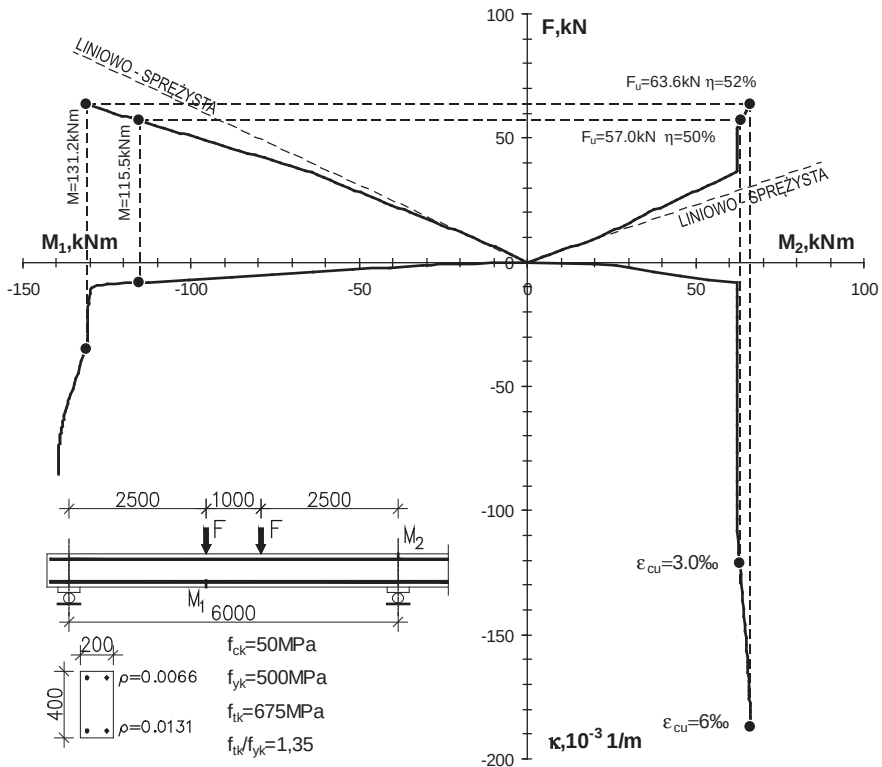
Zjawisko redystrybucji sił wewnętrznych

Sprężysto-liniowa charakterystyka zbrojenia niemetalicznego ma swoje negatywne konsekwencje w braku redystrybucji momentów w elementach statycznie niewyznaczalnych, gdyż jest ściśle związana ze zmianami sztywności wywołanymi działającym obciążeniem. W analizie obliczeniowej przedstawionej na rysunkach 5 i 6 przedstawiono obliczeniowy wpływ granicznych krzywizn na redystrybucję momentów zginających i nośność dwuprzęsłowej belki o stałym zbrojeniu na całej długości, wytrzymałości betonu $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$, stali klasy C ($f_{yk} = 500 \text{ MPa}$) oraz zbrojeniu GFRP (typu E-glass, $E_f = 72 \text{ GPa}$). Przyjęto, że redystrybucja momentów zginających może zachodzić tak długo, dopóki w żadnym z przekrojów na długości elementu nie zostanie osiągnięta krzywizna graniczna κ_u , przy której zostaje wyczerpana możliwość obrotu przekroju. Stopień zbrojenia stalowego został tak dobrany, aby element był silniej zbrojony w przęśle (zgod-

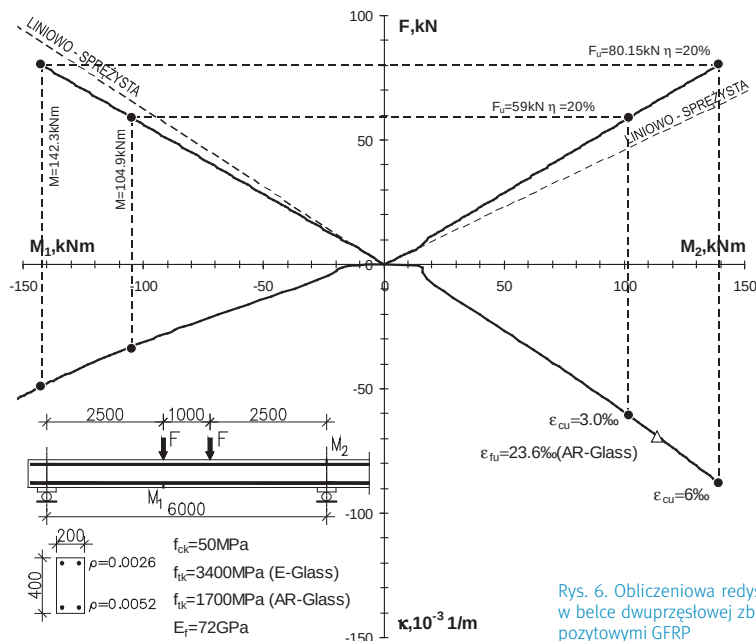
nie z modelem sprężystym) i redystrybucja zachodziła z podpory do przęśla. Zależności zostały wyznaczone dla dwóch granicznych odkształceń w skrajnym włóknie ściskającym, równych 0,003 i 0,006 (możliwych do osiągnięcia w betonach wyższych klas).

Z analizy wykresu moment-krzywizna dla przekroju żelbetowego (Rys. 5) widać, że o nośności decydują możliwości obrotu przekroju podporowego. Jak widać na rysunku 6 pełna redystrybucja rozumiana, jako jednoczesne wyczerpanie nośności przekroju przęsłowego i podporowego nie jest możliwa w przyjętym zakresie odkształceń (nawet do $\epsilon_{cu} = 0,006$).

Zmiana charakterystyki materiałowej zbrojenia na szklane GFRP negatywnie wpływa na możliwości redystrybucji momentów zginających (Rys. 6). Jest to dowód na brak możliwości plastycznego odkształcania się przekrojów zbrojonych materiałami kompozytowymi. Nieznaczna redystrybucja takich elementów możliwa jest wyłącznie dzięki zarysowaniu elementów.



Rys. 5. Obliczeniowa redystrybucja momentów w dwuprzęsłowej belce zbrojonej stalą



Rys. 6. Obliczeniowa redystrybucja momentów w belce dwuprzęsłowej zbrojonej prętami kompozytowymi GFRP

Podsumowanie

Na podstawie szerokiego przeglądu literatury badań doświadczalnych i analiz wytycznych projektowanych oraz badań własnych w pracy, przedstawiono szczegółową charakterystykę zbrojenia niemetalicznego porównując jego cechy fizyczne i wytrzymałościowe z tradycyjnym zbrojeniem stalowym. Celem nadrzędnym Autorki było rzetelne przedstawienie tych zalet i wad zbrojenia kompozytowego, które pomogą projektantom konstrukcji w podjęciu decyzji o wyborze właściwego rodzaju zbrojenia.

W pracy skupiono się głównie na analizie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami FRP, gdyż te właśnie elementy zostały zrelacjonowane w badaniach doświadczalnych, a wytyczne projektowe w tym zakresie są powszechnie stosowane. Autorka celowo nie podjęła się analizy elementów ściskanych, które we wszystkich wytycznych są wprost wyłączone z zastosowania zbrojenia niemetalicznego.

Nie ma wyraźnych przeciwwskazań do zastosowania zbrojenia kompozytowego w elementach poddanych skręcaniu i przebieciu, choć wytyczne europejskie pomijają oba te zagadnienia, z zakresu projektowania. Nieco bardziej liberalne wytyczne amerykańskie, japońskie i kanadyjskie (które

jak należy podkreślić wywodzą się z podstawowej normy JSCE Design 2007 [N2]) uwzględniają wprawdzie sprawdzenie nośności na przebiecie płyt pełnych zbrojonych na zginanie prętami FRP, ale tylko takich bez zbrojenia poprzecznego. Zbrojenie kompozytowe jak dotąd nie jest rekomendowane, jako zbrojenia na przebiecie.

Z analizy wytycznych projektowych przedstawionych w artykule i charakterystyki zbrojenia niemetalicznego nasuwają się następujące wnioski:

a) współczynniki redukcji:

- nie ma szczegółowych zasad doboru materiałowego współczynnika bezpieczeństwa dla zbrojenia niemetalicznego; wartości γ_{mf} wahają się od 1,15 do 1,5, co przy tak dużych różnicach znacząco wpływa na nośność elementów;
- podobnie dobór współczynników związanych z ekspozycją środowiska η_e i współczynnika długotrwałości obciążeń η_1 (tylko norma [N6]), jest w normach bardzo zróżnicowany, a na dodatek zależy od rodzaju włókien, co sprawia, że wartości te mogą się wahać w zakresie: $\eta_e = 0,7-1,0$ dla (SGN) oraz $\eta_e = 0,3-0,9$ dla (SGU);
- biorąc dodatkowo pod uwagę dodatkowe współczynniki zmniejszające oraz inne sposo-

by ich uwzględniania w szczegółowych wzorach, uzyskuje się bardzo duże zróżnicowanie wyników nośności;

- należałoby ujednolicić wytyczne ustalania współczynników redukcji z uwagi na różne wpływy zewnętrznej ekspozycji środowiska, rodzaju włókien, pełzania oraz współczynników materiałowych.

b) wrażliwość włókien na: agresywne środowisko, pełzanie i wysoką temperaturę:

- powszechnie wiadomo, że włókna szklane są nieodporne na działanie środowiska alkalicznego oraz wilgoci, dlatego należy wziąć ten fakt pod uwagę projektując konstrukcje z tym zbrojeniem, które mogą być narażone na wymienione wpływy; niektórzy producenci oferują pręty GFRP o wysokiej odporności na alkalia przez zastosowanie specjalnych typów żywic zabezpieczających;
- najbardziej odporne na agresywne środowisko są włókna węglowe;
- w zasadzie żadne z prętów kompozytowych nie nadaje się do stosowania w temperaturze powyżej 80 °C, co praktycznie uniemożliwia ich zastosowanie w budynkach o określonej odporności ogniowej.

c) moduł sprężystości:

- niski moduł sprężystości prętów GFRP sprawia, że zbrojenie obliczone na podstawie SGN jest kilkakrotnie za małe aby spełnić warunki SGU; zbrojenie szklane doskonale sprawdza się jako zbrojenie skurczowe.
- w elementach poddanych zginaniu zdecydowanie bardziej zalecane jest stosowanie prętów CFRP, których moduł sprężystości jest do trzech razy wyższy niż prętów GFRP. Niestety wysoki koszt tego zbrojenia sprawia, że są one bardzo rzadko stosowane.

d) wrażliwość na zagięcia:

- dopuszcza się stosowanie zagiętych prętów FRP pod warunkiem, że zagięcie zostanie wykonane w procesie produkcji pręta;
- w projektowaniu należy uwzględnić spadek wytrzymałości zagiętego pręta na rozciąganie, ten problem szczególnie dotyczy projektowania zbrojenia poprzecznego w postaci strzemion.

e) brak standardów wykończenia powierzchni prętów FRP jest podstawowym powodem niestabilnych warunków ich przyczepności do betonu; badania dowodzą, że ten wpływ niejednokrotnie bardziej decyduje o nośności elementów kon-

strukcyjnych niż wpływ pozostałych parametrów zmiennych, takich jak wytrzymałość betonu i moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego.

Bibliografia

Normy, instrukcje i wytyczne

- [N1] ACI 318 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2002.
- [N2] ACI 440.1R-15 *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, 2015.
- [N3] ACI 440.6-08 *Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bar Materials for Concrete Reinforcement*, 2008.
- [N4] ACI 440R-07 *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 2007.
- [N5] ASTM D7205/D7205M *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2011.
- [N6] CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 1 N 110 *Draft Reinforcing With FRP*, 2017.
- [N7] CNR-DT-203/2006 CNR Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. *Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars*. Rome, 2006.
- [N8] CSA S806-12: *Design and construction of building structures with fibre reinforced polymers*. Canadian Standards Association (CSA), 2012.
- [N9] EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for Buildings*, 2008.
- [N10] *FRP reinforcement in RC structures*. "fib Bulletin" 40, 2007.
- [N11] Japan Society of Civil Engineers *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. *Concrete Engineering Series* JSCE, no.23, 325, 1997.
- [N12] Model Code 2010. *Final draft*. fib Bulletin, 65, 2012.

Materiały reklamowe

- [M1] Materiały reklamowe firmy Alba Kompozit. FMCG-TRADE Sp. z o.o.
- [M2] Materiały reklamowe firmy ComRebars® Sp. z o.o.
- [M3] Materiały reklamowe firmy Polprek S.A.
- [M4] Materiały reklamowe firmy PREFA KOMPOSIT a.s.
- [M5] Materiały reklamowe firmy Pulwell kompozyty Co., Ltd
- [M6] Materiały reklamowe firmy Schöck Bauteile GmbH. Schöck ComBAR® *Technical Information*, December 2015; *Design Guideline for ComBAR®*, April, 2016 [M6],
- [M7] Materiały reklamowe firmy PULTRALL INC. V-Rod.

MAGDALENA PĘKAŁSKA

CEBRIO Grzegorz Pelczar
ORCID: 0000-0002-5886-0324

Analiza potencjalnych materiałów pochodzenia ceramicznego stanowiących dodatek osnowy granulatu kompozytowego wykorzystywanego do druku 3D

Abstrakt: Przeprowadzono analizę materiałów potencjalnie mogących stanowić dodatek do osnowy granulatu kompozytowego wykorzystywanego do druku 3D. Rynek materiałów kompozytowych jest nadal bardzo chłonny jeśli chodzi o wykorzystanie i zastosowanie nowych dodatków do granulatu kompozytowego. Mogłoby się wydawać, iż w dziedzinie druku 3D zrobiono już wszystko. Jak się okazuje naukowcy z tej dziedziny wciąż poszukują nowych i przełomowych rozwiązań. Wykorzystanie materiałów z rynku, stanowiących często uboczny produkt produkcji w przemyśle, może stanowić doskonale rozwiązanie jako dodatek do granulatu kompozytowego. Przeprowadzone analizy i poszukiwanie materiału na rynku stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie rynku.

Słowa kluczowe: materiał ceramiczny, granulat kompozytowy, druk 3D, kompozyty

Wprowadzenie

Druk 3D jest obecnie jednym z najszybciej rozwijających się dziedzin na rynku nowych technologii, a kolejne informacje docierające z różnych źródeł, zarówno wielkich międzynarodowych korporacji, które rozwijają się na rynku druku 3D, czy początkujących start-upów prezentujących nowe i innowacyjne rozwiązania, tylko umacniają jego pozycję. Dotychczas prowadzone liczne badania oraz nowe projekty wskazują jednoznacznie na olbrzymi wzrost zarówno wartości rynku druku 3D jak i jego olbrzymią dynamikę wzrostu.

Główny zakres działalności firm związanych z drukiem 3D obejmuje:

- usługi wydruku 3D,
- produkcja i sprzedaż drukarek,
- dystrybucja urządzeń oraz filamentów.

Aktualnie w Polsce funkcjonuje 33 dystrybutorów drukarek 3D, podzespołów do drukarek oraz

akcesoriów, w tym 7 dystrybutorów wyłącznych na Polskę. Według raportu: „Druk 3D” z 2022 r. w latach 2019–2021 nastąpił 8-krotny wzrost sprzedaży filamentów, akcesoriów i części do drukarek 3D. Najwięcej firm zajmujących się tym rodzajem druku zlokalizowanych jest w województwie mazowieckim (23%) oraz wielkopolskim (12%) [1].

Pierwsze polskie firmy produkujące drukarki 3D pojawiły się na rynku 4 lata temu. Pierwszą firmą była pochodząca z Darłowa firma Unique Design (obecnie 3NOVATICA z siedzibą w Warszawie), której drukarka GATE (w wersji I) niedawno została opisana na blogu Forbot.pl. Cena sprzedaży polskich drukarek 3D na rynkach światowych wynosi od 1 500 do 5 000 dolarów [1, 2]. Na podstawie informacji pochodzących od czołowych polskich producentów drukarek można zakładać, że łączna ilość wyprodukowanych przez nich urządzeń

Analiza potencjalnych materiałów pochodzenia ceramicznego stanowiących dodatek osnowy granulatu

w 2019 roku wyniosła około 15 tys. sztuk (na cały Świat). Z kolei firma SmarTech Analysis oszacowała aktualną wartość całego rynku druku 3D na kwotę 10,4 mld dolarów oraz przewiduje, że w ciągu najbliższej dekady ta wartość wzrośnie do poziomu 53,8 mld dolarów [1]. Jak widać za-potrzebowanie na filament o coraz to większych właściwościach wytrzymałościowych stale rośnie.

Ze względu na zapotrzebowanie na materiały do druku 3D zauważa się wzrost zainteresowania filamentami o podwyższonych właściwościach. W latach 2012–2015 czołowe firmy analityczne na czele z Gartnerem, wieściły nadejście wielkiego triumfu technologii addytywnych. Według ich prognoz i przewidywań, do 2020 r. miało sprzedawać się po kilka milionów drukarek 3D rocznie, a motorem napędowym miały być urządzenia konsumenckie, stojące praktycznie w każdym domu. Rozwój druku 3D przesunął się jednak w kierunku technologii przemysłowej, która powoli, lecz sumienie pracuje na swoje miejsce wśród innych technik wytwórczych [3, 4]. Nie oznacza to, że rynek druku 3D wyhamował. Zmienił jednakże swoją strukturę rozwoju – zmienia się jego dynamika oraz struktura przychodów z poszczególnych zakresów działalności wskazanych powyżej [5].

2. Materiał badawczy

W celu dokonania oceny możliwości wykorzystania pozyskanego materiału badawczego jako dodatek do osnowy granulatu kompozytowego przebadano materiały dostępne na rynku. Poszukiwano materiałów, które stanowią uboczne produkty procesów technologicznych, analizując przy tym również wielkość rynku i możliwość zagospodarowania. W ramach testów wytypowano materiały ceramiczne pochodzenia przemysłowego, jak popioły lotne z Elektrowni Połaniec. Próbkę pobierano okresowo w celu przebadania zmienności materiału.

W ramach badań pozyskano również materiał badawczy z cementowni Ożarów w postaci pyłów by-passowych. W celu pozyskania materiału przeprowadzono szczegółową analizę rynku obecnie

funkcjonujących cementowni a terenie Polski, przeanalizowano ich strukturę techniczną, proces technologiczny oraz możliwość wyodrębnienia materiału do badań. Ponadto, kolejnym źródłem, gdzie poszukiwano możliwości pozyskania materiału do badań była nanokrzemionka stanowiąca uboczny produkt produkcji w zakładzie hutniczym.

3. Analiza materiałów ceramicznych oraz wyniki

A. Pyły lotne

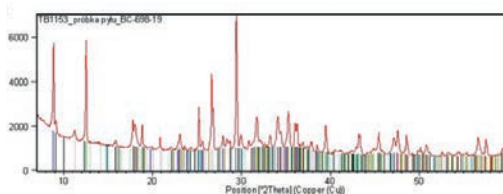
Próbki pobierano okresowo w celu przebadania zmienności materiału. Otrzymane analizy próbek wykazały, że:

- wilgotność badanych popiołów była zróżnicowana;
- odnotowano straty prażenia;
- zawartość części lotnych jest zróżnicowana.

Wszystkie popioły, poza próbką nr 9 i próbką nr 10 miały niską wilgotność (do ok. 1%), podobnie straty prażenia w stanie suchym dla wszystkich pozostałych popiołów były niskie (< 7%). Zawartość części lotnych jest mniejsza od strat prażenia, przeciętnie o ok. 2%, za wyjątkiem próbki nr 9, który mimo znacznego udziału strat prażenia, zawiera tylko ok. 2,6% części lotnych.

B. Pył by-passowy

Jak wykazała wstępna analiza materiału, cechuje się on znaczną zmiennością oraz wysoką zawartością alkaliów. Ponadto materiał odznacza się wysoką zawartością wapnia oraz krzemu.



Rys. 1. Dyfraktogram materiału badawczego

Ponadto należy mocno podkreślić, że przeanalizowany materiał odznacza się znaczną zawartością chloru co niekorzystnie wpłynęłoby na dalsze etapy wytwarzania granulatu.

Tabela 2. Skład chemiczny pyłów by-passowych pod kątem zawartości chlorków i siarczanów

Rodzaj badań	Próbka – Cementownia Ożarów	Metoda badania
Zawartość chlorków Cl ⁻ [%]	3,546	PN-EN 196-2:2013-11
Zawartość siarczanów SO ₃ [%]	2,69	

Magdalena Pękalska

C. Nanokrzemionka

Jak wykazała analiza chemiczna badanego materiału wykazuje on zawartość krzemu na poziomie 95,753% oraz Mg 1,942%. Należy również podkreślić iż przeprowadzone analizy za pomocą Spektrometru Thermo Scientific Niton XL3t 980 GOLDD+ wykazały, że materiał odznacza się również zawartością chloru na poziomie 0,203%.



Rys. 2. Próbkę materiału badawczego w postaci nanokrzemionki

4. Wnioski z przeprowadzonych badań

Jak wykazała analiza materiałów w postaci pyłów lotnych, ze względu na zbyt dużą zmienność materiału został on odrzucony do dalszego etapu badań.

W przypadku pyłu by-passowego, ze względu na wysoką zawartość chloru również został on odrzucony jako materiał do dalszych badań. Jest to spowodowane faktem, że chlor działa niekorzyst-

nie w kontakcie ze stalowymi elementami np. linii do produkcji filamentu, czy elementów drukarki 3D i powoduje ich korozję.

Analiza nanokrzemionki wykazała z kolei niewielką zawartość chloru oraz niewielką zmienność w zakresie składu, co daje pozytywne rekomendacje do dalszego wykorzystania materiału w kolejnym etapie procesu badawczego.

Kolejne czynności badawcze będą polegać na analizie wpływu wielkości procentowego udziału materiału ceramicznego na granulat kompozytowy, jego rozkład w żyłce filamentu i wpływ na jakość i wytrzymałość mechaniczną wydrukowanych elementów próbných.

Literatura

- [1] Blog Forbot.pl, <https://forbot.pl/blog/rynek-druku-3d-w-polsce-raport-dzieki-printelize-id11433> (dostęp: 12.09.2022).
- [2] Czerwiński K., Czerwiński M., „Drukowanie w 3D”, Warszawa 2013.
- [3] Wimpenny D.I., Pulak M., Pandey L., Kumar J., „Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies”, Springer, 2017.
- [4] Siemiński P., Budzik G., „Techniki przyrostowe. Druk Drukarki 3D”, Warszawa 2015.
- [5] Bieniaś J., „Struktura i właściwości materiałów kompozytowych”, Lublin 2002.

Abstract: An analysis of materials that could potentially be an addition to the matrix of the composite granulate used for 3D printing was carried out. The composite materials market is still very absorbent when it comes to the use and application of new additives for composite granules. It might seem that everything has already been done in the field of 3D printing. As it turns out, scientists in this field are still looking for new and breakthrough solutions. The use of materials from the market, which are a kind of by-product of production in industry, can be an excellent solution as an addition to composite granulate. The conducted analyzes and searching for material on the market are, in a way, a response to the market demand.

Keywords: ceramic material, composite granulate, 3D printing, composites

MARCIN KNUTELSKI^{1,2}

1 – Cebrio Grzegorz Pelczar

2 – Silesian University of Technology

Inteligentne pomiarowe kompozyty FRP

Abstrakt: Na świecie trwają prace nad opracowaniem i możliwościami zastosowania sensorów optycznych w długich strukturach kompozytowych o okrągłym przekroju, służących do wzmocnienia struktury konstrukcji budowlanych i dużych kompozytowych struktur nośnych wraz z monitorowaniem odkształceń w czasie rzeczywistym. Obecnie niewiele jest na rynku rozwiązań do monitorowania ciągłego wybranych elementów obiektów inżynierskich, budowlanych i konstrukcji. Dostępne rozwiązania substytucyjne – systemy czujników punktowych – w ograniczonym tylko zakresie odpowiadają na rosnące oczekiwania rynku.

Słowa kluczowe: SHM, czujniki optyczne

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach zauważa się rosnące zainteresowanie systemami monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich w aspekcie oceny strukturalnej, w różnych obszarach inżynierii takich jak: inżynieria cywilna, mechaniczna, morska, wojskowa, lotnicza czy energetyczna. Uwagę instytucji akademickich, agencji rządowych i przemysłu przyciąga technologiczny potencjał SHM (Structural Health Monitoring) [1–3], którego celem jest dostarczanie w czasie rzeczywistym kluczowych informacji dotyczących uszkodzeń strukturalnych i zapewnienie oczekiwanej krytycznej wydajności monitorowanych obiektów podczas eksploatacji.

Pomimo, że zainteresowanie SHM zwiększa się wraz z ilością prowadzonych badań jak i realizowanych wdrożeń, jego pierwotnej koncepcji można doszukiwać się w już w historycznych, pierwszych próbach w zakresie konceptualizacji, projektowania bardziej wymagających konstrukcji, narażonych na uszkodzenie, a dalej w określaniu możliwości ich ewentualnej naprawy. Całość sprowadza się do potrzeby maksymalnego wydłużenia okresu użytkowania konstrukcji jako, że zarówno rodzaj materiału, wiek materiału, sposób

eksploatacji czy poziom zaawansowania technologicznego konstrukcji ma istotny wpływ na jego wydajność oraz długość maksymalnej eksploatacji. Nie do zakwestionowania jest fakt, że każda konstrukcja z biegiem czasu straci swoje pierwotne własności.

Badanie i ocenę stanu konstrukcji obiektów inżynierskich można przeprowadzać jednorazowymi kontrolami bądź w sposób ciągły. Obecnie na rynku dostępnych jest niewiele systemów monitorowania ciągłego wybranych parametrów obiektów inżynierskich, budowlanych czy konstrukcji szczególnie narażonych na działanie czynników zewnętrznych (kadłuby jachtów i łodzi, szandory/grodzice, elementy konstrukcyjne turbin wiatrowych, naczepy samochodów ciężarowych, wagony pociągów czy tramwaje). Dostępne rozwiązania substytucyjne – systemy czujników punktowych – w ograniczonym tylko zakresie odpowiadają na rosnące oczekiwania rynku.

Postęp technologiczny oraz popularyzacja technologii BIM (Building Information Modeling) wymuszają na dostawcach rozwiązań dla budownictwa poszukiwanie coraz to dokładniejszych narzędzi pomiarowych i monitorujących parametry konstrukcyjne obiektów. Producenci wskazanych

Marcin Knutelski

elementów poszukują rozwiązań, które pozwolą w trybie ciągłym i systematycznym monitorować zmiany parametrów we wszystkich kierunkach produkowanych elementów pod wpływem czynników zewnętrznych (np. naprężeń, odkształceń sprężystych, odkształceń statycznych), które mają znaczenie dla zachowania pierwotnych właściwości konstrukcji. Obecnie stosowane rozwiązania tylko częściowo zaspokajają tę potrzebę, ponieważ oferują zazwyczaj pomiary punktowe (tensometry, czujniki odkształceń), które nie oddają rzeczywistej zmiany parametrów w całym przekroju konstrukcji.

2. Pomiarowe pręty kompozytowe

Kompozytowe pręty z wbudowanym czujnikiem optycznym mogą trafić do budownictwa, w szczególności jako elementy obiektów inżynierskich czy obiektów infrastrukturalnych. Wysoka i podatna na wahania cena stali jest jednym z głównych czynników wzrostu zainteresowania prętami FRP (Fiber Reinforced Polymer) w celu zastąpienia konwencjonalnych prętów stalowych w konstrukcjach żelbetowych. Pomimo wysokiej wytrzymałości wzdłużnej [4], kompozytowe pręty FRP charakteryzują się stosunkowo niską wytrzymałością poprzeczną ze względu na swój jednokierunkowy charakter wzmocnienia włóknami ciągłymi. Jednokierunkowe wzmocnienie stanowi ograniczenie kompozytowych prętów wytworzonych z włókien ciągłych poddawanych odkształceniom poprzecznym.

Jedną z koncepcji opracowania zaawansowanych inteligentnych prętów zbrojeniowych FRP jest poprawa bezpieczeństwa konstrukcyjnego zbrojenia kompozytowego. Zintegrowany sensor optyczny w strukturze kompozytowej może być czujnikiem rozproszonym lub lokalnym bądź kombinacją obu i stanowić dobre narzędzie do wykrywania lokalnych i globalnych zmian zachodzących w konstrukcjach.

Jednym z napotykanym problemów w niemal każdej konstrukcji cywilnej są uszkodzenia spowodowane postępującym „mechanizmem korozji”. Proces stopniowego niszczenia niektórych konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych na skutek ich reakcji z otoczeniem może doprowadzić do pogorszenia właściwości materiału tak jak ma to miejsce w przypadku zbrojenia stalowego w betonie. Rozprzestrzeniająca się korozja stali zbrojeniowej powoduje postępującą degradację

konstrukcji żelbetowych i wpływa wraz z upływem czasu na betonową powierzchnię.

Jedną z alternatyw dla stali, coraz powszechniej stosowaną w inżynierii lądowej, są kompozyty polimerowe wzmocniane włóknami węglowymi, aramidowymi czy szklanymi (FRP) [5]. Kompozyty FRP wykazują wiele zalet nad innymi tradycyjnymi materiałami: są lekkie, mają dobrą odporność na korozję, wysoką wytrzymałość w kierunku ułożenia włókien. Podobnie jak inne materiały konstrukcyjne, FRP mają pewne wady ograniczające ich zastosowanie w wybranych konstrukcjach inżynierskich [6].

Opracowywane rozwiązania monitorowania stanu konstrukcji w czasie rzeczywistym mogą w pewnym stopniu rozwiązać problem stosowania materiałów FRP w nowoczesnych i wymagających konstrukcjach inżynierskich i stanowić zamiennik konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Jednym z takich rozwiązań są kompozytowe elementy strukturalne z zintegrowanymi czujnikami optycznymi. Zapewnienie jednocześnie funkcji zbrojenia (wzmocnienia konstrukcji) oraz monitorowania parametrów może mieć wiele zalet.

3. Podstawowe zasady

Zakres możliwości inteligentnych pomiarowych prętów kompozytowych uzależniony jest od zastosowanych czujników światłowodowych oraz właściwości materiałów wykorzystanych do integracji owych czujników w strukturach kompozytowych. W dalszej części opisano w skrócie poszczególne materiały wchodzące w skład budowy pomiarowych prętów kompozytowych oraz zaprezentowano proces produkcji.



Zdj. 1. Kompozytowy pomiarowy czujnik DFOS firmy Nerve-sensor ułożony wzdłuż zbrojenia stalowego (źródło: <https://nerve-sensors.com/product/epsilonsensor/>).

3.1. Czujniki światłowodowe

Czujniki światłowodowe ze względu na zalety, takie jak odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, wysoka czułość, wysoka odporność na korozję, czy małe rozmiary, są obiecującymi narzędziami monitorowania różnych parametrów [8]. Pod wpływem oddziaływania z środowiskiem reagują na zmianę intensywności optycznej, fazy, częstotliwości, polaryzacji, długości fali lub modu [9]. W literaturze branżowej można odnaleźć informacje o różnych typach czujników światłowodowych, w tym przykładowo:

- Fiber Bragg Grating (FBG),
- detekcję rozproszoną (BOTDA, OTDR),
- interferometry Fabry-Perot (FP),
- SOFO.

Spośród dostępnych rozwiązań szczególnie potencjał do zastosowań w inżynierii lądowej wykazują czujniki FBG, światłowody rozproszone oraz interferometry światłowodowe Fabry-Perot (FP).

3.2. Kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami

Materiały FRP składają się z osnowy (żywica epoksydowa) i wzmocnienia. Jako wzmocnienie w konstrukcyjnych kompozytach polimerowych typu FRP stosuje się przede wszystkim różnego rodzaju włókna (aramid, węgiel, szkło i bazyt),

których wskaźniki wytrzymałościowe znajdują odzwierciedlenie w wskaźnikach wytrzymałościowych produktu końcowego [10]. Materiały te cechują się wysoką odpornością na korozję, dobre właściwości mechaniczne, które są prawie podobne do właściwości konwencjonalnej stali wzdłuż kierunku włókien, dlatego są coraz powszechniej wykorzystywane w budownictwie [11–13]. Zalety, jakie wykazują kompozyty FRP, są odpowiednie, aby chronić zintegrowane z nimi włókna światłowodowe i otrzymać inteligentne narzędzie pomiarowe.

3.3. Proces produkcji

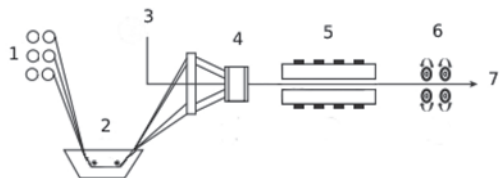
Jedną z metod produkcji pomiarowych kompozytowych prętów zbrojeniowych FRP jest proces pultruzji. Zaletą wymienionej technologii jest możliwość kontrolowanego umieszczania ciągłego włókna, czujnika optycznego i osnowy w procesie produkcyjnym co pozwala na optymalizację właściwości strukturalnych. Przeciągane czujniki światłowodowe i impregnowane żywicą włókna przechodzą przez formę matrycy (rys. 1). Nasylenie włókien żywicą pozwala na wzmocnienie materiału, natomiast odpowiednio dobrana temperatura inicjuje proces polimeryzacji. W końcowym etapie masa materiału wzmacniającego

Tabela 1. Zestawienie parametrów włókien stosowanych w produkcji kompozytów FRP [10].

Rodzaj włókna	Typ	Gęstość	Moduł Younga [GPa]	Wytrzymałość [MPa]	Odszałowienie niszczące [%]	Uwagi
Szkłane	E	2,57	72,5	3300-3500	2,5-4,5	Najpowszechniejsze
	E-CR	2,71	72,5	3330	2,5-4,5	Chemoodporne
	C	2,46	74	2350	2,5-3,2	
	S	2,47	88	4600	3,0-5,2	O zwiększonej wytrzymałości
	R	2,55	86	4400	3,0-5,1	
	AR	2,70	70-75	3500	2,5-3,5	Odporne na zasady
Włókna węglowe i grafitowe	T300	1,76	230	3530	1,5	Włókna węglowe tzw. wysokowytrzymałe
	T400H	1,8	250	4410	1,8	
	T700S	1,8	230	4900	2,1	
	T800H	1,81	294	5490	1,9	Włókna tzw. o module pośrednim
	T1000G	1,8	294	6370	2,2	
	M40J	1,77	377	4410	1,2	Włókna wysokomodułowe
	M60J	1,94	588	3920	0,7	
Aramidowe	Kevlar29	1,44	58	3620	3,7	
	Kevlar49	1,44	124	3620	2,9	

Marcin Knutelski

utwardza się i dopasowuje do kształtu matrycy co skutkuje otrzymaniem trwałego i sztywnego materiału wzmocnionego strukturalnie o określonym przekroju.



Rys. 1. Schemat wytwarzania pultrudowanych pomiarowych prętów FRP. 1- włókno; 2 – żywica; 3 – czujnik optyczny; 4 – matryca; 5 – kalibrator i urządzenie grzewcze; 6 – urządzenie ciągnące; 7 – gotowy produkt.

Do procesu produkcyjnego wykorzystuje się urządzenia optyczne, takie jak optyczna analiza w dziedzinie czasu Brillouina (BOTDA), optyczna reflektometria w dziedzinie czasu Brillouina (BOTDR), demodulator FBG i optyczna reflektometria w dziedzinie czasu (OTDR). Zastosowanie wymienionych urządzeń optycznych ma na celu kontrolowanie wszelkich wad produkcyjnych wywołanych przerwami podczas pultruzji. Inną opisywaną w literaturze metodą wytwarzania pomiarowych prętów kompozytowych FRP jest przygotowanie dodatkowej osłony chroniącej czujniki przed procesem pultruzji. Rozwiązanie to jednak odznacza się większym stopniem skomplikowania.

4. Podsumowanie

Inteligentne pomiarowe kompozyty oparte na FRP mogą stopniowo zmniejszać wagę konstrukcji bez zmniejszania jej wytrzymałości. Pomimo widocznego postępu wciąż trwają liczne odkrycia i ulepszenia w obszarze badań inteligentnych pomiarowych komponentów i struktur, w tym projektowania i wytwarzania nowych czujników zintegrowanych z kompozytami FRP, które są bardziej wytrzymałe i mogą wytrzymać bardzo trudne warunki.

Niezależnie od tego czy konstrukcje, które eksploatujemy uznajemy za „nowoczesne” czy wręcz przeciwnie za „archaiczne”, są nieprzerwanie narażone na działanie czynników zewnętrznych, obciążenia, agresywne środowisko, upływ czasu, wstrząsy sejsmograficzne w przypadku budynków, co w konsekwencji może doprowadzić do zniszczenia, a w najgorszym wypadku doprowadzić do zagrożenia życia lub śmierci eksploatatora.

Dzięki pojawiającym się nowoczesnym i inteligentnym rozwiązaniom w obszarze monitorowania stanu konstrukcji w czasie rzeczywistym będzie możliwe unikanie wypadków takich jak katastrofa budowlana w Rydze, gdzie w 2013 r. doszło do zawalenia się dachu supermarketu „Maxima XX”, w której śmierć poniosły 54 osoby [14], zawalenie się wiaduktu w Ponte Morandi we Włoszech czy zawalenie się wiaduktu w Koszalinie w 2021 roku (Zdj. 2).



Zdj. 2. Katastrofa wiaduktu w Koszalinie w 2021 r. (fot. prk24.pl).

Literatura

- [1] Doebling SF. et al., "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", *The Shock and Vibration Digest*, May 1996.
- [2] Raghavan A., "Review of guided wave structural health monitoring", *The Shock and Vibration Digest*, No. 39(2), March 2007.
- [3] Sohn H. et al., "A review of structural health monitoring literature. 1996-2001", Los Alamos National Laboratory Report.
- [4] Attia M.M. et al., "Behavior of FRP rods under uniaxial tensile strength with multiple materials as an alternative to steel rebar", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, 2022.
- [5] Xiao Y., "Applications of FRP composites in concrete columns", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 7 Issue 4, 2004.
- [6] Hollaway L.C., "A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 12, 2010.
- [7] Biswas P. et al., "Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structure", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 157, Issue 1, 2009.
- [8] Lopez-Higuera J.M. et al., "Fiber optic sensors in structural health monitoring", *Journal of Lightwave Technol*, Vol. 29, Issue 4, 2011.
- [9] Giallorenzi T.G. et al., "Optical fiber sensor technology", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 30, Issue 4, 1982.
- [10] Boczkowska A., Krzesiński G., „Kompozyty i techniki ich wytwarzania”, Warszawa 2016.
- [11] Davids W.G. et al., "Development, assessment and implementation of a novel FRP composite girder bridge", *Construction and Building Materials*, Vol. 340, 2022.
- [12] Zhao X-L., Zhang L., "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", *Engineering Structures*, Vol. 29, Issue 8, 2007.
- [13] Cheng L. et al., "New bridge systems using FRP composites and concrete: a state-of-the-art review", *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 8, Issue 4, 2006.
- [14] BBC News, <https://www.bbc.com/news/world-europe-25045879> (dostęp: 12.09.2022).

Abstract: Worldwide, work is underway on the development and application of optical sensors in long composite structures with a circular cross-section for strengthening the structure of building structures and large composite load-bearing structures along with monitoring deformations in real time. Currently, there are few solutions on the market for continuous monitoring of selected elements of engineering, construction and structures. The available substitute solutions – point sensor systems – only to a limited extent meet the growing market expectations.

GRZEGORZ PELCZARWspólna Szkoła Doktorska Politechniki Śląskiej
FAM – Technika Odlewnicza Sp. z o.o.

Charakterystyka mechaniczna dodatków w kompozytach polimerowych z recyklingu kabli

1. Wprowadzenie

Metale wykorzystywane do produkcji kabli mają szerokie zastosowanie w przemyśle, a zapotrzebowanie na nie stale rośnie. Proces recyklingu kabli pozwala na skuteczny odzysk miedzi i aluminium – ich wytrzymałość sprawia, że pomimo przetwarzania nie tracą swoich najważniejszych właściwości. Pozyskiwanie surowców ze źródeł wtórnych umożliwia nie tylko oszczędzanie złóż naturalnych, ale też ma znaczny wpływ na redukcję zanieczyszczenia powstającego w procesie wydobywania metali.

Aktualnie na rynku odzysku miedzi i aluminium z kabli, pojawia realna potrzeba, związana z odzyskiem odpadów polimerowych występujących w kablach (głównie PVC). Wspomniany rynek jest bardzo chłonny, co przekłada się na poszukiwanie nowych metod i rozwiązań dla tej dziedziny gospodarki. Może to stanowić źródło nie tylko wymiernych korzyści dla przemysłu, ale również dla środowiska.

W przeciwieństwie do miedzi i aluminium, odpady polimerowe takie jak PVC, nie mogą być przetwarzane w postaci czystego polimeru. W zależności od projektowanych właściwości i kierunków zastosowań, musi on zawierać każdorazowo odpowiednie środki pomocnicze. Są to przede wszystkim plastyfikatory, umożliwiające termoplastyczne przetwórstwo polimeru i nadające tworzywu odpowiednią wytrzymałość mechaniczną i elastyczność oraz stabilizatory, zapobiegające degradacji polimeru podczas przetwórstwa. Oprócz wymienionych, w przetwórstwie PVC na wyroby elastyczne i twarde, stosuje się wiele innych dodatków, jak związki do działania smarującym, wypełniacze, pigmenty. Ponadto, środki

zmniejszające palność, antystatki, czy środki spieniające. Co więcej, kompozycje PVC przeznaczone na wyroby twarde, wymagają prawie zawsze udziału modyfikatorów udarności i płynięcia.

2. Materiał badawczy

Próbki do badania pozyskano od firmy FBL Sp. z o.o., wybierając odpady pokablowe, pochodzące z różnych źródeł. Wśród zebranego materiału badawczego zidentyfikowano odpady kablów telekomunikacyjne, energetyczne, wiązki samochodowe i inne. Materiał zabrudzony ziemią oczyszczono, a następnie pocięto na 50-cio centymetrowe odcinki (Zdjęcie 1), a w dalszej kolejności rozdrobniono za pomocą młyna na frakcję o wielkości 5–10 mm.

Wstępnie rozdrobniony materiał poddano separacji, oddzielając frakcję metaliczną od frakcji polimerowej. Separację przeprowadzono na stole wibracyjnym. Część polimerową rozdrobniono ponownie otrzymując cząstki o wielkości ok. 1,5 mm na laboratoryjnym młynku firmy Tamel o mocy 2,2 kW wyposażonym w sito 1,5 mm. Z otrzymanego materiału przygotowano 4 różne mieszanki z dodatkami, a następnie wykonano serie kształtek kompozytowych do statycznej próby rozciągania oraz próby ugięcia trójpunktowego na maszynie wytrzymałościowej.

Jako dodatki do mieszanek wykorzystano dostępne na rynku kompatybilizatory w ilościach 0%, 3%, 6% i 9% dodatków dla poszczególnych mieszanek. Kształtki przygotowano na miniwtryskarce laboratoryjnej Haake MiniLab II. W celu przygotowania kształtek przeprowadzono analizę termicz-



Zdjęcie 1. Próbkę kabla pociętą na odcinki 50 cm.

Tabela 1. Parametry wytwarzania kształtek na miniwtryskarce do statycznej próby rozciągania i próby ugięcia trójpunktowego.

Parametr [jednostka]	Wartość
Temperatura układu uplastyczniającego [°C]	200 / 200*
Temperatura cylindra wtryskowego [°C]	205 / 205*
Temperatura formy wtryskowej [°C]	110 / 115*
Ciśnienie wtrysku [bar]	880 / 820*
Czas wtrysku [s]	10 / 10*
Ciśnienie docisku [bar]	700 / 700*
Czas docisku [s]	3 / 3*

ną metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DCS), oszacowano temperaturę przetwórstwa frakcji polimerowej, przy założeniu ograniczenia degradacji termicznej frakcji poli(chlorku winylu) z wydzielaniem produktów gazowych. W tabeli 1. Przedstawiono parametry otrzymania kształtek 1BA (PN-EN ISO 527) do statycznej próby rozciągania i próby ugięcia trójpunktowego*.

Otrzymane kształtki wykazywały stosunkowo niską jakość powierzchni ze względu na dużą liczbę zanieczyszczeń metalicznych, które utrudniały przepływ stopu przez zwężkę formy wtryskowej do gniazda formującego, a także wykazywały migrację do powierzchni w warunkach przepływu stopu. Ze względu na brak termodynamicznej mieszalności komponentów, krystalizacja powodowała lekką deformację geometrii wyprasek na skutek czego odrzucono wszystkie próbki, których odcinek pomiarowy uległ zniekształceniu lub widocznej nieciągłości, wynikającej z zatkania kanału gniazda formy.

3. Statyczna próba rozciągania

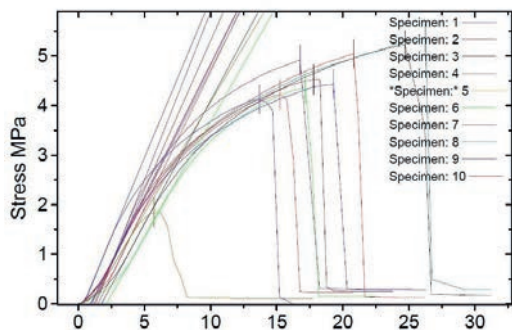
Przeprowadzono statyczną próbę rozciągania kształtek typu 1BA (PN-EN ISO 527) na maszynie wytrzymałościowej Instron (Model 4204, USA) z wykorzystaniem głowicy 1 kN. Szybkość odkształcania wynosiła 50 mm/min. Profile rozciągania dla wszystkich wyprasek były zbliżone. Materiały nie wykazywały płynięcia plastycznego a zerwanie następowało we wszystkich przypadkach zaraz po przekroczeniu granicy plastyczności. Wyniki uzyskano na podstawie 10 powtórzeń dla danej kompozycji (Tabela 2).

Wykonano również profile rozciągania poszczególnych materiałów (na osi x przedstawiono odkształcenie (strain) w %) (Wykresy: 1–4). Poniżej zaprezentowano również zdjęcia kształtek przed i po przeprowadzeniu statycznej próby rozciągania (Zdjęcie 2 i 3).

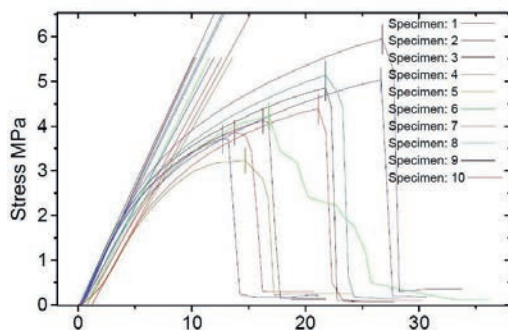
Tabela 2. Zestawienie średnich wyników badanych kompozytów dla statycznej próby rozciągania.

Materiał	E [MPa]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ [%]	σ_{break} [MPa]	ϵ_{break} [%]
Kompozyt 0% dodatku (P00) ¹	55,86±6,93	4,69±0,46	19,19±4,14	4,51±0,61	19,70±4,14
Kompozyt 3% dodatku (P03) ¹	50,65±4,04	4,45±0,80	19,42±5,16	3,71±1,36	20,99±5,05
Kompozyt 6% dodatku (P06) ¹	46,12±5,87	3,88±0,89	18,67±6,19	3,60±1,05	19,73±6,22
Kompozyt 9% dodatku (P09) ¹	52,77±4,34	4,32±0,86	20,00±5,31	3,57±1,13	21,60±5,45

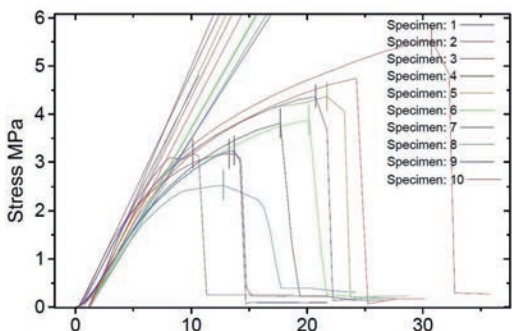
Gdzie: E [MPa] – moduł Younga; $\sigma_{\max}$ [MPa] – wytrzymałość na rozciąganie (napężenie maksymalne); $\epsilon_{\max}$ [%] – odkształcenie odpowiadające maksymalnej wartości napężenia; σ_{break} [MPa] – napężenie przy zerwaniu; ϵ_{break} [%] – odkształcenie przy zerwaniu; 1 – oznaczenie próbki dla danej kompozycji



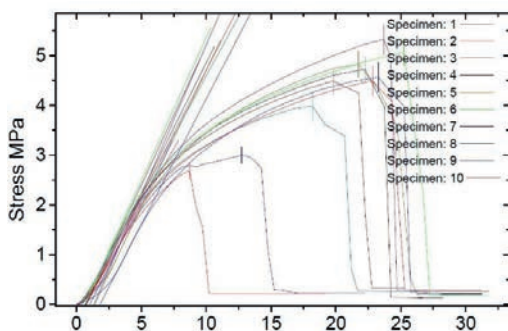
Wykres 1. Profil rozciągania dla próbki P00.



Wykres 2. Profil rozciągania dla próbki P03.



Wykres 3. Profil rozciągania dla próbki P06.



Wykres 4. Profil rozciągania dla próbki P09.



Zdjęcie 2. Wykonane kształtki na miniwtryskarce Haake MiniLab II.



Zdjęcie 3. Kształtki po statycznej próbie rozciągania.

Część próbek nie uległa rozerwaniu w odcinku pomiarowym, ponieważ nagromadzona ilość zanieczyszczeń metalicznych generowała wytworzenie się niewrażliwych punktów o niższej wytrzymałości, gdzie osnowa polimerowa, w której się znajdowały, była najcieńsza, co przy niewielkiej grubości kształtek powodowało powstawanie karbów.

4. Próba ugięcia trójpunktowego

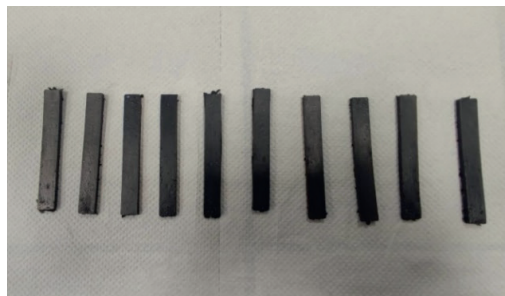
W kolejnym etapie badań przeprowadzono próbę trójpunktowego ugięcia prostokątnych kształtek o wymiarach 72,2×10×3,1 mm na ma-

szynie wytrzymałościowej Instron (Model 4204, USA) z wykorzystaniem głowicy 1 kN. Szybkość odkształcania wynosiła 10 mm/min. Rozstaw podpór wynosił $L_0=16h=49,6$ mm (gdzie „h” stanowiło grubość próbki – 3,1 mm) – norma PN-EN ISO 178. Droga standardowa ugięcia wynosiła 20 mm. Profile ugięcia trójpunktowego dla wszystkich kształtek były zbliżone. Wyniki uzyskano na podstawie 10 powtórzeń dla danej kompozycji (Tabela 3). Zaprezentowano również zdjęcia kształtek przed i po przeprowadzeniu trójpunktowego ugięcia (Zdjęcie 4 i 5).

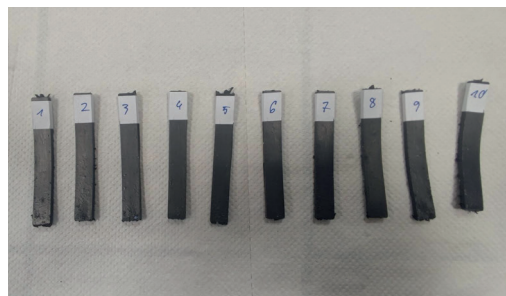
Tabela 3. Średnie wyniki z 10 powtórzeń dla poszczególnych kompozycji próby trójpunktowego ugięcia.

Materiał	σ_c [MPa]	σ_{max} [MPa]	$\epsilon_{\sigma max}$ [mm]
P00	2,87±0,21	3,74±0,27	11,15±0,49
P03	2,96±0,13	3,76±0,18	10,63±0,57
P06	2,57±0,15	3,37±0,18	11,16±0,56
P09	2,56±0,12	3,29±0,19	10,84±0,62

Gdzie: σ_c [MPa] – naprężenie zginające przy ugięciu konwencjonalnym $s=1,5h=4,65$ mm; σ_{max} [MPa] – wytrzymałość na zginanie (maksymalne naprężenie w materiale); $\epsilon_{\sigma max}$ [mm] – droga ugięcia odpowiadająca maksymalnej wartości naprężenia



Zdjęcie 4. Wykonane kształtki na miniwtryskarce Haake MiniLab II przeznaczone do próby ugięcia trójpunktowego.



Zdjęcie 5. Kształtki po testach ugięcia trójpunktowego.

Wykonano również profile zginania trójpunktowego poszczególnych materiałów (na osi x przedstawiono przemieszczenie [ang. *Displacement*] w mm) (Wykresy: 5–8).

5. Obserwacje i wnioski

W temperaturze przetwórstwa powyżej 210 °C zaobserwowano wydzielanie się dużych ilości gazowych produktów degradacji termicznej o ostrym i drażniącym zapachu (prawdopodobnie chlorowodor). Zaobserwowano, że łatwość przetwarzania dostarczonych kompozycji przy stałej temperaturze przetwórstwa rośnie w szeregu: kompozyt z 0% dodatków (najgorsza); kompozyt z 3% dodatków; kompozyt z 6% dodatków; kompozyt z 9% dodatków (najlepsza). Sugeruje to możliwość obniżenia temperatury przetwórstwa przy zachowaniu prawidłowego zapewnienia formy wtryskowej. Kompozyty P03, P06, P09 wykazywały również lepszą jakość powierzchni wypraski niż dla kompozytu bez dodatku kompatybilizatora.

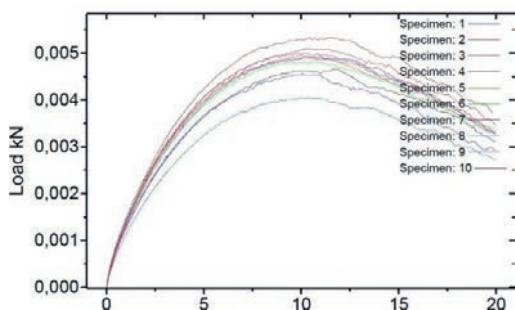
Różnice zaobserwowane we właściwościach mechanicznych dostarczonych kompozycji są nieznaczne, wskazują jednak na niewielką plastyfikację próbek P03 oraz P06 względem materiału P00. Obniżenie modułu Younga oraz wytrzymałości na rozciąganie świadczy o łatwiejszej zdolności do odkształcania. Kompozycja P03 ce-

chowała się właściwościami mechanicznymi najbardziej zbliżonymi do P00, jednak wykazywała dużo lepsze parametry przetwórcze (potencjalnie niższe temperatury przetwórstwa) oraz lepszą jakość powierzchni wyprasek. Znaczne odchylenia standardowe wartości modułu Younga oraz odkształcenia przy zerwaniu oraz odpowiadającemu maksymalnemu naprężeniu w materiale, wynikają z dużej ilości wtrąceń metalicznych, które osłabiły materiał działając jako „karby”.

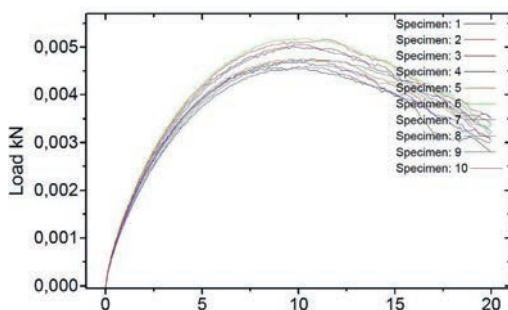
Ze względu na brak odcinka spełniającego prawo Hooke’a (zakresu odkształceń liniowo-sprężystych) na krzywych zginania, nie wyznaczono modułu zginającego. Ze względu na elastyczność testowanego materiału nie nastąpiło pękanie kształtek, nawet pomimo ustalenia większej wartości ugięcia niż standardowe 5%. Wyznaczono wytrzymałość na zginanie badanych materiałów (σ_{max}). W zaistniałym przypadku, gdy przygotowane kompozycje charakteryzują się profilem ugięcia odpowiadającym materiałom elastycznym, wyznaczono wartość naprężenia zginającego przy ugięciu konwencjonalnym, wynoszącym $s=1,5$ krotność wartości grubości badanych kształtek.

Różnice w wartości zmierzonej wytrzymałości na rozciąganie były niewielkie i miały w szeregu materiałów: P00, P03, P06, P09, co świadczy o rosnącej plastyczności materiału. Materiał P00

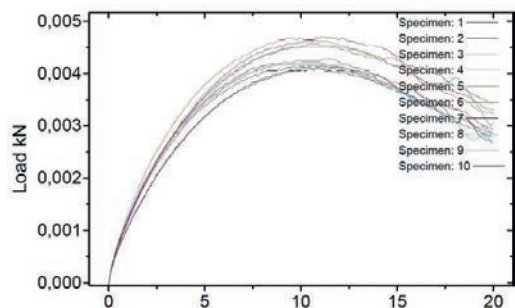
Grzegorz Pelczar



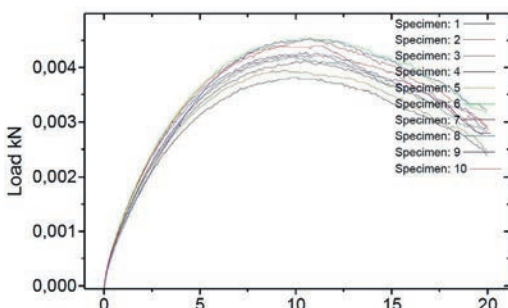
Wykres 5. Profil zginania trójpunktowego dla próbki P00.



Wykres 6. Profil zginania trójpunktowego dla próbki P03.



Wykres 7. Profil zginania trójpunktowego dla próbki P06.



Wykres 8. Profil zginania trójpunktowego dla próbki P09.

zachowywał się najmniej stabilnie, stąd nieco wyższe odchylenie standardowe wytrzymałości na zginanie. Analogiczne tendencje obrazuje parametr naprężenia materiału przy ugięciu konwencjonalnym.

W celu uzyskania lepszej powtarzalności procesu wtrysku oraz lepszej jakości wyprasek, rzutującej na powtarzalność prób na maszynie wy-

trzymałościowej należy uzyskać większy stopień oczyszczenia kompozycji z metalicznych elementów (aluminium, miedź).

W celu zminimalizowania odchyłek standardowych modułu Younga oraz odkształcenia przy zerwaniu dla statycznej próby rozciągania, należy przeprowadzić powtórnie separację frakcji polimerowej.

ARTUR WÓJCIK

Prezes GUSSTECH

Wysokowydajne płyty do wysokiej jakości lekkich konstrukcji w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, morskim i wiatrowym

Kompleksowa wiedza na temat kompozytów z jednego źródła – RAMPF Tooling Solutions i jej polski partner GUSSTECH zapewnia klientom wysokowydajne płyty epoksydowe i materiały płynne, a także obejmuje wsparcie techniczne w zakresie konstrukcji najnowocześniejszych kompozytów.

Kompozyty wzmocnione włóknem stały się materiałem wyjściowym do produkcji części o wysokiej wytrzymałości, takich jak elementy lotnicze (ogony, skrzydła, kadłuby, śmigła), kadłuby łodzi i kadłubów, ramy rowerowe i karoserie samochodów wyścigowych. Inne zastosowania obejmują wędki, zbiorniki magazynowe, panele basenowe do pływania i kije baseballowe. Łącząc wytrzymałość, sztywność i niewielką wagę, kompozyty są niezbędne, gdy trzeba zminimalizować wagę i zmaksymalizować wytrzymałość mechaniczną.

Materiał kompozytowy składa się z włókien wzmacniających i matrycy z żywicy. Włókna zapewniają kompozytowi strukturę i wytrzymałość, podczas gdy żywica utrzymuje włókna razem. Żywica chroni również włókna przed ścieraniem i wpływem środowiska. Wybierając odpowiednią kombinację materiału wzmacniającego i żywicy, producenci mogą osiągnąć właściwości, które dokładnie odpowiadają wymaganiom określonej konstrukcji i założeniom.

Przykład zastosowania (zdjęcie obok): perfekcyjna lekka konstrukcja – firma RAMPF Tooling Solutions dostarczyła wysokiej jakości płyty RAKU® TOOL, które zostały użyte do wykonania

form do produkcji różnych lekkich części legendarnej Corvette C7 GT3-R firmy Callaway.



Gama płyt epoksydowych RAKU® TOOL do najnowocześniejszej produkcji kompozytów

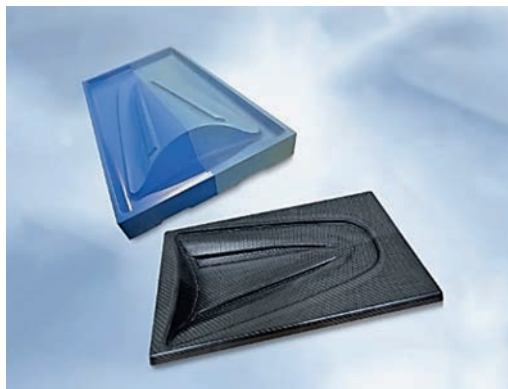
RAMPF Tooling Solutions z siedzibą w Gafenberg w Niemczech oferuje szeroką gamę wysokowydajnych płyt epoksydowych RAKU® TOOL do form, produkcji narzędzi do układania i bezpośredniego oprzyrządowania (zob. zdjęcie obok). Dzięki zastosowaniu tych materiałów w procesie produkcyjnym uzyskuje się doskonałą jakość części w bardzo krótkim czasie. Płyty są stabilne

Artur Wójcik



wymiarowo i wykazują liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej w całym zakresie temperatur (110–200°C). Są łatwe w obróbce, małopylące i bez wiórów izostacyjnych. Do klejenia dostępne są kleje specjalnie dobrane do płyt.

Jednym z wielu wyróżniających się produktów jest płyta epoksydowa RAKU® TOOL WB-o890 (zob. zdjęcie niżej). Jej niezwykle drobna struktura powierzchni znacznie zmniejsza zarówno czas obróbki wykończeniowej, jak i ilość stosowanego uszczelnacza. Co więcej, wykończenie powierzchni



można przenieść z modelu głównego do formy prepregu, dzięki czemu nie jest wymagane ponowne szlifowanie formy, a żywotność form do prepregu jest znacznie zwiększona. RAKU® TOOL WB-o890 jest łatwa i szybka w obróbce oraz kompatybilna ze wszystkimi standardowymi farbami przemysłowy-

mi, środkami antyadhezyjnymi i prepregami epoksydowymi. Temperatura zeszklenia T_g wynosi 110°C.

RAMPF Tooling Solutions opracowuje również i produkuje materiały płynne do różnych technik wytwarzania kompozytów, metod nakładania i zastosowań. Obejmują one:

- **Żelkoty:** dostępne w wersji łatwej do nakładania, szlifowalne, chemoodporne, odporne na ścieranie i styren, polerowalne, ochrona tkaniny, mające odporność na wysoką temperaturę do 190°C.
- **Żywice do laminowania:** dobre właściwości zwilżające ułatwiające nakładanie, dobra wytrzymałość po utwardzeniu w temperaturze pokojowej (brak kruchości), łatwe wyjmowanie części z formy bez zniekształceń, bez rozpuszczalników.
- **Systemy infuzyjne i RTM:** dobre właściwości płynięcia „w próżni” podczas budowy większych elementów, możliwe długie odległości płynięcia, minimalizacja otworów na kołki, dobra wytrzymałość po utwardzeniu w temperaturze pokojowej (brak kruchości), łatwe wyjmowanie części bez zniekształceń, długa żywotność (bezpieczeństwo procesowe), bez rozpuszczalnikowy, szeroki zakres odporności temperaturowej (75–170°C).

Zespół ekspertów GUSSTECH zapewnia kompleksową obsługę klienta

Artur Wójcik, Prezes GUSSTECH – „Nasz zespół ekspertów ma 20 udanych lat współpracy z branżą modelarską i narzędziową w Polsce. Współpracując z wiodącymi krajowymi i międzynarodowymi dostawcami maszyn i materiałów, oferujemy naszym klientom profesjonalne doradztwo, obsługę dostosowaną do potrzeb klienta oraz kompleksowe wsparcie techniczne dla ich projektów. Lekka konstrukcja kompozytowa szybko zyskała na popularności, a produkty RAKU® TOOL firmy RAMPF Tooling Solutions są marką numer jeden na rynku europejskim. Wysokowydajne materiały epoksydowe są bezkonkurencyjne pod względem wydajności i jakości. Jesteśmy gotowi na współpracę z naszymi klientami w zakresie nowych projektów z wykorzystaniem oferowanych innowacyjnych materiałów”.



GUSSTECH Wójcik A., Kołodziej K. sp.j.

ul. Krośnieńska 3, tel: +48 601258207
30-432 Kraków info@gusstech.com
www.gusstech.com

AGNIESZKA BERESKA

Dyrektor ds. Badań i Rozwoju / R&D Director

Noma Resins – spersonalizowane produkty dla branży kompozytowej

Noma Resins to wytwórca nowoczesnych produktów dedykowanych dla przemysłu kompozytowego. Specjalizujemy się w produkcji żywic epoksydowych.

Nasze atuty

Posiadamy własne know-how opracowane w oparciu o wieloletnie doświadczenie w branży chemicznej. Nasza dotychczasowa działalność obejmuje współpracę zarówno z instytutami badawczymi i uczelniami technicznymi, jak również z największymi firmami produkcyjnymi w kraju.



Fot. 1. Siedziba spółki

Posiadamy wykwalifikowaną kadrę B+R wraz z nowoczesnym zapleczem badawczym oraz serwisem technologicznym.

Współpracujemy z klientami nie tylko w procesie sprzedaży naszych produktów, lecz także oferujemy pomoc w ich wdrożeniu. Naszą domeną jest możliwość personalizowania produktów i doskonalenia ich we współpracy z klientem.

Jesteśmy również partnerem w licznych projektach badawczych – oferujemy swoją pomoc w pozyskiwaniu funduszy europejskich.

Nasza firma zlokalizowana jest w Gliwickim Centrum Naukowo-Technologicznym, gdzie swą działal-

ność rozwijają najnowocześniejsze przedsiębiorstwa, ukierunkowane na innowacyjną myśl techniczną.

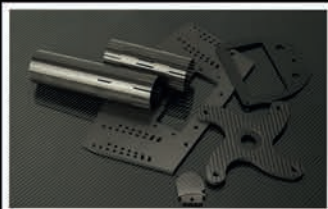
Nasze produkty

- **NOMA COMP** – szereg produktów w postaci żywicy i utwardzaczy pozwalających na tworzenie struktur kompozytowych za pomocą takich technik produkcyjnych jak laminowanie ręczne, infuzja, RTM, prasowanie na gorąco czy pultruzja.
- **NOMA CAST** – linia epoksydowych, supertransparentnych systemów, ulegającym samoistnie odgazowaniu w trakcie utwardzania, umożliwiając uzyskanie perfekcyjnych odlewów bez obecności pęcherzyków powietrza.
- **NOMA GLUE** – to linia epoksydowych systemów klejowych. Dostępne są wersje: tiksotropowane, transparentne, wzmacniane włóknem szklanym i węglowym oraz tzw. „ciekły metal”.
- **NOMA MOULD** – system epoksydowy do termoformowania wyrobów typu PMMA/ABS, zwłaszcza w produkcji sanitariatów i innych produktów wymagających wysokiej odporności termicznej. Zapewnia uzyskanie perfekcyjnej powierzchni oraz długą żywotność form.

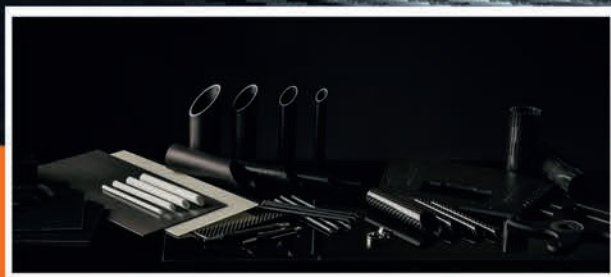


Fot. 2.

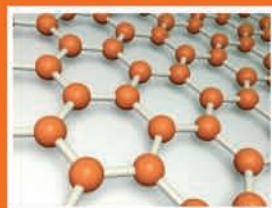
**Noma Resins Sp. z o.o.**ul. Bojkowska 35 A, 44-100 Gliwice
a.bereska@noma.com.pl



CG TEC and Carbon Center offer rods, tubes and plates out of carbon and fiberglass throughout germany, poland and europe. Our products are used wherever low weight, high durability and the highest quality are required.



The goal of the partnership is constantly develop our capabilities - we implement it by improving technology, developing new and innovative products, but above all through an individual approach to the needs of each client. Our passion is to show our customers the benefits of using composite materials in a clear way.



Carbon Center
Ul. Lodowa 110
93-232 Lodz
Poland

CG TEC Carbon und Glasfasertechnik GmbH
Gewerbepark Hügelmühle 41
91174 Spalt
Germany

MARCIN SOBCZYK

Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio

Płyty wiórowe z udziałem mielonych śmigieł

Anmet to firma z branży recyklingowej, zlokalizowana w południowej części województwa lubuskiego. Istnieje na rynku od 1999 roku i od swego początku dostarcza kompleksowych rozwiązań w zakresie recyklingu metali dla firm z Polski i Niemiec.

Od 2015 roku firma rozszerzyła działalność o rozwiązania w zakresie recyklingu śmigieł turbin wiatrowych. Dziś posiada zespół techników oraz zaplecze techniczne, które zapewnia demontaż i zagospodarowanie śmigieł zgodnie z najsurowszymi branżowymi normami. Jednocześnie firma stworzyła cały szereg rozwiązań ekologicznego zagospodarowania śmigieł, niektóre z nich dodatkowo patentując.



Obecnie firma komercjalizuje swój ostatni patent globalny – płyty wiórowe z udziałem mielonych śmigieł oraz proces ich produkcji. Rozwiązanie to pozwala produkować płyty wiórowe z udziałem mielonych śmigieł turbin wiatrowych oraz innych kompozytów. Przeprowadzone na polskich uczelniach wyższych badania potwierdziły, że płyty te prócz oszczędzania surowca naturalnego, jakim



Wdrażając swoje rozwiązania, firma współpracuje z najlepszymi polskimi i europejskimi uczelniami wyższymi. Część z rozwiązań ma na celu przyciągać uwagę ludzi do kwestii recyklingu jak np. pierwsza na świecie kładka konstrukcyjnie oparta na śmigłach czy wyroby małej architektury – ławki, leżaki. Inne z opatentowanych rozwiązań mają za to na celu umożliwienie ekologicznego zagospodarowania prawdziwie przemysłowych ilości śmigieł.

jest drewno, posiadają szereg zalet w stosunku do płyt klasycznych, jest to m.in. zmniejszona chłonność wilgoci oraz zwiększona ognioodporność. Dodatkowo wartości te można regulować poprzez zmianę procentowego udziału kompozytu w finalnym produkcie. Takie płyty są również wytrzymalsze co pozwala produkować płyty cieńsze z zachowaniem ich trwałości, to z kolei obniża koszty transportu.

**Przedsiębiorstwo Wielobranżowe Anmet Andrzej Adamcio**

67-300 Szprotawa, ul. Koszarowa 6/18

m.sobczyk@anmet.com.pl

+48 506 126 749

JACEK SYKULSKI

Innovative Polish start-up providing two advanced technologies of producing composite elements for two different markets

1. Unique, close to „zero waste”, fast moulding technology of C-SMC allowing to form highly complicated parts with hollow structures, high wall thickness variation, no void content and minimized finishing time

Basic compression moulding of SMC (sheet moulding compound) or C-SMC (carbon sheet moulding compound) also known as Forged Carbon is well known on the market. First one, based on glass fibre, is in use since many years. The second one, based on carbon fibre, is spreading fast, being new on the market comparing to standard SMC. C-SMC allows to form parts fast with wall thickness variation, where using prepreg is too complicated and where the strength needed is not so high like for full prepreg parts. Mentioned material is perfect as a replacement for aluminium parts being 45% lighter.

Carbon Design Sp. z o.o. developed new moulding technology allowing to form highly complicated parts. With this technology it is possible to form hollow structures with high wall thickness variation. Good practice for currently used standard SMC moulding technology is to avoid big wall thickness variation, especially in the form of steps, because it is highly possible that there will be empty spots in corners. In mentioned newly developed technology the moulding volume is

closed, so the material is pushed to the volumes which are not possible to form using standard SMC/C-SMC moulding technology. It is worth to mention that C-SMC moulding is much harder than the SMC because of much higher volume content and the absence of fillers helping with flow.



What is also very important regarding the costs, finishing time and environmental point of view, is that Carbon Design technology uses closed volume moulding – the waste material is around 1% of charge material, depending on the volume of the part. This also results in closed volume of the flash which minimize the finishing time.

For hollow structures based on C-SMC material, there were two possibilities available on the market to form that kind of structures. One was to form monolith structure and then mill it. This resulted in cut fibres, less strength, less stiffness, up to 70% of material wasted and additional process of milling.

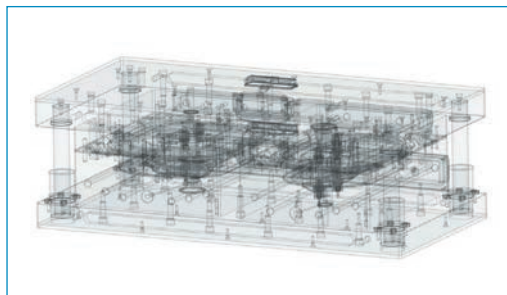
The second solution was to form two halves of the hollow structure part and then glue them together. This results in higher mould costs (two moulds needed) and weak glue area together with higher weight because of surface needed for glue.

Carbon Design developed special inserts inside the mould which allows to form that kind of highly complicated structures. Putting the insert in the mould to form so complicated hollow

structures is not enough. Using simple insert in not enough because it can cause a lot of material issues like empty spaces and void content. In Carbon Design's technology the insert's position is precisely controlled during the whole moulding process. It is even possible to form parts with negative draw angles, which needs another "magic" included in insert's design.

Carbon Design is obsessed with highest possible quality of provided composite structures. Together with all the above innovations in moulding Forged Carbon, there is one more trick involved. It is the vacuum assistance. It is not like in some SMC/C-SMC processes where the vacuum is applied when the mould is closed or just few millimetres before closure. The designed vacuum assistance can be applied during the whole moulding process.

Carbon Design always focuses on all aspects of developing the technology. That is the reason why there were a lot of working hours involved in developing the mould design, so it can also meet the expectation of economy for each part of development process.



Carbon Design Sp. z o.o. offers ULTIMATE DESIGN APPROACH.



We offer a complete development of composite parts from concept to the start of manufacturing in the best selected manufacturing technology.

2. Composite dispersed reinforcement produced with highly capable production line

Composite dispersed reinforcement is not well known on the market. It is known in a form of small steel bars with hooks or polypropylene small bars. The PP have much lower strength where steel ones are not corrosion resistant being still around 3–4 times weaker than glass fibre ones.

One of the producers which developed glass fibre based dispersed reinforcement product is Owens Corning and its MiniBars product. It is important to mention that this kind of reinforcement comes in a form of small bars (around 1 mm of thickness) made with the similar technology to composite rebars. This kind of reinforcement is made out of glass (or any other) fibre and resin (mostly epoxy) and is treated as macro reinforcement. As a comparison, dry fibres like chopped glass fibres are micro reinforcement – that mostly helps with avoiding shrinkage cracks. Depending

on the quantity and application, macro dispersed reinforcement can be treated as primary concrete reinforcement.

The composite dispersed reinforcement is used in concrete to raise its strength, stiffness, crack resistance and also lower the time and cost of preparing the reinforcement for concrete structures. It must be added to the concrete during the mixing and is perfect solution for concrete prefab plants.

The issue connected with that kind of reinforcement production is that it is similar to composite rebars production, where the cost of production of 1m or 1 kg of the rebar and what it provides as a concrete reinforcement comparing to costs of production of 1 kg of macro composite reinforcement is much higher. That is the reason why few production lines available on the market right now can produce parallelly around 15–20 lines.

Carbon Design developed the production line which focuses on high quality final product with perfectly wetted fibres which is able to produce up to 100 lines of dispersed reinforcement parallelly.

That kind of approach has strong influence on the strength of the final product and the cost of producing 1 kg of final product. The thickness and the length of those small rods can be easily adjusted on the production line to match the customers' expectations.



**WE ENCOURAGE OUR FUTURE PARTNERS TO STEP
ONTO A NEW PATH WITH US.**

SYLWIA BIEL

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

Bezpieczeństwo pożarowe – metody badań

Bezpieczeństwo pożarowe jest jednym z siedmiu wymagań podstawowych określonych w rozporządzeniu CPR 305/2011, zgodnie z którym obiekty budowlane muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby w przypadku pożaru nośność konstrukcji została zachowana przez określony czas, powstanie i rozprzestrzenianie ognia i dymu w obiektach budowlanych było ograniczone oraz rozprzestrzenienie ognia na sąsiednie obiekty budowlane było ograniczone. Wymagania w zakresie bezpieczeństwa pożarowego określone są w specyfikacjach technicznych oraz rozporządzeniach unijnych i obejmują klasyfikację w zakresie reakcji na ogień zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 13501-1:2019-02 oraz klasyfikację w zakresie rozprzestrzeniania ognia przez ściany zgodnie z wymaganiami polskich norm i przepisów prawnych.

Fire safety – test methods

Fire safety is one of the seven basic requirements set out in CPR 305/2011, according to which construction works must be designed and constructed in such a way that, in the event of a fire, the load-bearing capacity of the structure is maintained for a specified period of time, the emergence and spread of fire and smoke in the objects, construction works were limited and the spread of fire to adjacent buildings was limited. Requirements for fire safety are specified in technical specifications and EU regulations and include the classification of reaction to fire in accordance with the requirements of PN-EN 13501-1: 2019-02 and the classification of fire spread through walls in accordance with the requirements of Polish standards and regulations legal.

**Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych**ul. Cementowa 8, 31-983 Kraków, NIP: 525 000 76 26
www.icimb.lukasiewicz.gov.pl

BEATA LUBOS

Łukasiewicz Research Network – Institute of Aviation

The support of Industry Contact Point (ICP)

Clean and Smart Mobility for entrepreneurs and scientists interested in the implementation of composite projects

ICP Smart and Clean Mobility offers free support and advice for ones, passionate in driving change in composite area.

ICP Smart and Clean Mobility covers issues related to technologies related to design, manufacturing, production and use of ground, air and water transport, as well as logistics infrastructure. **It supports entrepreneurs and researchers in the implementation of projects in the areas of clean and smart composites and composite technologies.** It specialises also in the intermodal transport systems (including regional transport), urban transport systems, transport logistics, innovative low-emission propulsion technologies, energy management systems on board, vehicle traffic management systems, environmentally friendly design solutions in transport, autonomy and vehicle safety systems.

ICP Smart and Clean Mobility...

- actively promotes the participation of entrepreneurs and researchers in the Horizon Europe,
- offers (especially to the science and business sector) specialized, industry-specific trainings and workshops,
- helps to choose the right funding and
- supports the process of establishing or joining the partnership in the Horizon Europe programme.

Łukasiewicz Research Network – Institute of Aviation is implementing the vision of ICP Smart and Clean Mobility while belonging to the most modern research institutions in Europe, with traditions dating back to 1926. Currently, the Institute employs more than 1300 engineers, scientists and researchers working in aerospace, space, unmanned, energy, oil and gas technologies, remote sensing, material technologies, additive and military technologies. The Institute, together with its specialised Composite Technology Centre, provides solutions in the field of composite technologies and tests of composite materials for industries.

Contact us: bpkmobilnosc@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Sign up for free 45m consultation in

English <https://iawl.edu.pl/icp-consulting-eng/> and in

Polish <https://iawl.edu.pl/bpk-icm-konsultacje/>



Ministry of Education
and Science

Co-financed by the project of the Minister of Education and Science "Industry Contact Points for the Research and Innovation Framework Programme Horizon Europe"

 18 - 19 TH, OCTOBER, 2022

 NOVOTEL KATOWICE CENTRUM



InterNanoPoland to odbywająca się cyklicznie, największa w Polsce międzynarodowa konferencja naukowo-biznesowa poświęcona wyłącznie tematyce nanotechnologii. Wydarzenie stanowi międzynarodowe forum dla przedsiębiorców, naukowców, instytucji otoczenia biznesu oraz studentów działających w obszarze nanotechnologii i zaawansowanych materiałów.

Szósta edycja **InterNanoPoland 2022** odbędzie się w dniach **18–19 października 2022 r.** w hotelu Novotel w Katowicach. W tym roku szykujemy niezwykle interesujące, perspektywiczne i interdyscyplinarne tematy sesji, w tym m.in.:

- Materiały funkcjonalne,
- Nowoczesne rozwiązania w druku 3D – od skali makro do nano,
- Nanotechnologia w medycynie,
- Komerccjalizacja badań: od pomysłu do biznesu,
- Badania i zastosowanie nanomateriałów,
- Idea 3W: woda – węgiel – wodór,
- Wyzwania związane z harmonizacją, walidacją i standaryzacją w nanofabrykacji,
- Sesja plakatu: Badania i technologie dla rozwoju przemysłu nanotechnologicznego.

Podczas Konferencji zaprezentowane zostaną najciekawsze projekty B+R, a także przedstawione zostaną osiągnięcia i wyniki prac młodych zespołów naukowych.

Głównymi organizatorami wydarzenia są **Fundacja Wspierania Nanonauk i Nanotechnologii NANONET** oraz **Śląski Klaster Nano**, których misją jest stworzenie platformy współpracy przedsiębiorców, instytucji naukowych, administracji publicznej i organizacji wsparcia biznesu na rzecz popularyzacji i zwiększenia znaczenia nanotechnologii w kształtowaniu innowacyjności gospodarki na Śląsku i w Polsce. Honorowym Gospodarzem konferencji jest **Miasto Katowice**, a współorganizatorami jest **Uniwersytet Śląski w Katowicach**, **Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny**, **Bank Gospodarstwa Krajowego**, **Akces NCBR sp. z o.o.** oraz firma **Sygnis S.A.**

InterNanoPoland 2022 to doskonała okazja by podpatrzeć praktyków, porozmawiać, wymienić kontakty, poszukać pracodawcy, znaleźć pracownika czy partnera naukowego lub biznesowego, sprawdzić swoje pomysły przed inwestorami i uzyskać praktyczne umiejętności.

Konferencja **InterNanoPoland** w liczbach

- 5 edycji konferencji InterNanoPoland
- 1234 uczestników podczas wszystkich edycji
- 356 prelekcji z obszaru nanotechnologii
- 509 posterów, które brały udział w sesjach posterowych
- 376 przedstawicieli przemysłu
- 180 przedstawicieli świata nano z innych krajów

Małopolska Agencja Rozwoju Regionalnego SA

Wspieramy przedsiębiorczość. Rozwijamy i promujemy **Małopolskę!**

Zapewniamy korzystne
warunki i przestrzeń
do prowadzenia biznesu

Oferujemy pomoc
finansową, inwestycyjną,
doradczą i szkoleniową

- **Doradzamy** przedsiębiorcom i startującym w biznesie
- **Asystujemy** w zakładaniu firmy
- **Planujemy** rozwój
- **Wspieramy** sprzedaż

Proponujemy:

- ✓ konkurencyjne fundusze pożyczkowe
- ✓ dotacje na rozwój i szkolenia
- ✓ wynajem nowoczesnej przestrzeni dla biznesu