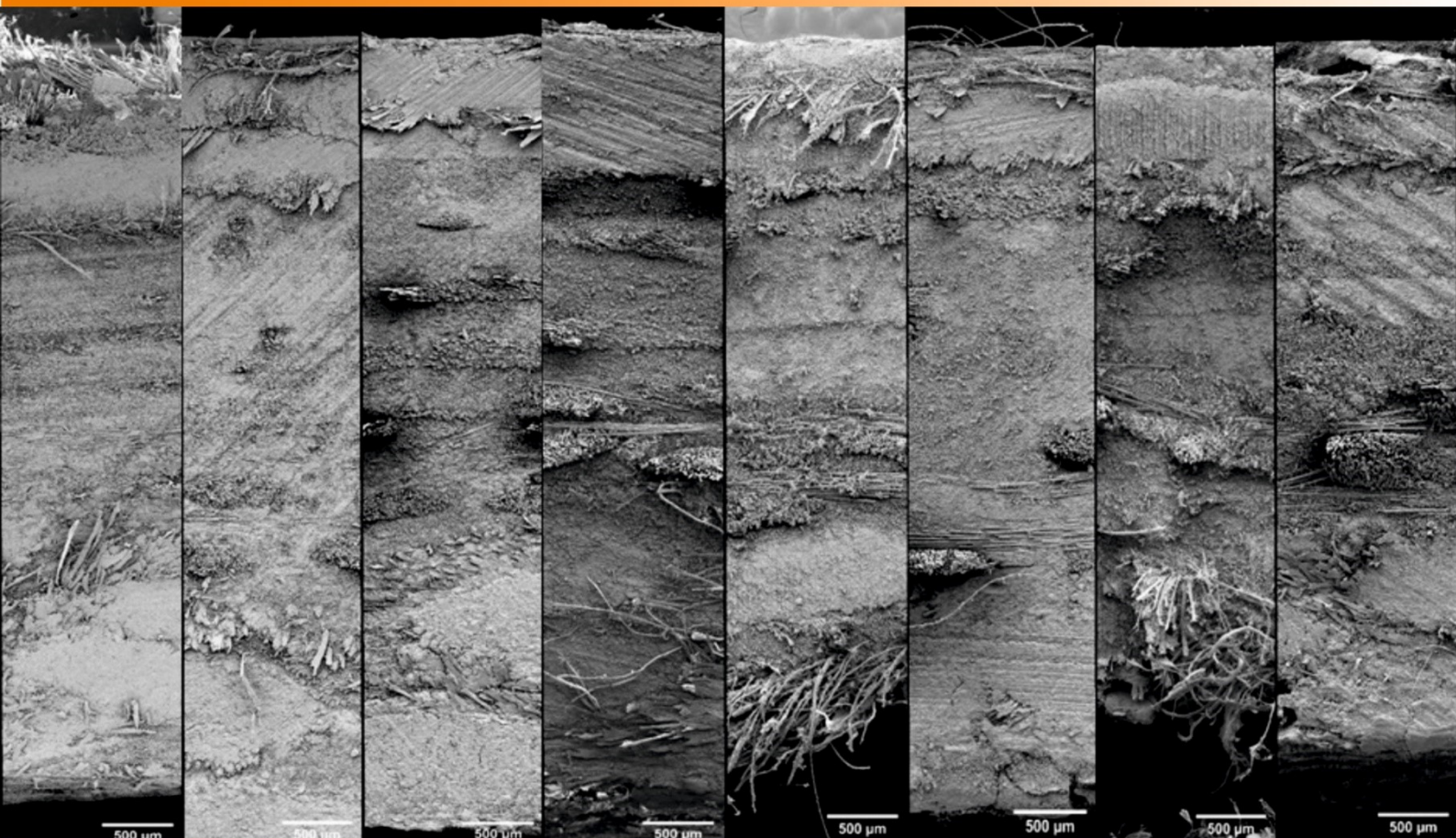


Kamila Mizera  
Emilia Irzmańska  
Natalia Litwicka  
Kamila Sałasińska  
Agnieszka Gajek



# Kompozyty hybrydowe o wysokiej odporności na akty wandalizmu

*Materiały informacyjne*

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Projekt nr III.PB.03 pt. *Opracowanie kompozytów hybrydowych modyfikowanych napelniającami nieorganicznymi i roślinnymi o obniżonej palności i emisji dymu oraz wysokiej odporności na akty wandalizmu do zastosowań w pojazdach transportu publicznego*

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Autorzy: dr inż. Kamila Mizera, dr Kamila Sałasińska, dr hab. inż. Emilia Irzmańska, mgr Natalia Litwicka dr Agnieszka Gajek

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Warszawa 2022

**CIOP**  **PIB**  
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa  
tel. (48-22) 623 36 98, [www.ciop.pl](http://www.ciop.pl)

## Wstęp

Rosnące wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym przez przemysł motoryzacyjny, lotniczy i inżynierski powodują konieczność wprowadzenia nowych rozwiązań materiałowych o dużej wytrzymałości, a jednocześnie znacznie mniejszej gęstości niż dotychczas stosowane materiały metalowe [1]. Najszerszej stosowane jako materiały wysokowydajne są polimery wzmocnione włóknem, szczególnie te oparte na polimerach termoutwardzalnych, takich jak żywice poliestrowe i epoksydowe [2]. Możliwość zastosowania polimerów o wysokim stopniu usieciowania i reaktywnych wobec wypełniaczy pozwala na uzyskanie struktur o dużej wytrzymałości mechanicznej i odporności chemicznej, o wysokiej adhezji na granicy faz polimer-wypełniacz [3].

Popularność kompozytów termoutwardzalnych w postaci laminatów wzmocnianych długimi włóknami wynika z możliwości wytwarzania wyrobów o wysokich parametrach mechanicznych bez konieczności stosowania drogich urządzeń technologicznych.

Wśród długich włókien wykorzystywanych do produkcji laminatów na osnowie z termoutwardzalnych polimerów najczęściej stosowane są włókna szklane (GF), najczęściej S-glass i E-glass, w zależności od ostatecznego przeznaczenia, tj. wytrzymałości na rozciąganie (S-glass) lub trwałości chemicznej (E-glass) [4]. W celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej i trwałości laminatów epoksydowych powszechną praktyką jest zastępowanie ich włóknami węglowymi (CF) [5,6]. Są one nie tylko odporne na korozję naprężeniową i pęknięcia naprężeniowe, jak włókna szklane, ale zyskują przewagę nad innymi stosowanymi wzmocnieniami dzięki dodatkowym funkcjom, takim jak dobre przewodnictwo elektryczne i cieplne [7]. Chociaż włókna bazaltowe (BF), podobnie jak GF, często zawierają ponad 50%  $\text{SiO}_2$ , ich właściwości są znacznie lepsze. Ponadto ich produkcja charakteryzuje się mniejszym energochłonnością i mniej skomplikowanymi procesami produkcyjnymi [8]. Wysoka wytrzymałość, stabilność chemiczna i termiczna BF doprowadziła do szerokiego zastosowania jako materiał wzmocniający w kompozytach polimerowych. Włókna bazaltowe są dobrze znane ze swojej doskonałej odporności na uderzenia; dlatego są często wykorzystywane do hybrydyzacji laminatów zawierających włókna naturalne lub syntetyczne [9]. Włókna aramidowe (AF), wykazujące właściwości porównywalne z włóknami nieorganicznymi, znajdują zastosowanie we wszystkich zastosowaniach, w których istotne jest zmniejszenie masy produktu końcowego [10]. Wprowadzenie długich lub krótkich włókien z takich roślin jak len [11], konopie [12], juta

[13], kenaf [14] pozwala na zwiększenie trwałości finalnego kompozytu w porównaniu do wzmocnionych z włóknami nieorganicznymi.

Przedstawiona tematyka została podjęta w projekcie III.PB.03, którego celem było opracowanie i wytworzenie nowych hybrydowych kompozytów polimerowych o zwiększonej odporności na akty wandalizmu, w tym na uderzenia, bądź przecięcie czy przekłucie nożem ręcznym, co zwiększyłyby bezpieczeństwo i komfort pasażerów oraz obsługi pojazdów komunikacji zbiorowej.

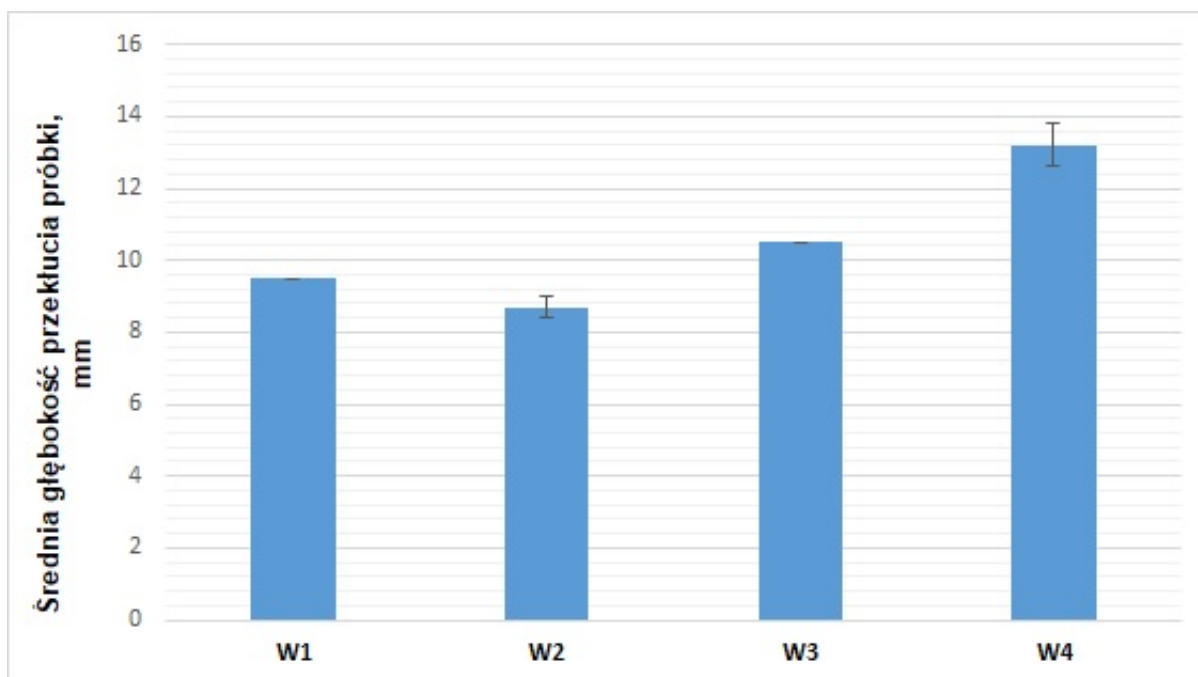
W ramach wspomnianego projektu, w Pracowni Ochron Rąk i Nóg Zakładu Ochron Osobistych CIOP-PIB, wykonano badania materiałów kompozytowych w oparciu o zwalidowaną metodę antywandalową składającą się z czterech procedur badawczych:

- wyznaczanie odporności na przecięcie w wyniku uderzenia ostrzem noża (PN-EN 1082-1:1999),
- wyznaczanie odporności na płomień (PN-EN ISO15025:2017-02),
- wyznaczanie odporności materiałów na przecięcie ostrymi przedmiotami (PN-EN ISO 13997:2003),
- wyznaczanie odporności na uderzenie (PN-EN ISO 20344:2012 i procedury wewnętrznej NONB-33).

W zależności od kolejności zastosowanych tkanin użytych do wytworzenia kompozytów hybrydowych takich jak: węglowa, szklana, aramidowa, bazaltowa i lniana oraz zastąpienia niektórych z tych warstw napełniaczami proszkowymi takimi jak: wermikulit, kulki szklane i zmielone łupiny orzecha laskowego, zaobserwowano zmiany w ich odpowiedzi na działania mechaniczne w ramach aktów wandalizmów. Dodatkowo materiały te zawierały z swoim składzie układ uniepalniający, zastosowany w celu zredukowania ich palności. Ze względu na toczące się postępowanie ochrony patentowej wytworzonego rozwiązania nie podano dokładnego ułożenia zbrojenia oraz dodatków znajdujących się w prezentowanych kompozytach hybrydowych.

W przypadku badania odporności na przecięcie w wyniku uderzenia ostrzem noża zastosowano bijak o masie 2 kg, który zrzucano z wysokości 58 cm z energią uderzenia wynoszącą 11,3 J. Zaobserwowano najmniejszą głębokość przekłucia dla kompozytu W2, który w swoim składzie zawierał napełniacze proszkowe, które zastąpiły wybrane warstwy tkanin (rys. 1). Z kolei największym uszkodzeniem charakteryzował się kompozyt z tkaniny szklanej W4. Dodatkowo zaobserwowano korelację pomiędzy grubością kompozytu,













a średnią głębokością przekłucia, która była wynikiem stosowania różnych surowców. Wraz ze wzrostem grubości materiału, malała głębokość przekłucia kompozytu.



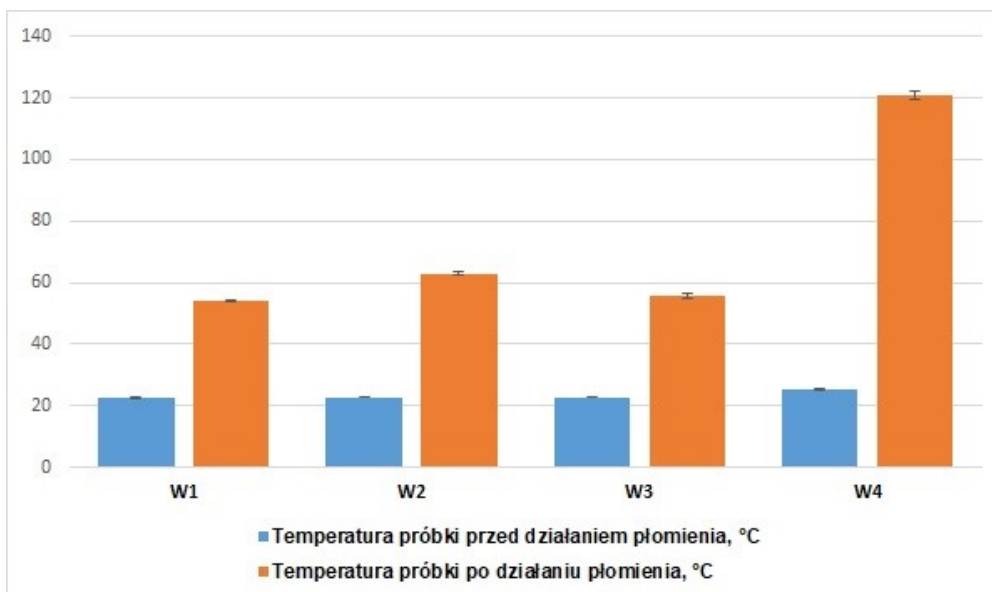
Rys. 1. Wyniki badania odporności hybrydowych kompozytów polimerowych w wyniku uderzenia ostrzem noża

Powierzchnia badanych kompozytów przed badaniem oraz po badaniu uderzenia ostrzem noża została przedstawiona w tabeli 1. Dla każdego kompozytu zaobserwowano perforację badanego materiału, pojawienie się ostrych krawędzi w miejscu uderzenia oraz przebicie każdego kompozytu na wylot. Dodatkowo, w przypadku kompozytu oznaczonego symbolem W4, po stronie zewnętrznej wokół każdego miejsca uderzenia, zaobserwowano pojawienie się białych śladów. Na fotografiach przedstawiających powierzchnie próbki od strony przeciwnej, widoczne są białe elementy, przypominające masę, niemniej jednak pochodzi ona od jednego z elementu układu pomiarowego, w który wbija się ostrze (sztuczna masa emitująca skórę człowieka).

Tabela 1. Zdjęcia kompozytów hybrydowych przed i po badaniu odporności na przecięcie w wyniku uderzenia ostrzem

Próbka	Powierzchnia przed badaniem	Powierzchnia próbki od strony poddanej działaniu ostrza noża	Powierzchnia próbki od strony przeciwnej
W1			
W2			
W3			
W4			




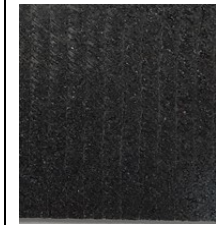
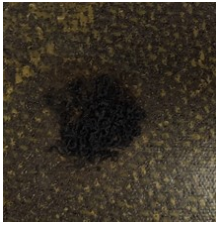



Badanie odporności na płomień badano używając palnika, który znajdował się w odległości 25 mm od powierzchni próbki pod kątem 45°, a wysokość płomienia wynosiła 35 mm i działał on na próbkę przez okres 60 s. Badanie to wykazało wzrost temperatury warstwy kompozytu poddanej działaniu płomienia (rys. 2). Jednak najwyższą temperaturą charakteryzował się kompozyt szklany W4, którego temperatura była o 50 % wyższa niż w przypadku pozostałych kompozytów. Zastosowanie napełniaczy proszkowych lub ich braku (kompozyty W1-W3) nie wpłynęło zatem na zmianę nagrzania się materiału.



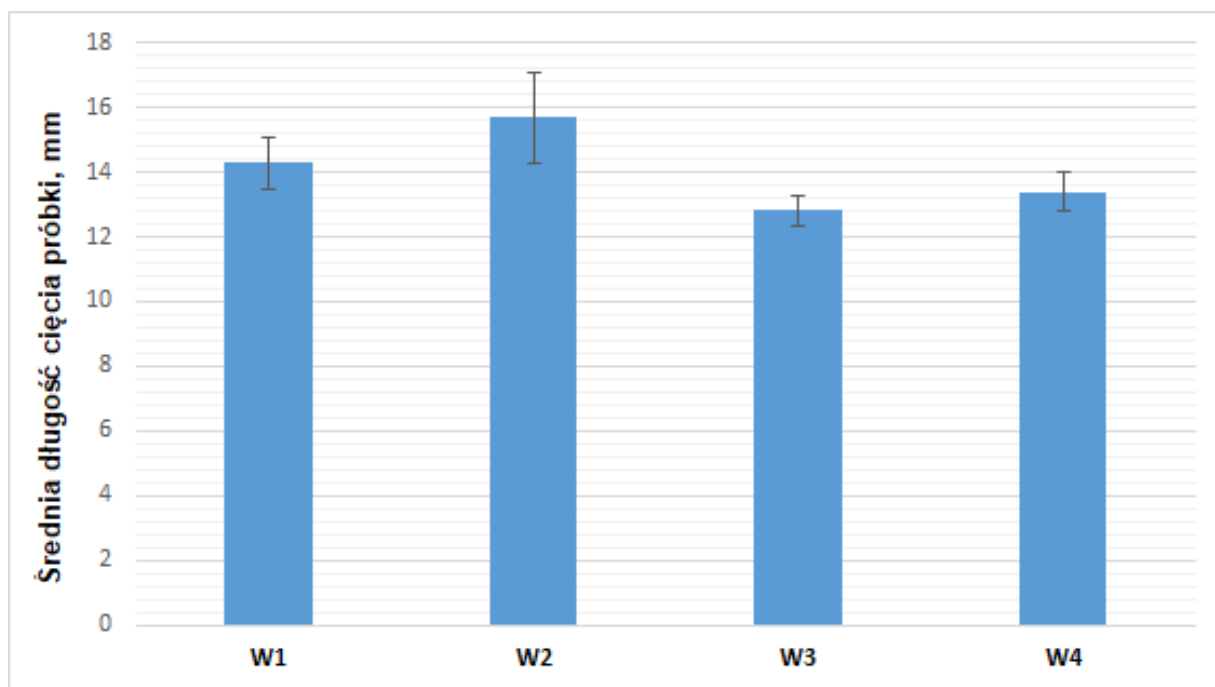
Rys. 2. Wyniki badania odporności hybrydowych kompozytów polimerowych na płomień

Powierzchnia badanych kompozytów przed badaniem oraz po badaniu odporności na płomień została przedstawiona w tabeli 2. Czas działania płomienia zapalającego wynoszący 60 sekund nie powodował dalszego palenia i żarzenia badanych kompozytów. Natomiast, na powierzchni kompozytów w miejscu kontaktu z płomieniem, zaobserwowano zwęglenie próbki oraz wystąpienie charakterystycznych uwypuknień, co związane jest z charakterystyką zastosowanego układu uniepalniającego oraz zastosowanego zbrojenia kompozytów.

Tabela 2. Zdjęcia kompozytów hybrydowych przed i po badaniu odporności na działanie płomienia przez 60 s

Próbka	W1	W2	W3	W4
<b>Powierzchnia przed badaniem</b>				
<b>Powierzchnia po badaniu</b>				

Badanie odporności na przecięcie ostrymi przedmiotami oceniono na podstawie wyników długości cięcia materiału wygiętego wzdłuż krótszego boku o promieniu 38 mm, przedstawionych na rys. 3. Najkrótsze cięcie zaobserwowano dla kompozytu W3, z kolei najdłuższe dla kompozytu W2. Różnią się one zastosowanymi napełniaczami proszkowymi. Krótsze cięcie na powierzchni materiału, świadczy o jego twardszej powierzchni.



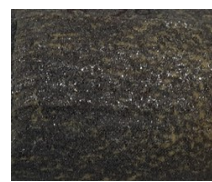
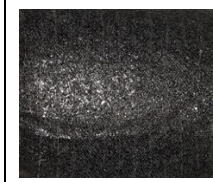
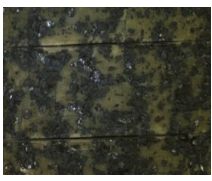
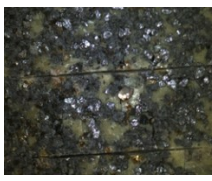
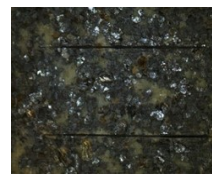
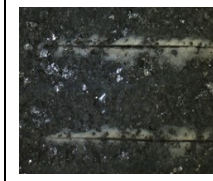


Rys. 3. Wyniki badania odporności hybrydowych kompozytów polimerowych na przecięcie ostrymi przedmiotami

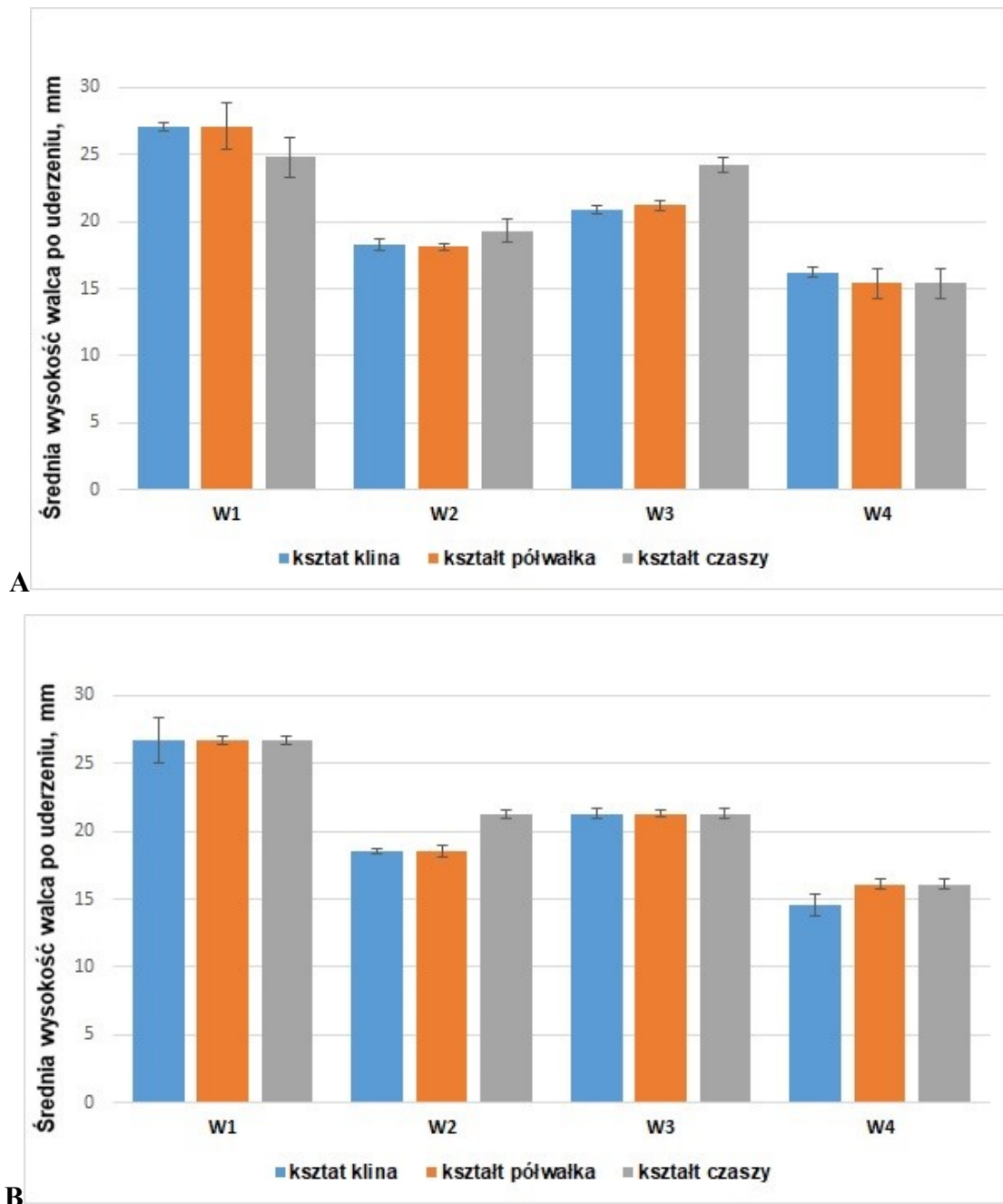
Z kolei powierzchnia badanych kompozytów przed badaniem oraz po badaniu uderzenia ostrzem noża, została przedstawiona w tabeli 3. Przy zastosowaniu siły wynoszącej 250 N, nie uzyskano efektu przecięcia materiału. Zaobserwowano niewielkie zarysowania warstwy wierzchniej.



Tabela 3. Zdjęcia kompozytów hybrydowych przed i po badaniu odporności na przecięcie ostrymi przedmiotami

Próbka	W1	W2	W3	W4
Powierzchnia przed badaniem				
Powierzchnia po badaniu				





Badanie odporności na uderzenie zostało wykonane przy zastosowaniu bijaków o masie 20 kg o trzech różnych kształtach: klina, półwałka i czaszy (w poprzek i wzdłuż ich osi), których energia uderzenia wynosiła 100 J z wysokości 50 cm, a ich wyniki zostały przedstawione na rys. 4. Na podstawie wyników wysokości gumowego walca znajdującego się pod uszkodzoną próbką po uderzeniu, można zaobserwować, że w przypadku kompozytu W1 kształt oraz ustawienie próbki względem osi podłużnej bijaka, nie wpłynęły znacząco na wartości odkształcenia materiału. Uzyskane wartości nadał były najwyższe w odniesieniu do tego kompozytu. Z kolei w przypadku kompozytów W2 i W3 zaobserwowano różnicę w przypadku bijaka o kształcie czaszy, gdzie odkształcenie gumowego walca było najmniejsze. Jednak w przypadku tych kompozytów zaobserwowano również zmianę uzyskanych wyników w zależności od osi podłużnej zastosowanego bijaka (rys. 4a i b). Największym odkształceniem, niezależnie od zastosowanego bijaka oraz jego osi podłużnej względem próbki, charakteryzował się szklany kompozyt W4.



Rys. 4. Wyniki badania odporności hybrydowych kompozytów polimerowych na uderzenie bijakiem w poprzek osi (A) i wzdłuż osi (B) o różnym kształcie

Powierzchnie kompozytów po badaniu uderzenia bijakami w kształcie klina, półwałka oraz czaszy dla kompozytu W1 zostały przedstawione w tabeli 4. Po uderzeniu kompozytów bijakami o trzech różnych kształtach zaobserwowano pęknięcie materiałów w miejscu kontaktu narzędzia z powierzchnią próbki. Dodatkowo, z uwagi na grubość materiałów, pękały, bądź odłamywały się także poszczególne warstwy w miejscach mocowania w prowadnicach. Kompozyty po uderzeniu rozwarstwiały się.

Tabela 4. Zdjęcia kompozytów hybrydowych przed i po badaniu uderzenia bijakami

Próbka	W1
Powierzchnia przed badaniem	
Powierzchnia po uderzeniu bijakiem w kształcie klina	
Powierzchnia po uderzeniu bijakiem w kształcie półwalca	
Powierzchnia po uderzeniu bijakiem w kształcie czaszy	

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano, że warstwy tkanin takich jak aramidowe, węglowe i szklane, ich ilość oraz kolejność, mają znaczący wpływ na wytrzymałość mechaniczną wytworzonych kompozytów.

Badania odporności na akty wandalizmu wykazały, że najwyższą odporność na uderzenie wykazał kompozyt zbrojony tkaniną szklaną. Natomiast największą odpornością na przecięcie nożem charakteryzował się kompozyt z dodatkiem napelniaczy proszkowych.

Z kolei najkrótszą długością cięcia na powierzchni materiału, świadczącym o twardszej powierzchni kompozytu charakteryzował się materiał bez kulek szklanych.

## **Bibliografia**

- [1] Saba N., Jawaid M., Allothman OY., Paridah M., Hassan A.: Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications. *J. Reinf. Plast. Compos.* 2016, 35, 447–470.
- [2] Sivasankaraiah T., Lokavarapu BR., Venkata Rajesh J.: Post-curing effect on flexural strength of glass epoxy composites. *Mater. Today Proc.* 2021, 38, 3320–3331.
- [3] Wu Q., Zhao R., Ma Q., Zhu J.: Effects of degree of chemical interaction between carbon fibers and surface sizing on interfacial properties of epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 2018, 163, 34–40.
- [4] Rahmat M., Ashrafi B., Naftel A., Djokic D., Martinez-Rubi Y., Jakubinek MB., Simard B.: Enhanced Shear Performance of Hybrid Glass Fiber–Epoxy Laminates Modified with Boron Nitride Nanotubes. *ACS Appl. Nano Mater.* 2018, 1, 2709–2717.
- [5] García-Moreno I., Caminero M., Rodríguez G., López-Cela J.: Effect of Thermal Ageing on the Impact and Flexural Damage Behaviour of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers.* 2019, 11, 80.
- [6] García-Moreno I., Caminero M., Rodríguez G., López-Cela J.: Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers.* 2019, 11, 160.
- [7] Sałasińska K., Barczewski M., Aniśko J., Hejna A., Celiński M.: Comparative Study of the Reinforcement Type Effect on the Thermomechanical Properties and Burning of Epoxy-Based Composites. *J. Compos. Sci.* 2021, 5, 89.
- [8] Fiore V., Scalici T., Di Bella G., Valenza A.: A review on basalt fibre and its composites. *Compos. Part B Eng.* 2015, 74, 74–94.
- [9] Matykiewicz D., Lewandowski K., Dudziec B.: Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane. *Compos. Interfaces* 2017, 24, 489–498.
- [10] Sarasini F., Tirillò J., Valente M., Ferrante L., Cioffi S., Iannace S., Sorrentino L.: Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties. *Mater. Des.* 2013, 49, 290–302.
- [11] Matykiewicz D., Mysiukiewicz O.: Epoxy composites reinforced with natural fillers such as flax fiber and linseed cakes. *Polimery* 2020, 65, 828–832.
- [12] Sepe R., Bollino F., Boccarusso L., Caputo F.: Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. *Compos. Part B Eng.* 2018, 133, 210–217.
- [13] Ranakoti L., Rakesh PK.: Physio-mechanical characterization of tasar silk waste/jute fiber hybrid composite. *Compos. Commun.* 2020, 22, 100526.
- [14] Ugochukwu S., Ridzuan MJM., Abdul Majid MS., Cheng EM., Razlan ZM., Marsi N.: Effect of thermal ageing on the scratch resistance of natural-fibre-reinforced epoxy composites. *Compos. Struct.* 2021, 261, 113586.