Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018

Część II

Nauki techniczne i ścisłe

ISBN 978-83-951445-2-3

Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe
2018

Część II
Nauki techniczne i ścisłe

Idea Knowledge Future
Świebodzice, 2018

Recenzenci rozdziałów

dr Grzegorz Popowicz, prof. dr hab. inż. Igor Ariefjew, dr inż. Radosław Stodolak, dr hab. inż. Lucyna Leniowska, prof. nadzw., prof. dr hab. inż. Walery Jezierski, dr hab. inż. Wojciech Gamrot, dr inż. Jolanta Dąbrowska, prof. dr hab. inż. Krzysztof Fitzner, dr inż. Stefan Brachmański, dr hab. inż. Jolanta Tomaszewska, dr hab. inż. Wojciech Błażejewski, dr hab. inż. Romuald Tarczewski, prof. nadzw., dr hab. inż. Jerzy Detyna, prof. nadzw., dr inż. Marek St. Węglowski, dr hab. inż. Janusz Piechna, prof. nadzw., prof. dr hab. inż. Adam Figiel

Redakcja

Tobiasz Wysoczański

Opracowanie materiałów

Katarzyna Dereń

ISBN (całość kolekcji): 978-83-951445-3-0

ISBN 978-83-951445-2-3

Wydawca: Idea Knowledge Future

Spis treści

Zastosowanie nanotechnologii w powłokach elewacyjnych i szkłach

Joanna Borowska, Natalia Taraszkiewicz **6**

Elektrochemiczne metody otrzymywania powłok metalicznych o właściwościach superhydrofobowych

Karolina Chat, Ewa Rudnik **17**

Przesłony przeciwfiltracyjne wykonane z odpadów po flotacji rud miedzi

Maciej Gruszczyński, Sara Burkiewicz, Patryk Krzyszkowski **28**

Influence of scanning strategy on geometrical accuracy and mechanical properties of electron beam-melted Ti6Al4V scaffolds

Viktoria Hoppe, Patrycja Szymczyk, Marcin Madeja **40**

Inwestycje w Terminalu Promowym Świnoujście i ich wpływ na obsługę promów i jednostek frachtowych

Izabela Kamińska **51**

Deformacje perspektywy w przestrzeni audiowizualnej

Maurycy Kin, Sylwia Prygoń, Witold Szymański **64**

Problem powodzi na obszarze Kotliny Kłodzkiej - propozycja działań ochronnych

Ewa Knap, Radosław Stodolak **75**

The antibioticresistance: beta-lactamases

Marta Kolonko **88**

Współczesne metody i narzędzia pracy architekta

Jerzy F. Łątka **98**

Ekonomia jazdy, czyli jak przejechać 500 km na litrze paliwa

Jakub Mijal, Hubert Kamiński **107**

Właściwości tribologiczne PA6 i jego kompozytów napełnionych włóknem węglowym

Aneta Niemiec **118**

Wpływ promieniowania gamma na tarcie ślizgowe w układzie PEEK-stal

Aneta Niemiec **127**

Modelowanie konstytutywne złącza FSW w jednoosiowym stanie naprężenia

Przemysław Nosal **136**

Analiza porównawcza podgrzewania wody w gospodarstwie domowym z wykorzystaniem promieniowania słonecznego

Tomasz Noszczyk, Maciej Iwański, Arkadiusz Dyjakon **146**

Analiza Monte Carlo dokładności estymatorów mediany dla różnych planów losowania

Tomasz Stachurski **160**

Tworzenie głębi w przestrzeni audiowizualnej

Witold Szymański, Sylwia Prygoń, Maurycy Kin **172**

Grafen jako napełniacz kompozytów na osnowie poli(chlorku winylu) –przegląd literatury

Sławomir Wilczewski **181**

Badanie parametrów dynamicznych prototypu serwomechanizmu

Dorota Zaborniak, Mateusz Turzyniecki **192**

Zastosowanie nanotechnologii w powłokach elewacyjnych i szkłach

Joanna Borowska[(1)], Natalia Taraszkiewicz[(1)]

[1] Katedra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa Energooszczędnego, Politechnika Białostocka
Joanna Borowska: j.borowska@doktoranci.pb.edu.pl

Streszczenie
Nanotechnologia jest dziedziną prężnie rozwijającą się w XXI wieku. Nanocząstki są wykorzystywane w wielu dziedzinach życia codziennego. Na szczegółowy opis zasługują te, które stosuje się w dziedzinie budownictwa w celu polepszenia właściwości różnych powierzchni. W pracy zostały opisane specjalistyczne powłoki, wytworzone z wykorzystaniem nanotechnologii, stosowane do elewacji i szkieł.

Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanocząstki, dwutlenek krzemu, nanopowłoki, szkło samoczyszczące

Application of nanotechnology in facade coatings and glasses

Summary
Nanotechnology is a rapidly developing field in the 21st century. Nanoparticles are used in many areas of everyday life. A detailed description deserves those that are used in the field of construction to improve the properties of various surfaces. The work describes special coatings, made using nanotechnology, applied to facades and glass.

Keywords: nanotechnology, nanoparticles, silicon dioxide, nanocoating, self-cleaning glass

1. Wstęp

W obecnych czasach nastąpił bardzo gwałtowny rozwój nauki. Badacze od lat zastanawiali się nad możliwością wzmacniania całych konstrukcji i ich poszczególnych elementów z wykorzystaniem najmniejszych cząstek materii. Dzisiaj w zawrotnym tempie dokonuje się postęp w tej dziedzinie. Nanocząstki charakteryzują się unikatowymi cechami, bardzo pożądanymi w dziedzinie budownictwa, takimi jak: wysoki współ¬czynnik stosunku powierzchni do objętości, łatwość chemicznej modyfikacji czy niepospolite właściwościami powierzchniowymi (Kosmala i Szymańska 2016). Jeśli chodzi o sam obszar nanotechnologii, to obejmuje on zarówno wytwarzanie nanomateriałów, jak i modyfikacje materiałowe dokonywane przez dodawanie nanomodyfikatorów czy modyfikację powierzchniową materiału (Stankiewicz 2008).

Nanocząstki wytwarza się dwiema głównymi metodami (Błaszczyński 2012). Pierwsza z nich nosi nazwę budowania od podstaw – „bottom up" – atom – po – atomie, gdzie proces trwa aż do osiągnięcia właściwych założonych nanostruktur. Odbywa się to albo metodami chemicznymi (np. za pomocą polimeryzacji), albo metodami tzw. kontrolowanego osadzania i wzrostu (np. osadzania z fazy gazowej, osadzania elektronicznego lub koloidalnego). Druga metoda nazywa się „top down" i polega na rozdrabnianiu już istniejących materiałów. Zaś ze względu na sposób powstawania, można dokonać podziału na nanocząstki naturalne oraz antropogeniczne (nanocząstki zaprojektowane oraz produkt uboczny, wydzielony, jako

frakcja „ultrafine”). Na¬nocząstki można dodatkowo pogrupować, jako zawieszone w postaci aerozolu w fazie gazowej, roztwór koloidalny w fazie ciekłej bądź umieszczone w ciele stałym (Świdwińska-Gajewska 2007).

Niewątpliwą zasługą nanotechnologii jest opracowanie nowoczesnych powłok, które można wykorzystać do każdej powierzchni, zarówno do muru, jak i do drewna, stali czy szkła. Nanocząstki wpływają stanowczo o wiele lepiej niż inne cząstki na powierzchnie nimi powleczone. Jest to możliwe dzięki penetracji wgłębnej i dynamicznej interakcji pomiędzy powierzchnią i powłoką, co skutkuje trwałym pokryciem powierzchni. Nanopowłoki wykazują dużą odporność na zarysowania i promieniowanie słoneczne, ogniotrwałość, a także podwyższone przewodnictwo elektryczne. Ich niewątpliwą zaletą może być zdolność do samooczyszczenia albo antybakteryjność. Należy też zwrócić uwagę, że umożliwiają pochłanianie lub odbijanie promieniowania podczerwonego. (Lelusz i Stankiewicz 2014).

W artykule przedstawione zostaną różne metody wytwarzania, właściwości i możliwości zastosowania nowoczesnych powłok elewacyjnych i szkieł stosowanych w budownictwie, które wpływają na polepszenie cech hydrofobowych, antybakteryjnych i samoczyszczących elementów budowlanych.

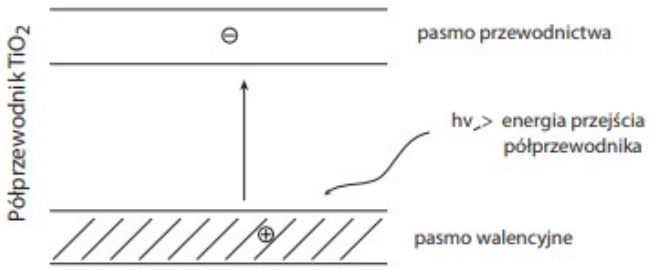
2. Dwutlenek tytanu (IV)

Najpowszechniej ultradrobny TiO2 produkowany jest za pomocą hydrolizy albo z rozpuszczalnych soli tytanu, albo pirolitycznej z fazy gazowej. Każda technologia produkcji takich surowców nosi nazwę technologii „high-tech”, głównie ze względu na niezwykle skomplikowane rozwiązania technologiczne, które towarzyszą produkowaniu cząstek w rozmiarze nano. Związane jest to także z wysokimi kosztami i wykorzystaniem najnowocześniejszych technologii (Kosmala i Szymańska 2016).

Nanocząstki tlenku tytanu (IV) są szeroko stosowane w dzisiejszych czasach. Można je wykorzystywać zarówno w kosmatyce, medycynie, przemyśle farb i lakierów czy szkle samoczyszczącym, jak i w wielu innych dziedzinach życia (Rys.1.).

Rys. 1. Diagram obrazujący zastosowanie nanocząsteczkowego tlenku tytanu (IV) (Kosmala K., Szymańska R. (2016). Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych,* t. 65, nr 2(311)/2016, 235-245)

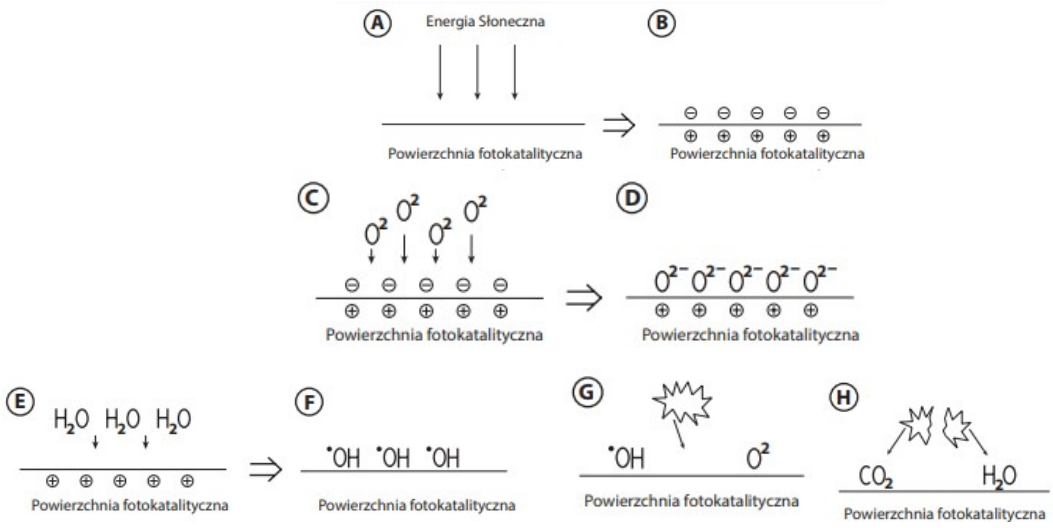
Należy wspomnieć, że tlenek tytanu (IV) wykazuje właściwości fotokatalityczne. Fotokatalizę (Rys. 2) należy definiować, jako proces chemiczny, polegający na zmianie szybkości reakcji chemicznej z udziałem promieniowania ultrafioletowego w obecności fotokatalizatora. Fotokatalizatorem jest omawiany TiO_2, półprzewodnik, którego zadaniem jest pochłanianie kwantu promieniowania, co początkuje reakcję chemiczną (Kosmala i Szymańska 2016).



Rys. 2. Uproszczony schemat procesu fotowzbudzania TiO_2 (Kosmala K., Szymańska R. (2016). Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych,* t. 65, nr 2(311)/2016, 235-245

Mechanizm fotokatalizy można podzielić na 3 odrębne etapy. Pierwszy to generowanie nośników ładunku. Następnie występuje rekombinacja nośnika ładunku oraz ostatecznie przeniesienie ładunku na granicy faz (Kosmala i Szymańska 2016).

Proces fotowzbudzania TiO_2 inicjuje się z momentem, kiedy promieniowanie słoneczne dociera do płaszczyzny półprzewodnika (Rys. 3A). Pod jego wpływem zostają wybijane elektrony (Rys. 3B), które w chwili kontaktu z cząsteczkami tlenu tworzą anionorodniki ponadtlenkowe O_2 (Rys. 3. C-D).



Rys. 3. Schemat obrazujący poszczególne etapy wzbudzania TiO_2 (Kosmala K., Szymańska R. (2016). Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych,* t. 65, nr 2(311)/2016, 235-245)

Następnie, dodatnio naładowana powierzchnia fotokatalityczna dwutlenku tytanu (IV) pozyskuje elektrony z H_2O, która jest zawarta w powietrzu (Rys. 3E), co wpływa na wytworzenie rodników hydroksylowych OH (Rys. 3F). Proces ten jest stosowany do rozkładu zanieczyszczeń pochodzenia organicznego, ponieważ wykreowane reaktywne formy O_2 utleniają te nieczystości do wody i dwutlenku węgla (Rys. 3. G-H) (Kosmala i Szymańska 2016).

Dwutlenek tytanu (IV) znalazł zastosowanie w budownictwie. Dodaje się go do farb i lakierów, gdzie odpowiada za białość, jaskrawość i gładkość powierzchni. Dodatkowo z pigmentów TiO_2 korzysta się także w przemyśle tworzyw sztucznych, przy tworzeniu warstwy ochronnej, która zapewnia dużą odporność na działanie czynników atmosferycznych (Kosmala i Szymańska 2016).

Dwutlenek tytanu tworzy trzy odmiany polimorficzne, z którymi można się spotkać w przyrodzie: tetragonalne rutyl i anataz oraz rombowy brukit. Dwie ostatnie stają się najtrwalszym rutylem, gdy osiągną temperaturę powyżej 800-900°C. TiO_2 jest najpowszechniej stosowanym i najtrwalszym tlenkiem tytanu. Występuje, jako biały proszek o temperaturze topnienia ok. 1830°C i temperaturze wrzenia ok. 2500°C. Wykazuje właściwości amfoteryczne, bardzo dobrze reaguje ze stężonym kwasem siarkowym, a w procesie topnienia w reakcjach z wodorotlenkami, węglanami albo tlenkami innych metali, przechodzi w tytaniany. Nie rozpuszcza się w wodzie (Stankiewicz 2008).

Dwutlenek tytanu (IV) stosuje się też niezwykle często, jako dodatek do betonów architektonicznych. Technologia oparta jest na tym, że do cementu portlandzkiego dodaje się TiO_2 w postaci białego proszku. W wyniku fotokatalizy dwutlenku tytanu powierzchnia stwardniałego betonu zyskuje bardzo pożądane właściwości, takie jak: zdolność do oczyszczania powietrza, a także do samooczyszczania. Ponadto zysuje wszystkie inne cechy właściwe dla powłok z TiO_2 (Błaszczyński i Gwozdowski 2012).

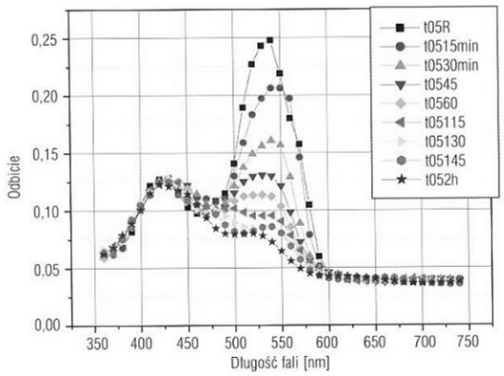
3. Rodzaje nanopowłok

Wśród powłok wytwarzanych z wykorzystaniem nanotechnologii wyróżnić można (Lelusz i Stankiewicz 2014):

- powłoki wykazujące właściwości antybakteryjne, w których stosuje się dodatki dwutlenku tytanu, cząsteczek srebra lub tlenek cynku,
- powłoki fotokatalityczne wykazujące właściwości samoczyszczące, gdzie stosuje się dwutlenek tytanu lub tlenek cynku,
- powłoki wykazujące właściwości absorbujące albo odbijające promienie słoneczne bądź podczerwone, gdzie stosuje się tlenek cynku i dwutlenku tytanu,

- powłoki wykazujące odporność na zarysowanie, gdzie stosuje się krzemionkę, a także tlenek glinu,
- powłoki wykazujące zmniejszą palność, gdzie stosuje się krzemionkę.

Powłoki fotokatalityczne wytwarzane są technikami magnetronową lub zol-żel. Na rysunku pokazane zostały zmiany charakterystyki optycznej warstwy TiO_2 w konsekwencji rozpadu katalitycznego barwnika znajdującego się na powierzchni – rodaminy R. Na rys. 4. można dostrzec znaczący spadek siły pasma pochodzącego od rodaminy już po półgodzinnym naświetlaniu. Około 90% rozkłada się po 120 minutach działania promieniowania ultrafioletowego. Powłoki katalityczne wykazują dość dużą skuteczność w usuwaniu nieczystości organicznych. Jednakże cząstki stałe nie zawsze są usuwane skutecznie (Nocuń 2010).



Rys. 4. Zmiany odbicia w funkcji naświetlania powłoki TiO_2 o cechach katalitycznych. Powłoka otrzymana techniką zol-żel. Zobrazowano rozkład rodaminy (Nocuń M. (2010). Powłoki funkcyjne na szkle - rodzaje, właściwości, perspektywy rozwoju. *Świat Szkła*, nr specjalny 2/2010, 6-9

Powłoki bakteriobójcze są produkowane z wykorzystaniem srebro, który jako czynnik unicestwiający bakterie przeżywa swoisty renesans. Została wykreowana, więc idea wytwarzania na szkle powłok, które zawierają aktywne nanocząstki Ag. Tak powleczona powierzchnia szkła powinna działać niszcząco zarówno na bakterie, grzyby jak i inne drobnoustroje, które znajdują się w pomieszczeniach. Mimo, że takie szyby są już produkowane i użytkowane, to niestety nie ma wiarygodnych badań, które potwierdzałyby skuteczność takiego rozwiązania. Powłoki aktywne produkuje się np. poprzez dodanie nanocząstek Ag do powłok SiO_2, które nakłada się techniką zol-żel albo przez dyfuzję termiczną srebra do szkła. Stosuje się także nanoczastki takich metali, jak złoto, miedź, pallad czy platyna (Nocuń 2010).

Kolejnym rodzajem powłok są powierzchnie z refleksami. Głównym zadaniem powłok refleksyjnych jest odbicie części promieni świetlnych, jakie padają na powierzchnię szkła. Należy jednak zauważyć, że powłoki te nie mają właściwości dielektrycznych. Intensyfikację

odbicia uzyskuje się poprzez powleczenie powierzchni szkła kompozytem o współczynniku załamania światła wyższym od współczynnika szkła. Bardzo często, jako materiał na powłoki refleksyjne stosuje się dwutlenek tytanu (IV). Takie powłoki stosuje się zazwyczaj w biżuterii szklanej, przedmiotach szklanych dekoracyjnych, ale również w szybach komunikacyjnych (Nocuń 2010).

Następnym rodzajem nanopowłok, wymagających szerszego omówienia, są te, które charakteryzują się właściwościami hydrofobowymi. Ich zadaniem jest zapobieganie tworzeniu się regularnej warstwy wody na powierzchniach m.in. szyb. Hydrofobizację płaszczyzny szkła uzyskuje się poprzez powleczenie jej związkiem chemicznym wykazującym cechy hybrydowe. Wśród takich materiałów wyróżnić można siloksany i związki z grupami fluorowymi (fluoroalkilsilany). Jednakże posiadają one jedną główną wadę – nie są trwałe. Cechy hydrofobowe zanikają na wskutek współdziałania z wodą i wykorzystywania urządzeń mechanicznych (takich jak myjki do okien czy wycieraczki samochodowe).

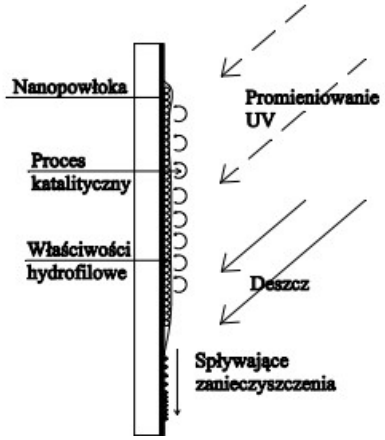
Obecnie na masową skalę wykorzystuje się powłoki wytworzone z pewnych form strukturalnych nano SiO_2. Powłoki z krzemionki powstają za pomocą rozpylania, są na stałe związane z podłożem, a co najważniejsze - efekt hydrofobowy nie ustępuje (Nocuń 2010).

Powłoki eklektrochromowe to takie, które pozwalają na regulację jasności od 15% do75%. Regulacja ta zachodzi dzięki zmianie potencjału elektrycznego, który jest przyłożony do układu. Takie powłoki stosuje się na szybach okiennych, jednakże nie są jeszcze produkowane na skalę przemysłową, głównie ze względu na wysokie koszty wytwarzania, ale także na brak stabilności długoczasowej parametrów optycznych oraz elektrycznych (Nocuń 2010).

Nanotechnologia została także wykorzystana do opracowania powłok w oparciu o micele. Mają one średnicę zaledwie kilku nanometrów, a składają się z około 30-100 molekuł. Ich cechami charakterystycznymi jest stabilny kulisty kształt, a najważniejszymi zaletami pochłanianie brudu i zanieczyszczeń do swojego wnętrza. Wyróżnia je dualizm budowy, część wewnętrzna wykazuje właściwości hydrofobowe, a warstwa zewnętrzna właściwości hydrofilowe. Na bazie miceli tłuszczu wytwarzany jest wodny preparat stosowany do powlekania drewna i konstrukcji drewnianych. Jego głównymi zaletami jest hamowanie rozwoju glonów, pleśni i mchów, a także zapobieganie erozjom biologicznej, chemicznej, a także fizycznej drewna (Lelusz i Stankiewicz 2014).

4. Szkło samoczyszczące

Jak zostało wspomniane wcześniej, najbardziej do kreowania powłok funkcyjnych na szkle nadają się nanotlenki tytanu, krzemu i glinu. Powłoki takie dokładnie przylegają do szkła, zatem bardzo trudno je uszkodzić. Może się to wydarzyć jedynie w przypadku uszkodzenia powierzchni samego szkła, m.in. przy wykorzystaniu ostrych przedmiotów, ściernych środków czyszczących czy wełny stalowej.



Rys. 5. Schemat działania szkła samoczyszczącego (Lelusz M., Stankiewicz N. (2014). Nanotechnologia w budownictwie – przegląd zastosowań. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska,*5/2014, 101-112

Głównym zadaniem powłok fotokatalitycznych jest rozkładanie zanieczyszczeń organicznych przy reagowaniu z promieniowaniem słonecznym, a następnie samoistne spływanie takiego brudu, kiedy o szkło uderza deszcz bądź woda. W przypadku takich powłok woda, zamiast kroplami, ocieka po powierzchni równą warstwą i zabiera ze sobą wszelkie zanieczyszczenia występujące na jej drodze. W porównaniu ze zwykłym szkłem, bardzo szybko staje się ono suche, a woda nie pozostawia po sobie nieestetycznych zacieków (Stankiewicz 2008). Mechanizm działania szkła samoczyszczącego opartego na powłokach fotokatalitycznych został pokazany na rysunku poniżej (Rys.5).

Należy pamiętać, że powłoka działa nawet wtedy, gdy szkło jest bardzo zabrudzone. Jednakże, jeśli powierzchnia jest aż tak brudna, że promienie świetlne nie mają dostępu do szkła, proces samoczyszczenia nie dojdzie do skutku. Wystarczy wówczas takie szkło wyczyścić miękką szmatką z ciepłą wodą z mydłem, a proces fotokatalizy uaktywni się ponownie po kilku dniach. By aktywować powłokę potrzebna jest niewielka wiązka promieniowania UV. Powłoka spełnia swoje zadanie, zatem także i w pochmurne dni, a efekt harmonijnego spływania wody po szkle utrzymuje się zawsze pod wpływem wody (Stankiewicz 2008).

Jednakże wieloletnie doświadczenia ze szkłem samoczyszczącym wykorzystywanym w budownictwie pokazują, że pozostałości w postaci suchych kropel nieestetycznie

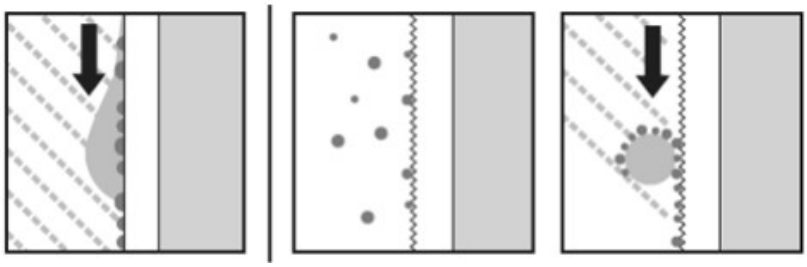
wyglądających na szybach nie są znikome, bywają nawet bardziej widoczne niż na szkle bez powłoki. Zatem naukowcy zaproponowali, by takie szkło nazywać easy-to-clean, co ma wskazywać na łatwość usunięcia z nich zabrudzeń (jeśli takowe pozostają). Niemniej jednak szkło o właściwościach hydrofobowych jest szeroko stosowane i bardzo interesujące dla różnych zastosowań. Wspomaga czyszczenie kabin prysznicowych, jest też często wykorzystywane w szybach samochodowych. Dzięki najnowocześniejszym rozwiązaniom opartym o nanotechnologię, szkło noszące miano samoczyszczącego znajduje zastosowanie w konstrukcjach o dużych powierzchniach przeszkleń, jak np. w biurowcach, czy centrach handlowych (Stankiewicz 2008).

Do zalet samoczyszczących szyb można zaliczyć (www.oknotest.pl):

- łatwiejszą konserwację, gdyż brud w mniejszym stopniu przylega do powierzchni,
- lepszą widoczność przez szyby w czasie deszczu,
- oszczędność czasu oraz pieniędzy,
- ochronę środowiska dzięki redukcji zużycia środków myjących.

5. Efekt lotosu

Wyjątkową zdolność samooczyszczenia, nazywaną także efektem lotosu, stosuje się w wielu produktach na rynku budowlanym. Jako przykład można wymienić hydrofobowe farby do elewacji czy ceramikę sanitarną. Nie zważając na to, do jakich wyrobów jest ona wykorzystywana, efekt zawsze jest taki sam, a mianowicie o wiele łatwiejsze utrzymanie czystości. Mechanizm działania powłok o właściwościach samoczyszczących jest niezwykle bliski temu, który natura stworzyła na potrzeby lotosu. Jego liście są niezwilżalne i po każdorazowych opadach deszczu od razu stają się suche i czyste. Dzieje się tak, dlatego, że krople wody toczą się po nich tak jak kule po szklanej płycie, zabierając po drodze każdy brud. Zostało to zobrazowane na rysunku 6. Efekt lotosu w tynkach i farbach osiągnięto dzięki połączeniu właściwości hydrofobowych farb silikonowych z mikrostrukturą o niedużej chropowatości (Błaszczyński i Gwozdowski 2012).



Rys. 6. Mechanizm samoczyszczenia powłok elewacyjnych z tradycyjną powłoką elewacyjną w porównaniu z efektem (Błaszczyński T., Gwozdowski B. (2012). Wprowadzenie do zagadnień nanotechnologii w budownictwie. Nanotechnologie w Budownictwie. Międzynarodowe Targi Poznańskie, *Politechnika Poznańska*)

Produkowanych jest bardzo dużo rodzajów farb hydrofobowych znajdujących zastosowanie do takich produktów i elementów konstrukcyjnych jak (Błaszczyński i Gwozdowski 2012):

- ceramika, zapewniając optymalne warunki higieniczne,
- stal szlachetna, chroniąc przed korozją,
- okna (szyby), samooczyszczając powierzchnię z brudu,
- drewno, kamień, chroniąc przed mchami oraz spalinami,
- wykładziny podłogowe, ułatwiając utrzymanie w czystości,
- anty-graffiti, umożliwiając zmywanie niechcianych malunków przy pomocy wody pod ciśnieniem .

Oprócz farb i powłok hydrofobowych, na rynku znajdują się także bezbarwne preparaty, których zadaniem jest zabezpieczenie powierzchni poprzez zapobieganie wnikaniu zanieczyszczeń w pory. Co jest niezwykle ważne - nie zakłócają one procesu oddychania powierzchni. Przy wykorzystaniu tego typu środków, usunięcie wszelkich nieczystości nie wymaga użycia żadnych specjalistycznych detergentów, gdzie podobnie jak w przypadku farb hydrofobowych, zanieczyszczenia wystarczy spłukać za pomocą wody (Błaszczyński i Gwozdowski 2012).

6. Powłoki hydrofilowe na elewacjach

Bardzo ciekawie prezentują się właściwości powłok hydrofilowych. Wśród najważniejszych trzeba wymienić (Błaszczyński i Gwozdowski 2012):

- właściwości samoczyszczące w deszczu, zarówno w oknach, świetlikach dachowych, elewacjach ceramicznych i aluminiowych, jak i przeźroczystych zadaszeniach i szklarniach,
- właściwości bakteriobójcze i przeciwgrzybiczne, wykorzystywane w instalacjach do oczyszczania powietrza w budynkach, w ścianach w łazienkach i ubikacjach miejsc użyteczności publicznej, w powierzchniach sal operacyjnych i gabinetów lekarskich,
- ułatwianie mycia ścian czy oświetlenie tuneli,
- ochrona przed promieniowanie UV w przypadku elewacji narażonych na duże nasłonecznienie,
- neutralizacja zapachów w palarniach, wnętrzach z dużym natężeniem nieprzyjemnych zapachów, szatniach sportowców.

Powłoki hydrofilowe znalazły szerokie zastosowanie w produktach stalowych. Stanowią dobre rozwiązanie w przypadku fasad o znacznej powierzchni. Takie powłoki sprawiają, że woda na płaszczyźnie rozprowadzana jest o wiele bardziej równomiernie, co

polepsza czyszczenie. Ponadto na powierzchni nie ma widocznych kropel, co jest niezmiernie pożądane ze względu na estetykę (Błaszczyński i Gwozdowski 2012).

Technologa Hairclyn firmy Arcelor Mittal jest oparta na próżniowym nakładaniu powłok zawierających dwutlenek tytanu (IV). Odbywa się to już w czasie procesu produkcyjnego materiału. Produkty wytwarzane w ten sposób dostępne są w wielu kolorach, co zdaje się być dużą zaletą, zważywszy na to, że są one szeroko stosowane przy konstruowaniu ścian fasadowych. Ponieważ fasady wielkich hal produkcyjnych mają bardzo duże powierzchnie, sposobność łatwego utrzymania ich w czystości ma ogromne znaczenie. Producent patentu zapewnia, że czyszczenie fasad wykonanych z produktów z jego logo, może odbywać się bez wykorzystywania jakichkolwiek detergentów. Mniejsze jest także zużycie wody, głównie dzięki mechanizmowi samooczyszczenia (Błaszczyński i Gwozdowski 2012).

7. Wnioski

Przeprowadzona analiza dowodzi, że, mimo, iż nanotechnologia jest dostatecznie nową dziedziną nauki, to ma szerokie zastosowanie przy produkcji powłok wykorzystywanych do szkieł i elewacji budynków. Najczęściej stosowanymi nanocząsteczkami są dwutlenek tytanu oraz nanocząstki srebra.

Wśród powłok produkowanych z wykorzystaniem nanocząstek można wyróżnić: antybakteryjne, fotokatalityczne, absorbujące albo odbijające promienie słoneczne bądź podczerwone, odporne na zarysowanie i ze zmniejszoną palnością.

Bardzo szeroko są stosowane obecnie szkła samoczyszczące, które wykazują właściwości fotokatalityczne. Wykorzystuje się je zarówno w konstrukcjach o dużych powierzchniach przeszkleń, jak np. w biurowcach, czy centrach handlowych czy w kabinach prysznicowych albo szybach samochodowych.

Nanotechnologia jest wykorzystywana również w farbach i tynkach elewacyjnych. Dzięki zjawisku fotokatalizy i właściwościom hydrofilowym są one łatwiejsze w utrzymaniu czystości. Takie powłoki sprawiają, że woda na powierzchni rozprowadzana jest bardziej równomiernie i spływając zabiera ze sobą wszelkie zanieczyszczenia.

8. Literatura

Błaszczyński T., Gwozdowski B., 2012. Wprowadzenie do zagadnień nanotechnologii w budownictwie. Nanotechnologie w Budownictwie. Międzynarodowe Targi Poznańskie, *Politechnika Poznańska*.

Czarnecki L., 2011. Nanotechnologia w budownictwie. *Przegląd Budowlany*, 1/2011, 40-53.

Kosmala K., Szymańska R., 2016. Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych,* t. 65, nr 2(311)/2016, 235-245.

Kowalski Z., Chrzanowski P., 2005. Diamon Fusion – nanotechnologia w zasięgu ręki. *Świat Szkła,* 7-8/2005.

Krukiewicz K., 2011. Na tropach innowacji. *Chemik,* nr 65(11)/2011, 1218-1223.

Lelusz M., Stankiewicz N., 2014. Nanotechnologia w budownictwie – przegląd zastosowań. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska,*5/2014, 101-112.

Nocuń M., 2010. Powłoki funkcyjne na szkle - rodzaje, właściwości, perspektywy rozwoju. *Świat Szkła*, nr specjalny 2/2010, 6-9.

Stankiewicz B., 2008. Nanotechnologia w nowoczesnym szkle. *Świat Szkła,* 5/2008, 58-62.

Świdnicka-Gajewska A.M., 2007. Nanocząstki (Część 1). Produkt nowoczesnej technologii i nowe zagrożenie w środowisku pracy. *Medycyna Pracy*, nr 58, 243-251.

http://oknoplast.pl

Elektrochemiczne metody otrzymywania powłok metalicznych o właściwościach superhydrofobowych

Karolina Chat[(1)], Ewa Rudnik[(1)]

[1]Wydział Metali Nieżelaznych, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie
Karolina Chat: karolina.chat@wp.pl

Streszczenie
Wiele metali w kontakcie ze środowiskiem ulega korozji.Jedną z metod poprawyodporności korozyjnej materiałów metalicznych jest wytwarzanie powłok ochronnych o właściwościach superhydrofobowych. Powierzchnie tego rodzaju odznaczają się specyficzną chropowatością w mikro- i nanoskali oraz niską energią. Inspirację do rozwoju materiałów superhydrofobowych stanowiły obserwacje naturalnych powierzchni świata roślinnego i zwierzęcego. W pracy przedstawiono krótki przegląd elektrochemicznych metod otrzymywania powłok hydrofobowych na podłożu metalicznym. Opisano przykłady warstw otrzymanych na drodze cementacji, katodowego osadzania i anodowego utleniania, a także możliwości ich potencjalnych zastosowań.

Słowa kluczowe: elektroliza, anodowanie, cementacja, powłoka, zwilżalność

Electrochemical fabrication of metallic coatings with superhydrophobic properties

Summary
Many metals corrode in contact with surrounding environment. One of the methods used for improvement of the corrosion resistance of metallic materials is application of superhydrofobic protective coatings. Such surfaces are characterized by specific roughness in micro and nanoscale as well as low surface energy. Development of superhydrophobic materials was inspired by observations of plant and animal natural surfaces. The paper presents a short review on electrochemical methods used for fabrication of hydrophobic coatings on metal substrates. Examples of the layers obtained by cementation, electrodeposition and anodic oxidation as well as their potential applications have been described.

Keywords: electrolysis, anodizing, cementation, coating, wettability

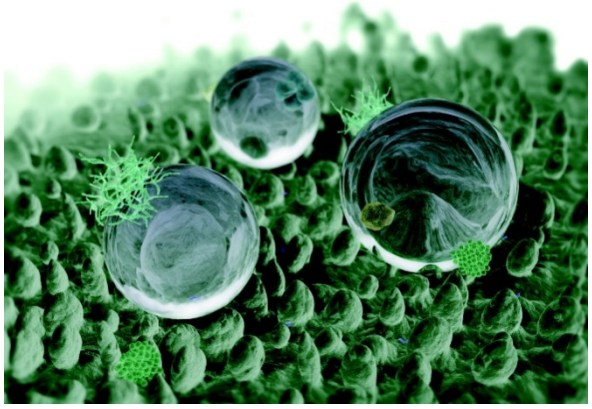
1. Wstęp

W trakcie eksploatacji urządzeń, instalacji i konstrukcji, metale, z których zostały one wykonane ulegają zniszczeniu, a z upływem czasu całkowitej degradacji. Na proces zniszczenia wpływa oddziaływanie metali z powietrzem, glebą oraz wodą. Niszczenie metali zachodzi przede wszystkim wskutek korozji elektrochemicznej i przebiega zazwyczaj od powierzchni mającej bezpośredni kontakt ze środowiskiem korozyjnymstopniowo wnikając w głąb materiału.Straty wywołane procesami korozyjnymi są trudne do oszacowania, ponieważ dotyczą zarówno kosztów materiałowych, jak i robocizny, energii czy remontów. Szacuje się, że wskutek korozji, roczne straty są bliskie kosztom rocznej produkcji około 30% tworzyw metalowych (Głowacka 2014).

Odpowiednie zabezpieczenie antykorozyjne przedłuża żywotnośći zmniejsza koszty użytkowania konstrukcji i wyrobów metalowych. Istnieją różne techniki zapobiegania korozji metali.Jedną z nich jest nanoszenie na powierzchnię warstw o różnorodnym składzie i właściwościach. Powłoki ochronne mogą być wykonane z materiałów metalicznych,

ceramicznychlub z tworzyw sztucznych (Łączka i in. 2008). Najważniejszą funkcją warstw tego rodzaju jest odizolowanie chronionego materiału od środowiska korozyjnego, a w przypadku powłok metalowych można dodatkowo zapewnić ochronę elektrochemiczną podłoża metalicznego.

W ostatnich latach dużym zainteresowaniem cieszą się antykorozyjne powłoki superhydrofobowe. Powierzchnie superhydrofobowe charakteryzują się wysokim kątem zwilżania (powyżej 150°) i niskim kątem przesuwu kropli (poniżej 5°). Inspiracją do opracowania metod wytwarzania powierzchni o wyjątkowo niskiej zwilżalności było wyjaśnienie tzw. „efektu lotosu" w latach dziewięćdziesiątych XX wieku (Neinhuis i Barthlott 1997*)*. Liście lotosu posiadają właściwości samoczyszczące - woda tworzy kuliste krople, które z łatwością spływają z powierzchni liści „zbierając" zanieczyszczenia (rys.1). Cecha ta wynika ze specyficznej hierarchicznej struktury powierzchniowej liści oraz obecności wosków oniskiej energii powierzchniowej (kąt zwilżania 161° i kąt przesuwu 2°).



Rys. 1. Symulacja morfologii powierzchni liści lotosu (http://wthielicke.gmxhome.de/bionik)

Zastosowanie powłok superhydrofobowych do ochrony metali przed korozjązmniejsza kontakt między warstwąwody a powierzchnią podłoża, co ogranicza powstawanie ognisk korozyjnych i hamuje procesy elektrochemiczne.

Powłoki superhydrofobowe można otrzymać wieloma sposobami. Należy tu wymienić m.in.: trawienie chemiczneb(Zhang i in. 2008), obróbkę laserową (Bhattacharyya 2013), utlenianie w mikrołuku(Zhang i Lv 2015), metodę zol-żel (Ferrari i Benetti 2015), osadzanie z fazy gazowej (Wang i in. 2005). Większość z wymienionych metod wymaga stosowania kosztownej aparatury i długiego czasu obróbki powierzchni, przy czym często trwałość właściwości hydrofobowych nie jest dostatecznie zadowalająca(do roku od momentu zaaplikowania). Z tego względu poszukuje się nowych, prostych i wydajnych metod wytwarzania powłok niezwilżalnych.

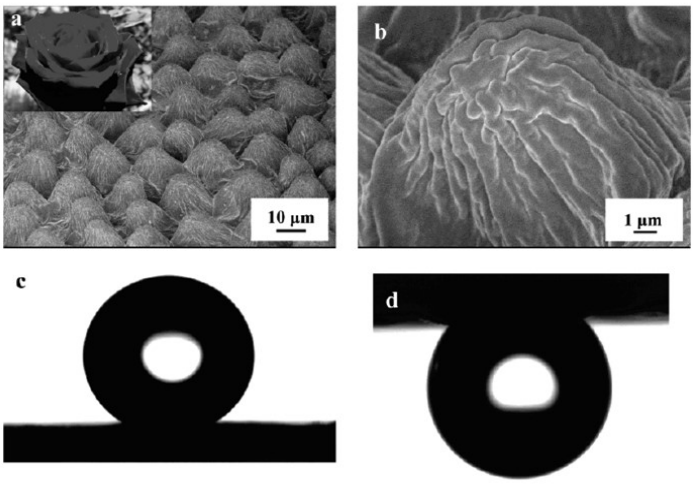
W niniejszej pracy przedstawiono krótką charakterystykę naturalnych powierzchni superhydrofobowych, teorie wyjaśniające niską zwilżalność powierzchni chropowatych oraz opisano elektrochemiczne metody wytwarzania powłok superhydrofobowych. Należy podkreślić, że metody elektrochemiczne stanowią niewątpliwie obiecujący sposób produkcji trwałych powłok antykorozyjnych, których potencjalne zastosowania zaprezentowano w podsumowaniu artykułu.

2. Naturalne powierzchnie superhydrofobowe

W przyrodzie można znaleźć wiele różnych powierzchni superhydrofobowych, zarówno w świecie roślinnym, jak i zwierzęcym (Bhushan i Jung 2011). Jako przykłady należy wymienić: liście lotosu (Neinhuis i Barthlott 1997) i ryżu (Guo i Liu 2007), płatki róż (Feng i in. 2008), odnóża nartników wodnych (Gao i Jiang 2004), skrzydła cykad (Sun i in. 2005.), skrzydła motyli (Zheng i in. 2007), pióra pingwinów (Wang i in. 2016), odnóża gekona (Gao i in. 2005).

Liście lotosu są jednym z najważniejszych i najbardziej znanych przypadków naturalnych powierzchni o właściwościach superhydrofobowych. Pod mikroskopem elektronowym widoczna jest specyficzna „dwupoziomowa" struktura powierzchni tworząca „doliny" i „wzgórza" (3-10 μm), które są pokryte „pałeczkami" wosku (70-100 nm) (Bhushan i Her 2010).

Warto wspomnieć również o tzw. „efekcie płatka" (Feng i in. 2008). Odnosi się on płatków róży, których powierzchnia uniemożliwia toczenie się kropli wody (rys. 2 a, b), nawet gdy kwiat zostanie odwrócony o 180^{o} w kierunku gruntu (rys. 2 c, d). Świadczy to o występowaniu powierzchni superhydrofobowych innego rodzaju, które dodatkowo wykazują wysokie siły adhezji.

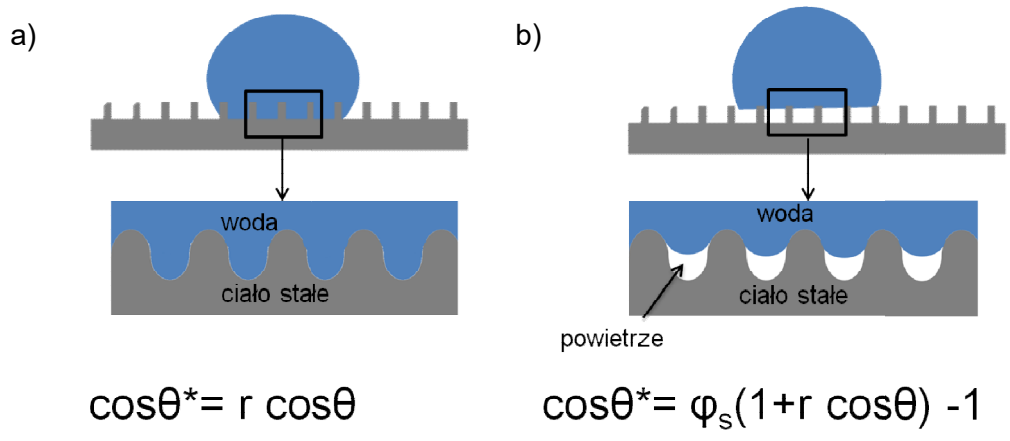


Rys. 2. Zdjęcia: a, b) SEM powierzchni płatka róży czerwonej, c) kropli wody na powierzchni płatka róży (kąt zwilżania 152,4°), d) kropli wody na powierzchni płatka odwróconego o 180^{o}. American Chemical Society 2013

3. Teorie zwilżalności powierzchni

W celu zrozumienia mechanizmu działania powierzchni hydrofobowych opracowano teorie zwilżalności powierzchni chropowatych, spośród których najważniejsze sądwa modele: Wenzel'a i Cassie-Baxtera (Baldacchini i in. 2006). Pierwszy z nich opisuje powierzchnię o nieregularnej budowie, która w pełni styka się z warstwą cieczy (rys.3 a), natomiast drugi zakłada, że kropla cieczy zamyka pęcherzyki powietrza w rowkach struktur powierzchniowych (eys.3 b).

Każda z teorii może zostać zastosowana do opisu wzajemnego oddziaływania między wodą a powierzchnią, a wybór konkretnej zależy od rodzaju zwilżenia danej powierzchni. Analizując modele należy zauważyć, że na zwilżalność powierzchni wpływa w dużym stopniu ruch wody. W modelu Wenzel'a istnieje całkowity kontakt pomiędzy wodą a ciałem stałym, w wyniku, czego ruch kropli wody na powierzchni staje się trudniejszy. Mechanizm zwilżający typu Cassie-Baxtera wskazuje natomiast na znacznie mniejszy kontakt powierzchni ciała stałego z kroplą wody, przez co powierzchnia staje się „śliska" (Victor i in. 2016). W efekcie, powierzchnia typu Wenzel'a będzie „lepka" i nie będzie wykazywać właściwości samooczyszczania w przeciwieństwie do powierzchni typu Cassie-Baxtera, po której krople wody mogą z łatwością się poruszać zbierając zanieczyszczenia.



Rys. 3. Modele zwilżalności powierzchni chropowatych: a) Wenzel'a, b) Cassie-Baxtera
θ – kąt zwilżania powierzchni płaskiej; θ* - kąt zwilżania powierzchni chropowatej powierzchni;
r –chropowatość powierzchni; φ_s – udział powierzchni kontaktu ciało stałe-ciecz

Moment przejścia pomiędzy opisanymi dwoma stanami zwilżania stanowi ciekawy aspekt prac badawczych; analizowana jest m.in. rola wielkości powierzchni, wysokości wypustek, odstępów między wypustkami oraz geometria wypustek. Zmiana tych parametrów zapewnia duże różnice nie tylko w „lepkości" powierzchni, ale również w wartościach kątów zwilżania (Darmanin i in. 2013).

4. Elektrochemiczne metody otrzymywania powłok superhydrofobowych

Skład chemiczny oraz chropowatość powierzchni są kluczowymi parametrami przyczyniającymi się tworzenia powierzchni superhydrofobowych. Elektrochemiczne metody uważane są za efektywne sposoby otrzymywania powierzchni niezwilżalnych. Najważniejszymi zaletami procesów elektrochemicznych są: łatwość realizacji procesów, niski koszt wytwarzania, szerokie zastosowanie w przemyśle, możliwość wytwarzania na dużych powierzchniach, zastosowanie roztworów wodnych lub organicznych, niska temperatura pracy (poniżej 100 ^{o}C).

4.1.Osadzanie bezprądowe

Osadzanie bezprądowe umożliwia otrzymywanie powłok metalicznych na drodze cementacji. Jony metalu Me_1^{n+} w kontakcie z metalem o niższym potencjale elektrochemicznym Me_2ulegają redukcji w procesie samorzutnym:

$$mMe_1^{n+} + nMe_2 \rightarrow mMe_1 + nMe_2^{m+} \quad (1)$$

Morfologia powierzchni powłoki otrzymanej w procesie cementacji w dużym stopniu zależy od rodzaju użytego elektrolitu.

Larmour i współaut. (Larmour i in. 2007) opracowali prostą metodę otrzymania powłok niezwilżalnych. W tym celu zanurzono folię cynkową w roztworze azotanu (V) srebra (I), w wyniku, czego otrzymano czarną, matową, chropowatą warstwę srebra o strukturze przypominającej kwiaty. Uzyskana powłoka nie wykazywała właściwości superhydrofobowych. Z tego względu przeprowadzono modyfikację chemiczną za pomocą 3, 3, 4, 4, 5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 9, 9, 10, 10, 10-heptadekafluoro-1-dekanotiolu. W rezultacie warstwa metaliczna została pokryta monowarstwą substancji o niskiej energii powierzchniowej, a kąt zwilżania otrzymanej powierzchni wynosił 173^{o}.

Podobną metodę zastosowali Xu i in. (2010). Chropowatą warstwę srebra osadzano z roztworu $[Ag(NH_3)_2]OH$ na wypolerowanych blaszkach miedzianych. W wyniku procesu otrzymano powłoki o strukturze dendrytycznej, które następnie zmodyfikowanon-dodekanotiolemuzyskując warstwy o kącie zwilżaniaokoło 169°.

Analogiczny sposób wykorzystano do osadzania superhydrofobowych warstw srebra o strukturze nanoporowatej (Gu i in. 2010). W tym przypadku zastosowano roztwór chlorku srebra w chlorku choliny. Warstwy srebra osadzano w temperaturze pokojowej oraz w temperaturze 50^{o}C, co jednak nie miało znacznego wpływu na rodzaj otrzymanej morfologii, a jedynie przyśpieszało proces osadzania. Powierzchnia powłoki zmodyfikowana n-dodekanotiolem wykazywała kąt zwilżania 160^{o}.

Guittard i Darmaint (2018) otrzymali natomiast struktury dendrytyczne złota na drodze cementacji na blaszkach cynkowych. Osadzanie przeprowadzono przez zanurzanie cynku w wodnym roztworze $HAuCl_4$, anastępnie powłoki wyżarzano w temperaturze 160^o. W rezultacie otrzymano powierzchnie o kącie zwilżania 170^o.

Hierarchiczne struktury uzyskano także na drodze cementacji platyny (Zhang i in. 2014). Poprzez zanurzanie miedzi w wodnym roztworze $PtCl_4$ i wyżarzaniu otrzymanej warstwy platynowej otrzymano powierzchnię o budowie mikro- i nanostuktur kwiatowych oraz kącie zwilżania 170^o.

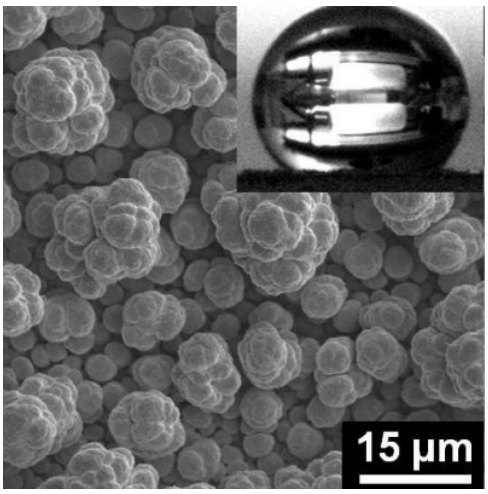
4.2. Osadzanie katodowe

Elektrochemiczna redukcja jonów metali pozwala na uzyskanie powłok metalicznych i stopowych zarówno z roztworów wodnych, jak i cieczy jonowych:

$$Me^{n+} + ne \rightarrow Me \quad (2)$$

Morfologia otrzymywanych warstw zależy od parametrów elektrolizy oraz składu kąpieli. Hydrofobowe powłoki galwaniczne otrzymuje się zwykle w trakcie jedno- lub dwuetapowej elektrolizy. Zazwyczaj w drugim etapie warstwę metaliczną poddaje się obróbce chemicznej w alkoholowych roztworach wyższych kwasów karboksylowych lub innych związków organicznych zapewniających niską energię powierzchniową.

Metodę otrzymywania elektrolitycznych powłok miedzianych o właściwościach superhydrofobowych opisali Hagdoost i Pitchumani (2013). Osadzanie prowadzono stosując kwaśny roztwór siarczanowy i wysoki nadpotencjał katodowy. Otrzymano powłoki o morfologii kwiatu kalafiora(rys.4), których kąt zwilżania wynosił 165^o.



Rysunek 4. Hierarchiczna mikrostruktura powierzchni powłoki miedziowej.Copyright (2013) American Chemical Society.

Powłoki superhydrofobowe można również uzyskać z niklu. Xiang i in. (2017) określili wpływ gęstości prądu na morfologię, zwilżalność i odporność korozyjną powłok niklowych.

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń otrzymano hierarchiczną strukturę powierzchni, która charakteryzowała się kątem zwilżania około 140°. Po modyfikacji chemicznej otrzymano powierzchnie o kącie zwilżania około 150°.

Qiu i in., (2011) jako pierwsi przedstawili możliwość otrzymania elektrolitycznych powłok kobaltowych o właściwościach superhydrofobowych. Trójwymiarowe kolumnowe struktury o budowie naśladującej sześciopłatkowe kwiaty otrzymano w roztworze chlorkowo-siarczanowym. Podczas eksperymentu zaobserwowano, że wraz ze wzrostem czasu trwania procesu, tworzyły się mikrostruktury o coraz bardziej rozwiniętej powierzchni. Najwyższy kąt zwilżania 162° uzyskano dla czasu 600 s.

Superhydrofobowe powierzchnie otrzymane na drodze elektrolizy można uzyskać również ze złota (Ren i in. 2009). Warstwę złota o morfologii naśladującej kwiat kalafiora otrzymano w dwuetapowej elektrolizie z różnych roztworów. Ostatnim etapem była modyfikacja chemiczna za pomocą perfluorododecylotrichlorosilanu. Finalnie otrzymano powłokę o kącie zwilżania 162°.

Innym metalem szlachetnym, z którego uzyskano powierzchnie wodoodporne jest srebro (Gu i Zhang 2008). Elektrolizę prowadzono przy różnych potencjałach katodowych w roztworze azotanowym. Struktura otrzymanej powierzchni przypominała mikrodendryty, jednak kąt zwilżania wynosił zaledwie 7°. Modyfikacja powierzchni n-dodekanotiolem poskutkowała zmianą zwilżalności i uzyskaniem własności superhydrofobowych (kąt zwilżania 154°).

4.3 Anodowe utlenianie

Techniki anodowania są szeroko stosowane do sztucznego wytwarzania warstw ochronnych poprzez elektrochemiczne utlenianie podłoża nieszlachetnego metalu:

$$Me + yH_2O \rightarrow Me_xO_y + 2yH^+ + ye \quad (3)$$

Metoda ta jest często stosowana w celu wytworzenia porowatych nanostruktur na aluminium (Darmanin i in. 2013). Powszechnie wiadomo, że konwencjonalne anodowanie aluminium w H_2SO_4 powoduje powstanie tlenku o budowie nanoporowatej. Stwarza to możliwość otrzymywania powierzchni superhydrofobowych poprzez odpowiednią wstępną obróbkę powierzchni, właściwe kontrolowanie procesu anodowania oraz modyfikację uzyskanej warstwy.

Weibel i in. (2010) udowodnili, że wstępna obróbka aluminium za pomocą trawienia chemicznego znacznie zwiększa wartość statycznego kąta zwilżania przy jednoczesnym zmniejszeniu kąta przesuwu. Wstępne trawienie aluminium za pomocą wodorotlenku

tetrametyloamoniowego, a następnie anodowanie i obróbka warstwy tlenkowej za pomocą kwasu fosforowego umożliwia uzyskanie kąta zwilżania ok. 157^{o} (Park i in, 2010).

Song i in. (2013) zastosowali natomiast trawienie elektrochemiczne aluminium w roztworze NaCl. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie szorstkich struktur w skali mikrometrycznej. W kolejnym etapie przeprowadzono anodowanie oraz modyfikację za pomocą kwasu perfluorooktanowego. W rezultacie otrzymano powłokę o kącie zwilżania 166^{o}.

Anodowaniu poddaje się także tytan, miedź, cynk czy niob. Anodowanie tytanu prowadzi się w elektrolitach zawierających jony fluorkowe, które przyczyniają się do powstania na powierzchni metalu nanorurek tlenku tytanu. Poprzez odpowiedni dobór procesów obróbki wstępnej można otrzymać również powierzchnie nie tylko, superhydrofobowe, ale również superoleofobowe odpychające cząsteczki oleju (Wang i in. 2010).

Anodowanie miedzi prowadzi się w roztworach KOH lub NaOH (Guittard i Darmanint 2018). Morfologia powierzchni powłok hydrofobowych otrzymanych w tych elektrolitach przypomina kaktusy o dużej liczbie krótkich kolców.

Galstyana i in. (2012) opisali natomiast utlenianie powierzchni cynku, przy czym kąt zwilżania niemodyfikowanej warstwy tlenkowej wynosił 132^{o}. Znacznie wyższy kąt zwilżania (175^{o}) uzyskano w przypadku anodowania niobu (Yang i in. 2011).

5.Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono krótką charakterystykę elektrochemicznych metod otrzymywania powłok superhydrofobowych na podłożach metalicznych. Niezależnie od stosowanej techniki warunkiem niezbędnym do wytworzenia powierzchni superhydrofobowych jest właściwy dobór morfologii i chropowatości powierzchni oraz zastosowanie związków o niskiej energii powierzchniowej.

Postęp w wytwarzaniu i charakteryzowaniu warstw superhydrofobowych jest napędzany przez szerokie zastosowania praktyczne. Zmodyfikowane powierzchniowo materiały metaliczne mogą być wykorzystywane m.in., jako powierzchnie samooczyszczające (np. karoserie samochodowe, pokrycia samolotowe), antyoblodzeniowe (np. pokrycia samolotów, karoserie samochodowe, burty statków, linie energetyczne, pomosty, turbiny wiatrowe), antykorozyjne (np. powłoki ochronne), obniżające tarcie w kontakcie z wodą (np. burty statków i łodzi podwodnych, rurociągi) czy umożliwiające rozdział niepolarnych substancji organicznych (oleje) od wody.

Chociaż w ciągu ostatnich lat nastąpił intensywny rozwój w dziedzinie powłok superhydrofobowych, nadal pozostaje kilka zagadnień, które wymagają rozwiązań. Należą do nich standaryzacja metod pomiaru kąta zwilżania i sposobów testowania właściwości

hydrofobowych, a takżeutrzymanie długotrwałego efektu superhydrofobowego w warunkach użytkowania. Należy także nadmienić, że opracowane dotychczas metody projektowania i otrzymywania powłok superhydrofobowych ograniczają się często do badań laboratoryjnych i nie są jeszcze przystosowane do realizacji na skalę przemysłową.

6. Literatura

Baldacchini T., i in., 2006. Superhydrophobic Surfaces Prepared by Microstructuring of Silicon Using a Femtosecond Laser. *Langmuir* 22:4917-4919.

Bhattacharyya R., 2013. Technological applications of superhydrophobic coatings: needs and challenges. *Novus International Journal of Analytical Innovations* 2,4: 1-9.

Bhushan B., Her E. K., 2010. Fabrication of superhydrophobic surfaces with high and low adhesion inspired from rose petal. *Langmuir* 26,11: 8207–8217.

Bhushan B., Jung Y. C., 2011. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science* 56:1–108.

Darmanin T., i in., 2013. Superhydrophobic Surfaces by Electrochemical Processes, *Adv. Mater.* 25: 1378–1394.

Feng L., i in., 2008. Petal effect: a superhydrophobic state with high adhesive force. *Langmuir* 24, 8:4114–4119.

Ferrari M., Benetti A., 2015. Superhydrophobic surfaces for applications in seawater. *Advances in Colloid and Interface Science* 222: 291-304.

Galstyana V., i in., 2012. Growth and Gas Sensing Properties of Self-Assembled. Chain-Like ZnO Nanostructures. *Procedia Engineering* 47 (2012) 762 – 765.

Gao H., i in., 2005. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials* 37:275–85.

Gao X., Jiang L., 2004. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature* 432, 7013 :36.

Głowacka M., 2014. Inżynieria Powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie-wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej.

Gu C. D., Xu X. J., Tu J. P., 2010. Fabrication and Wettability of Nanoporous Silver Film on Copper from Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents, *J. Phys. Chem.* C 114:13614–13619.

Gu C., Zhang T., 2008. Electrochemical synthesis of silver polyhedrons and dendritic films. *Langmuir* 24,20:12010–12016.

Guo Z., Liu W., 2007. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: binary structure and unitary structure. *Plant Science* 172, 6:1103–1112.

Guittard F., Darmanint T., 2018. Bioinspired Superhydrophobic Surfaces: Advances and Applications with Metallic and Inorganic Materials, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. ISBN 9789814774055 s.66.

Haghdoost A., Pitchumani R., 2013. Self-cleaning superhydrophobic metallic coatings. Proceedings Annual Meeting of Adhesion Society. Daytona Beach, Florida, USA 3-6.03.2013: 126-128.

Jinlong Song i in., 2013. Fabrication of superoleophobic surfaces on Al substrates, *J. Mater. Chem. A*, 1: 14783–14789.

Larmour I. A. i in., 2007. Remarkably Simple Fabrication of Superhydrophobic Surfaces Using Electroless Galvanic Deposition. *Surface Chemistry* 119:1740 –1742.

Łączka M., i inn., 2008. Powłoki żelowe na szkle cz 2. *Świat Szkła* 11,: 40-43.

Neinhuis C., Barthlott W., 1997. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79,6: 667–677.

Park B. G., i in., 2010. Superhydrophobic fabrication of anodic aluminum oxide with durable and pitch-controlled nanostructure. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 370: 15–19.

Qiu R., i in., 2011. One-step preparation of hierarchical cobalt structure with inborn superhydrophobic effect. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Enginering Aspects* 377,1-3: 144–149.

Ren H. X., i in., 2009. A cauliflower-like gold structure for superhydrophobicity. *Journal of Colloid Interface Science* 334: 103–107.

Sun T., i in., 2005. Bioinspired surfaces with special wettability. *Accounts of Chemical Research* 38, 8:644–652.

Tam J., Palumbo G., Erb U., 2016. Recent Advances in Superhydrophobic Electrodeposits, *Materials* 9,151: 1-27.

Victor J., Facchini D., Erb U., 2012. A low-cost method to produce superhydrophobic polymer surfaces. *J Mater Sci* 47:3690–3697.

Wang D., i in., 2010. Engineering a Titanium Surface with Controllable Oleophobicity and Switchable Oil Adhesion, *J. Phys. Chem. C* 114, 9938–9944.

Wang L., Guo S., Dong S., 2008. Facile electrochemical route to directly fabricate hierarchical spherical cupreous microstructures: toward superhydrophobic surface. Electrochemistry Communications 10: 655–658.

Wang S., i in., 2016. Icephobicity of penguins spheniscus humboldti and an artificial replica of penguin feather with air-infused hierarchical rough structures. *Journal of Physical Chemistry* 120, 2:15923–15929.

Wang S., i in., 2005. Manipulation of surface wettability between superhydrophobicity and superhydrophilicity on copper films. *Chem. Phys.Chem*. 6: 1475–1478.

Weibel D. E., i in., 2010. Adjustable Hydrophobicity of Al Substrates by Chemical Surface Functionalization of Nano/Microstructures. *J. Phys. Chem. C* 114: 13219–13225.

Xiang T., i in., 2017. Effect of current density on wettability and corrosion resistance of superhydrophobic nickel coating deposited on low carbon steel. *Materials and Design* 114: 65-72.

Xu X., Zhang Z., Jin Yang J., 2010. Fabrication of Biomimetic Superhydrophobic Surface on Engineering Materials by a Simple Electroless Galvanic Deposition Method. *Langmuir* 26, 5: 3654–3658.

Yang S., i in., 2011. Control of morphology and surface wettability of anodic niobium oxide microcones formed in hot phosphate–glycerol electrolytes. *Electrochimica Acta* 56: 7446–7453.

Zhang, N., i in., 2014. Controlled growth of CuO–Cu3Pt/Cu micro-nano binary architectures on copper substrate and its superhydrophobic behavior, *New J. Chem*., 38: 4534–4540.

Zhang P., F.Y. Lv. 2015. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy* 82:1068-1087.

Zhang X., i nn., 2008. Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application. *Journal of Materials Chemistry* 18: 621–633.

Zheng Y., Gao X, Jiang L., 2007. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. *Soft Matter* 3, 2:178–182.

http://wthielicke.gmxhome.de/bionik

http://home.agh.edu.pl/~kmr/instrukcje/zwilzalnosc.pdf

Przesłony przeciwfiltracyjne wykonane z odpadów po flotacji rud miedzi

Maciej Gruszczyński[(1)], Sara Burkiewicz[(2)], Patryk Krzyszkowski[(3)]

[1]Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
[2]Inżynieria Środowiska rok 1 II°, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
[3]Inżynieria i Gospodarka Wodna rok 4, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Sara Burkiewicz: sara.burkiewicz@gmail.com

Streszczenie
W artykule przedstawiono sposoby wykorzystania odpadów powstałych w wyniku flotacji rud miedzi. Odpady te stanowią potencjalną wartość, jako materiały budowlane. Technologia produkcji miedzi prowadzi do powstania znacznych ilości odpadów, których zagospodarowanie pozwoli odciążyć środowisko naturalne oraz stwarza nowe rozwiązania techniczne. Szczególną uwagę zwrócono na badania wykorzystania odpadów, jako przesłona przeciwfiltracyjną w wale przeciwpowodziowym. Przedstawiono również wyniki obserwacji zmiany zachowania krzywych filtracji w wałach bez przesłony i z przesłoną przeciwfiltracyjną.

Słowa kluczowe: filtracja, wały przeciwpowodziowe, odpady poflotacyjne

Antifiltration diaphragms made of copper flotation waste

Summary
The article presents the methods of using waste resulting from copper ore flotation. These wastes represent potential value as building materials. The technology of copper mining leads to the creation of significant quantities of waste, the management of which will help relieve the natural environment and create new technical solutions. Particular attention was paid to research into the use of waste as a filter anti-filtration dam in the flood embankment. The results of the observation of changes in the behavior of filtration curves in shafts without a shutter and with a filtering aperture are presented.

Keywords: filtration, flood embankments, post-flotation wastes

1. Wstęp

Przetwórstwo i obróbka materiałów niesie ze sobą obciążenie środowiska odpadami oraz produktami ubocznymi, których gospodarka może być problemem. Jednym z produktów uciążliwych w składowaniu lub wykorzystaniu są odpady powstałe w wyniku flotacji rud miedzianych. Przy obecnych wymogach środowiskowych coraz trudniej stworzyć miejsce do przechowywania mogących negatywnie wpłynąć na wodę, powietrze lub grunt. Jednym z możliwych sposobów użycia odpadów poflotacyjnych jest wbudowanie w budowle hydrotechniczne, jako przesłony przeciwfiltracyjnej.

Według Instytutu Gospodarki Odpadami w Katowicach na różnych składowiskach przechowywane są ponad 4 mld Mg odpadów mineralnych powstałych za sprawą działalności górniczej oraz energetycznej. Dzisiejsza technologia pozwala na zminimalizowanie wpływu gazów i wód zanieczyszczonych na środowisko, ale ograniczone lokalizacje składowisk uniemożliwiają ciągłe składowanie odpadów stałych. Dlatego podjęto badania nad praktycznym ich wykorzystaniem (Łuszczkiewicz 2000)

Na cele badawcze pozyskano odpady przechowywane na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) zalegające pod zwierciadłem wody technologicznej.

Uzyskane odpady składają się jedynie z frakcji bardzo drobnych, a przeważającą część stanowią ziarna mniejsze nić 0,06 mm (tabela 1).

Niniejsza praca przedstawia wyniki badań nad wykorzystaniem odpadów poflotacyjnych do budowy przesłon uszczelniających wały wykonane z materiałów porowatych. W tym zakresie wykonane zostały podobne badania jedynie na modelach matematycznych na Politechnice Krakowskiej (Gwóźdź, Grodecki 2011)

Tabela 1 Średni skład ziarnowy odpadów flotacyjnych deponowanych w składowiskach przez zakłady wzbogacania rud poszczególnych kopalń LGOM (Żylińska-Dusza i in. 1996)

Klasa ziaren [mm]	Lublin	Polkowice	Rudna	Lena	Konrad
	Udział procentowy poszczególnych klas ziaren [%]				
>0,1	34,7	7,8	30,6	12,0	10,9
0,06-0,1	2,8	2,3	3,7	7,7	4,2
<0,06	62,5	89,9	65,7	80,3	84,3

2. Odpady poflotacyjne – powstawanie, składowanie

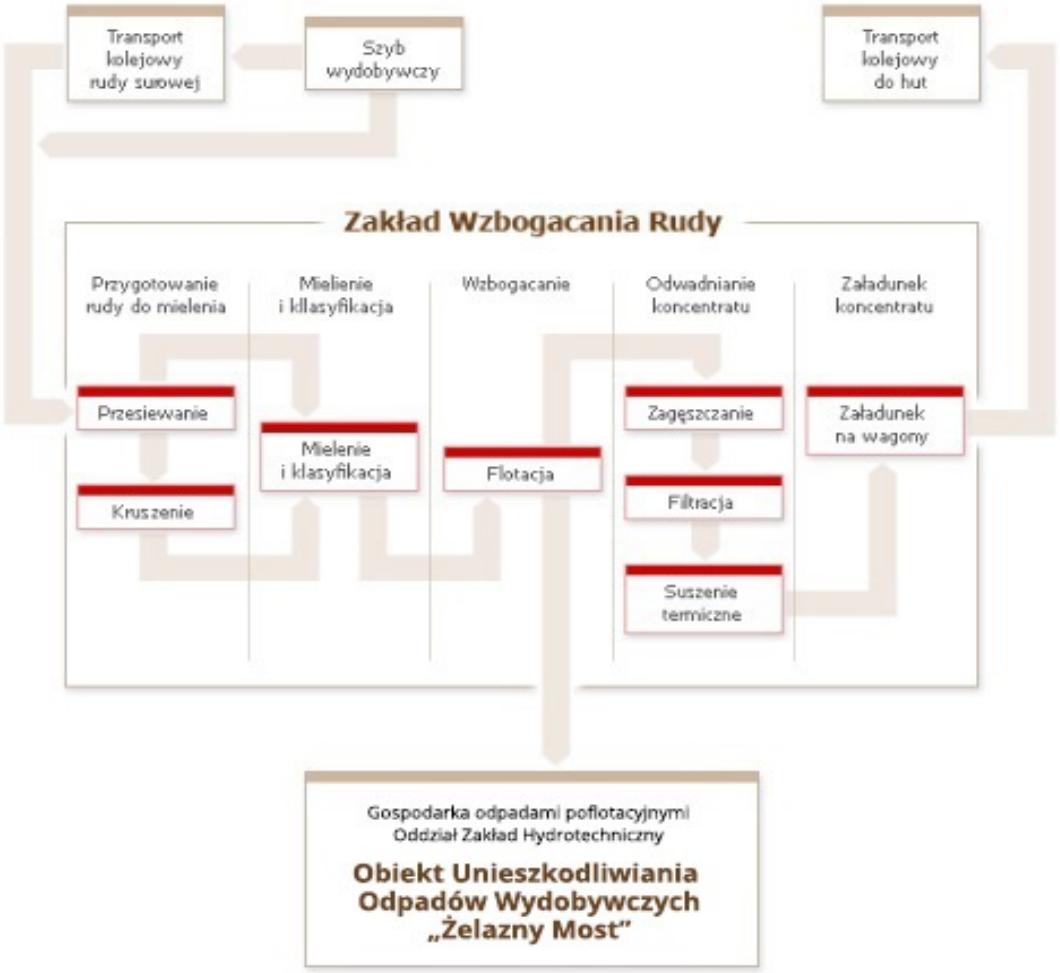
Definicja podana w ustawie o odpadach wydobywczych podaje, że są to odpady pochodzące z poszukiwania, rozpoznawania, wydobywania, przeróbki i magazynowania kopalin ze złóż (Ustawa o odpadach wydobywczych). Eksploatacja złóż miedzi wiąże się z dwoma głównymi rodzajami odpadów:

a) Skała płonna (kod z katalogu odpadów 01 01 80):
   - z prac związanych z drążeniem szybów,
   - z bieżącej eksploatacji górniczej,
   - zdeponowana w obiektach unieszkodliwiania (hałdach);
b) Odpady z procesu wzbogacania (flotacji) rud miedzi (kod 01 03 81):
   - zdeponowane na czynnym obiekcie unieszkodliwiania odpadów wydobywczych (OUOW) „Żelazny Most”,
   - zdeponowane w nieczynnych OUOW.

Proces wzbogacania rudy miedzi odbywa się w Oddziałach Wzbogacania Rud znajdujących się w rejonach Lubin, Polkowice, Rudna. Ilość kruszcu w rudzie nie przekracza 1,52% co powoduje, że w procesie flotacji jako odpad oddzielane jest około 94% wydobytej masy. Przy średnim rocznym wydobyciu 33 mln Mg powstaje do 32 Mg/rok odpadów wydobywczych wraz z poflotacyjnymi (kghm.com).

Wydobyty w szybach materiał surowy jest transportowany do Zakładu Wzbogacania Rudy, w którym następuje przygotowanie do procesu flotacji. Pierwszym etapem jest przesianie i rozkruszenie rudy, a następnie mielenie oraz klasyfikacja. Odpowiednio przygotowany materiał poddaje się procesowi flotacji, w wyniku, której powstają odpady

poflotacyjne oraz nawodniony koncentrat kruszcu. Koncentrat transportuje się do huty, gdzie podlega dalszej obróbce, a odpady składowane są na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych. Schemat przerobu urobku przedstawia rysunek 1.



Rys. 1 Schemat blokowy przerobu urobku miedzi (kghm.com)

W ciągu roku składowanych na OUOW jest 20-26 mln Mg odpadów poflotacyjnych. Z powody braku praktycznych możliwości ponownego ich wykorzystania magazynowane są na OUOW. Obecnie jedynym działającym obiektem jest OUOW „Żelazny most". Płynne odpady dzięki hydrotransportowi dostarczane są do zbiornika (rys. 2). Większość stanowi budulec do rozbudowy zbiornika, którego korona w najwyższym miejscu jest wyniesiona na 70 m od poziomu gruntu.

Rys. 2 Wylot przewodu transportowego (fot. S. Burkiewicz)

Odpady poflotacyjne są drobno zmieloną skałą płonną ze śladową zawartością minerałów kruszconośnych. Głównymi minerałami składowymi są dolomit, kwarc i kalcyt. Zawartość poszczególnych składników jest różna dla Zakładu Wzbogacania Rudy w Lubinie i Rudnej a ZWR w Polkowicach (tabela 2). Znaczne różnice występują też pod kątem składu chemicznego odpadów (tabela 3).

Tabela 2 Orientacyjny skład mineralny odpadów poflotacyjnych (red. Szafran, Kotarski 2002)

Minerał	Lokalizacja ZWR/Zawartość [%]	
	Lubin, Rudna	Polkowice
Dolomit	29,95	58,30
Kwarc	44,46	6,85
Kalcyt	7,70	7,82
Kaolinit	4,76	3,29
Gips	1,65	4,70
Biotyt	3,30	1,12
Skalenie	1,35	0,82
Substancje ilasto-węgliste	8,35	4,78
Minerały kruszcowe	1,10	1,32

Tabela 3 Skład chemiczny odpadów (red. Szafran, Kotarski 2002)]

Składnik	Jednostka	Zawartość/Rejon		
		ZWR Lubin	ZWR Polkowice	ZWR Rudna
SiO_2	%	68,20	19,63	55,46
CaO	%	6,96	25,60	11,29
MgO	%	3,97	3,60	5,32
Al_2O_3	%	4,63	5,29	4,13
K	%	1,07	1,49	1,25
Na	%	0,291	0,33	0,39
S_c	%	0,26	0,88	0,86
C_c	%	2,75	9,48	4,13
Fe	%	0,52	0,54	0,52
Cu	%	0,17	0,26	0,22
Pb	%	0,05	0,025	0,04
As	ppm	46	90	10
Ag	ppm	11	7	7
Hg	ppm	0,214	0,12	0
Cd	ppm	0,17	0	0

3. Kierunki badań nad odpadami stałymi

W celu znalezienia opłacalnego i bezpiecznego wykorzystania odpadów poflotacyjnych oraz innych odpadów pyłowych prowadzono badania nad ich właściwościami. Badania prowadzono między innymi w kierunku wykorzystania, jako:

- grunty budowlane (Pozzi, Mzyk 2012),
- mieszaniny rekultywacyjne (Pozzi, Mzyk 2012),
- budulec wałów przeciwpowodziowych (Pilecka, Morman 2016),
- uszczelnienie składowisk komunalnych (Koś, Zawisza 2016),
- wtórne odzyskanie kruszców (Kijewski, Downorowicz 1987; Łuszczkiewicz 2000),
- materiał w drogownictwie (Łuszczkiewicz 2000),
- wypełnienie pustki poeksploatacyjnej (Łuszczkiewicz 2000),

Niemal wszystkie wykonywane dotychczas badania przeprowadzono, jako modele matematyczne albo analityczne. Praktyczne badania były prowadzone pod kątem odkształcalności, pęcznienia, zmiany powierzchni (Ledno-Siwiecka, Niedźwiedzka 2012; Benzaanoua i in. 2004).

Przy dzisiejszych warunkach ekonomicznych, środowiskowych i technicznych ważnym aspektem jest właściwa gospodarka odpadami oraz ciągłe poszukiwanie sposobu na ich wykorzystanie.

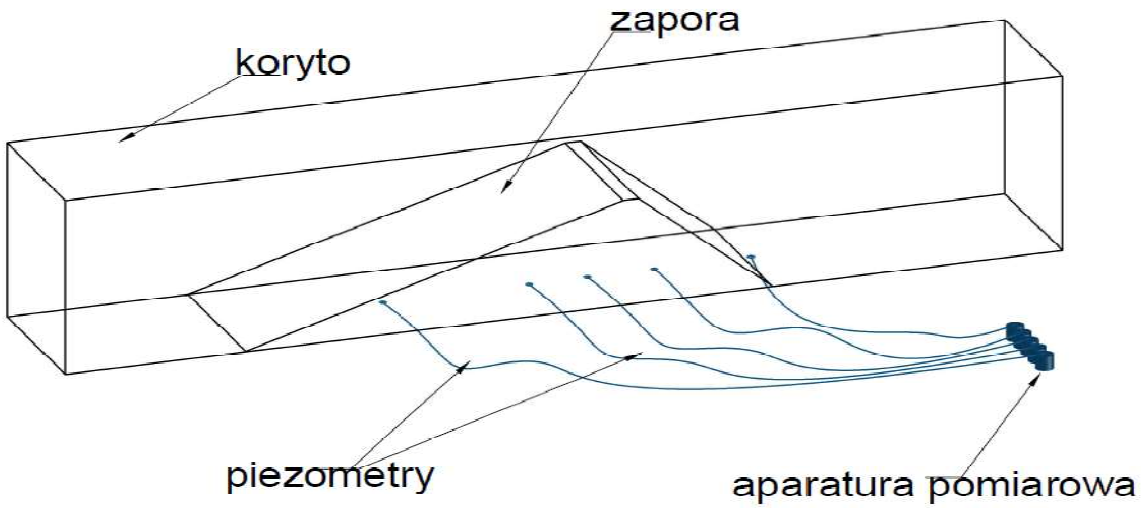
4. Cel pracy

Celem niniejszej pracy było określenie składu granulometrycznego odpadów poflotacyjnych znajdujących się w centralnej części OUOW „Żelazny Most", sprawdzenie skuteczności działania przesłony przeciwfiltracyjnej oraz pomiar zmiany wysokości wody w wykonanych modelach laboratoryjnych. Zagadnienie wydaje się ciekawe ze względu na właściwości fizyczne odpadów i praktyczne możliwości ich zastosowania.

5. Badania laboratoryjne

5.1. Stanowisko badawcze

Badania wykorzystania odpadów poflotacyjnych, jako przesłony przeciwfiltracyjnej wykonano w laboratorium na modelu fizycznym usytuowanym w korycie pomiarowym. W tym celu wykorzystano znajdujące się w laboratorium wodnym Uniwersytetu Przyrodniczego koryto o szerokości 1,10 m, długości 5,00 m i wysokości 1,20 m. Stanowisko, na którym przeprowadzono badania zostało wyposażone w ścianę transparentną co pozwoliło podczas wykonywania badań na obserwacje przebiegu krzywej filtracji w czasie. Koryto zostało wyposażone w 5 czujników, co umożliwiło pomiar rozkładu ciśnienia w modelu fizycznym. Szkielet konstrukcji wraz z rozmieszczeniem czujników prezentuje rysunek 3.



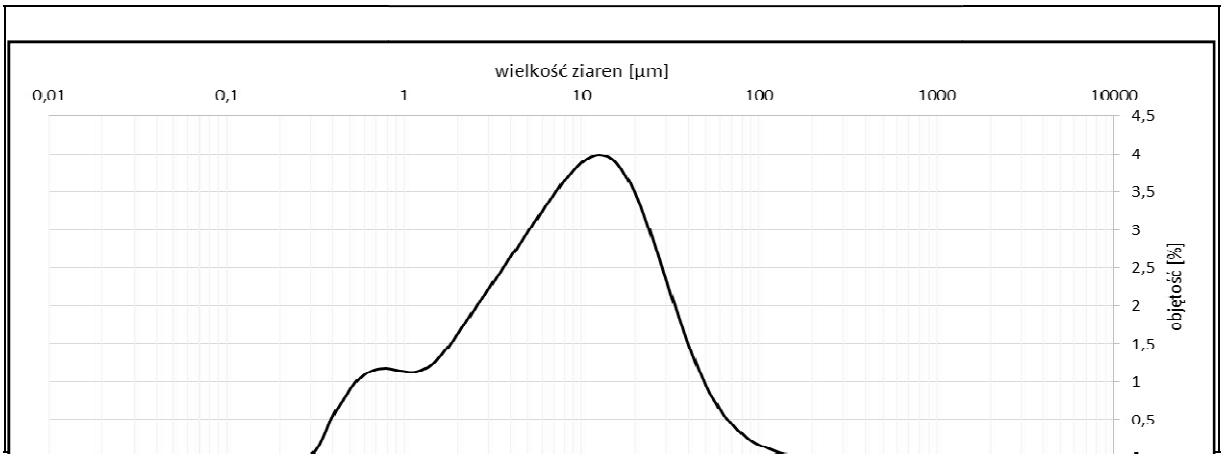
Rys. 3 Schemat stanowiska pomiarowego (opracowanie S. Burkiewicz)

5.2. Materiały tworzący przesłonę oraz zaporę

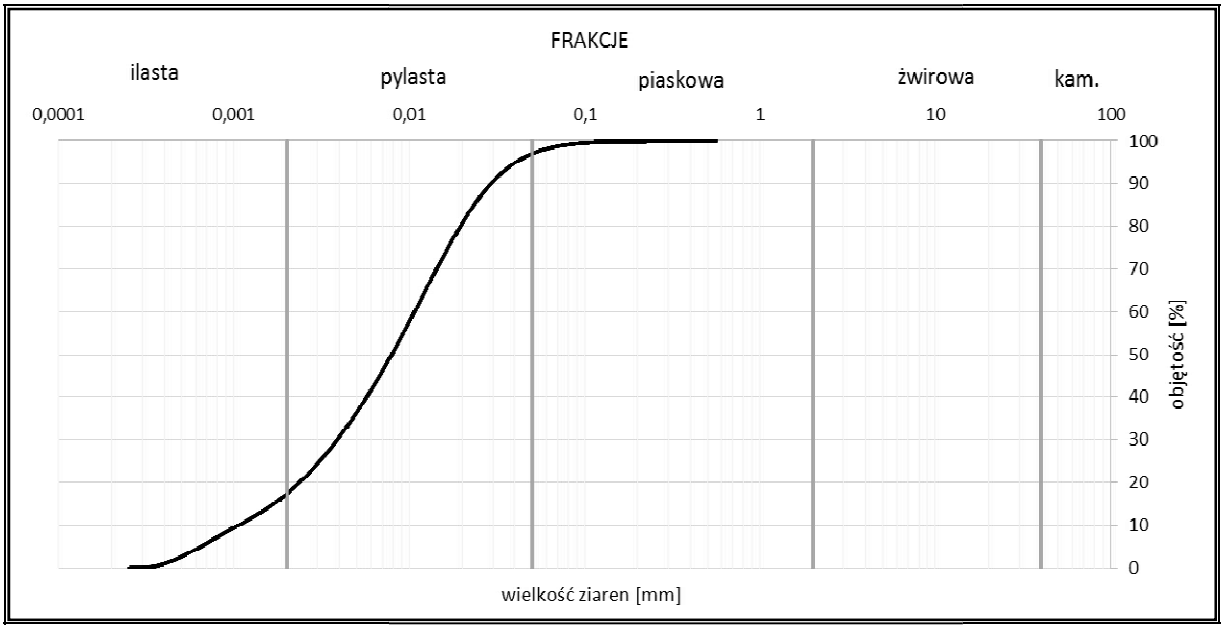
Materiałem wykorzystanym do badania przesłony przeciwfiltracyjnej są odpady poflotacyjne rudy miedzi pobrane jednostką refulującą z centralnej części zbiornika osadowego w 2016 roku. Materiał pobrano z gęstością około 1,32 $Mg \cdot m^{-3}$. Skład mineralogiczny odpadów składowanych w Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych "Żelazny Most" zaprezentowano w tabeli 1. Podstawowymi minerałami wchodzącymi w skład opadów są dolomit i kwarcyt. Odpady zgromadzone w centralnej części składowiska charakteryzuje niewielka średnica cząstek (tabela 2). Materiał pobrany można scharakteryzować, jako iły. Udział ziaren w objętości próbki prezentuje wykres 1.

Ustalenie wielkości cząstek budujących odpady poflotacyjne było możliwe dzięki wykorzystaniu laserowego analizatora cząstek Mastersizer 2000. Pomiar przeprowadzony metodą dyspersji na roztworze wodnym próbki odpadów. Technologia bezsoczewkowego obrazowania dynamicznego pozwala uzyskać wyniki z dokładnością do 0,01 µm. Wyniki wykorzystania do sporządzenia wykresów 1 i 2.

Model fizyczny zapory, na którym przeprowadzono badania została wykonana z piasków drobnych. Tworzona była zagęszczanymi warstwami po około 10 cm.



Wykres 1 Uziarnienie odpadów poflotacyjnych użytych w doświadczeniu



Wykres 2 Krzywa uziarnienia odpadów

5.3. Technologia wykonania przesłony

Badania obejmowały wykonanie przesłony z uzyskanych odpadów. Pierwszą próbę wykonano w postaci namywu skarpy odpadami o gęstości 1,62 ($Mg \cdot m^{-3}$)do grubości 2 cm. (rys. 4). W wyniku nierównomiernego wzrostu gęstości do około 1,85 ($Mg \cdot m^{-3}$) i kurczeniu odpadów po trzech dniach warstwa odpadów zsunęła się ze skarpy.

Użycie odpadów o stosunkowo niskiej gęstości okazało się trudne do wykonania, dlatego zdecydowane się na próbę drugą z wykorzystaniem odpadów w postaci „kafli" (rys. 5). Ich gęstość w momencie nakładania wynosiła 2,10 ($Mg \cdot m^{-3}$). Zastosowanie kafli wyeliminowało skurcz i zmianę kształtu przesłony. Szczeliny między kaflami oraz kaflami a korytem zabezpieczono „fugą" wykonaną z odpadów o gęstości około 1,80 ($Mg \cdot m^{-3}$).

Rys.4 Namyw na skarpie odwodnej (foto P. Krzyszkowski)

Rys.5 Widok na zaporę z wbudowaną przesłoną (foto S. Burkiewicz)

5.4. Badania

W wyżej wymienionym korycie laboratoryjnym wykonano fizyczne modele o wymiarach 1,10 m szerokości, 0,90 m wysokości, 3,25 m szerokości podstawy, 0,10 m szerokości korony oraz nachyleniu skarp odpowietrznej 1:1 i odwodnej 1:2,5. Wykonano dwa modele: referencyjny bez przesłony i badawczy z przesłoną.

Badanie polegało na poddaniu modeli na działanie parcia wody i pomiarze przebiegu krzywej filtracji i przepływu. Parametry rejestrowano w formie wizualnej i cyfrowej (rys. 6).

Rys. 6 Aparat do pomiaru ciśnienia hydrostatycznego (foto P. Krzyszkowski).

5.5. Wyniki badań

Badany model fizyczny bez przesłony przeciwfiltracyjnej uległ zniszczeniu przez upłynnienie stopy skarpy odpowietrznej po 40 minutach. Model zapory z przesłoną pozostaje stabilny od 10 miesięcy obserwacji. Zarejestrowane pomiary przepływu wyraźnie przedstawiają różnicę między krzywymi filtracji w obu modelach (wykresy 1-35 minut dla modeli A i B).

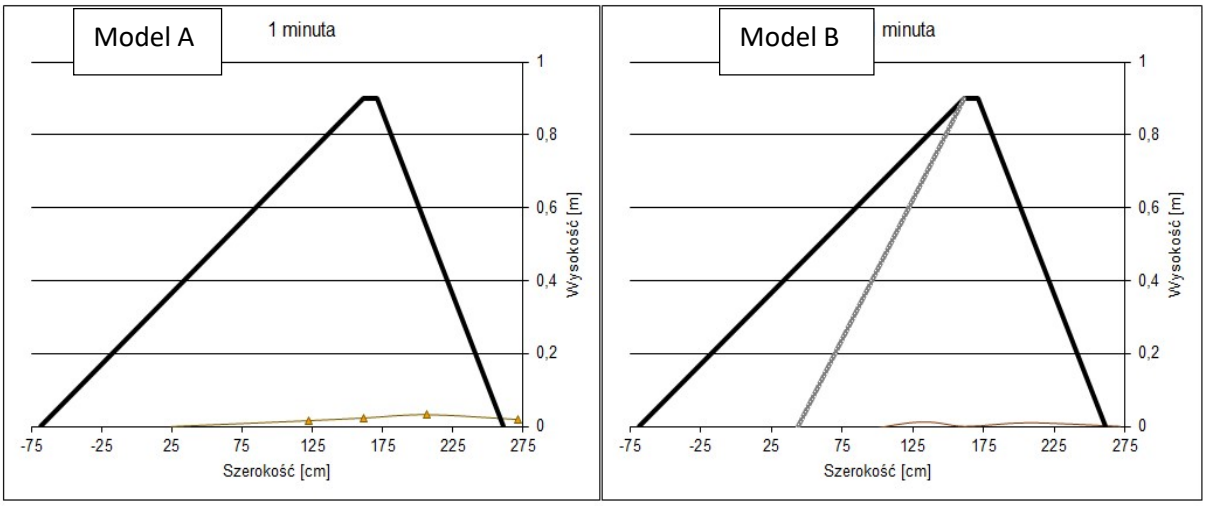
Rys. 7 Krzywa filtracji w 7 minucie pomiaru (foto A. Kulik)

W trakcie napełniania stanowiska odwodnego warunki filtracji przez korpus modelu mają charakter nieustalony, ponieważ układ krzywej filtracji zależy od czasu trwania eksperymentu (rys. 7). W początkowej fazie doświadczenia układ krzywej filtracji obserwowany przez szybę przypominał półksiężyc przesuwający się w kierunku skarpy odpowietrznej. Kształt krzywej zarejestrowany w tym czasie przez aparaturę przypominał

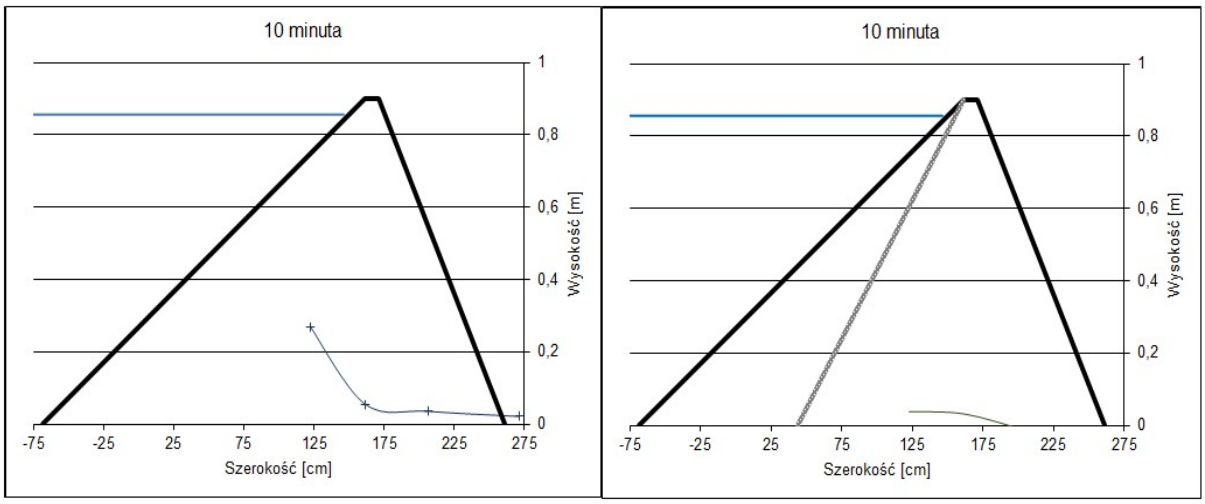
przebiegiem spłaszczoną sinusoidę równomiernie unoszącą się wraz z czasem trwania eksperymentu.

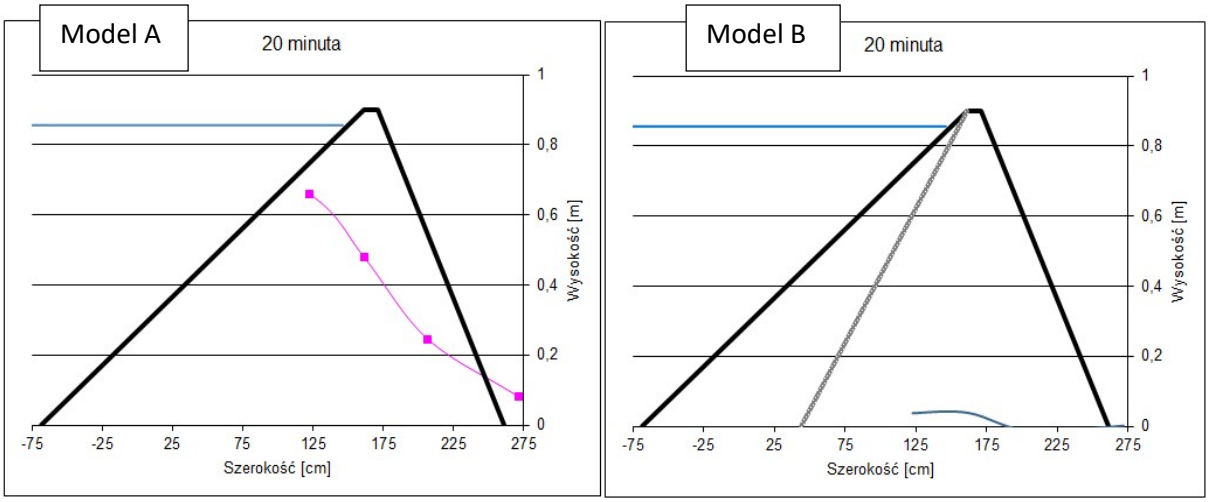
Poniższe wykresy przedstawiają porównanie odczytów z aparatury pomiarowej wykonanych dla modelu bez przesłony (Model A) i modelu z przesłoną (Model B). Zaprezentowano odczyty dla kolejnych czasów prowadzenia badania: 1 minuta, 10 minut, 20 minut, 35 minut.

Zwierciadło wody oznaczono niebieską linią na wysokości 0,85 m. W przypadku modelu B przesłona przeciwfiltracyjna prezentowana jest przez szarą linię.

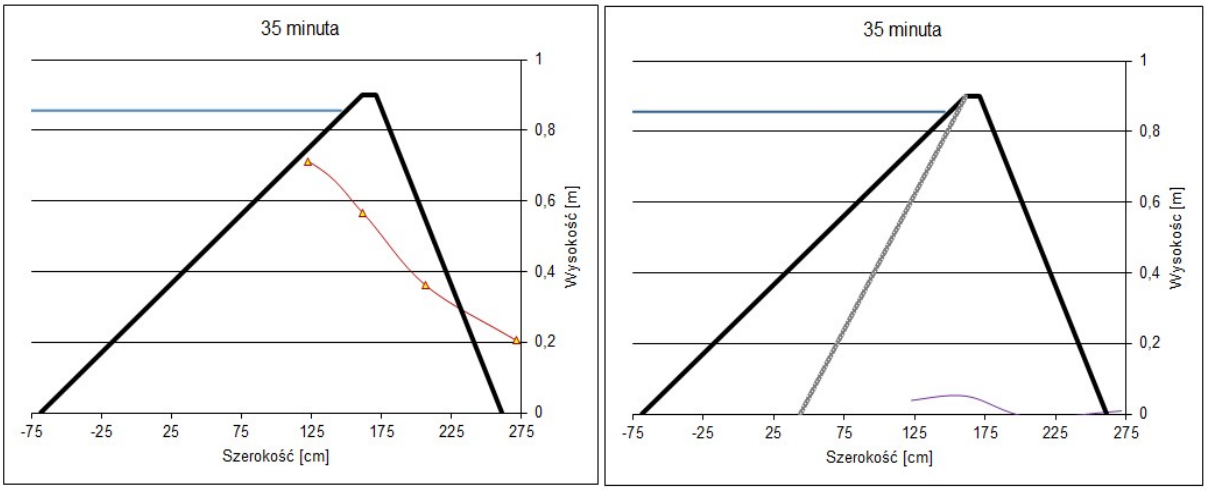


W pierwszej minucie kalibrowano aparaturę. Od momentu ustabilizowania zwierciadła wody odczyt z pierwszego piezometru nie jest brany pod uwagę, ponieważ pokazuje poziom wody od strony skarpy odwodnej.





W 10, 20 i 35 minucie badania widać podnoszenie poziomu wody wewnątrz korpusu zapory w przypadku modelu bez przesłony. Model z przesłoną w 10 minucie jest ustabilizowany.



W 35 minucie widać wyraźne wystąpienie wody poniżej stopy odpowietrznej modelu A. Kilka minut później doszło do uszkodzenia zapory. Model z przesłoną pozostaje stabilny.

6. Wnioski

Wykazano możliwość wykorzystania drobnych odpadów po flotacji rud miedzi, jako przesłonę przeciwfiltracyjną wbudowaną w korpus zapory zbudowanej z materiału porowatego. Wykorzystanie przesłony w skali laboratoryjnej powoduje ustabilizowanie współczynnika stateczności do wartości powyżej jedności. Modele korpusu zapory bez uszczelnienia ulegały uszkodzeniu po okresie około 40 minut. Przygotowane w ramach prezentowanego projektu stanowisko badawcze okazało się przydatnym instrumentem do badania położenia krzywej filtracji w przypadku filtracji nieustalonej (zależnej od czasu).

Uzyskanie jednorodnej szczelnej przesłony przeciwfiltracyjnej z odpadów poflotacyjnych jest trudne nawet w warunkach laboratoryjnych. Przemysłowe zastosowanie omawianej substancji wymaga dopracowania technologii.

Prezentowane badania są jednym z pomysłów wykorzystania odpadów po flotacji, jako materiału przemysłowego. Do tej pory nie podejmowano podobnych kierunków badań.

Sprawdzone w ramach projektu stanowisko może stanowić instalację badawczą nad wykorzystaniem innych odpadów, jako element korpusu zapory ziemnej. W trakcie badań zaobserwowano znaczącą różnicę w przebiegu krzywej filtracji obserwowaną przez za pomocą piezometrów a widzianą przez szybę w korycie pomiarowym. Różnica jest w szczególności znacząca w początkowym okresie przepływu wody prze materiał porowaty tworzący korpus.

7. Literatura

Gwóźdź R., Grodecki M., 2011. Analiza możliwości zastosowania osadów spoistych zbiornika rożnowskiego do uszczelnienia wałów przeciwpowodziowych**,** *Środowisko.*

Kijewski P., Downorowicz S., 1987. Odpady poflotacyjne rudy miedzie jako potencjalna rezerwa surowcowa, *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, nr 19.

Koś K., Zawisza E., 2016. Laboratory tests of bentonite stabilization of bottom sediments from a dam reservoir in relation to their usage in municipal solid waste landfill liners, *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, nr 15 (3).

Lendo-Siwicka M., Niedźwiedzka K., „Wpływ pęcznienia na parametry odkształceniowe iłów jako materiału budowlanego", Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, nr 58, 2012

Łuszczkiewicz A., 2000. Koncepcje wykorzystania odpadów flotacyjnych z przeróbki rud miedzi w regionie legnicko-głogowskim, *Inżynieria Mineralna* — styczeń–czerwiec.

Pilecka E., Morman J., 2016. Stateczność wałów przeciwpowodziowych z wbudowaną warstwą odpadów powęglowych w świetle obliczeń numerycznych, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, nr 94.

Pozzi M., Mzyk T., 2012. Ocena możliwości zastosowania mieszanek popiołowo-gruntowych do rekultywacji wyrobiska kwb w bełchatowie, Instytut Geologii Stosowanej, Politechnika Śląska, Gliwice.

Szafran A., Kotarski I., 2002. Katalog odpady w przemyśle metali niezależnych, CBPM „Cuprum" sp. z o.o., Wrocław.

http://kghm.com/pl/biznes/procesy/wzbogacanie-rud (dnia 01.05.2018 r.)

Influence of scanning strategy on geometrical accuracy and mechanical properties of electron beam-melted Ti6Al4V scaffolds

Viktoria Hoppe[(1)], Patrycja Szymczyk[(2)], Marcin Madeja[(2)]

[1] Koło Naukowe BioAddMed, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
[2] Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji, Centre for Advanced Manufacturing Technologies (CAMT/FPC), Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Patrycja Szymczyk: patrycja.e.szymczyk@pwr.edu.pl

Summary
Electron Beam Melting (EBM) is a powder bed fusion additive manufacturing method that utilises an electron beam. It is commonly used to produce metallic scaffolds. Fabrication of porous custom-made titanium implants with controlled porosity that correspond with anatomic conditions and functions is one of the most relevant issues in medicine nowadays. During the EBM process, the electron beam, depending on the scanning strategy (theme), produces subsequent layers in a specific way. Three types of scan strategies were investigated: Melt, Net and Point-net. The aim of this research is investigating usefulness of EBM technology in manufacturing Ti6Al4V rods and scaffolds with the maximum accuracy and without reduction of their mechanical properties.

Keywords: additive manufacturing, titanium scaffolds, EBM, static compression test, geometrical accuracy

Wpływ strategii skanowania na dokładność geometryczną oraz wybrane właściwości mechaniczne rusztowań ze stopu Ti6Al4V wytwarzanych metodą EBM

Streszczenie
ElectronBeamMelting (EBM) jest technologią wytwarzania przyrostowego, wykorzystującą energię wiązki elektronowej do topienia proszku znajdującego się na platformie. Technologia ta jest wykorzystywana do wytwarzania rusztowań (tzw. skafoldów), które dzięki swojej odpowiednio dostosowanej porowatej strukturze znalazły zastosowanie w inżynierii tkankowej. Uzyskanie elementu o indywidualnych parametrach, które doskonale odzwierciedlają warunki anatomiczne występujące w miejscu implantacji, jest niezwykle ważnym aspektem biomedycznym. Podczas procesu EBM wiązka elektronów w zależności od strategii skanowania w określony sposób przetapia kolejne warstwy. Badaniom poddano próbki wytworzone w wyniku trzech różnych rodzajów skanowania: Melt, Net, oraz Point-Net. Celem tego badania było określenie zdolności technologii EBM do wytwarzania rusztowań ze stopu Ti6Al4V z jak największą dokładnością geometryczną, przy zachowaniu wymaganychdla wyrobu gotowego właściwości mechanicznych.

Słowa kluczowe: technologie przyrostowe, rusztowania tytanowe, EBM, statyczna próba ściskania, dokładność geometryczna

1. Introduction

Electron beam melting (EBM) is an example of additive manufacturing (AM) technology which uses selective melting of metallic powders such as titanium, inconel, stainless steel etc. to produce various spatial structures. The technology was invented in 1993 in Sweden at the University of Technology in Göteborg. The Arcam company, which continued the development, was founded in 1997 and sold its first commercial system in 2002(Yang et al, 2017).

The EBM manufacturing consists ofprocesses such as: focusing electron beam in separate areas composed of metal particles, melting and subsequent solidification, which allows the creation of specific geometry. Each of additive process has its own unique characteristics, but

there are common problems that occur in most AM systems. Though the creation of spatial structures is possible thanks to AM processes, they also introduce changes in shape, e.g. geometrical fluctuations and errors of manufactured products compared to their designed shapes and sizes. Some geometrical features, such as resolution, surface quality and geometric accuracy,derive from process parameters (Rebaioli and Fassi, 2017).

Lack of information regarding the choice of construction parameters precludes any quantitative comparison of the different results and any conclusions regarding the impact of these parameters on the material properties. These process parameters include geometry and construction orientation of the parts, powder chemistry, use of supports and all device settings included in the "build theme". Theme includes a large set of process parameters that are to be optimized by the machine manufacturer, i.e. Arcam Abs (Formanoir et al, 2016).

The standard themes from ARCAM are called "Melt", "Net", "Point-net" and "Wafer". The „Melt" theme is used the most since it is applicable for melting any geometry. The "Net" theme is optimized for thin structures (less than 1 mm diameter struts) as it follows only contour paths. The "Point-net" theme gives process parameters for the fabrication of parts from wireframe geometries.Finally, the "Wafer" theme is made to fuse supports (Mathieu Suard, 2015).

Medical grade titanium alloys (Ti6Al4V) are widely used as implant materials due to their high strength to weight ratio, corrosion resistance biocompatibility andproperties allowing osseointegration. The elastic modulus of titanium alloy is about 114 GPa while that of bone's ranges from 0.5 GPa to a maximum of 20 GPa (Parthasarathy et al, 2010). A reduction of stresses transferred to the adjoining bone due to the high modulus of the titanium causes bone resorption, leading to aseptic loosening of the implant. The introduction of electron beam melting (EBM) for the processing of titanium has led to fabrication of porous custom titanium implants with controlled porosity that fit the anatomy and simulate functions at the region of implantation. Additive manufacturing technology madeit possible to plan implants and fabricate them with design strategy and manufacturing process that would lead to mechanical properties equivalent to the part they replace

2. Material and Methods

The purpose of this article is to examine the influence of the EBM process on the geometrical properties of the Ti6Al4V scaffold structures.To verify the accuracy and the limits of the EBM process, different samples have been produces andthree different build themes preset by Arcam ABs called Melt, Net and Point-net to manufacture scaffolds were used. Samples were built in two directions: horizontal (xy) and vertical (xz).

Standard theme used for manufacturing bulk parts is called „Melt” theme. The melting strategy consists of initially melting contours, followed, if possible, by a second one. Moreover, if the CAD model is large, the surface is scanned by beam line by line in the hatching step.

For very thins struts it is recommended to use „Net” theme. Strategy for manufacturing vertical struts with very low diameter (e.g. 1mm) can be achieved by scanning first path with special process and parameters and second one with other parameters. First contour offset is the distance between CAD margin and first contour and it is specified as 0,3 mm. The second contour offset is specified as 0,1mm.

“Point-Net” is optimized theme where three inner contours occur with the same process parameters to fully melt the area of the rod. This theme is also called Net with CO^{OPT} (the optimal first contour offset) and itis supposed to melt larger volumes of powder.

The goal of this paper is to study the effects of the EBM process on geometrical and mechanical properties of fabricated lattice structures. Two research questions were investigated: which theme gives better mechanical properties and how to achieve the highest geometrical accuracy using different scanning strategies to make scaffolds with different diameter of rods? Compression test were conducted to evaluate the mechanical properties on scaffolds with diameter of rods: 0,1 mm, 0,3 mm and 0,5 mm.Machine that was used was Instron 3384 material testing system with a 15-kN load-cell. Compressive strength was determined as the maximum stress prior to failure. The crosshead speed was set at 1 mm/min. Geometrical accuracy was defined using diameter measurements of manufactured scaffolds. Geometry of 10x10x10 (W x D x H) mm scaffolds is represent by a figure below (Fig. 1).

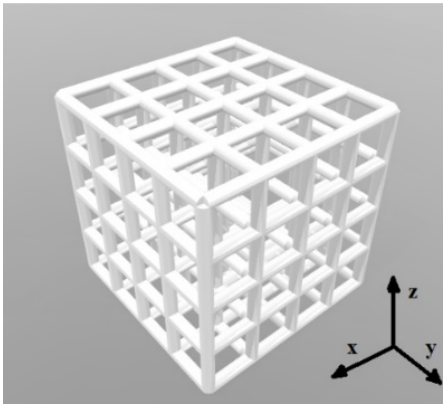


Fig. 1 CAD geometry of a scaffold

Values of compression stress and Young's modulus were calculated for each sample (n = 5). The elastic modulus of scaffolds was determined from the linear region of the stress–strain curve.

3. Results

- Geometricalaccuracy

To identify geometrical accuracy scaffolds were measured in two manufacturing dimensions – horizontal (xy) and vertical (xz) for scaffolds made with „Melt” **(** Fig. 2**,** Fig. 3), „Net” (Fig. 4**,** Fig. 5**)** and „Point-net” **(**Fig. 6**,** Fig. 7)theme.Sample rods of scaffolds manufactured with different scan strategies are presented below.

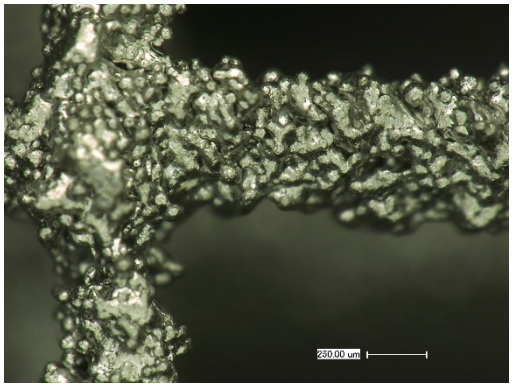


Fig. 2Scaffold - Melt theme–300µm – xz direction

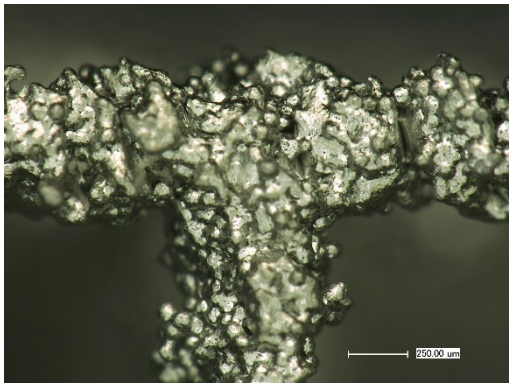


Fig. 3Scaffold - Melt theme– 500 µm – xz direction

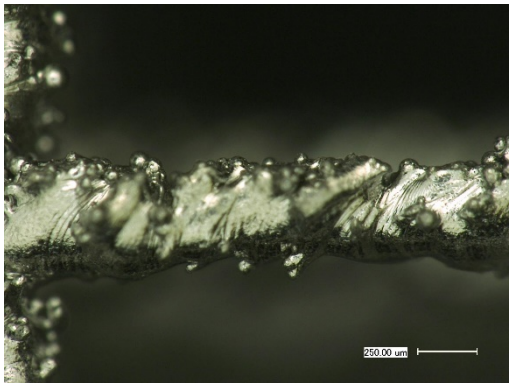


Fig. 4Scaffold - Net theme– 300µm – xy direction

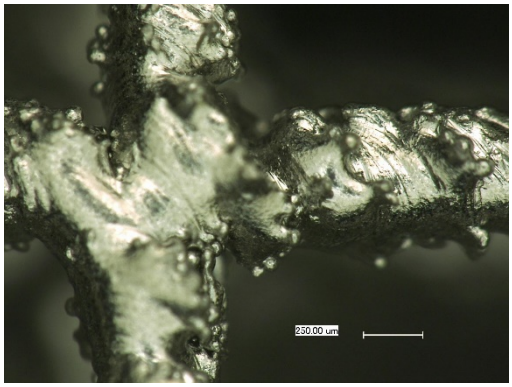


Fig. 5Scaffold - Net theme– 500 µm – xy direction

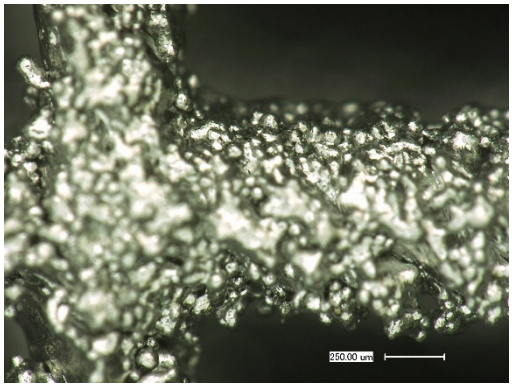


Fig. 6 Scaffold - Point-Net theme-300 µm – xz direction

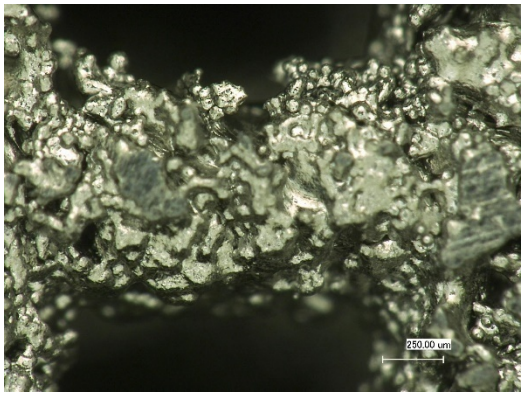


Fig. 7 Scaffold - Point-Net theme –500 µm – xz direction

Analysis of the results obtained from the measurements of scaffolds made with the "Melt” theme showed that the most accurate geometry mapping was obtained for the scaffolds with

the diameters 1000 µm and 900µm, where the resulting contour did not exceed the contour determined by CAD model. Faithful geometry reproduction was also obtained for scaffolds with rod diameter 800µm and 700µm, however, it was observed that the resulting contour slightly exceeded the contour given by the CAD model. In case of scaffolds with a thickness of rods from 600 µm to 100µm, the geometrical accuracy drastically fallen. For ones with rods indiameter 500 µm, this difference is almost 200µm. The diameter remains constant, however the theoretical bar diameter, obtained as a result of this scanning strategy, is decreasing and the trend of differences between the diameters in increasing. In case of a 100µm scaffolds` diameter, the difference between the theoretical value given by the CAD model and the result obtained is almost 500 µm, which is five times the theoretical diameter. For geometries with higher diameters (from 400µm to 1000µm), a tendency of higher diameter values for bars formed in the xy direction is noticeable. In case of scaffolds with lower values of rods' diameters, a larger has been formed in xz direction. All measurements are presented in the chart below (Fig. 8).

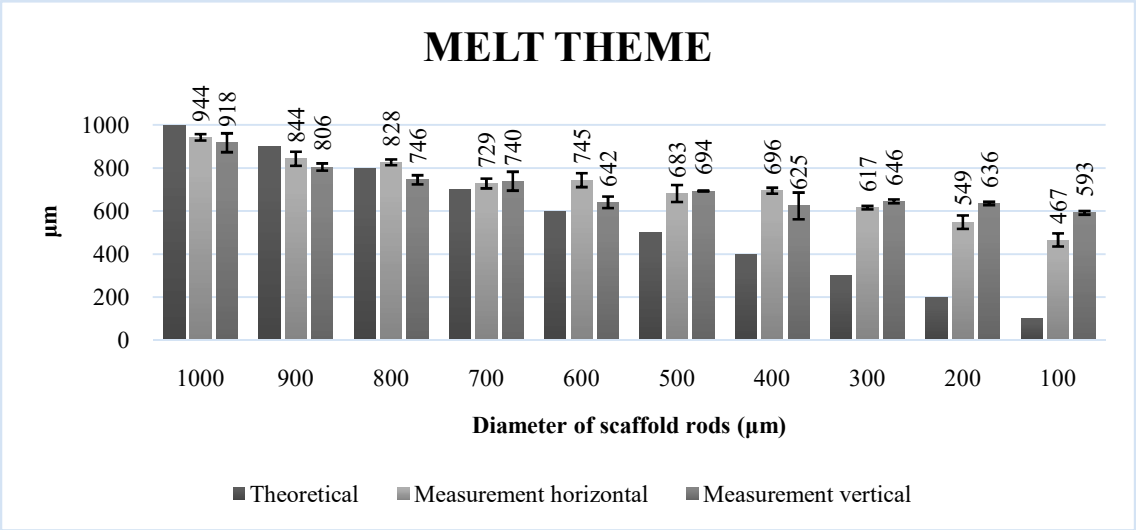


Fig. 8 Comparative analysis of the diameters of the scaffolds on the example of the „Melt" theme

The „Net" theme allowed to obtain geometrical structures with a corresponding CAD model accuracy only for scaffolds in the 700-500 µm diameter range (Fig. 9). In case of higher values, i.e. 1000 µm, 900 µm and 800 µm, the resulting contour was too small in relation to the contour given by the CAD model (about 200 µm). For lower values of scaffolds' diameter, i.e. 400 µm, 300 µm, 200 µm and 100 µm, the resulting contour was too large in relation to up to the contour given by CAD model by 40% for scaffolds with rod diameters of 400 µm, 50% for scaffolds with a diameter of 300 µm, 100% for scaffolds with diameters of 200 µm and 400% for ones with a diameter of 100 µm. For this theme, higher values of rod diameters are created for xy scanning direction only of 1000 µm, 900 µm and 800 µm.

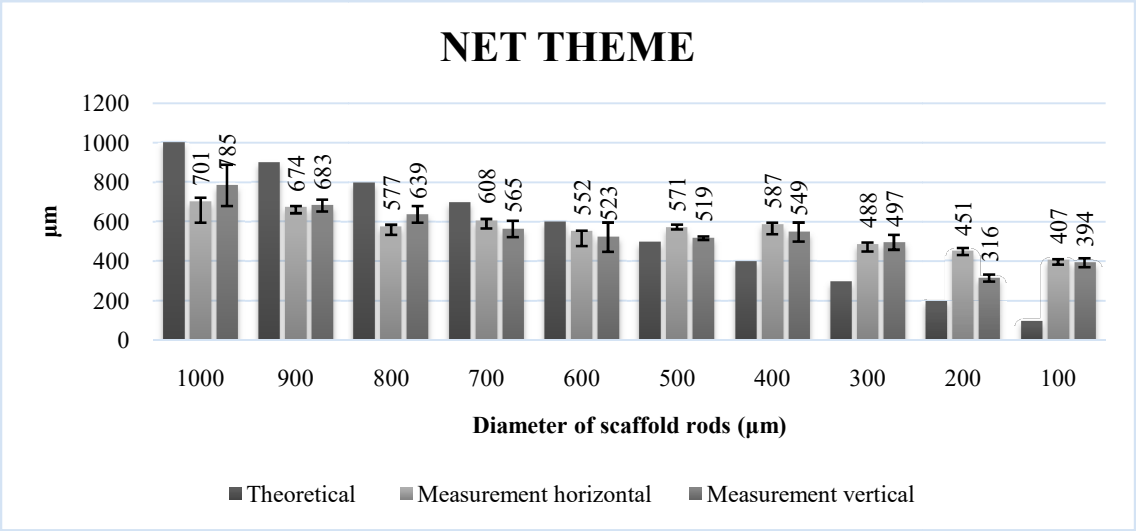


Fig. 9 Comparative analysis of the diameters of the scaffolds on the example of the „Net" theme

Scaffolds created as a result of the Point-Net theme are characterized by very low geometric accuracy (Fig. 10). None of the created scaffolds had diameters of rods reflecting its real geometry - the geometry resulting from the scanning strategy exceeded the geometry given by CAD model by about 50% for scaffolds with rod thicknesses from 1000 µm to 700 µm. In case of scaffolds with rod thicknesses from 600 µm to 100 µm, this difference begins to grow, and for 500 µm scaffolds it is double the geometry given by CAD model, and for 100 it is almost seven times. A tendency for higher values of rod diameter measurements was also observed for the xy direction for the majority of samples tested.

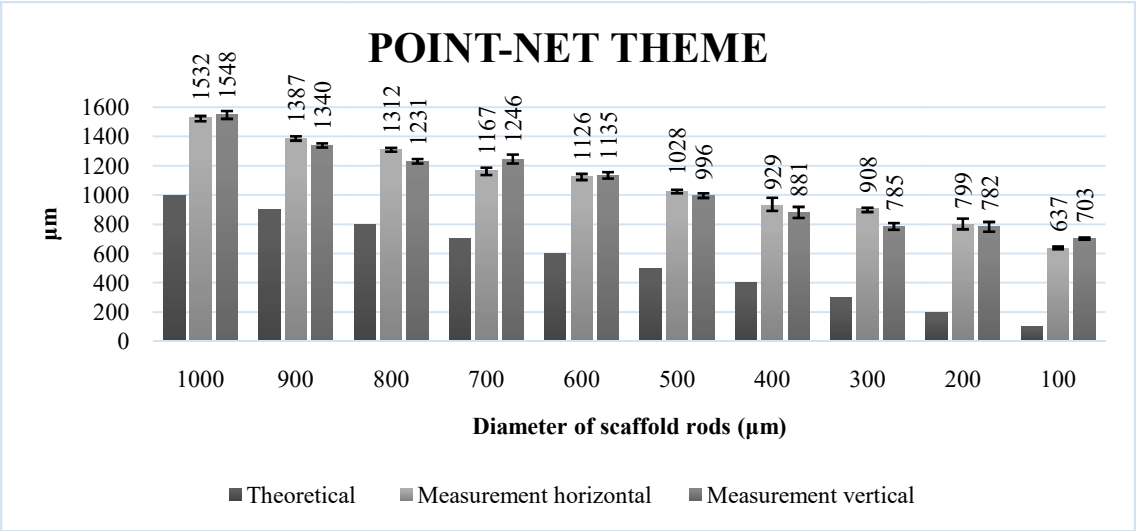


Fig. 10 Comparative analysis of the diameters of the scaffolds on the example of the „Point-Net" theme

- Compressiontests

The static compression test showed that the highest compressive strength among the tested scaffolds occurs in ones made with Point-Net theme and it ranges from 25 to 110 MPa. This is a direct reflection from the highest diameter of the rods from which these scaffolds

originated. The lowest theoretical value of the diameter is in the scaffold manufactured with Point-Net theme– 100 μm is in fact almost 700 μm, which corresponds to the scaffolds 1000 μm made with Net theme and 700 μm made with Melt theme. The scaffold with the lowest durability are the ones made using Net theme. Their compressive strength is estimated from 5 to 13 MPa depending on the diameter of the rod. In case of compressive strength of scaffolds made with Melt theme for those with a rod diameter of 100 μm, it is 10 MPa, for 300 μmit is 8 MPa, while for scaffolds with 500 μm rods diameter it is 26 MPa. To compare compressive strengths for physical dimensions, it was decided to combine the results of 300μm Melt and 500 μmNet with 100μmMelt and 300μm Net. In case of 300μmMelt and 500μmNet, it was observed that the scaffolds made using Net theme have higher durability - it is 50% higher than Melt themebeing 13 MPa. Analyzing 100μmMelt and 300μmNet scaffolds, it was found that the ones produced with Melt theme havecompressive strength of 10Mpa, which is 50% higher compared to the Net theme. The actual size of the rods produced therein and the geometrical accuracy have the greatest influence on the compressive strength of the researched structures. Results of compressive test are shown in the chart below (Fig. 11).

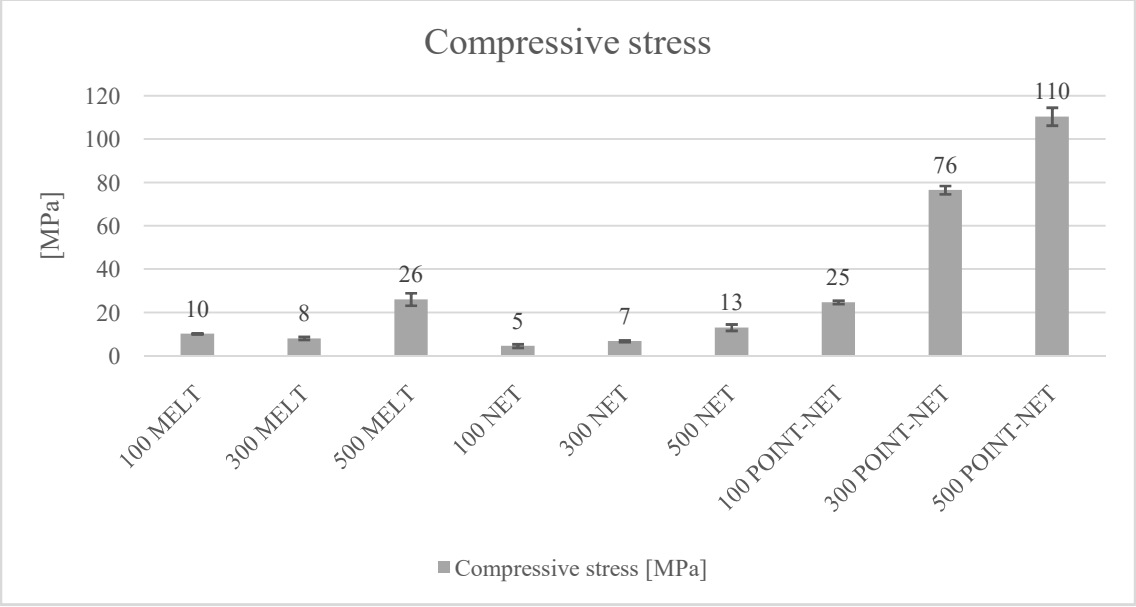


Fig. 11 Comparision of compressive stress of scaffolds manufactured with different geometry and scan strategies

All researched scaffolds had a small area of yielding, followed by a sudden decrease due to the failure of the vertical rods within the scaffold for Melt and Net theme at the strain of about 4% (Fig. 12). A different situation occurs when the samples with the 300 and 500 μm diameters produced using the Point-Net theme is compressed. In the stress-strain diagram, the deformation was clearly visible in the plastic domain, followed by decohesion of the sample.

This was directly related to the increased diameter of the scaffold rods and its' immediate strength.

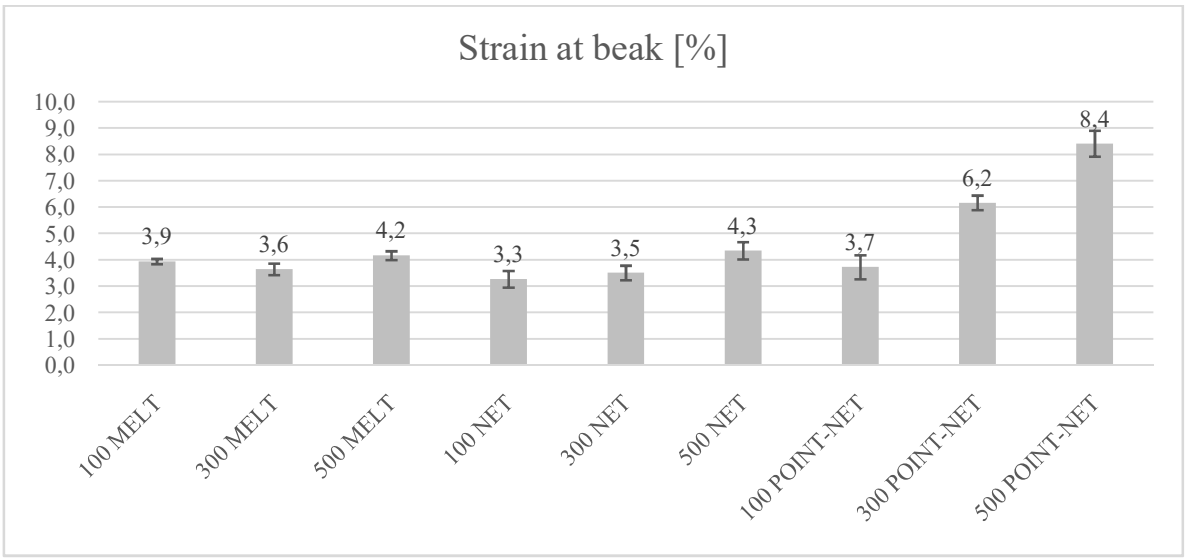


Fig. 12 Comparision of Strain at break of scaffolds manufactured with different geometry and scan strategies

The influence of the dimension, geometry accuracy, and the type of theme used during the manufacturing of scaffolds on the Young`s modulus was noted. It is one of the most important parameters in mechanical scaffolds studies. The lowest Young's modulus was observed for Melt and Net theme for theoretical diameters of rods 100 µm and 300 µm and it is about 0.3 GPa. Slightly larger values, around 1 GPa, are noticeable for the diameter of 500µm only in Melt theme. For geometries created using Point-Net, Young's modulus reaches a value of 1.1 to 2.7 GPa (Fig. 13).

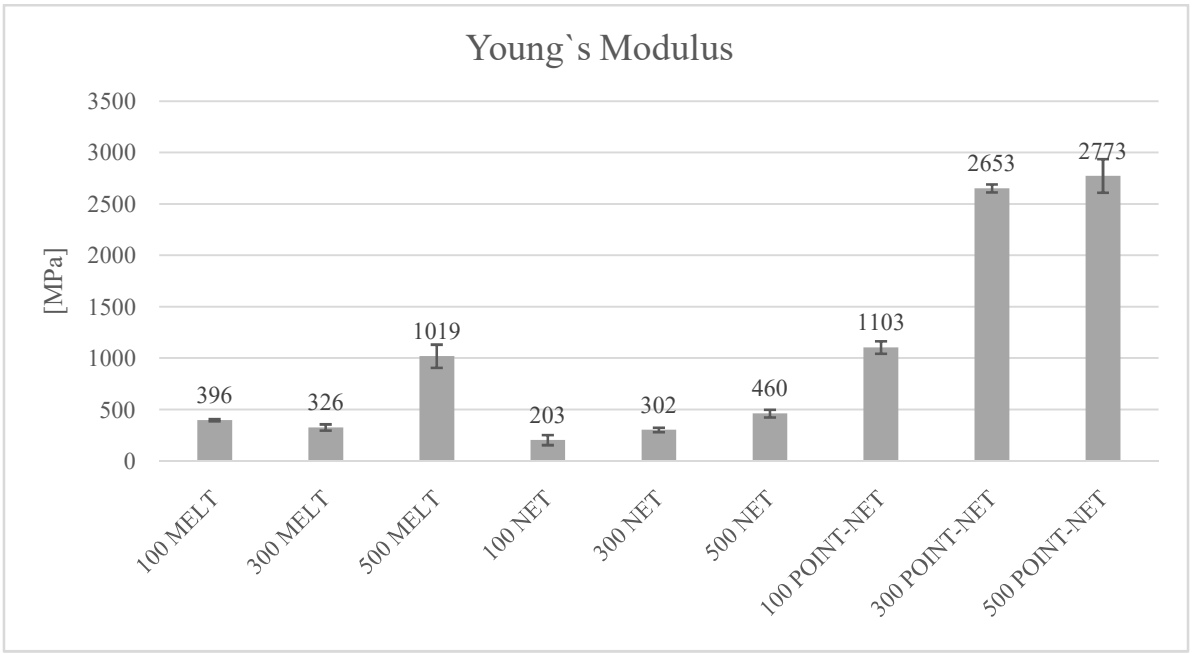


Fig. 13 Comparision of Young`s modulus of scaffolds manufactured with different geometry and scan strategies

4. Discussion

Young`s modulus of base Ti6Al4V material is E=110 GPa. Scientists researched that modulus of scaffolds varies in huge range depending on the geometry and porosity. The elastic modulus of porous Ti6Al4V alloy samples produced via EBM could be decreased accordingly, to match that of natural bone. The elastic modulus of human bone may diverge in tests using different detection methods (Li et al, 2016). Human cancellous bone has an elastic modulus of less than 3GPa, and cortical bone has an elastic modulus of less than 20 GPa (Liebschner, 2004).

Due to the specific geometry, all values are substitute – both compression stress and Young`s Modulus. To compare the values obtained during the study conducted in this work, it was decided to compare scaffolds with rods **t**hicknesses of 450 and 800 μm - the substitute compressive stiffnesses for scaffoldswere 0.6 and 2.9 GPa. Types of scaffolds with cubic-shaped porosities exhibit an elastic response with a small region of yielding, followed by a sudden decrease at approximately 6% strain due to the failure of vertical rods within a single layer (Wieding et al. 2012).

In this study, for scaffolds with its rods thickness of 100, 300 and 500 μm lower values of both strain at break and substitute Young`s Modulus were observed. With usage of Melt and Net themes, strain at break values were approximately at 4%. For Point-Net theme the strain at break ranges from 3.7 to 8.4% with and increasing rods' diameter. Ranges of Young's Modulus were obtained for different scanning strategies during compression tests of scaffolds: 0.3 – 1.1 GPa for Melt theme, 0.2 – 0.5GPa for Net theme, 1.1 – 2.8GPa for Point-Net theme. In order to compare the actual values with reference to the results obtained for 450 μm (Wieding et al, 2012), 100 μm Melt and 300 μm Net should be compared with each other. In case of Point-Net, dimensional accuracy was not ensured, providing a real value of around 450 μm. The lowest value of scaffold diameter is 600 μm for the specified geometry of 100 μm.

5. Conclusions

Testing of geometric parameters includes artifacts such as checking and comparing geometrical or dimensional performance like accuracy and repeatability. None of the specified scan strategies reflected the full geometry of CAD. The Net theme was created to produce thin structures due to the fact that it only creates a CAD model contour without hatching, differently than in case of Melt or Point-Net with a double contour. Results showed that the Net theme does not reflect the given geometrical parameters for scaffolds with thicknesses below 0.5 mm, however, comparing them with two other strategies, the accuracy

of the manufacturing of thin rods is the highest for Net. Despite of the fact that the Melt theme was made for bulk samples, it turned out that it reflects the geometry for scaffolds diameters larger than 0.7 mm very well. The Point Net strategy is not suitable for producing elements that have a diameter smaller than 1000 μm, because the obtained geometries differ from the specifiedone and are larger by at least 50% than desired. The reason is that this scanning strategy produces elements based on more than one contour, which reduces the geometric accuracy of the created scaffolds.

The static compression test showed that the mechanical properties, in particular the strength, depend on the size of the rods in the scaffolds. Another factor contributing to these observations may be the possibility that increased structural changes, as well as scanning strategy, in the smaller rods result in less durable structures that can suffer damage at lower loads.

The design diversity and adaptation to nearly any desired target value of additive manufacturing processescan be implemented to open-porous bone scaffolds.Change of the Young`s modulus in the studied range for researched theoretical geometries reachedapproximately 99,5% decrease for Melt theme, 99,7% decrease for Net theme and 98% decrease for Point-Netthemein comparison to base Ti6Al4V Young`s modulus. Geometrical parameters should be varied under uniaxial compression to obtain a structural modulus of a bone.

Acknowledgements

Thiswork was supported by a statutory grant 0401/0022/17 from Wroclaw University of Science and Technology.

References

Formanoir C de, Michotte S, Rigo O, Germain L, Godet S., 2016. Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material. *Materials Science and Engineering*, 652:105–19.

Li G, Wang L, Pan W, Yang F, Jiang W, Wu X, et al., 2016. In vitro and in vivo study of additive manufactured porous Ti6Al4V scaffolds for repairing bone defects. *Sci Rep.* 6:34072.

Liebschner MAK., 2004. Biomechanical considerations of animal models used in tissue engineering of bone. *Biomaterials.* 25(9):1697–714.

Suard M.. 2015. Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting [PhD Thesis]. France: Universite de Grenoble.

Parthasarathy J, Starly B, Raman S, Christensen A., 2010. Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *J Mech Behav Biomed Mater*. 3(3):249–59.

Rebaioli L, Fassi I., 2017. A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes. *Int J Adv Manuf Technol*. 93(5-8):2571–98.

Wieding J, Jonitz A, Bader R., 2012. The Effect of Structural Design on Mechanical Properties and Cellular Response of Additive Manufactured Titanium Scaffolds. *Materials*. 5(8):1336–47.

Yang L, Hsu K, Baughman B, Godfrey D, Medina F, Menon M, Wiener S., 2017. Additive manufacturing of metals: The technology, materials, design and production. *Cham:* Springer.

Inwestycje w Terminalu Promowym Świnoujście i ich wpływ na obsługę promów i jednostek frachtowych

Izabela Kamińska[(1)]

[1]Instytut Inżynierii Transportu, Akademia Morska w Szczecinie
Izabela Kamińska: iza.kaminska4@wp.pl

Streszczenie
Terminal Promowy Świnoujście pełni bardzo istotną rolę pod względem obsługi promów i jednostek frachtowych z Polski do Skandynawii. Dla utrzymania strategicznej pozycji w Terminalu Promowym Świnoujście przeprowadza się liczne inwestycje, którewpłyną na wielkość i częstotliwość przewozów promowych, a także na zwiększenie parametrów obsługiwanych promów. Celem artykułu jest szczegółowe przedstawienie inwestycji wdrażanych w Terminalu Promowym Świnoujście nakierowanych na poprawę obsługi promów i jednostek frachtowych. Ważnym elementem projektów pokazanych w tym artykule jest głównie adaptacja infrastruktury portowej i budowa terminala intermodalnego. W artykule przedstawiono obecną infrastrukturę dostępu oraz infrastrukturę portową w Terminalu Promowym Świnoujście, a także ukończone, obecnie realizowane i planowane inwestycje.

Słowa kluczowe: Terminal Promowy Świnoujście, infrastruktura, obsługa promów, stanowiska promowe

Investments in the ferry terminal Świnoujście and theirimpact on the service of ferries and freightunits

Summary
The Świnoujście Ferry Terminal serves a very important role in terms of servicing ferries and freigh tunits from Poland to Scandinavia. In order to maintain a strategic position in the Świnoujście Ferry Terminal, numerous investments are carried out, which will affect on the quantity and frequency of ferry transport as well as influence on enlarging the parameters of the manned ferries. The aim of the articleis to present in detail the implemented investments in the Świnoujście Ferry Terminal which are focused on improving the service of ferries and freight units. An important element of the projects shown in this article is the adaptation of port infrastructure and construction of anintermodal terminal. The article presents the port infrastructure and facilitiesin the Świnoujście Ferry Terminal. It also shows already completed and currently planned investments.

Keywords: Swinoujscie Ferry Terminal, infrastructure, ferry service, ferrystands

1. Wstęp

Terminal Promowy Świnoujście (TPŚ) zajmuje strategiczną pozycję pod względem obsługi promów i jednostek frachtowych z Polski do Skandynawii. Jest to największy w Polsce i jeden z najnowocześniejszych na Bałtyku terminal promowy (Drożdż i in., 2003). Terminal oferuje 71 odejść promów tygodniowo i stanowi integralną część korytarza transportowego łączącego Skandynawię z krajami Europy Południowej. Dla utrzymania pozycji lidera obsługi przewozów promowych konieczny jest systematyczny rozwój infrastrukturyportowej i infrastruktury dostępu w Terminalu Promowym Świnoujście.

Terminal dostosowany jest do przeładunków poziomych jednostek frachtowych (samochodów ciężarowych, naczep drogowych, wagonów) oraz obsługi pasażerów i samochodów osobowych.

Terminal Promowy Świnoujście wyróżnia nowoczesna infrastruktura przystosowana do obsługi jednostek frachtowych. Jest to jedyny terminal promowy w Polsce realizujący

przewozy kolejowe w relacjach do/ze Szwecji i jako jeden z ośmiu terminali na Bałtyku, dokonuje załadunku wagonów kolejowych na promy morskie (Kotowska 2004).

2. Charakterystyka infrastruktury w Terminalu Promowym Świnoujście

Infrastruktura portowa, jaką dysponuje TPŚ, obejmuje trzydzieści trzy działki o łącznej powierzchni 270 609 m^2. W jej skład wchodzą m.in. budowle, budynki, stanowiska promowe, infrastruktura transportowa wraz z sieciami medialnymi i majątkiem.

Infrastrukturę dostępu w Terminalu Promowym Świnoujście stanowią:

- *Dworzec Morski* - zlokalizowany przy ulicy Dworcowej, na wysokości stanowiska promowego nr 3, trzykondygnacyjny budynek o powierzchni ok. 4 300 m^2, gdzie dokonuje się obsługi pasażerów.
- *Budynek odpraw samochodów* - dzieli place wyczekiwania na wjazd/wyjazd z kraju. Wyposażony jest w dziesięć stanowisk kontrolnych, w których dokonywane są odprawy samochodów osobowych i ciężarowych.
- *Place wyczekiwania dla samochodów osobowych i ciężarowych* oczekujących na wjazd obejmują 44 pasy ruchu.
- *Place wyczekiwania dla samochodów osobowych i ciężarowych* oczekujących na wyjazd obejmują 30 pasów ruchu.
- *Galerie pasażerskie* wzdłuż nabrzeży połączone są z budynkiem Dworca Morskiego. Galeria prowadząca na stanowisko promowe nr 2 wyposażona została w trzy piony komunikacyjne o długości ok. 310 m. Na stanowisko promowe nr 3 prowadzi galeria o długości 145 m, wyposażona w jeden pion komunikacyjny, natomiast galeria prowadząca na stanowiska promowe nr 4 i 5 wyposażona została w trzy piony komunikacyjne o długości 436 m.
- *Place manewrowe i parkingi* o łącznej powierzchni 146 tys. m^2.
- *Magazyn* o powierzchni 5 tys. m^2.
- *Rampy kolejowe* z rozjazdem na pięć torów, *rampy wjazdowe i rampy lądowe*.
- *Tory kolejowe* o długości 20 km *i drogi kołowe* o długości 8 km.

Terminal Promowy w Świnoujściu dysponuje sześcioma stanowiskami wyposażonymi w ruchome rampy do obsługi promów morskich, pasażerów i ładunków tocznych i wtaczanych.

Na rysunku 1 zilustrowano położenie stanowisk promowych w TerminaluPromowym Świnoujście.

Rys. 1 Stanowiska promowe w Terminalu Promowym Świnoujście. *Źródło*: opracowanie własne

Stanowiska promowe zapewniają obsługę przewozów pasażersko-samochodowych i kolejowych na kierunku do i z Szwecji (Kotowska I., 2014). Dodatkowo TPŚ przystosowany jest do obsługi jednostek transportu intermodalnego dzięki odpowiedniemu układowi torów i placów manewrowo-składowych. Obecnie wykonuje się codziennie sześć odejść promów do Ystad i pięć do Trelleborga.

Terminal Promowy Świnoujście posiada infrastrukturę dostosowaną do przeładunków jednostek frachtowych w systemie poziomym, do obsługi, których przeznaczone są stanowiska promowe od 1-6 (Jabłonowska i Kotowska 2010).

Terminal Promowy Świnoujście dysponuje sześcioma stanowiskami promowymi, z których (Kotowska 2007):

- dwa stanowiska mają charakter uniwersalny- obsługują zarówno promy kolejowe, kolejowo- samochodowe, pasażerskie oraz ro-ro,
- trzy stanowiska pasażersko- samochodowe,
- jedno stanowisko do obsługi promów pasażerskich, samochodowych, a także statków ro-ro i semikontenerowców.

Charakterystykę poszczególnych stanowisk przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1Parametry stanowisk promowych w Terminalu Promowym Świnoujście

Stanowisko promowe	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Nr 6
Długość stanowiska [m]	242,15	193	194	184	196	154
Szerokość stanowiska [m]	32	32,5	bd	40	39,5	33,3
Wysokość stanowiska [m]	2	2	2	2	2	2
Głębokość techniczna stanowiska [m]	12	11	9,5	9,5	9,5	9,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów wewnętrznych TPŚ

Stanowisko promowe nr 1 to najdłuższe stanowisko do obsługi promów w Terminalu Promowym Świnoujście wyposażone w najnowocześniejszy rękaw pasażerski w Europie. Jego długość – 242,15 m umożliwia obsługę statków o długości do 220 m. Do użytku zostało oddane w październiku 2015 r. Ponadto nabrzeże jest wyposażone w pomosty wjazdowe, galerię pasażerską oraz estakadę samochodową (Konwicki 2016).

Stanowisko promowe nr 2 ma długość 189,4 m i przystosowane jest do obsługi promów samochodowo-pasażerskich i kolejowo-samochodowych o długości całkowitej do 170 m. Posiada pomosty wjazdowe: dolny, który jest wbudowany w łoże i umożliwia wjazd pojazdów samochodowych i wagonów kolejowych oraz górny, na który prowadzi estakada drogowa, pozwalający na wjazd na prom pojazdom kołowym. Oba pomosty dostosowują się w zależności od poziomu wody w rzece Świnie, dzięki czemu istnieje możliwość obsługi promów o różnej wysokości. Ponadto nabrzeże wyposażone jest w ruchomy pomost pasażerski.

Stanowisko promowe nr 3 ma długość 198,5 m. Zbudowane jest analogicznie do stanowiska nr 2. Służy do obsługi promów kolejowo-samochodowych i samochodowo-pasażerskich. Wyposażone jest w ruchomy pomost kolejowo-samochodowy, dojazdową estakadę drogową oraz ruchomy pomost, który pozwala na wjazd na prom (na górny pokład). Do obsługi pasażerów służy ruchomy pomost pasażerski.

Stanowisko promowe nr 4 obsługuje promy pasażersko-samochodowe i ma długość 176,3 m. Posiada ruchomy pomost dla pojazdów kołowych oraz ruchomy rękaw pasażerski.

Stanowisko promowe nr 5 ma długość 197,5 m. Obsługuje promy pasażersko-samochodowe. Wyposażone jest w ruchomy rękaw pasażerski i ruchomy pomost samochodowy.

Stanowisko promowe nr 6 jest najkrótszym stanowiskiem w Terminalu Promowym Świnoujście (ma 130 m długości) i w związku z trudnymi warunkami nawigacyjnymi pełni funkcję stanowiska postojowego/rezerwowego. Konstrukcyjnie możliwa jest w nim obsługa promów pasażersko- samochodowych. Stanowisko wyposażone jest w ruchomy pomost samochodowy.

TPŚ dysponuje fizycznie pięcioma stanowiskami od 1-5, na których może obsłużyć łącznie do dwudziestu promów w ciągu doby. Głównymi ograniczeniami możliwości przewozowych są parametry statku, jego pojemność oraz nośność ramp przeładunkowych. Zważając na sezonowość przewozów, specyfikę rynku i czasowe wyłączenia promów z eksploatacji, zakłada się, że w Terminalu Promowym Świnoujście możliwa jest obsługa na każdym ze stanowisk przyjęć do 300 zawinięć promów rocznie (Bernacki 2016). Tabela 2

przedstawia maksymalne zdolności przeładunkowe w Terminalu Promowym Świnoujście na eksploatowanych stanowiskach promowych od 1 do 5.

Tab. 2 Zdolności przeładunkowe stanowisk promowych 1-5 Terminalu Promowego w Świnoujściu

Numer stanowiska promowego	1	2	3	4	5
Czas eksploatacji nabrzeża [h]	24	24	24	24	24
Czas obsługi promu [h]	6	6	6	6	6
Ilość obsługiwanych promów na dobę przez stanowisko promowe [szt.]	4	4	4	4	4
Ilość zawinięć rocznie [dni]	300	300	300	300	300
Częstotliwość rejsów dziennie	2	2	2	2	2
Zdolności przeładunkowe jednostek frachtowych					
Maksymalna ilość obsługiwanych jednostek frachtowych dziennie przez stanowisko promowe [szt.]	250	91	91	91	91
Ilość obsługiwanych jednostek frachtowych rocznie przez stanowisko promowe [szt.]	330 000	120 120	120 120	120 120	120 120
Ilość obsługiwanych jednostek frachtowych ogółem rocznie	**810 480**				
Zdolność przeładunkowa stanowisk promowych					
Efektywne wykorzystanie pojemności ładunkowej promów	55%	55%	55%	55%	55%
Średnia masa ładunku na jednostce frachtowej [t]	13,33	13,33	13,33	13,33	13,33
Masa obsługiwanych ładunków przez stanowisko rocznie [t]	4 398 900	1 601 200	1 601 200	1 601 200	1 601 200
Masa obsługiwanych ładunków ogółem rocznie [t]	**10 803 698**				

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów wewnętrznych TPŚ

Stanowisko nr 1 posiada największą zdolność przeładunkową i pozwala na przeładunek 250 jednostek frachtowych dziennie, co przewyższa niemal trzykrotnie zdolność przeładunkową pozostałych stanowisk w TPŚ. Maksymalna roczna zdolność przeładunkowa obejmująca stanowiska promowe 1-5 wynosi 810 480 jednostek frachtowych i 10 803 698 ton ładunków.

3. Zakończone inwestycje

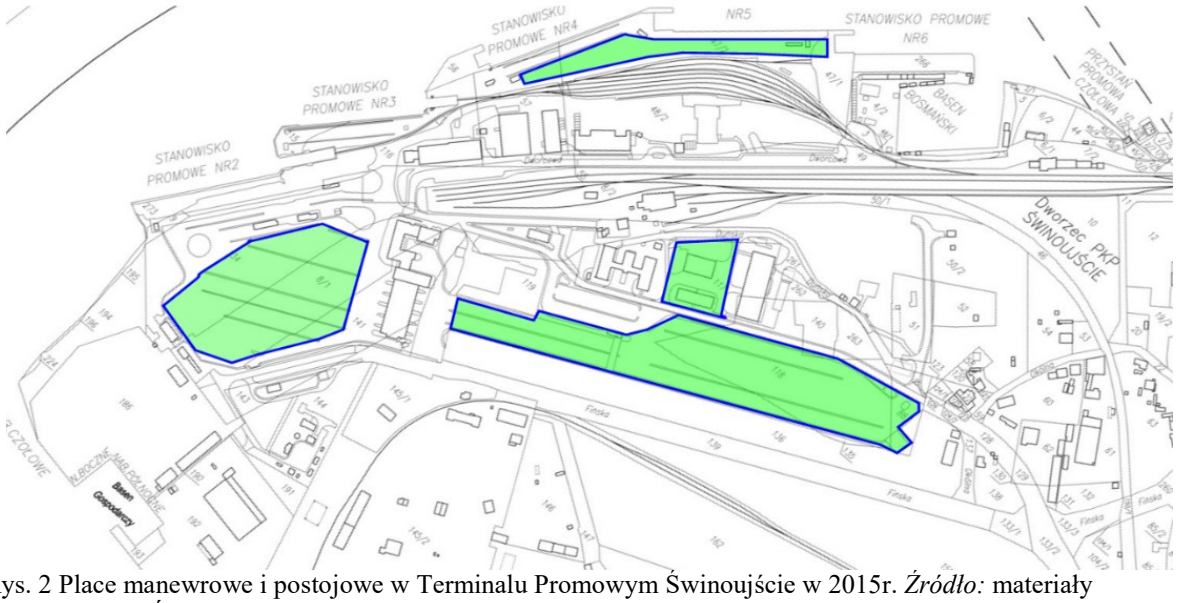
W ramach poprawy obsługi promów ukończono następujące inwestycje:

- wybudowanie stanowiska promowego nr 1,

- zwiększenie pojemności placów oraz miejsc postojowych.

W 2015 roku oddano do użytku nowo wybudowane stanowisko promowe nr 1. Inwestycja to została zrealizowana w ramach projektu: „Rozbudowa infrastruktury portowej w południowej części portu w Świnoujściu". Swoim zasięgiem obejmowała nabrzeże o umocnionym dnie i długości 242 m, umożliwiające przyjmowanie statków do 220 m długości, wyposażone w infrastrukturę techniczną i najnowocześniejszy w Europie rękaw pasażerski, stalowy pomost ruchomy oraz pomosty wjazdowe na prom, a także estakadę prowadzącą na pomost samochodowy boczny. Inwestycja ta znacząco wpłynęła na jednorazową zdolność przewozowa promów, która zwiększyła się z 91 jednostek frachtowych, do 250 jednostek frachtowych. Budowa stanowiska promowego nr 1 wzmocniła pozycję konkurencyjną Terminala Promowego Świnoujście i spełnia aktualne oczekiwania armatorów wprowadzających do eksploatacji coraz większe jednostki.

Kolejną ukończoną inwestycją mającą na celu zwiększenie efektywności obsługi promów była „Budowa infrastruktury terminali portowych w Szczecinie i Świnoujściu – miejsca postojowe". Zakresem inwestycji objęto przebudowę miejsc postojowych dla pojazdów ciężarowych w Terminalu Promowym w Świnoujściu przy ul. Duńskiej i Fińskiej. Place manewrowe i postojowe w Terminalu Promowym Świnoujście przebudowane w ramach inwestycji „Budowa infrastruktury terminali promowych w Szczecinie i Świnoujściu" zostały zaznaczone kolorem zielonym na rysunku 2.



Rys. 2 Place manewrowe i postojowe w Terminalu Promowym Świnoujście w 2015r. *Źródło:* materiały wewnętrzne TPŚ

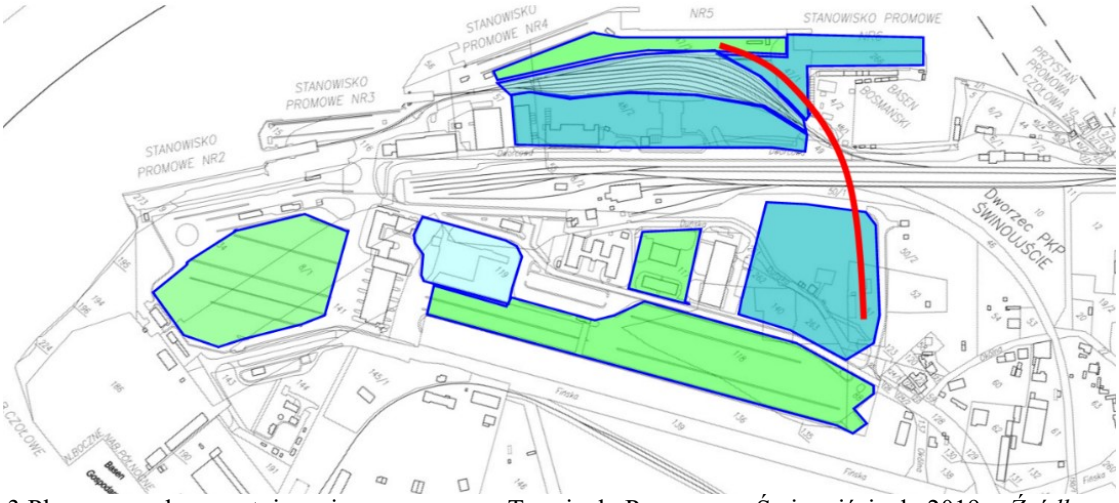
4. Rozpoczęte i planowane inwestycje

Rosnące obroty portowe i obciążenie dobowe ruchem samochodów ciężarowych w Terminalu Promowym Świnoujście bezpośrednio wpływają na sprawność obsługi promów

morskich, stymulują rozwój obszaru terminala i zmuszają do podejmowania nowych inwestycji.

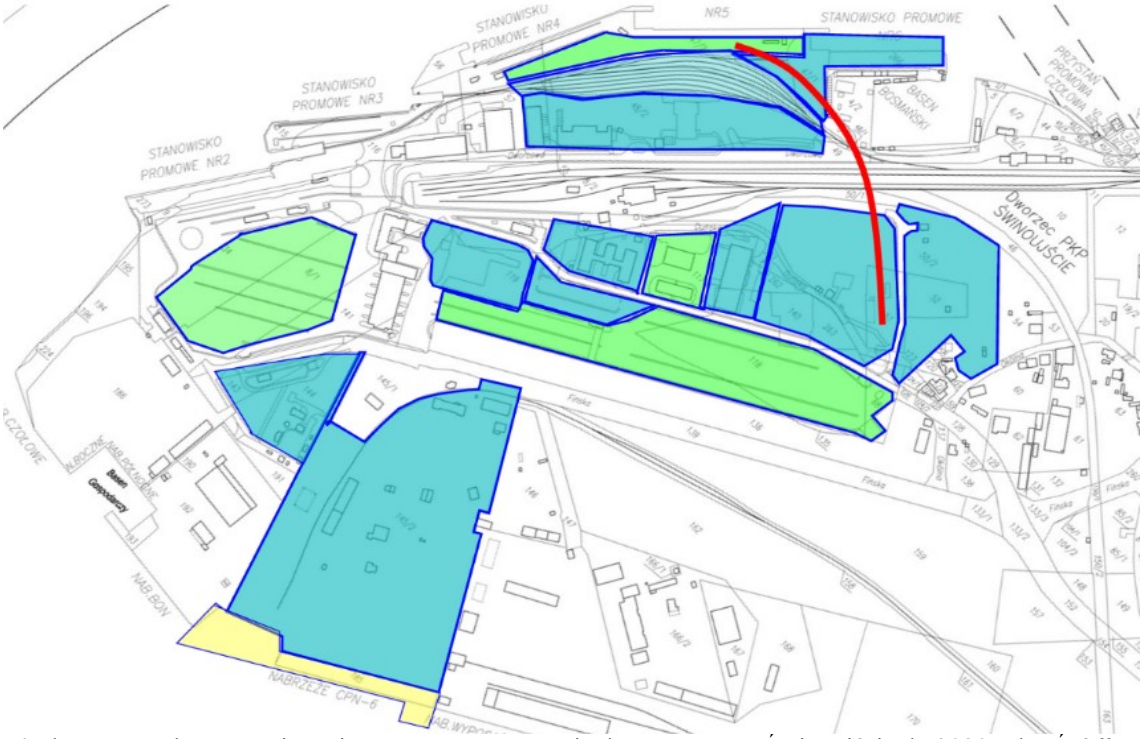
Optymalizacja i skrócenie czasu obsługi promów zwiększa efektywność obsługi jednostek. W tym celu do 2020 r. w Terminalu Promowych Świnoujście zrealizowane zostaną inwestycje mające na celu rozbudowę i modernizację infrastruktury technicznej terminala oraz przystosowanie go do obsługi transportu intermodalnego oraz budowa infrastruktury portowej do obsługi dużych promów.

Najważniejszym planowanym przedsięwzięciem inwestycyjnym jest przystosowanie infrastruktury Terminala Promowego Świnoujście do obsługi transportu intermodalnego. Powstaną dodatkowe miejsca postojowe i place manewrowe dla samochodów, co przedstawiono na rysunku 3, gdzie kolorem zielonym zaznaczono obecny zasięg placów postojowych, a kolorem niebieskim place, które powstaną w ramach realizacji projektu. Czerwona linią zaś wytyczono, jak będzie przebiegała estakada samochodowa.



Rys. 3 Planowane place postojowe i manewrowe w Terminalu Promowym Świnoujście do 2019 r. *Źródło:* materiały wewnętrzne TPŚ

Docelowo po zakupie nowych terenów zasięg placów postojowych i manewrowych do 2030 roku będzie zajmować powierzchnię przestawioną na rysunku 4. Czerwoną linią oznaczono estakadę samochodową, kolorem zielonym place postojowe i manewrowe, które obecnie są eksploatowane w Terminalu Promowym Świnoujście, natomiast kolorem niebieskim zaznaczono powierzchnie, na których powstaną place postojowe i manewrowe do końca 2030 roku. Kolorem żółtym zaznaczono miejsce, w którymplanowana jest budowa nowego stanowiska promowego.



Rys. 4 Planowane place postojowe i manewrowe w Terminalu Promowym Świnoujście do 2030 roku *Źródło:* materiały wewnętrze TPŚ

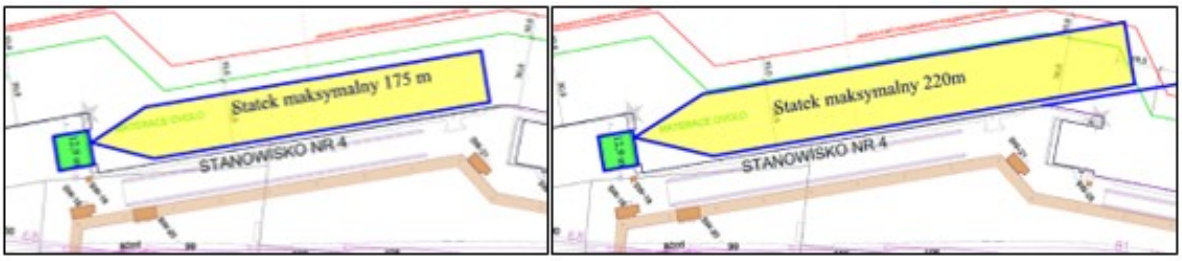
W ramach prac mających na celu poprawę dostępu od strony wody do Terminala Promowego Świnoujście konieczna jest modernizacja stanowisk promowych nr 3 i 4 i dostosowanie ich do obsługi jednostek o długości powyżej 200 m długości. Na rysunku 5 przedstawiono porównanie parametrów stanowiska promowego nr 3 przed i po modernizacji.

Rys. 5 Porównanie parametrów stanowiska promowego nr 3 w Terminalu Promowym Świnoujście przed i po modernizacji. *Źródło:* materiały wewnętrze TPŚ

W wyniku modernizacji stanowiska promowego nr 3 zmianie ulegną parametry nabrzeża – z długości 198,5 zostanie ono wydłużone do 230 m, dzięki czemu umożliwi obsługę statków o długości maksymalnej 220 m.. Ponadto szerokość pomostu kolejowego zostanie zwiększona z 10 m do 27-30 m , a dopuszczalne obciążenie robocze (DOR) zwiększy się z 80 ton do 120 ton. Pomost samochodowy na pokład górny nie ulegnie zmianie.

Na rysunku nr 6 przedstawiono porównanie parametrów stanowiska promowego nr 4 przed i po modernizacji.

W efekcie przeprowadzonej modernizacji stanowiska promowego nr 4, przebudowie stanowisk promowych 5 i 6, długość nabrzeża zwiększy się do 240 m. Umożliwi to obsługę statków o długości maksymalnej 220 m, czyli dłuższym o 45 m. Parametry pomostu samochodowego na pokład górny nie ulegną zmianie, w związku, z czym będą niewystarczające dla obsługi statku o długości 220 m.



Rys. 6 Porównanie parametrów stanowiska promowego nr 4 w Terminalu Promowym Świnoujście przed i po modernizacji. *Źródło:* materiały wewnętrze TPŚ

W związku z niewielkim wykorzystaniem stanowiska promowego nr 6 nieprzystosowanego do obsługi statków o długości maksymalnejdo 130 m opracowano projekt budowy nowego nabrzeża w miejsce istniejących stanowisk 5 i 6. W tabeli 3 dokonano zestawienia parametrów stanowisk promowych nr 5 i nr 6 objętych przebudową.

Tab. 3 Parametry stanowisk promowych nr 5 i nr 6 objętych przebudową

	Długość nominalna nabrzeża [m]	**Długość zasadnicza nabrzeża [m]**	**Dopuszczalna głębokość [m]**	**Lądowa powierzchnia nabrzeża [m^2]**
Stanowisko nr 5	196	167,3	11	2548
Stanowisko nr 6	154	130	11	1690
Nowe stanowisko nr5/6	294,75	270	13	3832

Źródło: opracowanie własne

Połączenie stanowisk nr 5 i 6 umożliwi przyjmowanie statków o długości 270 m i szerokości 36 m oraz promów pasażersko-samochodowych o długości maksymalnej do 245 m, tonażu powyżej 60 000 GT i jednorazowej zdolności przewozowej 280 samochodów ciężarowych. Ponadto nowe stanowisko przystosowane będzie do obsługi transportu intermodalnego, w związku z tym wyodrębniony zostanie plac do obsługi jednostek intermodalnych w technologii lo-lo.

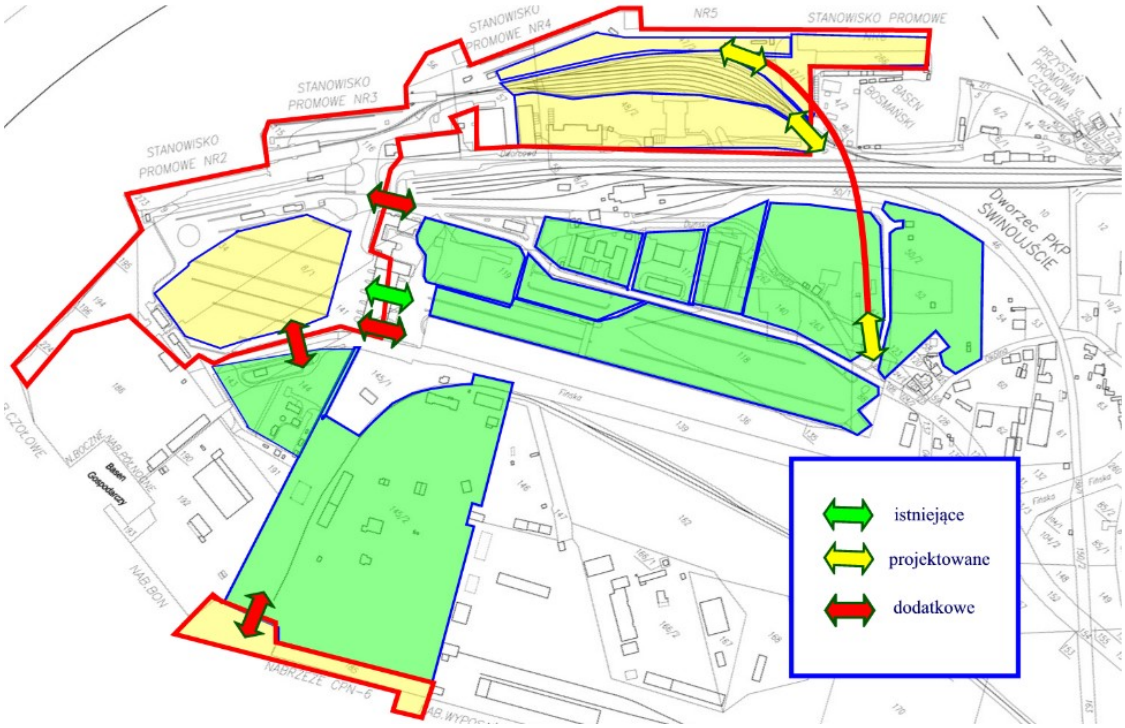
Rys. 7 Nowe nabrzeże z połączenia stanowisk nr 5 i nr 6. *Źródło:* materiały wewnętrzne TPŚ

Łączna jednorazowa pojemność placów składowych dla jednostek intermodalnych w Terminalu Promowym Świnoujście wyniesie do 181 jednostek. Na rysunku 7 przedstawiono projekt połączonego stanowiska 5 i 6.

Kolejne inwestycje mające na celu przystosowanie Terminala Promowego Świnoujście do obsługi transportu intermodalnego dotyczą utworzenia dodatkowych dróg komunikacyjnych umożliwiających sprawny za- i rozładunek promów poprzez place manewrowo-postojowe.

Na rysunku 8 przedstawiono projektowane drogi komunikacyjne w Terminalu Promowym Świnoujście. Kolorem zielonym zaznaczono obecny układ dróg, kolorem czerwonych są oznaczone drogi dodatkowe, a na żółto zaznaczono drogi projektowane.

W inwestycjach prowadzonych w celu przystosowania Terminala Promowego Świnoujście do obsługi transportu intermodalnego przewidziana jest rozbudowa układu torowego o trzy nowe tory kolejowe, a także przebudowa obecnych torów kolejowych nr 66 i 67.



Rys. 8 Projektowane drogi komunikacyjne w Terminalu Promowym Świnoujście. *Źródło:* materiały wewnętrzne TPŚ

Kolejnym obiektem, który umożliwi bezpośredni dojazd do przebudowanego stanowiska promowego nr 5/6 i placów postojowych będzie estakada samochodowa o długości 293,7 m. Zlokalizowana będzie miedzy placami postojowymi – przy ul. Duńskiej i stanowisku promowym nr 5. Całkowita szerokość projektowanej estakady ma wynosić 9,4 m, z czego obejmować będzie dwa pasy ruchu po 3,5 m szerokości każdy, dwa chodniki po 0,5 m oraz dwa pasy bezpieczeństwa o szerokości 0,7 m.

Poprawa efektywności obsługi promów obejmuje nie tylko modernizację infrastruktury, ale również dostosowanie odpowiednich systemów monitorujących. Zadaniem jednolitego systemu zmiennej informacji wizualnej będzie wspomaganie procesu załadunku promów na poszczególnych stanowiskach promowych. Jego zasięg ma obejmować system dróg, placów postojowych oraz manewrowych, a także stanowisk promowych. Dzięki połączeniu z harmonogramem obsługi poszczególnych odejść promów system ujednoliconego centralnie zarządzanego systemu informacji wizualnej przekierowuje strumienie ładunkowe samochodów ciężarowych, samochodów osobowych i autokarów w celu zapewnienia szybszej odprawy.

Na wzrost efektywności wykorzystania dostępnych placów postojowych może wpłynąć optymalizacja oraz skrócenie czasu obsługi samochodów ciężarowych przez armatorów i przez port dzięki zastosowaniu w szerokim zakresie technik informatycznych. Planowane jest stworzenie spójnego systemu „e-bilet" eliminującego wszelkie papierowe dokumenty

i pozwalającego na przemieszczanie się samochodów ciężarowych i innych pojazdów przez obszar Terminala Promowego Świnoujście, aż do zaokrętowania na prom bez potrzeby bezpośredniego kontaktu kierowcy z biurem ładunkowym armatora oraz służbami portowymi.

5. Wnioski

Terminal Promowy w Świnoujściu poprzez liczne inwestycje dąży do dostosowania infrastruktury do obsługi dużych promów o długości do 270m,a także systematycznego zwiększania ilości odejść promów w skali doby, co wpłynie na skrócenie czasu oczekiwania samochodów ciężarowych w czasie szczytów przewozowych, co wpłynie na zwiększenie zdolności przeładunkowych w terminalu.

Przeprowadzona modernizacja nie tylko wpłynie na rozwój transportu intermodalnego i umożliwi świadczenie usług przeładunkowych przy wykorzystaniu transportu kolejowego, ale też usprawni funkcjonowanie Środkowoeuropejskiego Korytarza Transportowego CETC (Central European Transport Corridor) oraz sieci TEN-T (Central European Transport Corridor).

Prowadzone przez Terminal Promowy Świnoujście działania zdecydowanie umacniają jego konkurencyjność wśród terminali promowych na Bałtyku i utrzymują go na pozycji lidera pod względem wielkości oraz nowoczesności.

6. Literatura

Bernacki D., 2014. Forecasted changes in the ro-ro traffic on ferry lines in the Świnoujście-Sweden relations, *Logistykanr* 6/2014.

Dróżdż W., Pluciński M., Salmonowicz H., 2003. Baza promowa w Świnoujściu w obsłudze tranzytu skandynawskiego. XIX Sejmik Morski: Europa bałtycka regionem współpracy i integracji.

Jabłonowska I., Kotowska I., 2010. Konkurencyjność połączenia promowego Świnoujście Ystad w aspekcie utworzenia autostrady morskiej, XXV Sejmik Morski Europa Bałtycka Przeszłość, Teraźniejszość, Nowe Wyzwania, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego.

Konwicki J., 2016. Dynamiczny rozwój terminalu promowego w Świnoujściu [w:] http://www.katalog.pgt.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]

Kotowska I., 2004. Funkcje terminali do obsługi intermodalnych jednostek ładunkowych w zespole portowym Szczecin – Świnoujście [w:] IV Konferencja Naukowa Porty Morskie 2004 Zmiany w lądowo-morskich łańcuchach transportowych w rejonie Basenu Morza Bałtyckiego - szanse i zagrożenia dla polskich interesów morskich.

Kotowska I., 2014. The analysis of hinterlands of intermodal terminals in Polish seaport, 6th International Conference on Maritime Transport.
Kotowska I., 2007. Perspektywy rozwoju infrastruktury portowej w Świnoujściu [w:] Dwa lata Polski Morskiej w Unii Europejskiej, Zeszyty Morskie Wydawnictwo Katolickiego Stowarzyszenia „Civitias Christiana".
Materiały wewnętrzne TPŚ
http://morzaioceany.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
http://www.budimex.com.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
http://www.gospodarkamorska.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
http://www.port.szczecin.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
http://www.portalmorski.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
http://www.promyskat.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
https://mgm.gov.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
https://www.cupt.gov.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]
https://www.logistyka.net.pl/ [dostęp: 15.05.2018 r.]

Deformacje perspektywy w przestrzeni audiowizualnej

Maurycy Kin[1)], Sylwia Prygoń[2)], Witold Szymański[3)]

[1] Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
[2] Dolby Poland
[3] Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej
Maurycy Kin: maurycy.kin@pwr.edu.pl

Streszczenie
W pracy przedstawione mechanizmy sprzyjające deformacjom perspektywy wizualnej oraz audialnej. Omówiono wrażenia wizualne powstałe wskutek percepcji zniekształconej głębi obrazu, a także przedstawiono wyniki badań percepcji zmian perspektywy w nagraniach dźwiękowych, poddanych różnym rodzajom kodowania. Omówiono aspekty związane z zaburzeniami postrzegania wzrokowego oraz wykazano, że wskutek zmniejszenia objętości informacji atrybut ten jest najbardziej wrażliwy na zmiany pierwotnej struktury obrazu dźwiękowego.

Słowa kluczowe: perspektywa, zniekształcenia, percepcja

Distortion of perspective impression in audio-visual space

Summary
In the paper, the conditions for distortion of audiovisual depth are presented. The visual impressions of changed perspective of visual form as well as the anomalies in seeing process are discussed. In the audio domain, the results of experiment on the influence of various kinds of signal compression on the detection of auditory scene changes has been presented. It was confirmed statistically that the complexity of the tested sounds influenced the depth impression of perceptual coded sound.

Keywords: the depth of image, distortion, audio-visual perception

1. Wprowadzenie

Perspektywę przestrzeni wizualnej stanowi jej rzut środkowy. Perspektywiczne obrazy różnią się od siebie w zależności od powierzchni (tła perspektywicznego), na jakiej powstają. W przypadku oka ludzkiego jest to sferyczna siatkówka, w malarstwie i fotografii w zależności od stylu lub epoki jest nią najczęściej płaszczyzna, czasem powierzchnia walcowa (panoramy) albo jak w barokowym malarstwie nasklepiennym powierzchnie sklepień; walcowych (kolebkowych), sferycznych, elipsoidalnych, itp. Promienie widzenia (światła emitowanego przez obserwowany obiekt) docierają do oka najczęściej bezpośrednio. Jeśli jednak pomiędzy okiem a postrzeganym obiektem umieścimy układ optyczny, jaki stanowić może lustro (powierzchnia refleksyjna), zostaną one załamane, powstaje obraz pozorny, a perspektywę nazywamy odbiciem względem powierzchni refleksyjnej, lub perspektywą refleksyjną. Aparat takiej perspektywy stanowi rzut środkowo-refleksyjny (Baltrusaitis 1984). Przykład takiej perspektywy może być odbicie względem zwierciadła sferycznego, co ilustruje rys. 1. Rozważając geometrycznie te dwa rodzaje perspektywy zauważmy, że w perspektywie, nazwijmy ją bezpośrednią, zmienną stanowi powierzchnia, na jakiej powstaje obraz, czy jest to siatkówka oka, ekran kinowy, powierzchnie malowideł,

w przypadku perspektywy refleksyjnej kształt lustra (mogą być one walcowe, stożkowe, graniaste a nawet takie jak np. karoserie samochodów, pofalowana powierzchnia wody, dowolność kształtów jest tu nieograniczona). Tak, więc obrazy perspektywiczne tego samego obiektu mogą znacznie różnić się od siebie ze względu na sposób (warunki) obserwacji. Owe różnice możemy najprościej wyjaśnić kategorią deformacji, bądź jej braku. Za deformację perspektywy uznajmy niezgodność obiektu z jego perspektywicznym obrazem, i odwrotnie.

Rys. 1. Odbicie obiektów przestrzennych względem zwierciadła sferycznego (Fot. W. Szymański).

Zniekształcenia perspektywy obrazu słuchowego mogą powstać wskutek usunięcia pewnych składowych dźwięku, odpowiedzialnych za wrażenie głębi atrybutów przestrzennych, głównie wskutek redukcji danych w procesie kodowania percepcyjnego (Pohlmann 2010, Sayood 2012). Ponieważ warstwa pogłosowa nagrania nie wpływa na zawartość semantyczną przekazu, często jest zmieniana, bądź też poważnie redukowana przez stosowane algorytmy redukcji danych. Jakkolwiek tak zredukowane nagranie w ogólnym odbiorze nie różni się znacząco od oryginału, niemniej jednak szczegóły odnoszące się do wrażenia rozgrywania się akcji dźwiękowej w konkretnym pomieszczeniu mogą ulec zmianie, co wpłynie na wartość estetyczną odsłuchiwanego nagrania (Bregman 1990, Kin 2013,

Rumsey 2017). Często także zmiana formatunagrania, dokonana w drodze redukcji liczby odtwarzanych kanałów powoduje zmiany w atrybutach przestrzennych zarejestrowanego dźwięku (Kin, Plaskota 2011). Wszelkie, zatem zmiany struktury dźwiękowej powinny być dokonywane ostrożnie i z możliwością permanentnej kontroli jakości dźwięku. Niestety, z punktu widzenia przesyłanych informacji nie jest to możliwe, stąd też pojawiło się rozwiązanie kompromisowe, bazujące na redukcji danych na podstawie konkretnego modelu psychoakustycznego, wg, którego usunięte składowe nie wpłyną istotnie, na jakość przekazu (Sayood 2012).

2. Zniekształcenia perspektywy wizualnej

Łatwo zauważyć deformację perspektywiczną na przykładzie odbić zwierciadlanych, trudniej, gdy patrzymy na barokowe malowidło nasklepienne, ponieważ ten rodzaj sztuki ma na celu stworzyć u widza iluzję zarówno głębi przestrzennej jak i zgodności przedstawień obiektów z nimi samymi. Jak można sądzić iluzja nie była dla malarzy celem samym dla siebie, ale wynikała z konieczności przedstawień scen biblijnych na skomplikowanych powierzchniach sklepień. Używane przez artystów deformacje form przedstawianych scen służyły, bowiem temu, aby widz obserwujący je z wybranego punktu obserwacji (*punto stabile*) urzeczony był ich realizmem. Natomiast w odbiciach lustrzanych artyście chodzi o dokładnie odwrotny efekt; deformacja ma zaciekawiać, ma być zagadką służyć do swoistej „gry z okiem".

W tym miejscu zapytamy, co może stanowić miarę deformacji perspektywicznej? Rozpatrzmy geometrycznie następujące układy perspektywy wtedy, gdy jej obrazy powstają na płaszczyźnie:

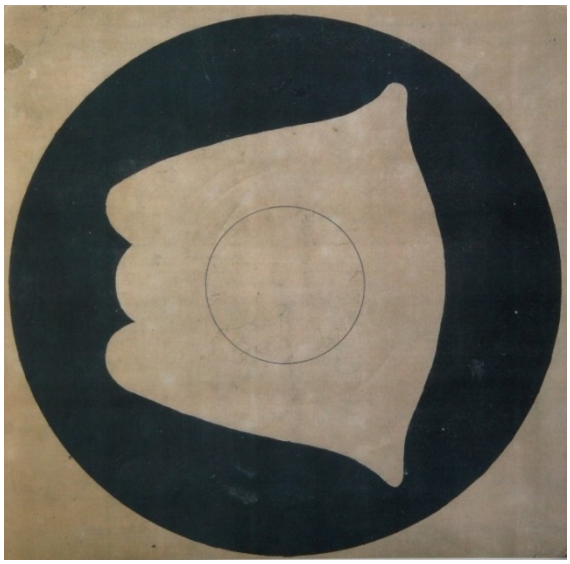
1. Jeżeli przyjmiemy, że punkt obserwacji jest w nieskończonej odległości od obserwowanego obiektu (środek rzutu perspektywicznego jest punktem niewłaściwym) to mamy wtedy do czynienia z rzutem równoległym (perspektywą równoległą) o określonym kierunku promieni widzenia (promieni rzutujących). Własnością takiej perspektywy to, że zachowuje miary liniowe (zachowuje stosunki podziału odcinków określone punktami prostej) oraz relacje równoległości, nie zachowuje jednak relacji kątowych.
2. Jeżeli środek rzutu jest w skończonej odległości promienie widzenia tworzą wiązkę środkową (środkiem takiej wiązki jest ognisko układu optycznego oka).

Własnością takiej perspektywy jest to, ze nie zachowuje miar liniowych, relacja równoległości w przestrzeni przechodzi na perspektywiczną zbieżność, relacje kątowe nie są zachowane.Istnieje jednak ważna relacja wspólna dla obu typówperspektywy na płaszczyźnie, a jest nią zgodność prostej przestrzeni z jej obrazem perspektywicznym. Zgodność tę przyjęto

nazywać kolineacją, a perspektywy, które realizują tę relację, kolineacjami. Rozpatrzmy teraz układy perspektywy wtedy, gdy jej obrazy powstają na zakrzywionych powierzchniach: takiej jak sfery, powierzchnie walcowe, stożkowe, powierzchnie o dowolnie zmiennych krzywiznach. Łatwo dowiedziemy, że obrazem prostej przestrzeni jest płaski przekrój takich powierzchni, który prosta nie jest. Perspektywy te nazywamy niekolinearnymi. Ponieważ siatkówka ludzkiego oka nie jest płaska to wynika z tego, że perspektywa oka ludzkiego nie jest kolineacja, co oznacza, że linię prosta widzimy, jako krzywą. Tej własności ludzkiego wzroku świadomi byli starożytni Grecy, co wykorzystywali w swojej sztuce wizualnej, rzeźbie i architekturze (świadomie stosowanie zakrzywienia powierzchni detali obiektów architektonicznych, takich jak kolumny i gzymsy, aby tworzyły iluzje symetrii i zamierzonego ideału linii prostej). To porównanie perspektyw kolinearnych i niekolinearnych oraz warunków, w jakich powstają odnosi się już do interesującego nas zjawiska (fenomenu) perspektywicznej deformacji, choć mamy tu do czynienia tylko z jedną zmienną - tłem płaskim lub zakrzywionym. Jeśli teraz do układu perspektywy wprowadzimy dodatkowe elementy a takimi są lustra to w wyniku uzyskamy obrazy perspektywiczne, które zależeć będą także od parametrów tych układów optycznych. Oczywiście deformacje perspektywy staną się funkcją już dwóch zmiennych, Pierwszą z nich stanowi tło, a drugą lustro o dowolnie wybranej powierzchni. Ponieważ perspektywa oka ludzkiego jest z natury dynamiczna, zmienna w czasie, to i ten warunek ma wpływ na finalny obraz perspektywy (pomijamy tu wpływ czynników związanych z psychofizjologią postrzegania wzrokowego, poprzestając jedynie na analizie geometrycznej).

Ten rodzaj perspektywy został wykorzystany w sztuce anamorfoz refleksyjnych. Omówimy go pokrótce na przykładzie anamorfoz sferycznych. Geometrycznie anamorfoza sferyczna jest obrazem punktu lub dowolnego zbioru punktów przyjętego w przestrzeni wewnątrzsferycznej lub nazewnątrzsferycznej powstającym w rzucie środkowo-refleksyjnym względem sfery. Fizycznie zaś jest przeciwobrazem obrazu pozornego powstającego poprzez odbicie anamorfozy względem powierzchni refleksyjnej. W wyniku takiego odbicia obraz pozorny tworzy iluzję założonego obiektu przestrzennego. W przekształceniu anamorficznym obiektem jest umieszczona na płaszczyźnie lub innej powierzchni, forma (rysunek) zwana anamorfozą, ma ona wymiar 2 (rys. 2). W wyniku jej perspektywicznego przekształcenia powstaje przestrzenny obraz o wymiarze 3 (rys. 3). stwierdzimy, że tylko odbicia względem płaskich luster o zerowej krzywiźnie zachowują kształt, a więc formę obiektu odbijanego, np. obrazem linii prostej jest prosta (przekształcenie ma charakter liniowy). Gdy jednak zakrzywiamy powierzchnię lustra, wówczas spowoduje to deformację obrazu, np. obrazem

prostej jest krzywa (przekształcenie ma charakter nieliniowy). Wraz ze wzrostem krzywizny lustra wzrasta też deformacja obrazu. Obiekty, których obrazy tworzymy w wyniku odbić, mogą istnieć na płaszczyźnie, dowolnych powierzchniach lub w przestrzeni. Co zaś tyczy luster to poza płaskimi do najprostszych zakrzywionych zaliczymy lustra stożkowe, walcowe i sferyczne.



Rys. 2. Anamorfoza na płaszczyźnie. Chiny, druga połowa XVII w. Ze zbiorów W. Nekesa. Fot. M. Jakubowicz

Ta gra z widzem to iluzyjna gra formą przestrzenną, ale też, (co jest może i ważniejsze) tworzeniem obrazu zniekształconej, nierozpoznawalnej w swym kształcie anamorfozy, która dopiero w wyniku odbicia względem przyjętego lustra dla stałego punktu obserwacji przekształca się w formy znane i niezdeformowane, co przedstawiono na rys. 4.

Rys. 3. Anamorfoza na płaszczyźnie i jej odbicie w lustrze stożkowym. Chiny, druga połowa XVII w.Fot. M. Jakubowicz

Rys. 4. Anamorfoza na układzie czterech płaszczyzn dwunastościanu foremnego, odbita względem zwierciadła sferycznego.

Znane anamorfozy są formami geometrycznymi, zbiorami punktów i linii na płaszczyźnie. Ale tę dwuwymiarową płaszczyznę można przecież dowolnie zakrzywić czy przekształcić. Najprostszymi zakrzywionymi powierzchniami są powierzchnie walca i stożka, nie wspominając już o sferze, bądź dowolnie zakrzywionych powierzchniach wypukłych. Drugą zmienną stanowi lustro. Oprócz płaskich, istnieją lustra walcowe stożkowe, sferyczne, i inne, o zmiennej krzywiźnie, choćby takie, jakie spotykamy w gabinecie luster czy współczesnej architekturze.

3. Zniekształcenia perspektywy audialnej

W celu wyjaśnienia wpływu kompresji objętości informacyjnej sygnału na deformację perspektywy obrazu słuchowego nagrania muzycznego przeprowadzono eksperyment, w którym zbadano wpływ stopnia i rodzaju kompresji na wrażenie głębi.

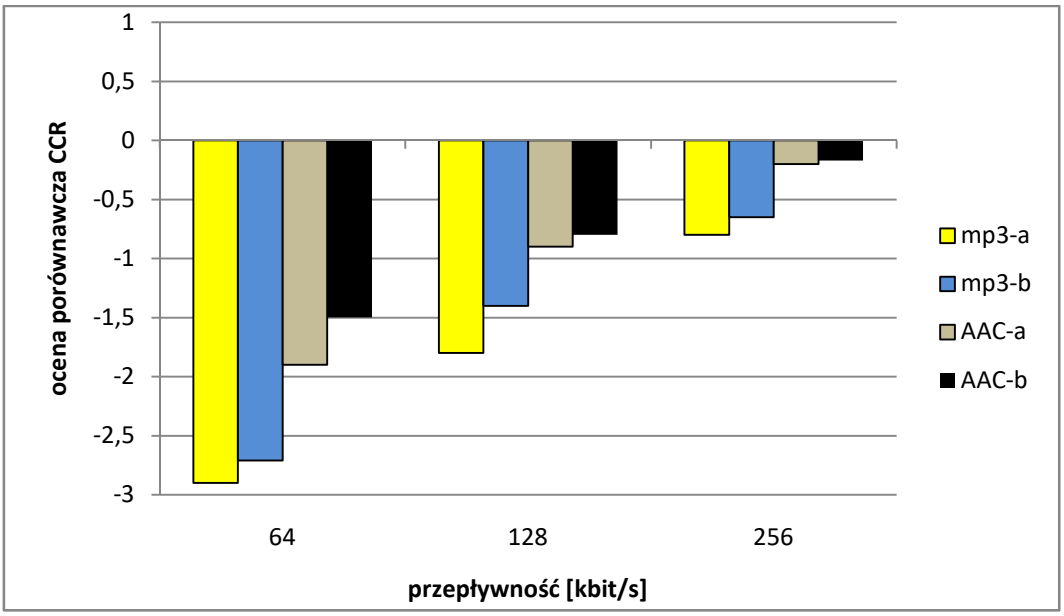
- Metoda badań

Badania wpływu rodzaju kodowania na zauważalność zmian perspektywy obrazu słuchowego przeprowadzono na grupie 5 słuchaczy. Wszystkie osoby biorące udział w badaniu charakteryzowały się dobrym słuchem (ubytki nie większe od 5 dB) i posiadały doświadczenie w badaniach subiektywnych. Badania zrealizowano przy zastosowaniu procedury CCR (Comparison Category Rating), w której słuchacze dokonywali oceny wrażenia głębi badanych nagrań w porównaniu do próbki wzorcowej w siedmiostopniowej skali ocen (Brachmański 2015), przy czym ocena -3 oznaczała próbkę, o jakości dużo gorszej od wzorca, a +3 – jakość dużo lepszą od wzorca, zgodnie z zaleceniami ITU (ITU 1996). Taki sposób badania wprawdzie nie odzwierciedla rzeczywistych warunków odsłuchu materiału

dźwiękowego, gdziez reguły nie ma możliwości porównania sygnału z wzorcem, a wrażenie pojawia się wskutek działania określonych bodźców (Morawski 1985, Sobeski 1917), ale jest często stosowany do badań wybranych atrybutów dźwięku, ocenianych niezależnie od wrażenia całości (Kin 2013, Łętowski 1976). Sesje odsłuchowe przeprowadzono w studio odsłuchowym Katedry Akustyki i Multimediów Politechniki Wrocławskiej, zgodnie z zaleceniami, co do czasu ekspozycji sygnałów oraz przerw. Oceniano 10 próbek nagrań różnej stylistyki z zakresu muzyki poważnej – były to nagrania zrealizowane przez Autorów. Próbki zawierały muzykę zarówno solową (klawesyn, lutnia, organy i flet), jak też i nagrania zespołów wokalno-instrumentalnych. Sygnały zostały zakodowane zarówno przy zastosowaniu kodeków stratnych z różnymi przepływnościami, jak i poddanych kodowaniu bezstratnemu. Wrażenie zmiennej głębi nagrania uzyskano poprzez dozowanie różnej zawartości sygnałów pogłosowych w stosunku do dźwięków zarejestrowanych w polu bezpośrednim, co pozwoliło na naturalną kreację perspektywy, bez stosowania urządzeń do wytwarzania sztucznego pogłosu (Woszczyk 1990). Badano nagrania o optymalnej (przeważnie małej) zawartości warstwy pogłosowej w nagraniu, jak i nagrania „przepogłosowane", o znacznej zawartości warstwy pogłosowej, uzyskując tym samym wrażenie bardzo dużej głębi nagrania dźwiękowego.

- Wyniki

Na rysunku 5 przedstawiono uśrednione wyniki oceny wrażenia głębi nagrania dlabadanych kodeków orazdla wszystkich testowanych próbek o różnej zawartości sygnału pogłosowego.



Rys. 5. Wartości oceny porównawczej wrażenia głębi nagrania dla badanych kodeków, uśrednione dla wszystkich słuchaczy i wszystkich badanych próbek. a-duża zawartość pogłosu, b-optymalna zawartość pogłosu

Warto zaznaczyć, iż wartości odchylenia standardowego we wszystkich przypadkach nie przekraczały 20% wartości oceny, co może świadczyć o jednoznaczności percypowanych zmian w perspektywie badanych nagrań, jak też i o jednorodności grupy odsłuchowej.

Należy zwrócić uwagę na duże różnice w ocenie perspektywy obrazu dźwiękowego pomiędzy badanymi algorytmami kompresji stratnej przy przepływności 64 oraz 128 kbit/s: dla kodowania mp3 zaobserwowano największe pogorszenie jakości badanego atrybutu, natomiast kodowanie AAC wypadło wg. słuchaczy znacznie lepiej. Warto dodać, że najmniejsze, na poziomie błędu statystycznego, pogorszenie wrażenia głębi odnotowano dla próbek zakodowanych w formacie bezstratnym FLAC (nie zaprezentowano na wykresie). Dla każdego z algorytmów najmniejszą relatywnie zauważalność zmian perspektywy zaobserwowano dla nagrań posiadających optymalna (częstokroć małą) zawartość sygnałów pogłosowych; były one oceniane, jako bliższe oryginału, niż nagrania o dużej zawartości sygnałów pogłosowych, zawsze oceniane, jako gorsze. Powyższy fakt sugeruje, że dla sygnałów o mocno zmiennej strukturze czasowej i o uboższej strukturzewidmowej algorytm kodowania odgrywa mniejszą rolę, co odnotowano także wewcześniejszych badaniach (Lee, Horner 2010, Prygoń, Kin 2017a). Dla zmian w percepcji perspektywy sygnału możemy ponadto zaobserwowaćnastępującą zależność – dany kodek wpływa znacząco na zmiany w sygnałach muzycznych, redukując ich objętość informacyjną nawet o 80% oryginalnej zawartości, ale wpływ, na jakość atrybutów przestrzennych próbki dźwiękowej, gdzie dominuje śpiew czy efekty dźwiękowe, może być mniejszy. Istotne jest też sposób pierwotnego wykreowania wrażenia perspektywy nagrania dźwiękowego: mniejszezniekształcenie głębi w nagraniu powstałe wskutek kodowania percepcyjnego odnotowano w przypadku ujęcia pogłosu odpowiednią techniką mikrofonową (Huber, Runstein 2014), natomiast znacznym pogorszeniem wrażenia perspektywy wykazało się nagranie, w którym zastosowano efekt pogłosu hybrydowego, będącego połączeniem pogłosu naturalnego i bramkowanego (Kin, Prygoń 2018).

Oceny próbek po kompresji bezstratnej wydają się potwierdzać teorię, która mówi, iż w procesie takiego kodowania nie są usuwane żadne informacje, a tym samym, jakość dźwięku nie ulega degradacji. Natomiast rezultaty uzyskane dla sygnałów kodowanych percepcyjnie z przepływnością bitową 64 kbit/s dowodzą utraty niektórych informacji podczas kodowania (Brachmański, Dobrucki 2016). Wykrycie zmian dla przepływności większych bądź równych 128 kbit/s staje się coraz trudniejsze (Kin 2013). Porównując uzyskane wyniki z wcześniejszymi pracami (Kin, Chojnacka 2016, Prygoń, Kin 2017b) należy zaznaczyć, że niezwykle istotny zdaje się być wpływ warunków odsłuchowych

pomieszczenia oraz sprzętu odsłuchowego: nie wszystkie elementy obrazu słuchowego, którebyły wyraźnie percypowane przy odsłuchiwaniu na profesjonalnych monitorach, byłyby w równym stopniu percypowane w warunkach odsłuchu nieprofesjonalnego, co tłumaczy olbrzymią popularność kodowania stratnego w domowych systemach odsłuchowych.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można wnioskować, że zmiany słyszalne po kompresji mogą nie zachodzić w obrębie jakiegoś jednego parametru sceny dźwiękowej -często poszczególne atrybuty wrażenia słuchowego są ze sobą powiązane:jeśli zostało wykryte pogorszenie perspektywynagrania dźwiękowego, to również mogły zmienić się jego barwai/lub głośność (Prygoń, Kin 2017b), w myśl reguł percepcji i interpretacji bodźców złożonych (Morawski 1985). Często też dla przepływności 64 kbit/s odnotowano zwiększenie poziomu szumu zakodowanego nagrania oraz pojawienie sie dodatkowych artefaktów związanych z kodowaniem, w postaci dodatkowych składników, a wpływających negatywnie na ogólną ocenę estetyczną testowanego materiału.

4. Podsumowanie

Zniekształcenia perspektywy audio-wizualnej, objawiające się zmiennym wrażeniem głębi obrazu mogą powstać w wyniku redukcji objętości informacji oraz ze względu na sposób rzutowania przestrzeni. Dla sygnałów o bardziej złożonej strukturze czasowej oraz dla sygnałów o mniej skomplikowanym widmie otrzymano mniejsze pogorszenie wrażenia perspektywy nagrania wraz ze zmniejszeniem przepływności bitowej (a tym samym redukcją objętości informacji). Autorzy sugerują, że aby zachować wrażenie głębi nagrania należałoby stosować różną zawartość sygnałów pogłosowychodpowiedzialnych za wrażenie głębi, w zależności od medium, dla którego dane nagranie jest przygotowywane. Oznacza to konieczność wykonywania różnych wersji tego samego nagrania. Takie przygotowanie materiału dźwiękowego gwarantuje postrzeganie danego atrybutu na zbliżonym poziomie, niezależnie od warunków transmisji i medium, na jakim nagranie się ukazuje. Oczywiście, te warunki nie mogą się różnić diametralnie, można jednak założyć, że zmiana przepływności o 20% nie wpłynie znacząco na ocenę jakości nagrania, a w dobie coraz większej ilości przesyłanych informacji nie jest to bez znaczenia.

Podziękowania

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0139/17.

5. Literatura

Baltrusaitis J., 1984. Anamorphoses les perspectives depravees. Flammarion. Paris. 198-204.

Brachmański S., 2015. Wybrane zagadnienia oceny jakości transmisji sygnału mowy. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław. 73-79.

Brachmański S, Dobrucki A., 2016. Subiektywna ocena wpływu techniki kodowania na jakość sygnału muzycznego, Przegląd Telekomunikacyjny – *Wiadomości Telekomunikacyjne*. 6: 487-490.

Bregman A. S., 1990. Auditory scene analysis, MIT Press, Cambridge, MA, 595-607.

Huber D. M., Runstein R. E., 2014. Modern Recording Techniques, 8th Edition, Focal Press, 506-512.

ITU-T Recommendation P. 800, Methods for subjective determination of transmission quality, International Telecommunication Union, 1996.

Kin M.J., Plaskota P., 2011. Comparison of sound attributes of multichannel and mixed-down stereo recordings. *Archives of Acoustics*. 36 (2): 333-345.

Kin M., 2013. Subjective evaluation of sound quality of musical recordings transmitted via DAB+ system, 134th AES Convention, Roma. preprint 8874.

Kin M., Chojnacka J., 2016. Badanie wpływu zmian dynamiki sygnałów muzycznych na ocenę barwy dźwięku kodowanego percepcyjnie. *Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne*. 6: 344–347.

Kin M., Prygoń S., 2018. Wykorzystanie pogłosu bramkowanego w realizacji nagrań muzycznych, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe, Idea Knowledge Future, 151-159.

Lee C., Horner A., 2010. Discrimination of MP3-Compressed musical instrument tones, *Journal of Audio Engineering Society*. 58 (6): 487-497.

Łętowski T., 1976. Słuchowa ocena urządzeń elektroakustycznych, Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Radia i Telewizji. 56-57.

Morawski S., 1985. Na zakręcie: od sztuki do po-sztuki, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas. 2007. 169-181.

Pohlmann K. C., 2010. Principles of Digital Audio, McGraw-Hill Education TAB, 426-455.

Prygoń S., Kin M., 2017a. Badanie zauważalności zmian sceny dźwiękowej sygnałów poddanych różnym rodzajom kompresji, Mat. XVII Międzynarodowego Sympozjum Inżynierii i Reżyserii Dźwięku ISSET 2017. Warszawa.

Prygoń S., Kin M., 2017b. Ocena wybranych atrybutów sceny dźwiękowej sygnałów poddanych różnym rodzajom kompresji, [w]: Aspekty cyfrowej inżynierii dźwięku. Wrocław. PS AES - Jakopol. 47-55.

Rumsey F., 2017. Recording and reproduction. Studio myths and new technology. *Journal of Audio Engineering Society*. 65 (9): 776-780.

Sayood K., 2012. Introduction to Data Compression, (4th Edition), Elsevier, Waltham. MA., 569-590.

Sobeski M., 1917. Filozofia sztuki, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas. 2010. 96-98.

Woszczyk W., 1990. A new method for spatial enhancement in stereo and surround recording, AES 89th Convention, Los Angeles. preprint 2946.

Problem powodzi na obszarze Kotliny Kłodzkiej - propozycja działań ochronnych

Ewa Knap[(1)], Radosław Stodolak[(2)]

[1]Studenckie Koło Naukowe Hydrologów i Hydrotechników, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
[2]InstytutInżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Ewa Knap: ewa.m.knap@gmail.com
Radosław Stodolak: radoslaw.stodolak@upwr.edu.pl

Streszczenie
Jednym z najtrudniejszych działań, przed którymi stoi gospodarka wodna jest skuteczna ochrona przeciwpowodziowa. Dynamiczne zmiany sposobu zagospodarowania zlewni a także klimat, który jest w ciągłej fazie przeobrażeń, znacznie wpływają na kształtowanie się odpływu ze zlewni. Szczególny charakter wezbrań kształtuje się w zlewniach górskich, których układ topograficzny oraz wcześniej wspomniane zmiany determinują czas oraz przebieg wezbrań.
Głównym zadaniem pracy jest szczegółowa analiza wezbrań historycznych na obszarze Ziemi Kłodzkiej oraz przedstawienie działań z zakresu ochrony czynnej, których realizacja może znacznie wpłynąć na redukcję fal wezbraniowych. W tym celu przedstawiono propozycję zbiornika stale piętrzącego wodę, analizując fizjografię oraz hydrologię górnej części zlewni Nysy Kłodzkiej, jakoobszaru potencjalnie możliwego do wykorzystania pod lokalizację zbiornika.

Słowa kluczowe: zbiornik, powódź, ochrona przeciwpowodziowa, Kotlina Kłodzka

Flood problems in the area of Kotlina Kłodzka - proposal for protective measures

Summary
Since the beginning of its existence, water management has been faced with one of the most difficult tasks: flood protection. Dynamics changes in the management of the basin, as well as the climate, which is in a constant phase of transformation, significantly influence the formations of the outflow from the basin. The special character of the rising which is formed in the mountain basin, whose topographical arrangement and the previously mentioned changes, determine the time and course of the risings.
The main task of this article was a detailed analysis of historical risings in the area of KotlinaKłodzka, and the presentations of protective actions, the implementation of which may significantly contribute to the reduction of hypotheticalwaves. To that end, designed a water reservoir continuously accumulate water, analyzing the physiography and hydrology of the area. The work focuses on the Upper part of the Nysa Kłodzka basin.

Keywords: reservoir, flood, flood protection, KotlinaKłodzka

1. Wstęp

Człowiek od zarania dziejów zmaga się z niszczycielską działalnością wody. Pomimo upływu lat, rozwoju technologii i realizacji coraz bardziej nowatorskich projektów inżynierskich, problem ochrony przeciwpowodziowej nadal pozostaje nierozwiązany. Wynika to z faktu, iż zagadnienie ochrony przeciwpowodziowej jest wieloaspektowe i scala ze sobą wiele dziedzin nauk technicznych, jednocześnie mając na uwadze zrównoważony rozwój i dobro ogólne społeczeństwa i środowiska.

Szeroko pojęta inżynieria i gospodarka wodna znacząco wpływa, na jakość życia mieszkańców, w szczególności obszarów przyrzecznych. Wśród wielu zadań gospodarki wodnej takich jak kształtowanie, ochrona i racjonalne wykorzystywanie zasobów wodnych, utrzymanie śródlądowych dróg wodnych oraz wód powierzchniowych, jednym

z najważniejszych aspektów jest ochrona przeciwpowodziowa. Aktualnie zbiorniki wodne stanowią podstawowy element czynnej ochrony przeciwpowodziowej na całym świecie, a ich budowa znacznie przyczynia się do redukcji fal wezbraniowych.

Niniejszy artykuł ma na celu przybliżyć specyfikę ukształtowania Kotliny Kłodzkiej, charakter kształtujących się na jej obszarze wezbrań, a także zaprezentować propozycję działań ochronnych – koncepcję zbiornika stale piętrzącego wodę.

2. Rys historyczny

Rejon Kotliny Kłodzkiej jest jednym z najbardziej powodziogennych obszarów Polski (Radczuk, Tokarczyk 1999). Topografia zlewni oraz specyficzne ukształtowanie hydrowęzła Nysy Kłodzkiej, tworzą idealne warunki do formowania się wezbrań. Powodzie na tym obszarze mają charakter opadowo-roztopowy (Tokarczyk i in. 2011). Największą rzeką Kotliny Kłodzkiej jest Nysa Kłodzka. Rzeka ta swój początek bierze na zboczach Trójmorskiego Wierchu; posiada silne przewężenie w okolicach miasta Kłodzka (gardło pomiędzy Górą Forteczną i Owczą), a także w pobliżu Barda, gdzie tworzy malowniczy Przełom Bardzki.

Jak podają źródła historyczne, najbardziej dotkliwie wezbrania odczuwało miasto Kłodzko i to właśnie w dużej mierze na ochronie przeciwpowodziowej tego miasta skupiono się w XX wieku. W swej historii obszar Kotliny Kłodzkiej został dotknięty przez powódź ponad 50 razy. Pierwsze udokumentowane wzmianki o powodziach na obszarze Kotliny Kłodzkiej, pochodzą z XIV wieku. Ponadto wezbrania historyczne datuje się na lata 1441, 1474, 1500, 1522, 1524, 1570, 1587, 1598, 1702, 1736, 1740, 1763, 1773 (Łach 2009).

Jedna z największych, a zarazem najlepiej opisanych powodzi XX wieku, miała miejsce w roku 1997. Jej przyczyną był niż bałkański, który wywołał napływ gorących mas powietrza z nad Morza Śródziemnego i Czarnego w kierunku północnym. Styk ciepłego, morskiego powietrza z powietrzem chłodnym, bałtyckim był przyczynkiem do powstania obfitych opadów deszczu w dniach 3-10 lipca. 6 lipca miasto Kłodzko znalazło się pod wodą. Kulminacja fali nastąpiła w nocy z 7 na 8 lipca i osiągnęła wysokość ponad 8 metrów.

Jest to jeden z wielu epizodów powodziowych, jakie miały miejsce wprzeszłości na obszarze Kotliny Kłodzkiej, dlatego wykorzystując dotychczasowy zasób wiedzy i doświadczenia, należy kompleksowo podejść do tematu ochrony przeciwpowodziowej.

3. Opis i metodyka

Celem pracy jest przedstawienie koncepcji zbiornika stale piętrzącego wodę zlokalizowanego w górnej części zlewni Nysy Kłodzkiej. Zbiornik będzie miał za zadanie przechwycenie przepływów powodziowych, stanowiących zagrożenie dla miejscowości położonych poniżej

planowanej inwestycji, alimentowanie przepływów podczas trwania niżówek oraz gromadzenie wody do stosowania nawodnień. Ponadto budowa zbiornika pozytywnie wpłynie na warunki wodne gleb, położonych w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika, a także znacząco poprawi atrakcyjność regionu ze względu na funkcję rekreacyjną obiektu.

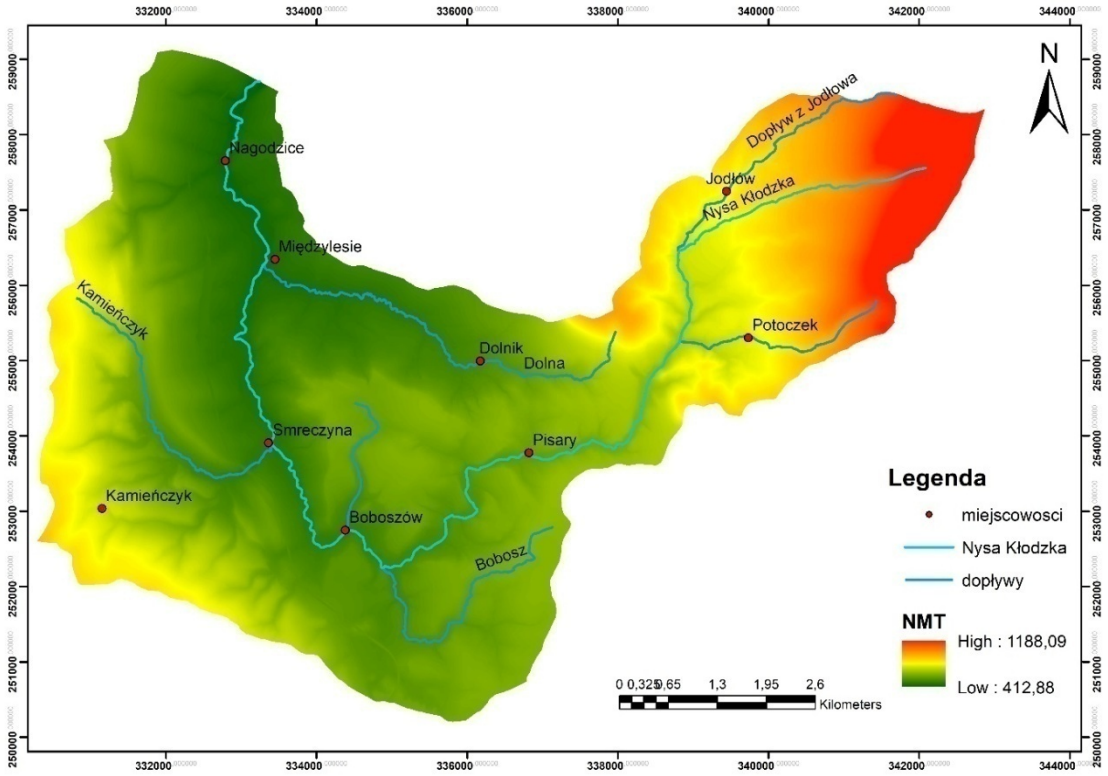
Administracyjnie rozpatrywana zlewnia od źródeł do przekroju obliczeniowego w km 169+140 rzeki Nysy Kłodzkiej, położona jest na terenie województwa dolnośląskiego, wpowiecie kłodzkim, w gminie Międzylesie. Z racji bliskości położenia przekroju projektowanej zapory, wszystkie obliczenia wykonano w oparciu o danehydrologiczne pozyskane dla wodowskazu Międzylesie.

Badania podzielono na dwa etapy: w pierwszym tzw. studialnym, dokonano wyboru lokalizacji projektowanej czaszy i zapory zbiornika na podstawie analizy dostępnych danych hydrologicznych, fizjograficznych oraz przyrodniczych. Drugi etap polegał na przeprowadzeniu obliczeń hydrologicznych i hydraulicznych oraz wykonaniu transformacji fali, w celu określenia efektywności działania zbiornika. Jako narzędzie wspomagające prace projektowe wykorzystano oprogramowanie ArcGIS 10.1.

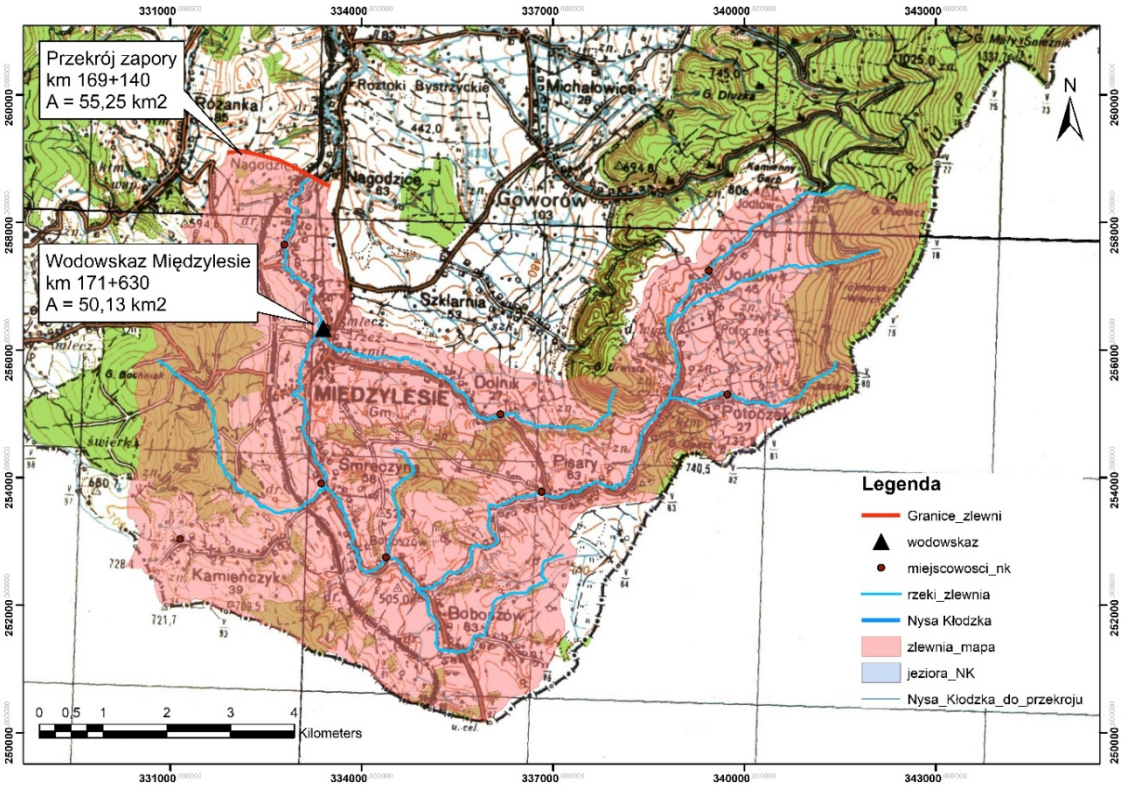
4. Opis obszaru badawczego

Nysa Kłodzka jest rzeką II rzędu, znajdującą się w regionie wodnym środkowej Odry. Recypientem Nysy Kłodzkiej jest rzeka Odra, do której Nysa uchodzi w km 579+ 250. Źródła Nysy Kłodzkiej znajdują się w Masywie Śnieżnika – na zboczach Trójmorskiego Wierchu, na wysokości 977,28 m n.p.m. Rzeka płynie Rowem Górnej Nysy w kierunku południowo-zachodnim. W pobliżu miejscowości Boboszów, zmienia swój kierunek i płynie na północ, gdzie wcina się w Kotlinę Kłodzką. W okolicach miejscowości Bardo wydostaje się z Kotliny Kłodzkiej i płynie w kierunku wschodnim. Od miejscowości Nysa, rzeka kolejny raz zmienia swój przebieg i płynie w kierunku północno-wschodnim. Nysa Kłodzka uchodzi do Odry w okolicach miejscowości Rybna. Administracyjnie rzeka przepływa przez województwa dolnośląskie oraz opolskie.

Obszar opracowania obejmuje zlewnię Nysy Kłodzkiej od źródeł do km 169 + 140 (przekrój Nagodzice). Zlewnia do rozpatrywanego przekroju nie posiada obecnie zbiorników wodnych. Jej obszar ograniczony jest od południa granicą państwa, od zachodu zlewniami rzek Czerwony Strumień oraz Jelonka, od północy zlewnią rzeki Różanka, od wschoduzlewnią rzeki Szklarka. Położenie zlewni prezentuje rys. 1, a jej ukształtowanie rys. 2. rzeki



Rys. 1 Położenie zlewni obliczeniowej do przekroju zamykającego w km 169 + 140



Rys. 1 Mapa hipsometryczna prezentująca ukształtowanie zlewni Nysy Kłodzkiej do przekroju projektowanej zapory

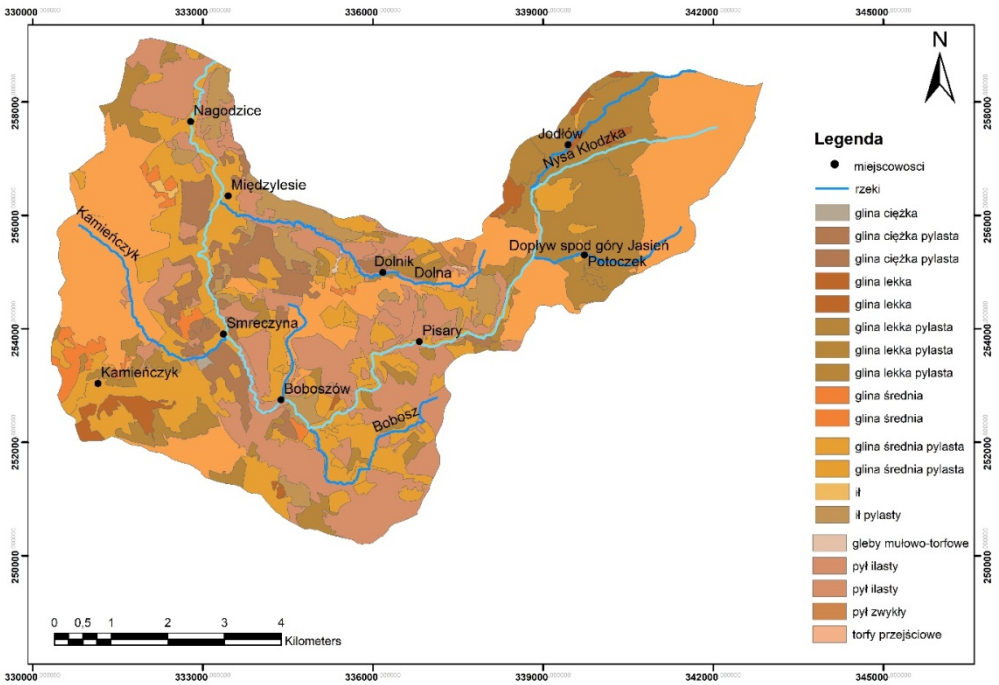
Podstawowe charakterystyki fizyczno-geograficzne zlewni oraz sieci rzecznej zestawiono w tab. 1.

Tabela 4 Podstawowe charakterystyki fizyczno-geograficzne zlewni oraz sieci rzecznej

Wysokość maksymalna zlewni	1117,00 m n. p. m.
Wysokość maksymalna działu wód	977,28 m n. p. m.
Wysokość minimalna zlewni	412,91 m n. p. m.
Wysokość minimalna działu wód	414,00 m n. p. m.
Wysokość średnia zlewni	764,96 m n. p. m.
Spadek średni zlewni	9,47 %
Długość rzeki	20,44 km
Spadek rzeki	2,76 %

Zlewnia Nysy Kłodzkiej do rozpatrywanego przekroju w przeważającej części pokryta jest lasami (35% powierzchni) oraz gruntami ornymi (54% powierzchni). Według podziału Matuszkiewicza (Matuszkiewicz 2008), rozpatrywany obszar zalicza się do dwóch podkrain: Zachodniosudeckiej oraz Wschodniosudeckiej. Formacje leśne występujące na obszarze zlewni to głównie grąd środkowoeuropejski, górnoreglowa świerczyna sudecka i żyzne buczyny sudeckie. W pobliżu cieków występują podgórskie łęgi jesionowe oraz nadrzeczne olszyny górskie, które należą do lasów wilgotnych.Ponadto na obszarze zlewni znajduje się obszar Natura 2000 – Góry Bialskie i Grupa Śnieżnika, o powierzchni 13,61 km^2 (25% powierzchni zlewni), który swoją powierzchnią pokrywa się ze Śnieżnickim Parkiem Krajobrazowym.

Podłoże mezoregionu Kotlina Kłodzka, zbudowane jest ze skał magmowych i metamorficznych ery paleozoicznej. Część podłoża wytworzyła się z dolnośląskich piaskowców czerwonych, przykryte zaś jest piaskami, żwirami, iłami, glinami i lessami ery kenozoicznej (Kondracki 2009). Budowę geologiczną zlewni prezentuje rys. 3



Rys. 2. Budowa geologiczna zlewni Nysy Kłodzkiej

Według podziału dokonanego przez Koppena i Geigera (Koppen 1918) obszar objęty opracowaniem zaliczany jest do klimatu wilgotnego kontynentalnego (Dfb) z łagodnym latem. Ze względu na wysokie zróżnicowanie topograficzne, jaki położenie nad poziomem morza, odnotowuje się znaczne ilości opadów atmosferycznych. Na obszarze zlewni Nysy Kłodzkiej do przekroju obliczeniowego, zlokalizowany jest jeden posterunek meteorologiczny w miejscowości Międzylesie. Średnioroczna temperatura wynosi 7,1°C. Roczna suma opadów wynosi 890 mm. Najsuchszym i najchłodniejszym miesiącem jest styczeń z sumą opadów około 25 mm oraz średnią temperaturą -3,2 °C. Najcieplejszym miesiącem jest lipiec ze średnią temperaturą 16,1 C i jest on jednocześnie miesiącem, w którym odnotowuje się najwyższa sumę opadów.

5. Rozwiązania projektowe dla wybranej lokalizacji planowanego zbiornika

W oparciu o dane udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB Oddział we Wrocławiu, obliczono podstawowe charakterystyki hydrologiczne. Przepływ nienaruszalny obliczono wg wzoru Kostrzewy, jako iloczyn średniego przepływu niskiego oraz współczynnika k, który został dobrany zgodnie z typem hydrologicznym rzeki (Depczyński, Szamowski 1999):

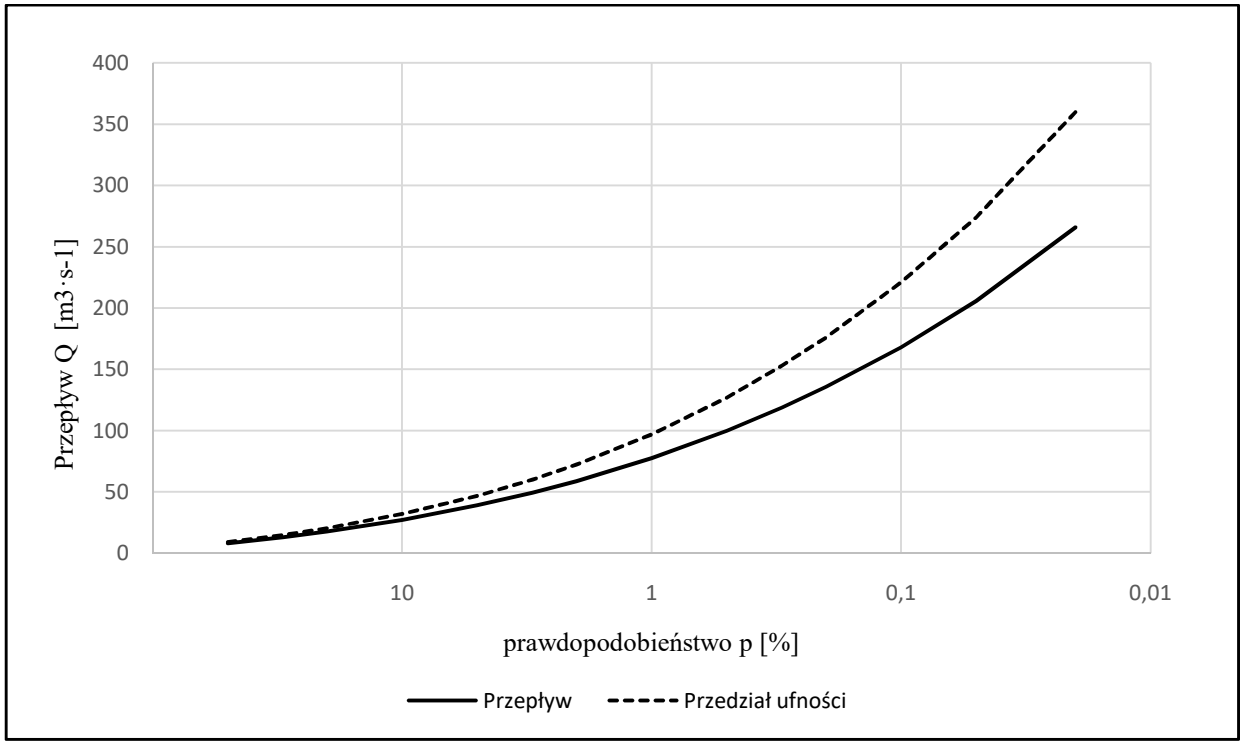
$$Q_n = k \cdot SNQ = 1{,}52 \cdot 0{,}12 = 0{,}18\ m^3 \cdot s^{-1}$$

Zestawiono również przepływy maksymalne o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia (tab. 2, rys. 4) oraz ich wartości powiększone o przedział ufności na poziomie $\alpha = 0{,}84$, stosownie do zapisów Rozporządzenia Ministra Środowiska(Rozporządzenie… 2007).

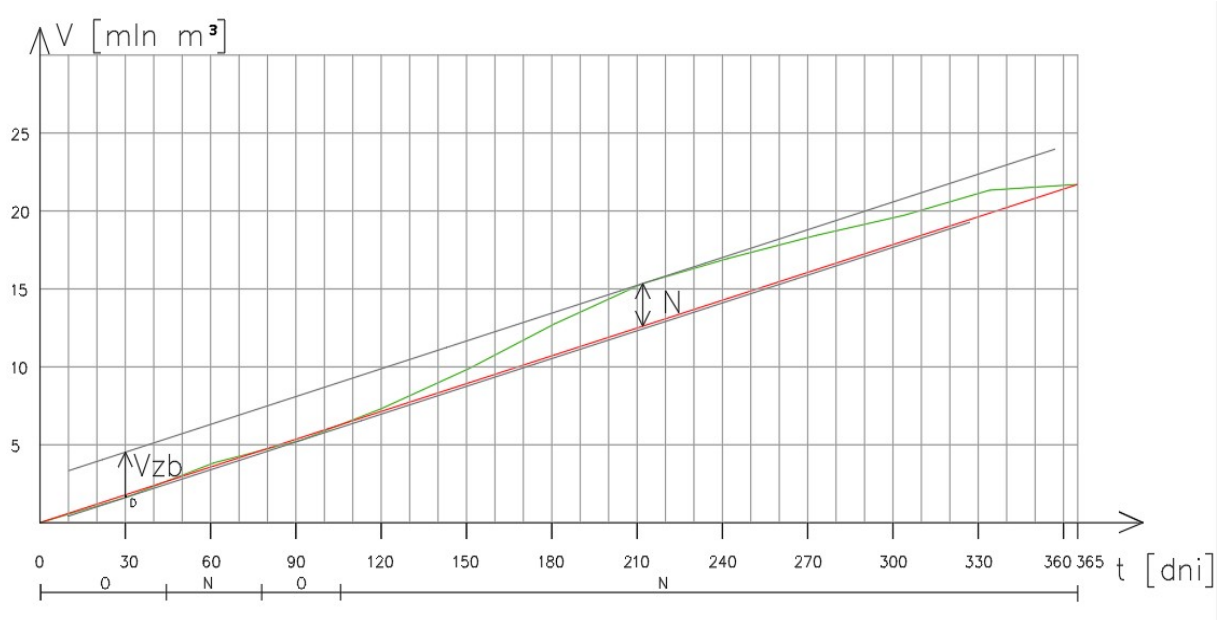
Tabela 5Przepływy maksymalne o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia

p [%]	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10	20	30	50
Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	266	206	168	136	119	99,9	77,6	59	49,6	39,2	27,4	17,9	13,3	8,25
Q_α [$m^3 \cdot s^{-1}$]	360	274	221	176	153	127	97	72,4	60,2	46,9	32,1	20,5	15	9,18

Niezbędnym narzędziem wspomagającym projektowanie hydrologicznych podstaw gospodarki wodnej na zbiorniku jest krzywa sumowa odpływu. Konstruuje się ją, nanosząc na układ współrzędnych sumowane objętości odpływu w wieloleciu (Byczkowski 2003). Objętość zbiornika wyznacza się jako największą różnicę między sumarycznym odpływem, a dopływem do zbiornika. Na podstawie przepływów średnich dziennych oraz ich rozkładów sporządzono krzywą sumową odpływu (rys. 5), dzięki której obliczono objętość projektowanego zbiornika, która wynosi 2,91 mln m^3.



Rys. 3.Przepływy maksymalne o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia



Rys. 4. Krzywa sumowa odpływu w układzie prostokątnym dla przekroju projektowanego zbiornika na Nysie Kłodzkiej.

Wykorzystano także krzywą pojemności oraz krzywą powierzchni zalewu w funkcji potencjalnej rzędnej piętrzenia wody w zbiorniku, które stanowią podstawowe charakterystyki morfologiczne czaszy zbiornika. Krzywe określono przy wykorzystaniu programu ArcGIS 10.1 w oparciu o numeryczny model terenu.

Klasę budowli hydrotechnicznej przyjęto w oparciu o załącznik nr 2 Rozporządzenia (Rozporządzenie... 2007), które definiuje, iż klasa budowli hydrotechnicznej stale piętrzącej

wodęzależy od wysokości piętrzenia, pojemność zbiornika, wielkości obszaru zatopionego przez falę powstałą przy normalnym poziomie piętrzeniaoraz ilości ludności, która uległaby zatopieniu w wyniku awarii obiektu. Celem weryfikacji narzuconych przez rozporządzenie warunków, wykonano obliczenia hydrologiczne, zaprojektowano zaporę ziemną oraz przeanalizowano mapy ryzyka i zagrożenia powodziowego dla obszaru zlewni Nysy Kłodzkiej od źródeł do przekroju obliczeniowego. Dla pojemności 2,91 mln m^3, którą uzyskano z krzywej sumowej odpływu, odczytano z krzywej pojemności wysokość piętrzenia równą 15,5 m.

Opierając się na tych wynikach, przyjęto II klasę ważności budowli dla projektowanego zbiornika Nagodzice.

Przepływ miarodajny i kontrolny przyjęto w oparciu o Rozporządzenie (Rozporządzenie… 2007). Zgodnie z powyższym przepływ kontrolny powiększono o błąd oszacowania przyjmowany dla rzek i potoków górskich przy uwzględnieniu przedziału ufności na poziomie α=0,84. Przepływ dozwolony charakteryzowany jest, jako taki, który poniżej obiektu nie powoduje powstania strat. W związku z tym jego prawdopodobieństwo zostało określone na 10%. Zestawione założenia projektoweprezentuje tab. 5.

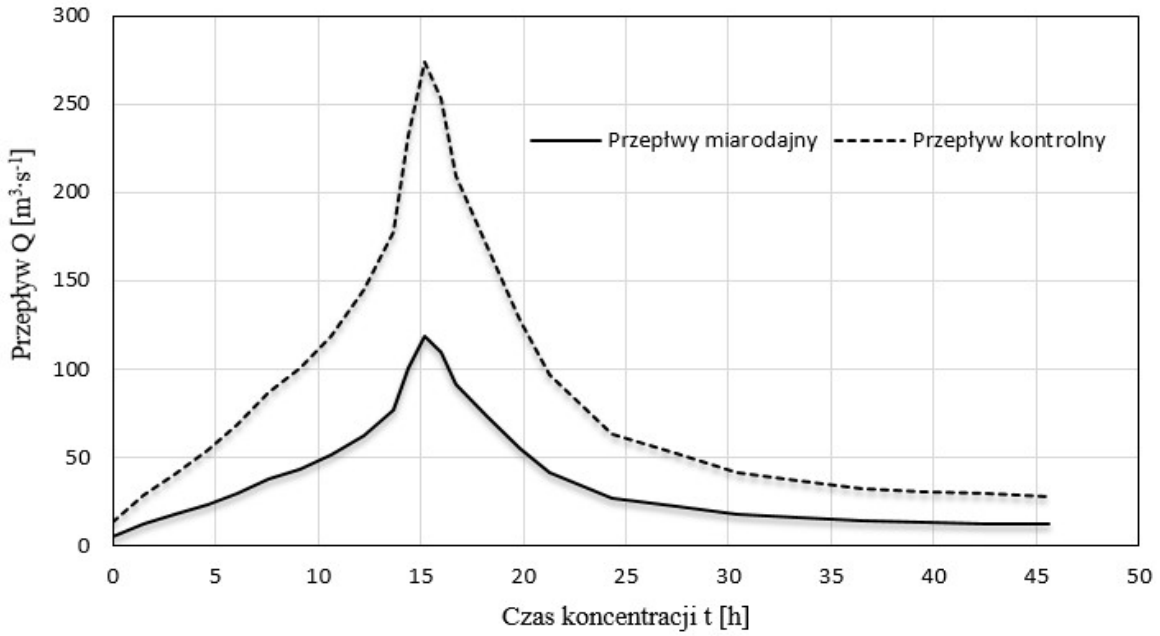
Tabela 6. Zestawienie przepływów charakterystycznych

Przepływ	Prawdopodobieństwo przepływu	
	[%]	[$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q kontrolny	0,05	274,00
Q miarodajny	0,3	119,00
Q dozwolony	10	27,40

Kolejnym elementem niezbędnym do projektowania zbiornika jest przyjęcie wielkości i kształtu hydrogramów obliczeniowych. Jak podaje Gądek (2012) przez wezbranie hipotetyczne rozumie się teoretyczny hydrogram przepływu, który przedstawia typowy przebieg fali wezbraniowej, jaki może wystąpić w określonych warunkach, w wybranym miejscu dla zadanej wartości przepływu maksymalnego.

Jedną z najczęściej stosowanych metod do sporządzeniahydrogramu fali hipotetycznej dlazlewni kontrolowanych jest metoda Politechniki Warszawskiej.Podstawą sporządzenia hydrogramu według założeń tej metody jest zarejestrowanie minimum 6 dużych wezbrań o charakterze jednomodalnym. Hydrogram hipotetycznej fali miarodajnej (rys. 6) dla prawdopodobieństwa wystąpienia 0,3% sporządzono na zasadzie interpolacji pomiędzy falą 0,2% i 1%, jednocześnie zachowując przepływ w momencie kulminacji, wynoszący

119 $m^3 \cdot s^{-1}$. Hydrogram fali kontrolnej(rys. 6) sporządzono na zasadzie odwzorowania, zachowując przepływ kulminacyjny wynoszący 274 $m^3 \cdot s^{-1}$.



Rys. 5. Hydrogramy hipotetycznych fal wezbraniowych

Racjonalne gospodarowanie wodą na zbiorniku retencyjnym wymusza regulowanie przepływu wody przez budowle hydrotechniczne. Służą temu przelewu powierzchniowe oraz upusty denne (Sobota 2003). Projektując urządzenia upustowe należy pamiętać o tym, żeby zagwarantować bezpieczne przeprowadzenie przez nie wód powodziowych.

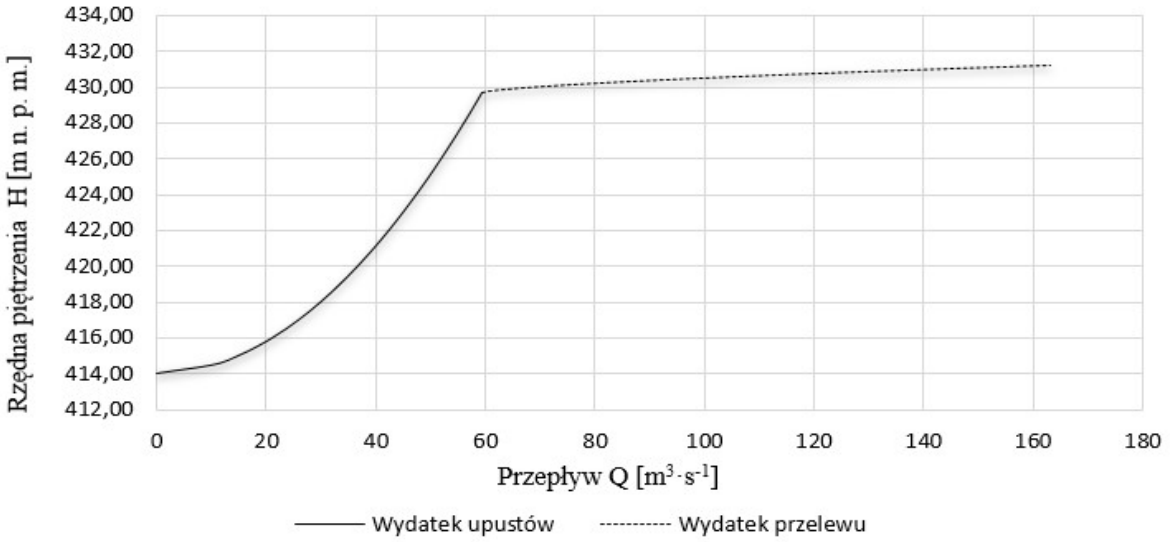
Upust denny zaprojektowano na 20 % przepływu miarodajnego, który wynosi 119 $m^3 \cdot s^{-1}$. Zaprojektowano 2 przewody o średnicy 500 mm oraz jeden przewód awaryjny o średnicy 1000 mm. Zaleca się zabezpieczyć wloty do upustów kratami o odpowiednich prześwitach, dzięki którym do wnętrza upustów nie dostaną się zanieczyszczenia niesione przez wodę. Całkowity wydatek upustu dennego wynosi:

$$\Sigma Q_u = 20\%\ Q_m = 20\% \cdot 119{,}00 = 23{,}80\ m^3 \cdot s^{-1}$$

Przelew czołowy o kształtach praktycznych zaprojektowano na 80% przepływu miarodajnego, który wynosi:

$$Q_p = 80\% \cdot Q_m = 75\% \cdot 119{,}00 = 95{,}20\ m^3 \cdot s^{-1}$$

Łączny wydatek wszystkich urządzeń zrzutowych, w odniesieniu do poziomu piętrzenia wody na zbiorniku obrazuje rys. 7.



Rys. 6. Sumaryczny wydatek urządzeń zrzutowych zbiornika

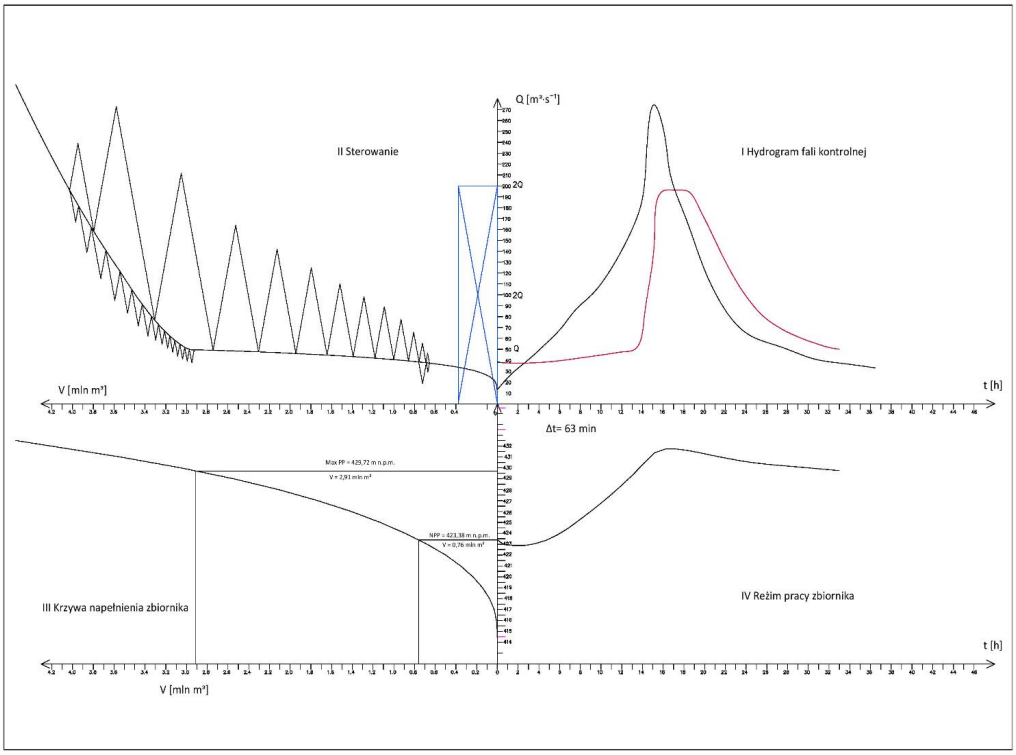
Zbiorniki retencyjne mają za zadanie między innymi wyrównanie przepływów rzecznych. W celu racjonalnego gospodarowania wodą na zbiorniku, obliczono charakterystyczne pojemności zbiornika oraz poziomy piętrzenia.

Warunki przepuszczania fal hipotetycznych zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. -Dział V, rozdział 8. Wykonano transformacje fal wezbraniowych metodą Sorensena (Dziewoński 1968), dzięki czemu określono, na jakim poziomie zbiornik redukuje falę wezbraniową, a tym samym uzasadniono celowość budowy zbiornika.

Stwierdzono zniwelowanie natężenia przepływu maksymalnego dla fali miarodajnej w momencie kulminacji ze 119,00 $m^3 \cdot s^{-1}$ do 25,50$m^3 \cdot s^{-1}$. Maksymalna wysokość piętrzenia na zbiorniku w momencie przejścia fali miarodajnej wynosi 429,72 m n.p. m. i zajmuje pojemność zbiornika wynoszącą 2,91 mln m^3. Kulminacja hipotetycznej fali kontrolnej w momencie przejścia przez przekrój zapory zbiornikazostała obniżona z 274,00 $m^3 \cdot s^{-1}$ do 196,10 $m^3 \cdot s^{-1}$(rys. 8). Wyznaczony na podstawie transformacji fali kontrolnej nadzwyczajny poziom piętrzenia wynosi 431,22 m n.p.m. i zajmuje pojemność zbiornika równą 3,78 mln m^3.Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 6.

Tabela 7. Charakterystyczne poziomy piętrzenia i odpowiadające im pojemności zbiornika

Pojemności [mln m^3]			
martwa (V_m)	użytkowa (V_u)	powodziowa stała (V_{ps})	powodziowa forsowana (V_{ps})
0,08	0,68	2,15	3,78
Poziom piętrzenia [m n.p.m.]			
minimalny (MinPP)	normalny (NPP)	maksymalny (MaxPP)	nadzwyczajny (NadPP)
418,06	423,38	429,72	431,22



Rys. 8 Transformacja fali kontrolnej metodą Sorensena

Według załącznika nr 6 Rozporządzenia (Rozporządzenie… 2007), określono bezpieczne wzniesienie korony budowli piętrzącej powyżej maksymalnego poziomu wód, któredla II klasy zapór ziemnych wynosi 1,50 m oraz 0,3 m nad NadPP. Ostatecznie zastosowano wartość większą, przy której rzędna korony zapory położona jest na wysokości 432,72 m n.p.m.

6. Podsumowanie i wnioski

Celem pracy było zaprezentowanie koncepcji zbiornika stale piętrzącego wodę, zlokalizowanego na rzece Nysa Kłodzka. Poprawne zrealizowanie tego zagadnienia wymagało połączenia wiedzy z różnych dziedzin nauki, tj. hydrologia, hydraulika czy geotechnika.

Przestudiowanie udostępnionych materiałów pozwoliło na wykonanie obliczeń hydrologicznych i hydraulicznych stanowiących podwaliny celowej gospodarki wodnej na zbiorniku. Dzięki temu można było określić podstawowe parametry zbiornika. Wykonując wykresy transformacji fali dla przepływu miarodajnego i kontrolnego stwierdzono, że fala powodziowa w obu przypadkach została znacząco zredukowana. Maksymalny przepływ odpowiadający przepływowi miarodajnemu ($Q_{0,3\%}$) został obniżony o 78,5%, zaś przepływ kontrolny ($Q_{0,05\%}$) o ponad 28,4%. Wskazuje to na dużą efektywność proponowanego rozwiązania. Przeprowadzona transformacja fal na zbiorniku pozwoliła określić przesunięcie

czasowe momentu kulminacji, które wynosi około 4 godzin. Oznacza to, że czas koncentracji uległ wydłużeniu, co dla zlewni rzek górskich reagujących bardzo szybko na intensywny opad jest dodatkowym atutem pozwalającym opóźnić odpływ ze zlewni.

W związku z powyższym stwierdza się, iż idea budowy zbiornika w określonej lokalizacji jest słuszna. Zaleca się wykonanie dodatkowych wariantów sterowania urządzeniami spustowymi, zakładając ich niepełne otwarcie. W celu pełnej analizy bloku zrzutowego zbiornika zaleca się wykonanie badań modelowych, które w bezpośredni sposób zobrazują pracę zbiornika i pozwolą wybrać wariant najbardziej optymalny.

7. Literatura

Byczkowski A., 1999. Hydrologia, Warszawa: Wydawnictwo SGGW, Wydanie II poprawione i uzupełnione.

Depczyński W., Szamowski A., 1999. Budowle i zbiorniki wodne, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Dziewoński Z., 1968. Zbiorniki rolnicze część I, Wrocław: Skrypty Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu.

Gądek W., 2012. Wyznaczanie wezbrań hipotetycznych metodą Politechniki Warszawskiej i metodą Politechniki Krakowskiej w zlewniach kontrolowanych – część I – opis metod, Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, zeszyt 23.

Kondracki J., 2009. Geografia regionalna Polski, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN

Łach, J., 2009. Historia wezbrań powodziowych na Ziemi Kłodzkiej i ich wpływ na kierunek przekształceń den dolinnych Nysy Kłodzkiej i Białej Lądeckiej. Nauka *Przyroda Technologie*, 3(3), 93.

Matuszkiewicz J. M., 2008. Zespoły leśne Polski Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN

Radczuk L., Tokarczyk T., 1999. Ochrona przeciwpowodziowa Ziemi Kłodzkiej *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, nr 339: 159- 168.

Sobota J., 2003. Hydraulika i mechanika płynów, Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wydanie II

Tokarczyk T., Olearczyk D., 2011. Krótka charakterystyka dziejów zagrożenia powodziowego na terenie obecnego powiatu kłodzkiego", http://www.powiat.klodzko.pl/ochrona-przeciwpowodziowa/o-powodzi-na-ziemi-klodzkiej/

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim

Ustawa Prawo Wodne z dnia z dnia 20 lipca 2017 r.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie

The antibioticresistance: beta-lactamases

Marta Kolonko[(1)]

[1]Zakład Biochemii, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska
Marta Kolonko: marta.kolonko@pwr.edu.pl

Summary
The current era of antibiotics has begun in 1928 with discovery of penicillin by Alexander Flaming. Since then, antibiotics have evolved and made it possible to save millions of lives. Simultaneously with the discovery of new beta-lactam antibiotics, the resistance to nearly all drugs has become a serious clinical issue. Bacteria have adapted to new class of antimicrobial compounds and developed a variety of strategies to neutralize the threat. One of the most effective defense strategy is the production of enzymes modifying the beta-lactamase class of compounds. These enzymes, beta-lactamases, catalyze the hydrolysis of the amide bond in the beta-lactam ring to produce a beta-amino acid, lacking the bactericidal properties. The presence ofthe serine residue or metal ionin the active site is essential for the activity of these enzymes. Currently, proteins from IMP metallo-lactamase family, responsible for providing resistance to imipenem and its derivatives, are one of the most problematic cases. Considering the importance and clinical aspects of this topic, understanding of the structural features affecting enzyme activity and substrate specificity will have a major impact onthe development of effective beta-lactamases inhibitors.

Keywords: antibiotics resistance, beta-lactamases, IMP

Atybiotykooporność: beta-laktamazy

Streszczenie
Obecną erę antybiotyków zapoczątkowało odkrycie penicyliny Alexandra Flaming w 1928 roku. Od tego czasu nastąpił znaczny rozwój antybiotyków, które szybko opanowały medycynę i pozwoliły na ocalenie życia milionów. Równocześnie z opracowaniem nowych struktur związków przeciwdrobnoustrojowych, poważnym problemem klinicznym stała się odporność bakterii na niemal wszystkie dostępne leki. Bakterie zaadaptowały się doobecnośc inowych cząsteczek i opracowały szereg strategii neutralizacji zagrożenia. Jedną z najskuteczniejszych strategii jest produkcja enzymów modyfikujących klasę związków beta-laktamowych. Enzymy te (beta-laktamazy) katalizują reakcję hydrolizy wiązania amidowego w pierścieniu beta-laktamowym z wytworzeniem beta-aminokwasu, pozbawionego właściwości bakteriobójczych. Kluczowe dla reakcji jest występowanie w miejscu aktywnym enzymu reszty seryny bądź jonu metalu, najczęściej cynku (metallo-beta-laktamazy). Obecnie, jedną z najgroźniejszych rodzin metallo-laktamazsą białka IMP, zapewniające oporność na imipenem i jego pochodne. Mając pod uwadze znaczenie i kliniczne aspekty omawianego zagadnienia, zrozumienie cech strukturalnych warunkujących aktywność i swoistość enzymów będzie miało istotny wpływ na rozwój skutecznych inhibitorów beta-laktamaz.

Słowa kluczowe: antybiotykooporność, beta-laktamazy, IMP

1. Intoduction

- The history of antibiotics

The current era of antibiotics has begun in 1928 with discovery of penicillin by Alexander Flaming (Sengupta et al. 2013). Since then, antibiotics have evolved and made it possible to save millions of lives.The first recorded case of prescribing antibiotics to treat severe infections dates back to the 1940s (Centers for Disease Control and Prevention 2013).However, shortly after that, the resistance to penicillin has become a serious clinical problem. In response, during the 1960s, high number ofnew beta-lactam antibiotics were discovered and developed (Sengupta et al. 2013).

Nowadays the resistance to nearly all clinical relevantantibiotics has been reported (Centers for Disease Control and Prevention 2013). From the late 1960s to the early 1980s, the pharmaceutical industry was constantly introducing new generic antibiotics, eliminating the raising problem of antimicrobial resistance. However, the resourcesof creating new, active compounds ended soon. As a result, since 2015, many decades after the first caseof patients cured with antibiotics, the bacterial infection has become a life-threatening problem again (Spellberg and Gilbert 2014).

Antibiotics have not only helped to save patients' lives, buthave been alsoinvolvedin evolutionof medicine, especially surgical interventions (Ventola 2015). Antibiotics have been successfully used in both prevention and therapy of infections in patients during chemotherapy or being chronically ill (i.e. diabetes or rheumatoid arthritis). Moreover, antibiotics were administered prophylactically tothe patients who have had complex treatment slike organ transplantations, joint replacements, or cardiac surgery, preventing them from life-threatening infections (Gould and Bal 2013).

Antibiotics have extended the expected life spans worldwide. Additionally, in developing countries where sanitation is still at low level, antibiotics reduced morbidity and mortality caused by alack of hygiene (D'Costa et al. 2011).

- Causes of the antibiotic resistance

To understand the problem of antibiotic resistance, it is important to mention the fact that antimicrobial resistance is ancient.Most antimicrobial agentsare naturally-produced molecules. Bacteria, coexisting with other organisms producing antibiotics in the same niche of environment, have been forced to evolveto overcome deadly effects of the naturally produced substances (Munita and Arias 2016). These organisms are often considered to be ‘intrinsically’ resistant to one or more antibiotic. However, in the topic of antimicrobial agents resistance, the majorproblem is arise from the bacteria showing ‘acquired resistance’, originally sensitive to the antimicrobial compound. Development of acquired resistance can be caused by several factors, including gene mutations or acquisition of external gene from other resistant organism (Munita and Arias 2016).

2. Basis of resistance acquisition

Bacteria are characterized by high genetic plasticity. It allows them to respond to a broadrange of environmental threats, also the presence of antimicrobial molecules. Bacteria use two major genetic strategies to become resistant: mutations in gene(s) encoding proteins involved in the mechanism of molecule action, or acquisition of external DNA fragment sencoding the resistance to specific classes of compounds (Munita and Arias 2016).

In the first strategy, a subset of bacterial cells sensitive to the drug, develops mutations in the genes to inhibit the antibiotic action (Munita and Arias 2016). Administration of an antibiotic results in the elimination of susceptible bacteria and survival of resistant cells containing mutated genes. Genetic modifications mainly aim at the enzymatic drug decomposition, reduction of the affinity for the drug (modifications of the antimicrobial target structure), decrease of the efficiency of drug uptake, active drug excretion or changes in the metabolic pathways. The range of techniques used by bacteria to fight with the danger is diverse and very complex (Munita and Arias 2016).

The second strategy involves a direct up take of DNA material encoding components responsible for antibiotic resistance. It is one of the most important factors responsible for bacterial evolution and development of drug resistance. Typically, bacteria can acquire external DNA in three main ways: transformation, transduction and conjugation. The transformation, including incorporation of the naked DNA molecule is extremely rare, since a small number of bacterial strains is able to uptake such DNA. In the hospital environment, the conjugation is most common. It is efficient method of gene transfer, involving direct cell-to-cell contact. It likely occurs in the gastrointestinal tract of humans during antibiotic treatment. The connected cells use mobile genetic elements (MGEs, plasmids and transposons) as carriers to share genetic information. Also direct transfer between two chromosomes has been reported (Manson et al. 2010).

Finally, one of the most interesting mechanisms for acquisition of resistance proceeds viaintegrons, which aregenetic elements capable of incorporating additional genes as a result of localized recombination. During recombination, new gene is attached along with the necessary machinery to ensure their efficient expression (Thomas and Nielsen 2005).

3. Basis of the resistance mechanism

It is important to note, that the resistance to one antibiotic class can be achieved via multiple biochemical pathways: each bacteriais capable to use different strategies to neutralize antibiotic. On the other hand, bacterial species exhibit preferences for most efficient mechanism of resistance. Good example can be the mechanism of resistance to beta-lactams. Gram-negative bacteria prefer production of beta-lactamases damaging the drug molecule, while gram-positive bacteria modify thetarget of the antibioticaction - penicillin-binding proteins (PBPs).Such a different choice of strategy is caused by a major distinctionin the cell envelope between gram-negatives and gram-positives (Munita and Arias 2016).

The classification of the antibiotic resistance mechanisms refers to the biochemical pathways such as:

1) Modification of the antimicrobial molecule: production of enzymes inactivating the drug by adding chemical moieties (acetylation, phosphorylation, adenylation) or decomposition of drug molecule (Wilson 2014).

2) Decrease in the antibiotic penetration and active efflux: decreased permeability of membranes, regulation of porins expression, production of - efflux pumps (Poole 2005, Nikaido 2003).

3) Changes in drug target site - decrease ofthe affinity for the antibiotic molecule: mutations in the genes encoding the target protein (or protein subunits, target site), enzymatic alteration of the target site, complete replacement or bypass of the target site (Munita and Arias 2016).

4) Global cell adaptive processes - active modification of the cell metabolism.

4. Beta-lactam antibiotics

The beta-lactam antibiotics constitute one of the oldest and most effective classes of anti-bacterial agents used for the treatment of almost all types of infections (Malcolm 2012). Al though they can be subclassified into penicillin, cephalosporin, carbapenem and monobactam subclasses, all possessa beta-lactam ring (Fig. 1) (Kuriyama et al. 2014).

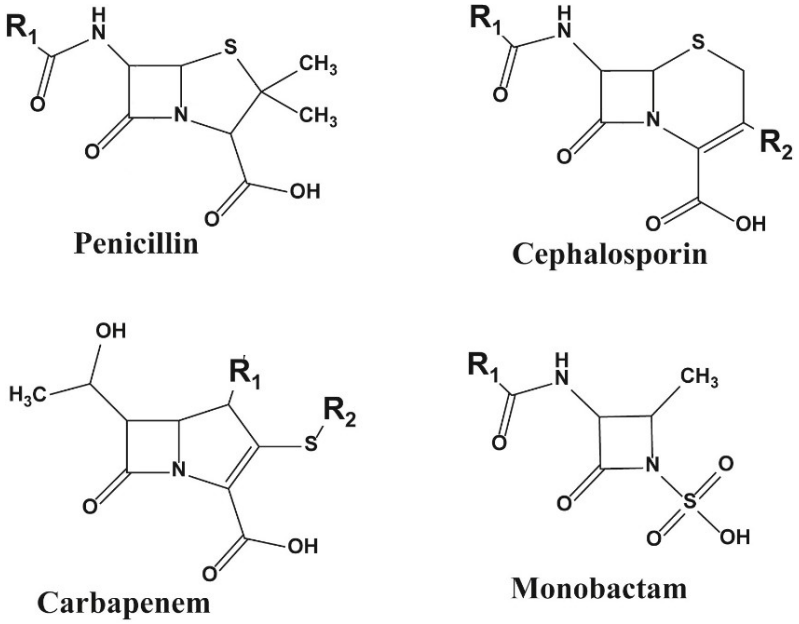


Fig. 1. Beta-lactam antibiotics(based on Zagursky R.J. 2017).

Beta-lactams are known to interfere with bacterial cell wall assembly mechanism (Tipper and Strominger 1965). The cell wall is a polysaccharide structure, surrounding most of the bacterial cells and protecting them from internal turgor pressure. It is composedof apolysaccharide chains (poliglycan) crosslinked by peptides (tetrapeptides containing D-amino acids) organized into polymer structure called polymer peptidoglycan (PG). Beta-

lactams disrupt PG biogenesis by inactivating enzymes called penicillin-binding proteins (PBPs) (Tipper and Strominger 1965). Bacteria encode different types of PBPs, including bifunctional enzymes possessing glycosyltransferase (GT) (glycan polymerization) and transpeptidase (TP) activity (poliglycan crosslink). The key target of the beta-lactams is the TP active site, covalently modified by the antibiotic (Cho et al. 2014). As a result of crosslinking blockade, the balance between wall synthases and hydrolases is disrupted. It causes the loss of the cell wall integrity and cell lysis (Cho et al. 2014).

5. Resistance to beta-lactams

The main mechanism of beta-lactam antibiotics resistance is based on the drug molecule destruction. Enzymes known as beta-lactamasescatalyze the hydrolysis of the beta-lactam ring amide bond, to produce the corresponding beta-aminoacid devoid of antibacterial activity (Concha et al. 2000).

Although evidence suggest existence of beta-lactamasesfor millions of years (D'Costa et al. 2011), the resistance is a problem since penicillin became widely available and used. The mechanism of resistance was found to be a plasmid-encoded enzyme (penicillinase), quickly transferred from resistant to antibiotic-sensitive strains. To solve this problem, new derivatives of beta-lactams, including ampicillin, have been developed. As a result, the development of new druggenerations has been followed by the uprisingof new beta-lactamases classes being able to destroy novel compounds (Munita and Arias 2016).

To date, over thous and different beta-lactamases were described (www.lahey.org/studies). Due to the bacterial evolution many more are likely to be reportedin the near future. One of the most popular beta-lactamases classification -Ambler classification, relies on the amino acid sequence identityand distinguishes 4 groups of beta-lactamases (A, B, C, and D) (Bush 2013).

Class A, C and D enzymes catalyze the hydrolysis of beta-lactams using a serine-dependent mechanism and proceeding through an acyl-enzyme intermediate (Concha et al. 2000). They differ in the range of catalytic activities (class A enzymes include a wide range of proteins with very different catalytic activities, from penicillinases to carbapeneases). Only class A can be inhibited by clavulanic acid (Munita and Arias 2016). Class B enzymes distinguish oneself because of the metal ion presence (most often zinc) in the active site, instead of a serine residue. Therefore they are also referasmetallo-beta-lactamases. They are inhibited by the ion-chelating agents (i.e. ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) and are active against a wide range of antibiotics, including carbapenems (Queenanand Bush 2007).

Metallo-beta-lactamases were discovered over 50 years ago in the chromosome of non-pathogenic bacteria. However, since 1990'sthe enzymes were frequently reported in clinical strains (Queenan and Bush 2007). What is important, the gene encoding enzymes are located in the accessory genome, what suggests the acquisition of external DNA coding for resistance. The most clinically important metallo-beta-lactamases belong to IMP (Imipenem resistant lactamases) and NDM (New Delhi Metallo-beta-lactamase) families (Munita and Arias 2016).

6. Metallo-beta lactamases: structure and mechanism of action

The crystal structures of the metallo-beta-lactamases from different strains have been reported (Concha et al. 2000). All of them present similar structure properties: the polypeptide chain is folded in characteristic four layers (alpha-beta-beta-alpha) with two alpha-helices surrounding a central, beta-sandwich. The active site, containing one or two Zn (II) ions (Zn1 and Zn2), is located at one rand of the sandwich (Fig. 2.).

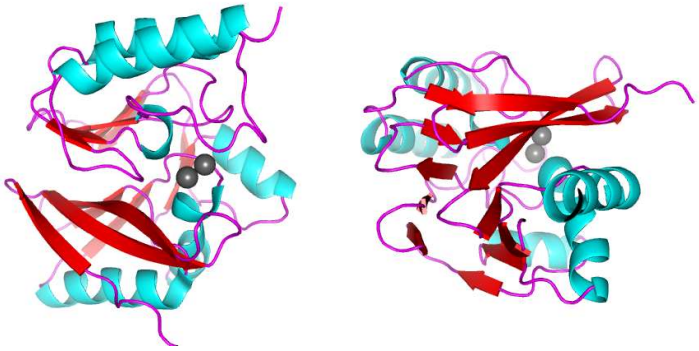


Fig. 2. An example of themetallo-beta-lactamase structure (IMP1, PDB 1DDK). The polypeptide chain is folded in characteristic four layers (alpha-beta-beta-alpha). Alpha helices are colored in blue, beta-sheets are colored in red. Two Zn ions (grey) are shownat one rand of the beta-sandwich.

In the crystal structures examined previously, Zn1 ion is tetracoordinated with three histidines and a water molecule. When present, second Zn ion is coordinated with three amino-acid residues (cysteine, histidine, and aspartate) and two water molecules (one of them shared with Zn1) in a trigonal bipyramid (Concha et al. 2000) (Fig. 3., left side).

In enzymes with two Zn ions, the shared water molecule (the bridging water) is activated, what releases the nucleophile (OH^-) forthe reaction. The addition of the hydroxide to the carbon of the substrate forms transient, negatively charged intermediate stabilized by the oxyanion hole of the enzyme. The second water molecule bound to Zn2 donate a proton to the leaving nitrogen. Finally, product dissociates from the enzyme active site (Fig. 3.) (Gensmantel et al. 1980).

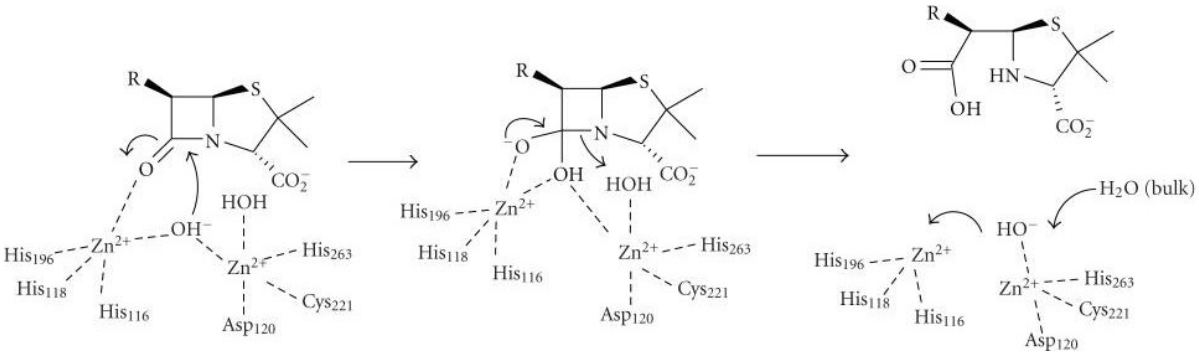


Fig. 3. The mechanisms of catalysis by metallo-beta-lactamases (Page and Badarau 2008). On the left side: two Zn ions sharing the water moleculeand activating it for the nucleophile attack on amide bond in the beta-lactam ring. In the middle: negatively charged reaction intermediate. On the right side: reaction product dissociating from the active site.

7. IMP enzymes family

IMP is considered to be the first identified transferable metallo-beta-lactamase isolated from clinical strains of *Pseudomonas aeruginosa*in Japan in the early 1990s (Hayakawa et al. 2014). Since then, these enzymes have been reported world wide in various Gram-negative bacteria (mostly in *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter* spp., and *Serratiamarcescens*). Recent date on epidemiology suggest that this metallo-beta-lactamase will probably be the most clinically significant type of enzyme (Concha et al. 2000) with broad substrate specificity that includes cephalosporins and carbapenems (Hayakawa et al. 2014). The IMP geneshas been shown to be encoded by both plasmids andintegrons (Munita 2016).

IMP variants amino acid sequence analysis showed 85%–99.6% of sequence similarity with 80%–99.6% sequence identity, suggestinga polyphyletic origin of IMPs (Meini et al. 2014). This group of metallo-beta-lactamases can be divided into two classes: IMP-1 and IMP-6, based on the identity of the aminoacid residue at position 262. IMP-1-like variants havea Ser residue and are active towards larger group of antibiotics, while IMP-6-like variants havea Gly residue and are more specific. This difference has been considered as main determinant factor for the substrate preferences of both classes (Iyobe et al. 2000). The role of mutation G262S would have been to broaden the substrate profile, while S262G would have been to adapt towards newer carbapenems (Meini et al. 2014).

Currently, only the structure of IMP-1 has been well described: in native and mutated forms as well as in complexes with captopril or inhibitors. Additionally structures of IMP-2 and IMP-18 are available in Protein Data Bank (PDB). As it has been shown for other metallo-beta lactamases (like NDMs) the mutations of any residue responsible for structure stabilization and/or interactions with substrate/inhibitor, might fine-tune substrate preferences

(Meini et al. 2014). These same concerns IMP protein family: the overall IMP-18 structure resembles IMP-fold, with a four layers fold (alpha-beta-beta-alpha) ‘sandwich’ configuration, with exception of the loop that covers the active site (differences in conformation; Furuyama et al. 2016). The difference is quite slight, but can strongly affect binding properties of an enzyme. Furthermore, IMP-1 mutagenic analysis indicated that each modification in the loop, affects ligand binding and the turnover rate (Furuyama et al. 2016). These findings confirm the importance of crystallization and structure determination for each of beta-lactamases. It allows to relate the biochemical features to the structure and support specific inhibitors for beta-lactamases designing.

One of the most dangerous beta-lactamases isthe IMP-13, identified in *Pseudomonas aeruginosa* clinical isolates from different countries in Europe and South America (Santella et al. 2010). The IMP-13 has 92% amino acid sequence identity with IMP-2 and 83% with IMP-1, and is quite divergent from other variants (Mojica et al. 2016). IMP-13 inactivates all cephalosporins, with the highest efficiency observed for cefuroxime and imipenem. What is important, the hydrolysis efficiency of cefuroxime was 100-fold higher than that of IMP-1. It has a significant impact on the level of resistance to the antibiotic (Santella et al. 2010). Further structure-function relationship analysis are required, nevertheless IMP-13 might owe its distinctive functional featuresto 11 unique amino acids substitutions (Santella et al. 2010).

8. Beta-lactamases inhibitors

Currently, scientists are focused on the development of selective molecules useful in the treatment of bacterial infections. The increase of bacterial resistance to antibiotic that parallels the production of lactamases, makes these enzymes an attractive target for the drug design. To overcome this emerging resistance mechanism, the production of metallo-beta-lactamase inhibitors to be administered in combination with antibiotic is necessary (Concha et al. 2000).

9. References

Bush K., 2013. The ABCD's of β-lactamase nomenclature.J InfectChemother. 19(4):549-59.

D'Costa V.M., King C.E., Kalan L., Morar M., Sung W.W., Schwarz C., Froese D., Zazula G., Calmels F., Debruyne R., Golding G.B., Poinar H.N., Wright G.D., 2011. Antibiotic resistance is ancient. *Nature*. 477(7365):457-61.

Centers for Disease Control and Prevention, Office of Infectious Disease Antibiotic resistance threats in the United States. 2013. http://www.cdc.gov/drugresistance/threat-report-2013.

Cho H., Uehara T., Bernhardt T.G., 2014. Beta-Lactam Antibiotics Induce a Lethal Malfunctioning of the Bacterial Cell Wall Synthesis Machinery. Cell. 159(6):1300-1.

Concha N.O., Janson Ch.A., Rowling P.,Pearson S., Cheever Ch.A.,Clarke B.P., Lewis C., Galleni M., Frere J.M., Payne D.J., Bateson J.H., Abdel-Meguid S.S. 2000. Crystal Structure of the IMP-1 Metalloβ-Lactamase from Pseudomonas aeruginosa and Its Complex with a Mercaptocarboxylate Inhibitor: Binding Determinants of a Potent, Broad-Spectrum Inhibitor. *Biochemistry*. 39 (4288-4298).

Furuyama T., Nonomura H., Ishii Y., Hanson N.D., Shimizu-Ibuka A., 2016. Crystal structure of metallo-beta-lactamase IMP-18 from Pseudomonas aeruginosa. *Antimicrob Agents Chemother*. 60: 5521-5526.

Gensmantel N.P., Proctor P., Page M.I., 1980. Metal-ion catalysed hydrolysis of some β-lactam antibiotics. *Journal of the Chemical Society*, Perkin Transactions 2. (11):1725–1732

Gould I.M., Bal A.M., 2013. New antibiotic agents in the pipeline and how they can help overcome microbial resistance. *Virulence.* 4(2):185-91.

Hayakawa K., Miyoshi-Akiyama T., Kirikae T., Nagamatsu M., Shimada K, Mezaki K., Sugiki Y., Kuroda E., Kubota S., Takeshita N., Kutsuna S., Tojo M., Ohmagaria N., 2014. Molecular and Epidemiological Characterization of IMP-Type Metallo--Lactamase-Producing Enterobacter cloacae in a Large Tertiary Care Hospital in Japan. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 58(6): 3441–3450.

Iyobe S., Kusadokoro H., Ozaki J., Matsumura N., Minami S., Haruta S., Sawai T., O'Hara K., 2000. Amino acid substitutions in a variant of IMP-1 metallo-beta-lactamase. *Antimicrob. Agents Chemother*. 44: 2023–2027.

Kuriyama T., Karasawa T., Williams D.W., 2014. Antimicrobial Chemotherapy. Significance to Health. Biofilms in Infection Prevention and Control. 209-244.

Malcolm G. P., 2012. Beta-Lactam Antibiotics. Antibiotic Discovery and Development. 79-117.

Manson J.M., Hancock L.E., Gilmore M.S., 2010. Mechanism of chromosomal transfer of Enterococcus faecalis pathogeni city island, capsule, antimicrobial resistance, and other traits. *Proc Natl AcadSci U S A*. 107(27): 12269-74.

Meini M.-R., Llarrull L.I., Vila A.J., 2014. Evolution of Metallo-β-lactamases: Trends Revealed by Natural Diversity and in vitro Evolution. *Antibiotics.* 3(3), 285-316.

Mojica M.F., Bonomo R.A., Fast W., 2016. B1-Metallo-beta-Lactamases: Where do we stand? *Curr Drug Targets*. 17(9): 1029–1050.

Munita J.M., Arias C.A., 2016. Mechanisms of Antibiotic Resistance. *Microbiol Spectr*. 4(2): 1-37.

Nikaido H., 2003. Molecular basis of bacterial outer membrane permeability revisited. *Microbiol Mol Biol Rev.* 67(4):593-656.

Page M.I., Badarau A., 2008. The Mechanisms of Catalysis by Metallo β-Lactamases. *Bioinorg Chem Appl.* 576297.

Poole K., 2015. Efflux-mediated antimicrobial resistance. *J Antimicrob Chemother*. 56(1): 20-51.

Queenan A.M., Bush K., 2007. Carbapenemases: the versatile beta-lactamases. *ClinMicrobiol Rev*. 20(3): 440-58.

Santella G., Docquier J.-D., Gutkind G., Rossolini G.M., Radice M., 2011. Purification and Biochemical Characterization of IMP-13 Metallo-β-Lactamase. *Antimicrob Agents Chemother*. 55(1): 399–401.

Sengupta S., Chattopadhyay M.K., Grossart H.P., 2013. The multifaceted roles of antibiotics and antibiotic resistance in nature. *Front Microbiol*. 4:47.

Spellberg B., Gilbert D.N., 2014. The future of antibiotics and resistance: a tribute to a career of leader ship by John Bartlett. *Clin Infect Dis*. 59 (suppl 2):S71–S75.

Thomas C.M., Nielsen K.M., 2005. Mechanisms of, and barriers to, horizontal gene transfer between bacteria. *Nat Rev Microbiol*. 3(9):711-21.

Tipper D.J., Strominger J.L., 1965. Mechanism of action of penicillins: a proposal based on their structural similarity to acyl-D-alanyl-D-alanine. *Proc NatlAcadSci.* 54(4): 1133–1141.

Ventola C.L., 2015. The Antibiotic Resistance Crisis Part 1: Causes and Threats. P T. 40(4): 277-83.

Wilson D.N., 2014. Ribosome-targeting antibiotics and mechanisms of bacterial resistance. *Nat Rev Microbiol*. 12(1): 35-48.

Zagursky R.J., Pichichero M.E., 2018. Cross-reactivity in β-Lactam Allergy. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*: In Practice. 6 (1): 72-81.

Współczesne metody i narzędzia pracy architekta

Jerzy F. Łątka[(1)]

[1]Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska
Jerzy Łątka: Jerzy.Latka@pwr.edu.pl

Streszczenie
Niniejszy artykuł przedstawia metody i narzędzia pracy architekta u progu trzeciej dekady 21 wieku, które wraz z rozwijającymi się technologiami przechodzą znaczną metamorfozę. Zachodzące przemiany pracowni autorskich w zdemokratyzowane zespoły, stosowane metody twórczego rozwiązywania problemów projektowych realizowane są za pomocą nowych technologii cyfrowych.
Żyjąc w erze Internetu Rzeczy, gdzie wielopłaszczyznowa komunikacja występuje nie tylko pomiędzy osobami, ale także przedmiotami, stajemy przed szansą na wykorzystanie nowych zdobyczy techniki w procesie projektowo-budowlanym. BIM (Building Information Modelling) pozwala na wirtualne stworzenie obiektu budowlanego zanim zostanie on wybudowany w świecie rzeczywistym.
Przyszłość procesu projektowego jest, więc oparta o zinformatyzowany i zdemokratyzowany świat, a dystans do klienta, kolegi z innej branży czy urzędu nie stanowi już problemu.

Słowa kluczowe: narzędzia projektowania, innowacyjne projektowanie, BIM

Contemporary methods and tools for architects

Summary
The article describes methods and design tools for architects which undergo a significant changes at the beginning of the third decade of the 21st century. Architectural offices becomes more equal and democratic collaborative teams where innovative methods for creative solutions are used and the solutions are realized them by the means of new digital technologies.
Living in the era of the Internet of Things, where multi layered communication runs not only between humans but also between objects, we stand in front of a chance to use the newest technical solutions in the design and production processes. BIM (Building Information Modelling) allows designers to create a building first in the virtual reality before it will be built in the real world.
The future of the design process is therefore based on the informatics and democratic world, and the distance between architect and client or different partners in the project do not cause any problems anymore.

Keywords: design tools, innovative design, BIM

1. Wstęp

U progu trzeciej dekady dwudziestego pierwszego wieku, zarówno sposób pracy jak i narzędzia, którymi posługuje się architekt ulegają znacznym zmianom, które są wynikiem globalnych przeobrażeń określanych, jako czwarta rewolucja przemysłowa.

Polega ona na wykorzystaniu systemu cyber-fizycznego (cyber physical system), w którym maszyny i urządzenia komunikują się, i są w stanie coraz skuteczniej zastąpić człowieka w niektórych zadaniach. Powtarzalne czynności, ale też analiza wielkich baz danych, rachunek prawdopodobieństwa, wykonywane są coraz częściej przez przystosowane do tego inteligentne systemy i urządzenia. Przemysł 4.0 łączy się ze zjawiskiem zwanym Internetem Rzeczy (Internet of Things). Oznacza ono, że coraz więcej urządzeń, maszyn, ale także obszarów miejskich i budynków jest skomunikowana ze sobą za pomocą internetu. Komunikacja ta pozwala na przesył danych i informowanie się nawzajem o zaistniałych

sytuacjach. Tzw. „Smart przedmioty" posiadają autonomiczny dostęp do sieci z własnym adresem IP.

Na bazie wymienionych technologii informatycznych powstały tzw. inteligentne budynki oraz inteligentne miasta (smart buildings, smart cities).

Inteligentny budynek „to obiekt, który w sposób zintegrowany efektywnie zarządza zasobami, usługami i ich wzajemnymi powiązaniami w celu zaspokajania zmieniających się potrzeb jego użytkowników przy jednoczesnej minimalizacji kosztów i ciągłym poszanowaniu środowiska naturalnego" (Dechnik, Furtak 2017). Krwiobiegiem inteligentnego budynku jest zintegrowany system zarządzania i automatyzacji budynku (Building Management System). Oprócz reagowania budynku na zmieniające się uwarunkowania zewnętrzne (temperatura, oświetlenie), dostosowywania warunków wewnętrznych do potrzeb użytkownika (natężenie światła, temperatura, wilgotność powietrza, atmosfera wywołana kolorem światła czy muzyką), systemy zarządzania budynku chronią go również przed wydarzeniami losowymi (np. pożar) i włamaniami.

Inteligentne budynki mogą zostać włączone w inteligentną sieć, która z kolei może być komponentem inteligentnego miasta. Smart city zintegrowane infrastrukturą energetyczną i informatyczną może wytworzyć komfortowe, energooszczędne środowisko dla swoich mieszkańców.

Przykładem zastosowania inteligentnego systemu jest miejski system komunikacyjny, który przesyła informacje o natężeniu ruchu w poszczególnych częściach miasta i samoczynnie reguluje go za pomocą świateł drogowych.

Symulacja infrastruktury i urządzeń (hardware) a także ich wzajemnej komunikacji (software) jest podstawą do sprawnego zaprojektowania inteligentnego budynku. Włączenie systemów zarządzania budynkiem, w celu np. zdobycia certyfikatu jakości BREEAM lub LEED powinno odbywać się już na wczesnym etapie projektowym.

Zaawansowany technologicznie inteligentny budynek lub obszar miejski odpowiada na szereg zagadnień, które aby współgrały ze sobą powinny zostać opracowane w wielobranżowym zespole podczas zintegrowanego procesu projektowego (Bać 2016).

2. Metody twórczej pracy

Praca architekta nad projektem dzieli się na kilka etapów. Etap początkowy jest procesem syntetyzowania i łączenia ustalonych informacji wejściowych, założeń projektowych, inspiracji i warunków wynikających z kontekstu krajobrazowego, kulturowego, a także ograniczeń związanych z zasobami finansowymi przeznaczonymi na realizację projektu. Pierwszy etap jest najprzyjemniejszą i jednocześnie najbardziej twórczą częścią

procesu projektowego. Istotnym elementem tego etapu jest umiejętność wydobycia istotnych dla projektu informacji oraz poddanie ich procesowi konceptualizacji tak, aby w efekcie powstała spójna propozycja, lub kilka propozycji, które w sposób nowatorski i twórczy odpowiadają na zadane zagadnienie projektowe.

W kolejnych etapach początkowa koncepcja nabiera coraz pełniejszych kształtów, otrzymuje fizyczną wartość w postaci wyszczególnionych wartości i charakterystyk takich jak wymiary części obiektu, jego komponentów oraz poszczególnych elementów, użycie materiałów i produktów przemysłu budowlanego, określenie kosztów, symulacja i zaplanowanie produkcji komponentów budowlanych w przypadku prefabrykacji oraz procesu budowy.

Część projektantów posługuje się wypracowanymi przez lata schematami i metodami projektowymi. Z jednej strony pozwala to na systematyczne rozwiązanie problemu wg ustalonego wzorca, z drugiej jednak prowadzi często do zrutynizowanego a więc mało twórczego podejścia do tematu projektowego. Zgodnie z definicją twórczości przywołaną przez J. Bondara „twórcze jest to, co nowe i użyteczne dla pewnej grupy w pewnym okresie" (Bondar 2012). Z kolei E. Nęcka, specjalista zajmujący się psychologią twórczości, dowodzi, że twórcze jest to, co „cechuje się koniunkcją dwóch cech: nowości i wartości" (Nęcka 2001). Aby więc stworzone dzieło uznane zostało za twórcze powinno charakteryzować się nowymi cechami. W celu uzyskania nowych i wartościowych cech projektu stosuje się różne techniki wspierające kreatywny proces projektowania.

Projektowanie jest efektywnym procesem podejmowania decyzji w celu osiągnięcia oryginalnego, nieprzeciętnego, funkcjonalnego, materiałowego i przestrzennego rozwiązania problemu strukturalnego przebiegającego od pierwszego pomysłu do wykonania (a w przyszłości do utrzymania napraw i rozbiórki) obiektu budowlanego.

Projektowanie opiera się o różne metody.

- Metodologia jest teorią metod używanych w procesie.
- Metodyczne podejście składa się z serii metod stosowanych w procesie.
- Metoda to zestaw opanowanych procedur.

Można rozróżnić trzy rodzaje podejścia do procesu projektowego:

- Podejście typu czarna skrzynka (black box), kiedy zagadnienie projektowe jest rozwiązywane głównie za pomocą intuicji.
- Rozwiązanie problemu na bazie własnej wypracowanej metody (rutyna).

- Wykorzystanie znanych metod i zastosowanie ich w procesie projektowym (tzw. glass box).

Udany proces projektowy jest kombinacją intuicyjnego, rutynowego i metodycznego podejścia projektowego.

Metody kreatywnego rozwiązywania zagadnień projektowych mają na celu stworzenie komfortowych warunków, w których obie półkule mózgu są zaangażowane w proces kreatywny. Półkula prawa odpowiada za intuicję, kreację, natomiast lewa odpowiada za analizę i ocenę. Aby proces twórczy przebiegł bez zakłóceń stosowane techniki rozdziela się na techniki intuicyjne oraz techniki analityczne. Oba rodzaje powinno stosować się oddzielnie, aby zniwelować napięcie pomiędzy tym, co spontaniczne a tym, co analityczne.

Do technik intuicyjnych zalicza się m.in:

- burza mózgów (brainstorming), brainstorming indywidualny, brainstorming mieszany (seria sesji naprzemiennych indywidualnych i grupowych), burza mózgów online,
- burzę pisania – niewerbalna burza mózgów,
- technika 635, polegająca na tym, że każdy z 6 uczestników zespołu wypisuje 3 pomysły w ciągu 5 minut i przekazuje je kolejnej osobie, której zadaniem jest dopisanie kolejnych 3 pomysłów, które różnią się od zapisanych,
- mapowanie myśli, służąca do ustrukturyzowania myśli i pomysłów,
- metoda Gordona polega na stopniowym syntetyzowania określonego ogólnie problemu poprzez poszukiwanie analogii i uszczegółowieniu zagadnienia,
- metoda kruszenia polrga na rozbijaniu utrwalonych znaczeń i przekonań w stosunku do opracowywanego przedmiotu lub systemu poprzez pytania sugerujące zmianę. Metoda ta ma doprowadzić do zmiany przyzwyczajeń i zastanego nastawienia do danego zjawiska.

Techniki intuicyjne można podzielić na trzy fazy: przygotowanie, inkubacja i odkrycie. Jedną z podstawowych zasad technik intuicyjnych jest odraczanie oceny, czyli proces, podczas którego kreatywność nie jest poddawana analizie i krytyce.

Do technik analitycznych zalicza się:

- analiza morfologiczna jest metodą łączącą techniki intuicyjne i analityczne. Polega ona na zestawieniu określonego zakresu i treści problemu, który następnie jest analizowany, a niezależne elementy lub wymiary (części składowe) tego problemu są identyfikowane. Kolejnym krokiem jest uszczegółowienie i wariantowanie

cząstkowych wymiarów i elementów. Mogą wśród pojawić się rozwiązania niestandardowe i niepasujące na pierwszy rzut oka do rozwiązania ostatecznego,

- analizę funkcjonalną, czyli matryca funkcji poszczególnych elementów zapotrzebowania związanego z ich zastosowaniem oraz konfliktów, które pojawiają się pomiędzy różnymi funkcjami,
- metoda delficka – *foresight,* kilkukrotne poddanie niezależnie pracujących ekspertów coraz bardziej pogłębiającym problem ankietom,
- analizy SWOT, w której określa się mocne i słabe strony projektu, będące charakterystykami wewnętrznymi, a także szanse i zagrożenia, na które wpływ mają czynniki zewnętrzne,
- diagram Ishikawy, który polega na stworzeniu wykresu przyczynowo-skutkowego, w którym zapisywane są powiązania pomiędzy elementami wpływającymi na dany proces oraz jego skutkami. Diagram przypominający kształtem rybę składa się z elementów pierwszego i drugiego rzędu. Elementy pierwszego rzędu są bezpośrednimi elementami składowymi zagadnienia (w przypadku budynku mogą to być np. charakterystyki kubaturowe, energetyczne, estetyczne, funkcjonalne) a elementy drugiego rzędu są ich rozwinięciem i doprecyzowaniem.

Organizacja pracy projektowej może mieć charakter:

- horyzontalny – równoległa praca kilku departamentów lub instytucji,
- wertykalny (model lidera) – projekt zarządzany jest odgórnie przez lidera uczestniczącego w każdym etapie prac,
- matrycowy, na który składają się takie działania jak praca grupowa, komunikacja, wykorzystanie zasobów i eliminacja odpadów (optymalizacja użycia materiałów), nieustanne ulepszanie. W tym modelu istnieje najszersza komunikacja pomiędzy uczestnikami procesu projektowego.

3. BIM – współczesne narzędzie do projektowania

Projekt architektoniczny oraz realizacja obiektu budowlanego są procesami przeprowadzanymi w zespołach międzybranżowych. Od wczesnych etapów powstawania projektu w proces ten zaangażowani są architekci oraz ich klienci, w następnych etapach dochodzą specjaliści branżowi (konstruktorzy, instalatorzy), przedstawiciele administracji publicznej (urzędnicy, konserwator zabytków), producenci materiałów i komponentów budowlanych oraz wykonawcy (firmy budowlane).

Jednym z największych problemów w trakcie całego procesu (od koncepcji do realizacji) jest komunikacja między uczestnikami procesu na różnych jego etapach. W zupełnie inny sposób wygląda komunikacja na linii architekt – klient niż na linii architekt – konstruktor. W pierwszym przypadku najczęściej do prezentacji i komunikowania wykorzystywane są jasne i czytelne obrazy w tym uproszczone rzuty, wizualizacje, makiety. W drugim natomiast komunikacja opiera się o zaawansowane rysunki techniczne.

Wykonanie skomplikowanego technologicznie inteligentnego budynku wymaga twórczej pracy przedstawicieli wielu dziedzin, którzy muszą wzajemnie się komunikować. Możliwość stworzenia platformy komunikacyjnej, która jest bazą informacyjną zarówno dla inwestora, branżystów, administracji jest coraz popularniejszy w ostatnich latach BIM (Building Information Modeling). Idea BIM, czyli modelowania informacji o budynku zakłada stworzenie płaszczyzny informacji o budynku, którą współtworzą lub z której korzystają wszystkie strony zaangażowane w proces projektowo-wykonawczy. Płaszczyznę tę stanowi kompleksowy cyfrowy model, który jest wykonany w rzeczywistości wirtualnej.

W tradycyjnym metodzie, projekt powstaje najpierw, jako wizja architekta, która następnie jest przedstawiana w postaci dwu lub trójwymiarowej za pomocą narzędzi analogowych (ołówek, rapidograf) lub cyfrowych (programów komputerowych). Zmiana, która dokonała się podczas trzeciej rewolucji przemysłowej, polegała na wprowadzeniu nowego narzędzia, jakim było projektowanie wspomagane komputerowo (CAD – Computational Aided Design), jednak sama metoda pracy pozostawała ta sama. Projekt był tylko odwzorowaniem kształtu obiektu przeniesionym z kalki na ekran komputera. BIM polega na stworzeniu cyfrowego modelu budynku, który odpowiada rzeczywistości wraz z takimi parametrami jak użyte materiały, przenikalność i termoizolacyjność przegród czy przebieg instalacji elektrycznych, wodno-kanalizacyjnych bądź HVAC (ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja). Cyfrowy model jest, więc zarówno źródłem informacji jak i polem do działania dla wszystkich uczestników procesu projektowo-wykonawczego.

Cyfrowy model budynku zawiera informacje m.in. o częściach składowych budynku, relacji przestrzennych między nimi, właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Informacje wprowadzane są przez różnych uczestników biorących udział w procesie projektowo-wykonawczym, z drugiej strony mogą być pobierane tylko wybrane, istotne dla uczestników informacje.

Można sobie np. wyobrazić sytuację, w której projekt powstaje na wirtualnym terenie z zapisanymi dla niego warunkami zabudowy (lub planu miejscowego) uzyskanego cyfrowo z lokalnego urzędu. Następnie projekt zapisywany jest w chmurze, (czyli zewnętrznym

serwerze) i w dalszym ciągu opracowywany przez zespoły projektantów, branżystów i innych specjalistów. W kolejnym kroku zainteresowany urząd pobiera z pliku istotne dla niego informacje niezbędne do wydania pozwolenia na budowę. Cały proces, więc przebiega cyfrowo i nie są już konieczne wielogodzinne wycieczki do urzędów lub biur projektowych współpracujących branżystów a także wielostronicowe wydruki projektów, które następnie muszą być sprawdzane, poprawiane i przechowywane. Wszystko, bowiem dzieje się w rzeczywistości cyfrowej.

Przygotowanie modelu budynku pozwala na uniknięcie wielu niespodzianek i pomyłek, które często pojawiają się podczas stosowania tradycyjnych metod projektowania. Jak wspomina Wojciech Gawinowski, specjalista BIM, dzięki zastosowaniu technologii BIM można osiągnąć oszczędności sięgające nawet 20% ze względu na bardzo małą ilość błędów na placach budowy wynikających z dokumentacji projektowej (Gawinowski 2018). Deweloperzy, którzy to rozumieją, zaczynają wprowadzać BIM, jako narzędzie wymagane w ich inwestycjach.

Model 3D obiektu wraz z detalami i przyjętymi rozwiązaniami materiałowymi powstaje niejako przy okazji całego procesu projektowego. Może zostać wykorzystany w celach marketingowych np. w formie wizualizacji lub wirtualnego spaceru po budynku z zastosowaniem technologii VR (Virtual Reality). Używając dodatkowo silników do animowania gier komputerowych można dokładnie pokazać atmosferę i nasłonecznienie obiektu.

BIM jest używany do analizy nasłonecznienia, ogrzewania i wentylacji (HVAC), ewakuacji przeciwpożarowych, konstrukcji, zarządzania energią czy analizą środowiskową. Pozwala również na lepszą organizację prac projektowych i kontrolę nad jej przebiegiem w czasie rzeczywistym.

Wciąż jednak technologia BIM nie uzyskała w Polsce wystarczającej popularności. Zapewne minie jeszcze sporo lat zanim urzędy zdecydują się na wprowadzenie możliwej obsługi projektu za pomocą BIM. Wielu lokalnych branżystów nie pracuje w BIM, co znacznie utrudnia współpracę w przypadku realizacji obiektów poza dużymi ośrodkami miejskimi.

W obecnej chwili większości architektów stosuje programy BIM'owskie, jako narzędzie do tworzenia modeli 3D a nie wymianę informacji. Dzieje się tak ze względu na brak wdrożenia technologii BIM oraz niewystarczającą jej popularność wśród innych branż związanych z przemysłem budowlanym. W programach tych można na bazie modelu przygotować tradycyjną dokumentację projektową.

Biorąc jednak pod uwagę korzyści płynące z BIM, pomimo, że na początku technologia ta wymaga przystosowania się, stworzenia własnych bibliotek, przygotowania zestawu obiektów, komponentów czy materiałów, co jest procesem czasochłonnym, późniejszy zysk czasowy i finansowy sprawia, że BIM stanie się tak samo popularny jak w latach '90 i 2000 stało się z programami typu CAD.

Już w obecnej chwili w niektórych krajach Europejskich zamówienia publiczne obwarowane są koniecznością przygotowania dokumentacji projektowej w technologii BIM.

4. Wnioski

Za kilkanaście lat technologia pracy i środowisko projektowania będą zupełnie inne niż obecnie. Budynki będą najpierw realizowane w świecie wirtualnym, po czym po dokładnym sprawdzeniu ich funkcjonalności, formy, jakości energetycznej czy nasłonecznienia, zostaną zbudowane w świecie rzeczywistym, pozostając na stałe podłączone do Internetu.

W celu rozwiązania złożonych problemów technicznych i projektowych interdyscyplinarne zespoły poszukują nowych i twórczych rozwiązań. Istniejące metody pracy twórczej i jej organizacji pozwalają na stworzenie innowacyjnych projektów, których inspiracje są zaczerpnięte nawet z najbardziej oddalonych gałęzi i źródeł wiedzy.

W epoce czwartej rewolucji przemysłowej sposób pracy architekta ulega istotnym przeobrażeniom. Konieczność nadążania za zmieniającymi się technikami i technologiami komunikacji, projektowania oraz produkcji a także wspólczesne, zdemokratyzowane formy współpracy realizowane za pomocą coraz nowocześniejszych narzędzi i metod powodują, że charakter zawodu architekta podlega dynamicznym zmianom, pomimo, że jego rola „dyrygenta" scalającego orkiestrę złożoną różnych specjalistów i dyscyplin w celu osiągnięcia wspólnego dzieła w postaci budynku pozostaje niezmienna. Będzie on mógł jednak prowadzić swoją „orkiestrę" nawet z najdalszych zakątków ziemi (powietrza, wody), tworząc za pomocą wirtualnego świata, który następnie zostanie przeniesiony do rzeczywistości.

Podziękowania.

Treść niniejszego artykułu została zainspirowana debatą, która odbyła się podczas konferencji „Młodzi do Łodzi" skierowanej do architektów przed czterdziestym rokiem życia. Konferencja organizowana jest, co pięć lat przez magazyn Architektura Murator i jest swego rodzaju zapisem zmian, jakie zachodzą w polskiej architekturze oraz problematyce dotyczącej młodych jej adeptów. W bieżącym roku, autor tego artykułu miał przyjemność być jednym z liderów merytorycznych spotkania a także prowadzącym panel poświęcony narzędziom i metodom pracy. Szczególne podziękowania należą się współpanelistom, specjalistom

zaproszonym do dyskusji i prezentacji: Michałowi Krzyżowskiemu, Kacprowi Radziszewskiemu, Wojciechowi Gawinowskiemu a także wszystkim pozostałym uczestnikom spotkania, którzy czynnie wzięli udział w dyskusji.

5. Literatura

Adamus Ł., 2012. Modelowanie Informacji o Budynku (BIM). Podstawy teoretyczne. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej* – Kwartalnik 4 (164): 13-26.

Bać A., 2016. Zrównoważenie w architekturze od idei do realizacji na przykładzie doświadczeń kanadyjskich, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. 44.

Bondar J., 2012. Dydaktyka przyjazna twórczowsci – metody heurystyczne. *Przestrzeń i Forma* 18, 47-64.

Dechnik M., Furtak M., 2017. Inteligentne budynki dziś i jutro. *Builder* czerwiec. 64-66.

Eekhout M., 2009. Methodology for Product Development in Architecture. ISBN 978-1-58603-965-3.

Gawinowski W., 2018. Debata wypowiedź ustna podczas konferencji Młodzi do Łodzi w dniu 18.05.2018 w Łodzi

Jagoda-Sobalak, D., 2014. Implementacja metod inwentycznych w projektowaniu innowacyjnego produktu. Implementation creative problem solving in designing innovative product. [W]: Nauka dla innowacji, Studia i Monografie /Politechnika Opolska z. 403. 78-86.

Krzyżowski M., 2018. Debata wypowiedź ustna podczas konferencji Młodzi do Łodzi w dniu 18.05.2018 w Łodzi

Nęcka E., 2001. Psychologia Twórczości. ISBN 83-87957-50-X.

Niezabitowska E.D., 2014. Metody badawcze i techniki badawcze w architekturze, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice. ISBN 978-83-7880-123-8.

Radziszewski K., 2018. Metody cyfrowej fabrykacji, Warsztat architektra. Programy, technologie. 22-25.

Szewczyk A., 2012. Inteligentne domy – marzeniem mieszkańców miast*? Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego Studia Informatica*. 29 (721): 137 – 146.

Ujwary-Gil A., 2004. Inwentyka czyli kreatywność w biznesie. Wybrane zagadnienia, ISBN: 83-88421-37-9. 43-101.

Wasilewska B., Knosala R., 2012. Analiza technik kreatywnego rozwiązywania problemów na wybranych przykładach praktycznych. In Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. 49-60.

Ekonomia jazdy, czyli jak przejechać 500 km na litrze paliwa

Jakub Mijał[(1)], Hubert Kamiński[(1)]

[1] Studenckie Koło Aerodynamiki Pojazdów, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska
Jakub Mijał: jakubmijal@gmail.com
Hubert Kamiński: hubert10kaminski@gmail.com

Streszczenie
Artykuł opisuje najważniejsze etapy procesu projektowania bolidów o ekstremalnie niskim zużyciu paliwa, opracowywanych i stworzonych przez studentów ze Studenckiego Koła Aerodynamiki Pojazdów (w skrócie SKAP). Struktura artykułu zawiera wstęp z opisem działań Koła, następnie krótki opis projektów realizowanych przez jego członków, kolejność prac wykonywanych w czasie budowy pojazdy Orion oraz krótkie wnioski i podsumowanie artykuły. Najważniejszą tezą opisywaną w artykule były sposoby zminimalizowania oporów aerodynamicznych, oporów toczenia, masy pojazdu, osiągnięcie jak największej sprawności zastosowanego napędu oraz strategia przejazdu umożliwiająca zrealizowanie celu zawartego w tytule artykułu. Wszystkie te kwestie mają ogromny wpływ na wynik osiągnięty podczas zawodów Shell Eco-marathon, dlatego ich analiza została oparta o fachową literaturę. Głównym celem działania Koła jest poszerzenie wiedzy i umiejętności przyszłych inżynierów oraz zastosowanie zdobytej przez nich wiedzy w praktyce.

Słowa kluczowe: niskie spalanie, aerodynamika pojazdów, SKAP, Shell Eco-marathon.

Economical driving – how to drive 500 km consuming one liter of fuel

Summary
The article presents the most important stages of low fuel consumption vehicles design proces. Vehicles described in article are created by members of Student Association for Vehicle Aerodynamics (SKAP) that works within structures of Warsaw University of Technology. Introduction contains characterisation of our projects, then follows the list of actions to conduct during vehicle construction proces and article ends with a short conclusion. The main conclusion the article is fact, that reduction of aerodynamic and rolling resistance, mass, maximizing of engine efficiency and well prepared race strategy are essential factors in car's fuel efficiency. Therefore, entire design process was based of profesional literaturę. Furthermore, Student Association for Vehicle Aerodynamics serves the idea of increasing practical knowledge within future engineers.

Key words: fuel efficiency, vehicle aerodynamics, SKAP, Shell Eco-marathon.

1. Wstęp

Cel zawarty w tytule artykułu można osiągnąć dzięki zaprojektowaniu pojazdów o minimalnym zużyciu paliwa, Kropelka 2.0 i Orion, przy pomocy programu NX. Projekty te po przejściu szeregu obliczeń, osiągnęły kształty dopracowane niemal do perfekcji. Ostatnią fazą było wykonanie pojazdów oraz udział w zawodach Shell Eco-marathon, gdzie zbadano ich osiągi pod względem zużycia paliwa.

Studenci należący do Studenckiego Koła Aerodynamiki Pojazdów (SKAP), założonego w 2005 roku, zajmują się projektowaniem, a także konstrukcją ekonomicznych pojazdów jednoosobowych, każdego roku wystawianych w międzynarodowych zawodach Shell Eco-marathon. Głównym założeniem jest stworzenie auta charakteryzującego się minimalnym zużyciem paliwa, co skutkowałoby między innymi zmniejszeniem stopnia zanieczyszczania środowiska. W celu osiągnięcia satysfakcjonujących rezultatów, członkowie koła, pracujący

pod czujnym okiem charyzmatycznego profesora, optymalizują kształt samochodu za pomocą odpowiednich programów komputerowych, zaś dzięki wybudowaniu hamowni, studenci są w stanie dobrać niezwykle korzystne parametry pracy jednostki napędowej.

Obecnie około pięćdziesięciu młodych, wykazujących się ponadprzeciętnym intelektem inżynierskim osób, pracuje przy dwóch projektach koła: Kropelka 2.0 oraz Orion. Ponadto kilkoro spośród nich angażuje się w rewolucyjny projekt nowego środka transportu - kapsuły Hyperloop, a także w projekt e-MaksPower, czyli elektryczny bolid ze sterowaniem dostosowanym dla osób z ograniczonym zakresem ruchu. Innowacyjność, kreatywność, świetna organizacja w zespole, jak i ogromne zaangażowanie jego członków oraz ich ogromne sukcesy świadczą o tym, że SKAP jest bezapelacyjnie jednym z najlepiej prosperujących kół naukowych w Polsce.

2. Projekty

- Kropelka 2.0

Kropelka 2.0 to trójkołowy, jednoosobowy pojazd wyróżniający się bardzo niskim oporem aerodynamicznym w porównaniu z przeciętnym samochodem osobowym. Innowacyjna samonośna konstrukcja i specjalnie przystosowany silnik mają dać możliwość osiągania wyników powyżej 500 km na jednym litrze paliwa.

Jednostka napędowa została przystosowana przez członków Koła tak, by zminimalizować zarówno jej masę jak i zużycie paliwa. Ponadto silnik, Honda GX-25, działający domyślnie na benzynę, został dostosowany również do pracy na etanolu. Zamontowany fabrycznie gaźnik zamieniono na układ z wtryskiwaczem paliwa, co pozwala na precyzyjne sterowanie pracą silnika za pomocą zaawansowanego komputera pokładowego stosowanego w sportach motorowych. W przyszłości jest planowana zmiana rodzaju napędu na elektryczny. Nadwozie wykonano z lekkich materiałów kompozytowych. Struktura samonośna łączy w sobie wysoką wytrzymałość z niską masą, wynoszącą około 5 kg. Kształt został zoptymalizowany pod kątem minimalnych oporów powietrza i wybrany spośród 150 testowanych modeli. Pojazd wyposażony jest w dwubiegową skrzynię biegów. Dzięki temu silnik może pracować w optymalnym zakresie obrotów bez względu na prędkość pojazdu.

- Orion

Jest to jednoosobowy pojazd czterokołowy. Pojazd ten jest w końcowej fazie wykonania, przeznaczony będzie do jazdy miejskiej. Prace nad jego kompozytową strukturą trwały ponad pół roku, efektem, czego samonośne nadwozie zostało wykonane bardzo pieczołowicie. Gwarantuje ono olbrzymią wytrzymałość, jednocześnie ważąc jedyne 35 kg.

Ponadto pojazd posiada kontrolowaną strefę zgniotu, co gwarantuje bezpieczeństwo kierowcy nawet w przypadku kolizji.

Do użytego w pojeździe silnika zaprojektowaliśmy i wykonaliśmy autorski układ dolotowy. Wykorzystujemy sterownik Ecu Master EMU, przygotowujemy mapy dedykowane do ekstremalnie niskiego zużycia paliwa, optymalizujemy je wykorzystując hamownię silnikową oraz przejazdy testowe. Poza wszelkimi funkcjami niezbędnymi dla pojazdu takimi jak obsługa klaksonu, świateł czy wycieraczki, zależało nam także, aby na bieżąco monitorować, co dzieję się w nim w trakcie przejazdu. Część danych przesyłana bezpośrednio do kierowcy daje mu dodatkową wiedzę przydatną w trakcie jego trwania, reszta zaś poprzez moduł telemetryczny przesyłana jest do zespołu znajdującego się w pobliżu trasy. Informacje o prędkości, przyspieszeniu, obrotach silnika czy chwilowym zużyciu paliwa pozwalają na sprawniejsze szukanie oszczędności w kolejnych próbach. Tak, więc, w przypadku niepożądanej sytuacji, szybka informacja pozwala na natychmiastowe zatrzymanie pojazdu i zapobiega poważniejszym konsekwencjom.

3. Założenia projektowe

Głównym celem przyświecającym konstruktorom podczas budowy pojazdów tworzonych w Studenckim Kole Aerodynamiki Pojazdów było osiągnięcie minimalnego zużycia paliwa. Stąd wynika skupienie się na minimalizacji oporów aerodynamicznych oraz toczenia pojazdu oraz osiągnięcie jak największej sprawności jednostki napędowej, a także dobór optymalnej strategii przejazdu.

Opór aerodynamiczny zależny jest od gęstości powietrza, prędkości w kwadracie, powierzchni czołowej oraz współczynnika oporu aerodynamicznego. Pierwsze z założeń osiągnięto dzięki opracowaniu bryły o bardzo małym współczynniku oporu powietrza oraz minimalnej powierzchni czołowej, zapewniającej wymaganą ergonomię wnętrza pojazdu. Współczynnik ten zależy głównie od kształtu bryły oraz w bardzo małym stopniu, szczególnie dla prędkości, z którą poruszają się opisywane pojazdy, od tarcia powierzchniowego. Wpływ prędkości na wartość współczynnika oporu aerodynamicznego oraz na zachowanie się przepływu opisano szczegółowo w pozycji pracy McBeath (2017). Ogromny wpływ na wartość współczynnika oporu aerodynamicznego ma położenie miejsc oderwania przepływu, czyli miejsc, gdzie przepływ powietrza wokół pojazdu nie jest ukierunkowany przez jego kształt i powietrze zaczyna poruszać się dowolnie. Powstawanie oderwań wiąże się z występowaniem znaczących wartości niekorzystnych gradientów ciśnienia na powierzchni pojazdu (Piechna 2000). Dlatego kształt obu pojazdów nie ma gwałtownych przejść lub szczelin, na których mogłoby nastąpić oderwanie przepływu. W przypadku Kropelki

najszersze miejsce pojazdu jest blisko tyłu pojazdu, dzięki czemu udaje się utrzymać korzystny gradient ciśnienia jak najdłużej. Również zastosowanie nietypowej belki skrętnej o przekroju profilu lotniczego o minimalnym oporze oraz owiewek na koła, redukujących powstawanie wirów, pozwoliło zmniejszyć współczynnik oporu aerodynamicznego do poziomu około Cx = 0,13. Z kolei w Orionie wydłużono maksymalnie bryłę zapobiegając zbyt wczesnemu oderwaniu przepływu, zastosowano kształt dachu zbliżony do symetrycznego profilu aerodynamicznego, koła oraz lusterka umieszczono wewnątrz bryły, redukując wpływ oporu indukowanego na nich, a także zastosowano dyfuzor w tylnej części pojazdu, pozwalający podnieść ciśnienie powietrza przepływającego pod pojazdem. Zasadę działania dyfuzora opisano w pracy Katz (1996). Podczas badań seryjnie produkowanych samochodów zauważono, iż kąt pochylenia szyby przedniej oraz tylnej, a także kąt oraz miejsce ścięcia tyłu mają ogromny wpływ na miejsce oderwania przepływu, a co za tym idzie na opór aerodynamiczny pojazdu. Z tego powodu w pojazdach Kropelka oraz Orion kąt między przednią szybą a przodem jest bardzo mały. Taki układ pozwala obniżyć wartość gradientu ciśnienia i zmniejszyć wpływ lokalnego oderwania przepływu u dołu szyby na wartość oporu aerodynamicznego (Hucho i in. 1998). Podczas analizy aerodynamicznej pojazdu wzięto również pod uwagę kwestię zapewnienia prawidłowej wentylacji wnętrza pojazdu. Jest to bardzo istotne zagadnienie, ponieważ długość przejazdu to ponad 40 minut, często przy wysokich temperaturach powietrza, bądź w czasie opadów deszczu. W takich warunkach kierowca bez odpowiedniej wentylacji wnętrza pojazdu mógłby odczuwać znaczne zmęczenie, a w skrajnych przypadkach byłby narażony na utratę przytomności. Prawidłowo ukształtowany przepływ wewnątrz pojazdu dodatkowo zapobiega parowaniu szyb, poprawiając widoczność kierowcy oraz pozwala zminimalizować straty związane z przepływem wewnętrznym (Barnard 2001). Uwzględniając powyżej opisane aspekty udało się obniżyć opór aerodynamiczny pojazdu i uzyskać wartość około Cx = 0,18.

Drugie z założeń, czyli minimalizację oporów toczenia pojazdu uzyskano dzięki ograniczeniu masy wszelkich stosowanych elementów. Aby to osiągnąć oba pojazdy mają strukturę samonośną z kompozytu węglowego, który zapewnia wymaganą wytrzymałość i sztywność przy bardzo małej masie. Powszechnie stosowanym materiałem konstrukcyjnym w obu pojazdach, podobnie jak w lotnictwie, są stopy aluminium, które również wykazują się małą gęstością przy dobrych parametrach wytrzymałości mechanicznej. Popularnym ostatnio rozwiązaniem stosowanym w celu ograniczenia masy elementów jest ich wykonanie w technologii druku 3D. Po znaczącej redukcji masy w porównaniu z poprzednikiem, Orion waży ok. 85 kilogramów. Kolejnym sposobem zmniejszenia oporów toczenia jest

zastosowanie łożysk ceramicznych o zwiększonej sprawności, zminimalizowanie nieosiowości (tak zwanego bicia) na wszystkich piastach i osiach kół oraz na elementach przeniesienia napędu. Zapewnia to zmniejszenie strat energii na wyżej wymienionych elementach oraz ma ogromne znaczenie, jeśli chodzi o możliwość toczenia się pojazdu, czego kwestia poruszona będzie w dalszej części tego rozdziału. W kwestii minimalizacji oporów toczenia ogromną rolę odgrywają również opony, jako jedyne punkty kontaktu pojazdu z ziemią. Z powodu narzucenia przez regulamin rodzaju i marki opony, nasze działania w tej kwestii ograniczyły się do zastosowania felg szprychowych o jak najmniejszej masie a jednocześnie sztywności oraz zapewnienia jak największego ciśnienia powietrza w oponie.

Jedynym z najważniejszych elementów, jeśli chodzi o obniżenie spalania w pojeździe jest zapewnienie jak największej efektywności pracy silnika. Nasze pojazdy napędzane są fabrycznymi silnikami spalinowymi, które przeszły szereg modyfikacji w celu podniesienia ich sprawności. W przypadku Oriona został wymieniony cylinder oraz zmodyfikowana głowica, co pozwoliło w znacznym stopniu podnieść stopień sprężania. Zastosowanie nowego układu wydechowego zapewniło minimalny opór wydostawania się spalin, z kolei układ dolotowy zaprojektowany specjalnie do tego pojazdu pozwolił na jak najlepsze rozpylenie paliwa i wymieszanie go z powietrzem, tworząc mieszankę, która zapewnia bardziej efektywne spalanie w cylindrze. Jednak największą modyfikacją silnika zarówno Kropelki jak i Oriona była zamiana sposobu zasilania tych silników z zasilania gaźnikiem na zasilanie za pomocą elektronicznego wtrysku paliwa. Dzięki temu można opracować mapę precyzującą ilość dostarczanego do silnika paliwa w ciągu cyklu pracy. Dobrze opracowany program sterujący silnikiem pozwala zmniejszyć jego spalanie nawet o połowę.

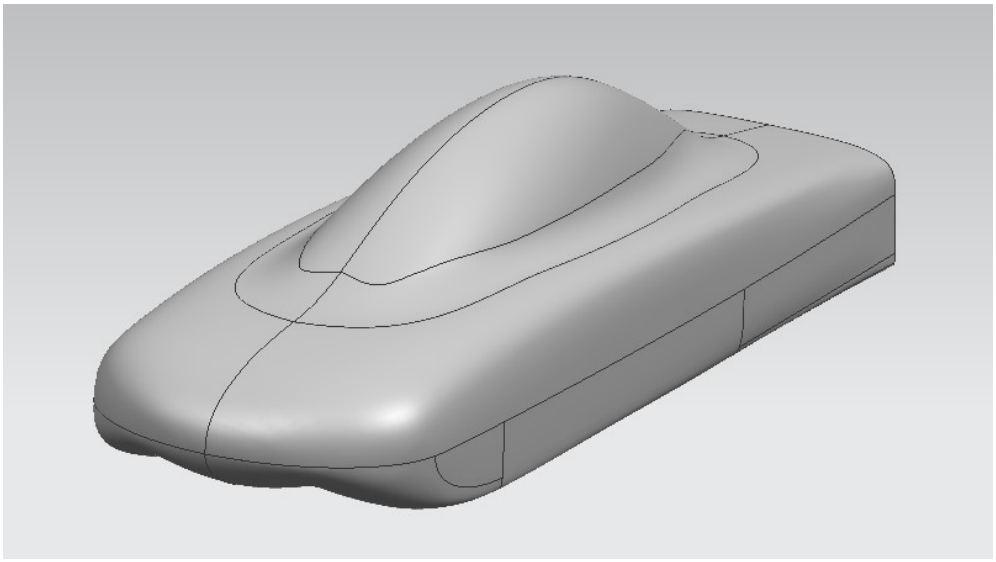
Ostatnią z opisywanych w tym rozdziale kwestii jest opracowanie właściwej strategii przejazdu po torze podczas zawodów. Skupimy się tu na strategii dla pojazdu Orion, ponieważ dla różnych kategorii pojazdów przejazd ten wygląda inaczej. Regulamin zawodów Shell Eco-marathon wymaga, aby pojazdy kategorii „Urban Concept” pokonały 10 okrążeń wokół wyznaczonego toru, przy czym przy każdym okrążeniu mają obowiązek się zatrzymać, co ma symulować jazdę w ruchu miejskim, czyli zatrzymanie przed sygnalizacją świetlną. Każdy z takich przejazdów ma określoną przez sędziów maksymalną długość czasu przejazdu. Optymalna strategia przejazdu zakłada wykorzystanie silnika tylko do rozpędzenia pojazdu, następnie zgaszenie go i wykorzystanie bezwładności pojazdu oraz niskich oporów do pokonania jak najdłuższego odcinka toru tocząc się. W zależności od długości toru, jego nachylenia, liczby zakrętów bądź nierówności na nawierzchni, a także ruchu innych uczestników zawodów, ilość sytuacji, gdy uruchamiany jest silnik w czasie okrążenia może

być różna. Ograniczenie maksymalnego czasu na przejechanie 10 okrążeń powoduje, iż optymalny czas jednego krążenia to czas tego ograniczenia podzielony przez całkowitą liczbę okrążeń. Wynika to z faktu, że przy niższych prędkościach i w rezultacie dłuższych czasach pokonywania toru można opracować strategię pozwalającą na mniejszą liczbę uruchomień silnika. Również duże znaczenie w czasie przejazdu mają umiejętności kierowcy. Pokonanie zakrętu po niewłaściwej linii bądź niepotrzebne hamowanie powoduje wytracanie energii kinetycznej rozpędzonego pojazdu, przez co znacząco rośnie spalanie.

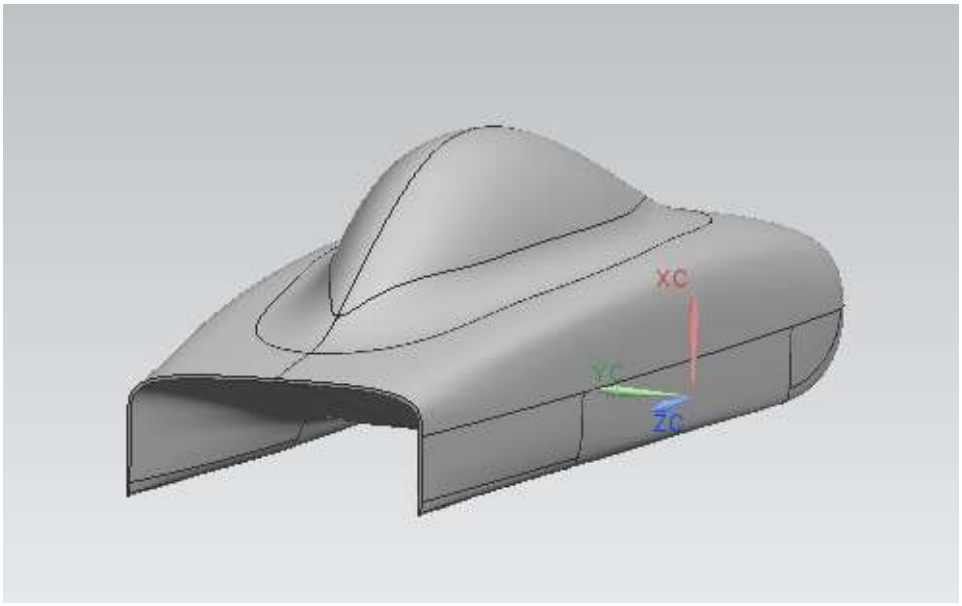
Ciekawą kwestią wartą odnotowania było zastąpienie wielu elementów mechanicznych elektronicznymi (np. przepustnica), co pozwoliło zredukować ich masę. Cała instalacja elektroniczna samochodu wykorzystuje do komunikacji magistralę CAN, czyli rozwiązanie bardzo popularne w seryjnie produkowanych samochodach. Zapewnia ona możliwość szybkiego oraz niezależnego porozumiewanie się między poszczególnymi elementami samochodu, takimi jak sterownik silnika, przepustnica, światła, bądź kierownica. Od tegorocznej edycji zawodów Shell Eco-marathon, oprócz spalania paliwa, mierzone będzie również zużycie energii elektrycznej. Z tego powodu w pojeździe zastosowano światła LED, pozwalające na oszczędzanie energii elektrycznej.

4. Etapy pracy na przykładzie Oriona

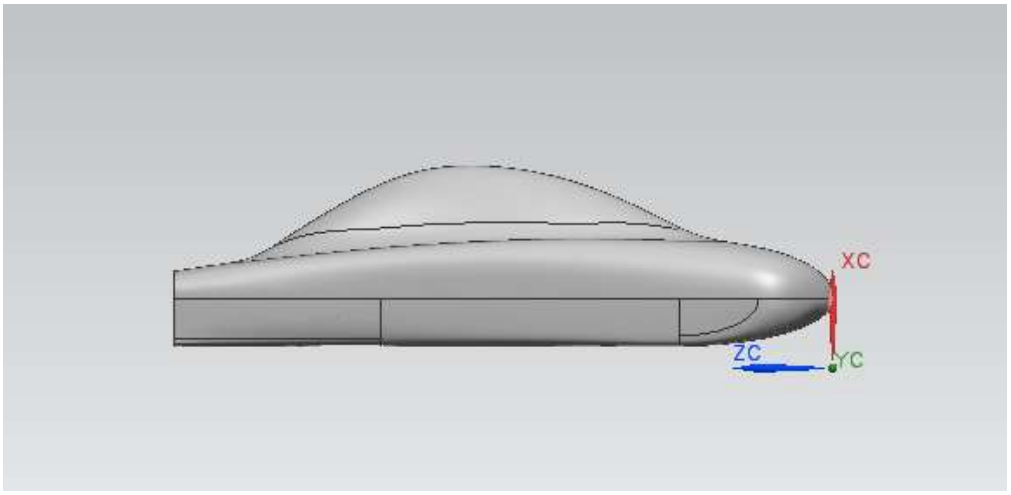
Prace nad projektem nowego samochodu rozpoczęte zostały w 2016 roku. W wyniku optymalizacji komputerowej początkowo przyjętej bryły pod kątem minimalizacji współczynnika oporu aerodynamicznego, ustalono końcowy kształt pojazdu.



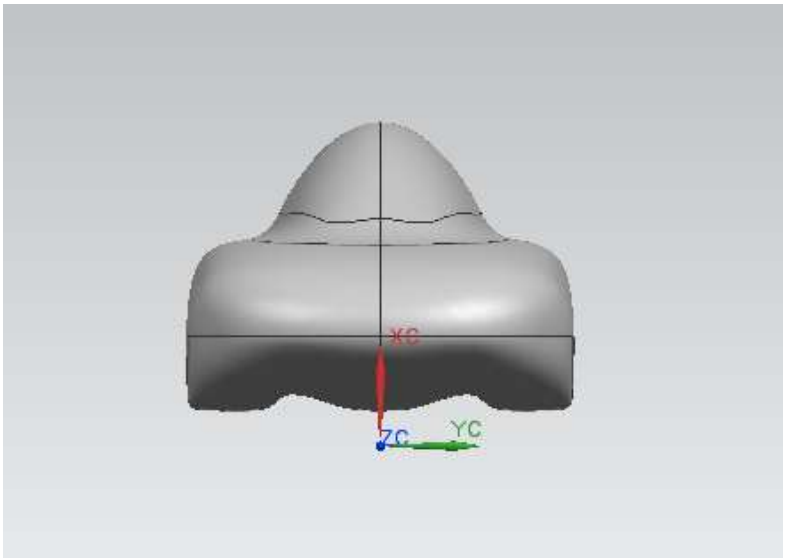
Rys. 7. Model pojazdu - widok aksonometryczny z przodu



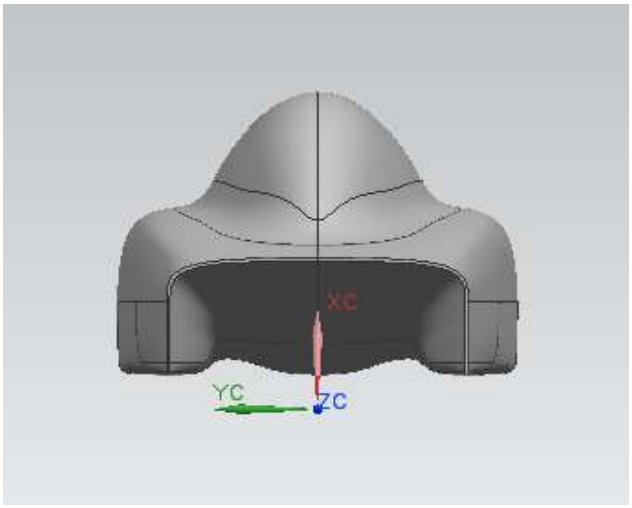
Rys. 8. Model pojazdu - widok aksonometryczny z tyłu



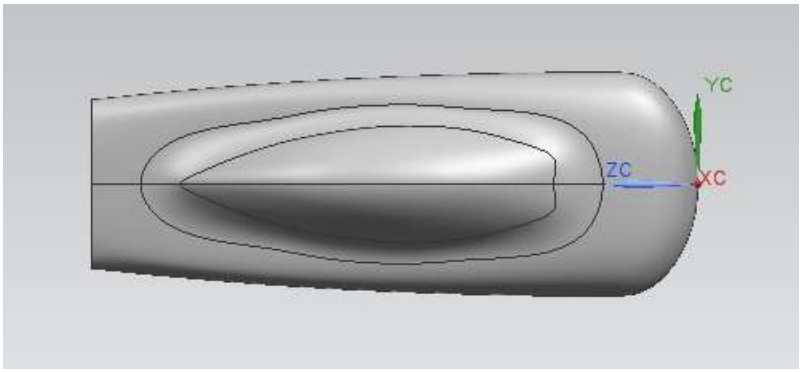
Rys. 9. Model pojazdu - widok z boku



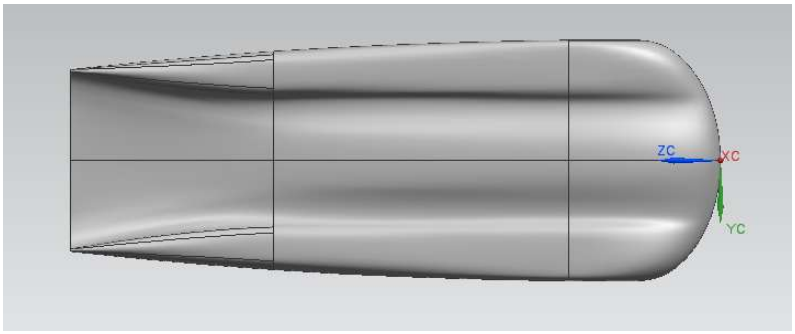
Rys. 10. Model pojazdu - widok z przodu



Rys. 11. Model pojazdu - widok z tyłu



Rys. 12. Model pojazdu - widok z góry



Rys. 13. Model pojazdu - widok z dołu

Fizyczne wykonanie modelu, z powodu braku dostępu do frezarki, zostało zlecone zewnętrznej firmie. Zadania skierowane do członków zespołu pojawiły się w sierpniu 2016 roku. Pierwszym z nich było umiejętne nałożenie szpachli wykańczającej powierzchnię modelu, co zajęło mnóstwo czasu. Kolejny etap to polerowanie w celu ułożenia warstw żelkotu oraz włókna szklanego, z których to wykonane były foremniki. Następnie foremniki zostały wyszlifowane, co wyeliminowało widoczne niedoskonałości powierzchni oraz zapewniło zmniejszenie jej porowatości. Kolejnym krokiem było nałożenie na powierzchnię

roboczą foremnika rozdzielacza w formie wosku, który umożliwił późniejsze rozdzielenie gotowego produktu od formy. Z tak przygotowaną powierzchnią można było przejść do nakładania podkładu pod lakier, a następnie kolejnych warstw tkaniny z włókna węglowego, przesyconej żywicą epoksydową. Po rozformowaniu wystarczyło wkleić elementy wzmacniające, takie jak podłużnice, wygrzać cały model oraz wyciąć stosowne otwory. Ostatnia fazą jest ponowne wyszlifowanie, nałożenie lakieru i polerowanie. Prace nad całkowicie samonośną strukturą zostały zakończone na początku czerwca 2017 roku.

Rys. 14. Struktura pojazdu po wycięciu otworów.

Rys. 15. Struktura pojazdu po pomalowaniu - widok z przodu.

Rys. 16. Struktura pojazdu po pomalowaniu - widok z boku.

Równolegle do prac nad strukturą odbywały się prace nad mechaniką, elektroniką oraz silnikiem. Ukończenie mechaniki nastąpiło marcu 2018 roku, elektroniki miesiąc później. Zastosowana w pojeździe jednostka napędowa to silnik GY6 konstrukcji firmy SYM. Stosowany jest zazwyczaj w skuterach.

Parametry silnika:

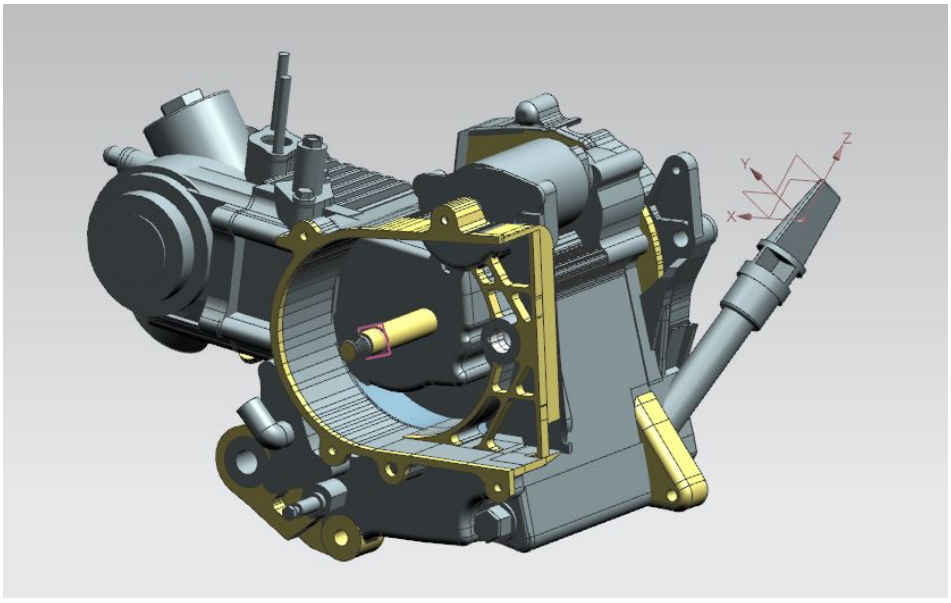
$wariant\ 139QMB$

$pojemność\ 49{,}5\ cm^3$

$moc\ 2{,}95\ hp\ =\ 2{,}20\ kW$

$prędkość\ obrotowa\ 7500\ RPM$

Mocowanie oryginalnej przekładni silnika zostanie przycięte w celu pozbycia się zbędnej masy, co ma kluczowe znaczenie przy budowie ekonomicznych pojazdów.



Rys. 17. Model silnika

5. Wyniki

Kropelka 2.0 osiągnęła wynik ponad 300 km na litrze spalanego paliwa podczas zawodów Shell Eco-marathon we francuskim Le Mans, co jest nieco niższym rezultatem od oczekiwanego, ale mimo wszystko bardzo dobrym. Podczas najbliższych zawodów planujemy osiągnąć tymże pojazdem wyższy wynik. Orion jeszcze nie miał okazji zrobić żadnego zmierzonego przejazdu. Jest on jednak lżejszy od swojego poprzednika, który osiągnął prawie 400km na litrze paliwa, zatem można spodziewać się wyższego rezultatu, również podczas zawodów Shell Eco-marathon.

6.Wnioski

Działalność członków Koła w zakresie zastosowania nowoczesnych technologii do budowy pojazdów o minimalnym zużyciu paliwa ma ogromne znaczenie ze względu na kurczące się zasoby paliw kopalnych oraz rosnące ceny tychże paliw. Metody zmniejszenia spalania również zapewniają zmniejszenie emisji szkodliwych spalin do atmosfery, co stanowi aspekt ekologiczny opisywanego tematu. Dzięki możliwości zastosowania zdobytej na studiach wiedzy w praktyce oraz poszerzeniu jej o nowe informacje poprzez szkolenia i warsztaty studenci działający aktywnie w ramach Studenckiego Koła Aerodynamiki Pojazdów uzyskują kwalifikacje zapewniające lepszą pozycję na rynku pracy. Zastosowanie nowoczesnych technologii w praktyce oraz nietypowych rozwiązań technicznych opracowanych przez członków SKAP przyczynia się również do rozwoju gospodarki naszego kraju.

Podsumowując, praca nad projektami opisanymi w tym artykule jest atrakcyjną formą rozwoju dla studentów, a także, dzięki możliwości współpracy poprzez wsparcie finansowe koła, dobrą okazją dla firm na podniesienie wartości marketingowej swojej marki.

7. Literatura

Barnard R.H., 2001. Road Vehicle Aerodynamic Design, 2nd edition. Mech Aero Publishing. ISBN 0954073401.

Hucho, Wolf-Henrich, 1988. Aerodynamics of road vehicles, 4th edition. SAE International.

Katz J., 1996. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed, 2nd edition. Bentley (Robert) Inc., Cambridge.

McBeath S., 2017. Competition Car Aerodynamics, 3rd edition. Veloce Publishing.

Piechna J., 2000. Podstawy aerodynamiki pojazdów, Wydanie 1, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000.

Właściwości tribologiczne PA6 i jego kompozytów napełnionych włóknem węglowym

Aneta Niemiec[(1)]

[1]Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Aneta Niemiec: aneta.niemiec@pwr.edu.pl

Streszczenie
Artykuł dotyczy właściwości tribologicznych czystego PA6 i jego kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym (CF). W celu poprawy właściwości mechanicznych i tribologicznych materiału na bazie poliamidu, jedną z najbardziej wydajnych metod jest dodanie do matrycy różnego rodzaju włókien, jako wzmocnienia. Dodatek włóknistego zbrojenia odgrywa główną rolę w utrzymaniu wytrzymałości, sztywności, stabilności termicznej i właściwości ciernych materiału kompozytowego. Badania nad właściwościami tribologicznymi i mechanicznymi wykazały znaczną poprawę wybranych parametrów PA6 wzmocnionego włóknem węglowym. Potwierdzają one, że kompozyt na bazie PA6 wykazuje lepsze cechy trybologiczne niż niemodyfikowany poliamid 6. Optymalną redukcję zużycia można uzyskać, gdy zawartość włókna węglowego osiągnie odpowiednią objętość, np. 20% obj.

Słowa kluczowe: PA6, włókno węglowe, tarcie

A study of tribological properties of PA6 and its composites reinforced with carbon fiber

Summary
The paper concerns tribological properties of neat PA6 and its composites reinforced with carbon fiber (CF). To further improve the mechanical and tribological performance of polyamide based friction material, one of the most efficient methods is add various kinds of fiber into the matrix as reinforcement. The addition of fibrous reinforcement plays a major role in maintaining strength, stiffness, thermal stability and frictional properties of the composite material. Overall, the tribological properties showed significant improvement as well as mechanical properties with the reinforcement of CF in PA6. All filled polyamide 6 have superior tribological characteristics to unfilled polyamides 6. The optimum wear reduction can be obtained when the content of carbon fiber reached the proper volume e.g. 20 vol %.

Keywords: PA6, carbon fiber, friction

1. Introduction

Engineering plastics have recently gained importance in the tribo-applications, such as bearings, seals, and gears. These materials are greatly appealing in the automotive industry to reduce the weight and cost of automotive parts. These plastics owe their advantages in such applications to easy production, high strength per weight, and self-lubricating properties. Because of their perfect balance of various mechanical properties such as high strength, toughness, and impact resistance, polyamides are the most frequently used engineering plastics for the production of mechanical/tribological components (Bijwe et al. 2006). Polyamide is an engineering thermoplastic that is widely used in engineering application due to its outstanding properties such as high strength, excellent corrosion resistance, exhibit excellence wear resistance and favorable self-lubricating property (low coefficient of friction). Polyamides exhibit a number of interesting properties such as high

thermal stability, chemical resistance and excellent mechanical properties. In recent few years considerable research has been devoted to the preparation of PA6 reinforced composites. Practically, polyamide 6 is the most desirable polyamides due to a reasonable balance of cost, performance, versatility and processability. However the existence of abundant acylamino groups in the material results in some defects, such as strong waterabsorptivity (water acts as a plasticizer) which resulting changes in mechanical properties, instability of structural sizes and highly shrinkage.

PA6 (fig.1) is a semicrystalline and aliphatic thermoplastic (T_g = 50 °C, T_m = 220 °C) which are produced on a much larger scale than aromatic polyamides and are the most important class of engineering thermoplastics.PA6 has excellent mechanical properties including high tensile strength, high flexibility, good resilience, low creep and high toughness. Moreover, polymer has good resistance to oils, bases, fungi and many solvents.

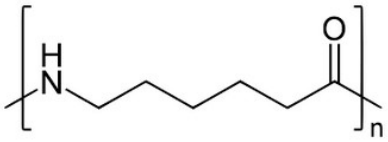


Fig. 1. Chemical structure of PA6

It has been reported that polyamides, relative to other polymers, have a superior wear resistance when sliding against a steel counterface (Pogacnik et al. 2012; Glaeser 1992; Meng et al. 2009; Kowalewski et al. 2011; Ptak 2016). Coefficient of friction (COF) of polyamides greatly depends on the load, sliding speed and temperature and under certain rubbing conditions (Watanable et al. 1986).

According to (Friedrich et al. 2005) the tribological behavior of polymers can be improved considerably by addition of particulate fillers and fibers e.g. glass and carbon. Fiber-reinforced polymer composites are an important class of polymer composites which possess unique self-lubricating capabilities and low load. Very common in the mechanical reinforcement of engineering plastics are fiber reinforcements e.g. carbon, glass and aramid fibers, which are the main candidates and have been widely employed. According to many researches the incorporation of fiber reinforcement improved the wear resistance and reduce the coefficient of friction (Friedrich et al. 2005; Srinath et al. 2005; Gordon et al. 2009; Bolvari et al. 1997). Generally the wear resistance was improved with lower fiber content e.g. carbon or glass fiber. This was attributed to a reduced ability of ploughing, tearing and other non-adhesive components of wear, because the fibers provided good interfacial adhesion between the matrix and the fiber reinforcement existed. The wear performance of

PA6 greatly depends on molecular weight, degree of crystallinity and water absorption. Improvement of wear behavior of PA6 by incorporating various conventional solid lubricants and fiber were found to be effective at certain amount.

Commonly, polymeric materials are modified using the monomer copolymerization, the mechanical modification, the interpenetrating polymer network (IPN), or the chemical modification method. The mechanical modification method is often applied to prepare a copolymer due to its simple technique, little investment to equipment, low cost and synergetic effect between two phases. Neat PA materials and PA compounds with reinforced with short carbon fibers have advantages over other kinds of fibers. Carbon fibers are characterized by excellent thermal stability and conductively, high modulus and strength, excellent electrical properties and potentially lubricating ability (Sun et al. 2016; Sharma et al. 2014; Liu et al. 2012; Zhang et al. 2013). Carbon fiber reinforcement dominates in high performance applications due to its outstanding mechanical properties combined with low weight. It is crucial to be aware that the influence of the structure of composites on abrasive wear is a complex function of the properties and interactions of the matrix. The fibers can either enhance or degrade the wear resistance of polymeric composited (Li et al. 2009). After fiber application, the degree of crystallinity of polyamide can be much increased (PA6 has an average density of 1.33 g/cm^3, carbon fiber of 1.74g/cm^3).

It is worth to mentioned that more than 60 % of the aliphatic polyamides produced are used in commercial fiber applications. This includes carpets, garments, seatbelts, ropes and tire reinforcements. Nylon fibers and mineral reinforced polyamide resins are also widely used for engineering and industrial applications which include almost every industry and market e.g. in the automotive industry, where nylon is used for wire and cable jacketing, cooling fans, air intake, turbo air ducts, valve and engine covers, brake and power steering reservoirs and gears for windshields wipers.

In the current study, the tribological behavior of PA6 and its composites reinforced with carbon fiber were studied.

2. Tribological properties of PA6 and its composites

The tribological properties of the polymer composites depend greatly on the formation of the transfer films. A good transfer film would effectively cushion the counterface asperities from being direct contact with the sample surface as well as reduce the friction coefficient and wear loss of the materials.It is important in the transient and subsequent steady states (when a proper transfer film adheres on the metal counterface) of a wear process on metals to form a thin, uniform, and stable transfer film on metal counterfaces (Friedrich et al. 2008).

According to Zhao et al. (1999), Bahadur et al. (1992) and Srinath et al. (2007) the quality, stability, and bonding characteristics of the transfer films are crucial in reducing polymer friction and wear.

Depends on functions of time, load, sliding speed, temperature, vol% of fibers, tribological properties will be slightly different. Li et al. (2009) have shown that for 20 vol% and 30 vol% CF/PA6 the coefficient of friction increase with respect of time and arrive at a relatively stable value. For 10 vol% of carbon fiber, the coefficient of friction increases during early testing and then decreases to a steady state, thereafter suddenly increases and again stays at a constant level. 20 vol% carbon fiber reinforced PA6 composite can exhibits the lowest friction coefficient. The average COF was reduced after the reinforcement of the carbon fiber and the PA6 composited exhibited lowest average COF as compared to pure PA6. To sum up, the average coefficient of friction was found to be reduced with the increasing loads.

The composite exhibits better friction behavior since the reinforcing carbon fiber can reduce effectively the adhesion force and the plough. Moreover, addition of those fibers strengthened the combination of the interface between the fibers and the PA6 matrix and increased the elastic modulus of the PA6 composites. This may clarify why the friction coefficient of the composite is reduced. Carbon fiber is a hard phase in the soft polymer matrix, so they can reduce the true contact area with the counterface under certain load. As a result, it exhibits an important influence on reducing the plough and the adhesion between the relative sliding parts. The carbon fibers influence the tribological behavior of PA6 compositesas it could lead to fractures in the interface of the two constituents and it could reduce the plough and the adhesion between the two sliding bodies (Shan-Shan et al. 2018).

Filled with lower content carbon fibers, the composite exhibits higher friction coefficient compared with pure PA6. The higher friction coefficients in these cases appear to be derived from the activation of fracture in the interface of reinforcing fibers and PA6 matrix as during the sliding process. For PA6 composite filled with higher carbon fiber content the coefficients of the friction will be lower compared with pure PA6. Carbon fiber is a graphitized carbon with the hexagonal planes of its crystals and graphitized carbon have very good lubricating propertiesso it can be responsible for the reduction of friction coefficient as its composites slide against steel. The graphite debris forms a thin lubricating film on the counterface, thereby reducing the abrasion process drastically. This resulted in low friction coefficient and low wear of the composite compared with neat PA6. Some fibers are microcracked, pulverized or broken into long pieces. The multiple layers of granular wear debris of the

carbon fibers accumulated near the edge and are responsible for very low friction coefficient due to their inherent lubricating action (Fengxia et al. 2016; Li et al. 2009; Li et al. 2010).

According to Li et al. (2009) the addition of some certain carbon fibers can improve the wear resistance of the PA6 composites. However when the carbon fiber content was over a certain one, the wear resistance was, in turn, reduced because the fibers would be easily cracked or even dragged due to the lower continuity of the PA6 matrix and poor harmonization of deformation of the fibers with the matrix under the alterative interaction of the asperities of the counterface during sliding. Moreover, stress concentration is easily occurred at the interface due to inhomogeneous plastic deformation between reinforcement and matrix, which can provides preferential sites for stress concentration. The composite that contained a higher fiber fraction may produce more abrasion debris, which contributes negatively to the wear resistance. To sum up, the higher the CF content, the more the stress concentration sites will be.

3. Tests of selected polyamide properties

- Coefficient of friction

The wear and frictional properties of the PA6 and its composites can be performed using pin-on-disc tester under dry sliding conditions. This machine measures the friction force and contact temperature during the wear tests. The test can be performed under a specific normal load and rotational sliding speed of a ring sample against a smooth steel plate. During the test the friction force is measured. In the wear test, a ring of polymer slides against a smooth stainless-steel counterface in a rotational mode. The counter face is a thin steel disc with a 50 mm diameter, 10 mm thickness, and mean roughness and hardness. The steel counterface should be cleaned with alcohol and dried after each test.

The other device which can be used for friction and wear tests is ball-on-disc tribometer. The conception of doing measurements is similar to pin-on-disc tribometer, but in this case the sample is the rotating disc.

- Wear rate

The wear rate was measured by weighing samples before and after each test and recording the volume reduction per unit distance traveled, knowing density of the samples. Average magnitudes of COF and contact temperature in the steady-state region of tests were calculated for each sample. To minimize data scattering, each test should be repeated at least three times, and the average value and the standard deviation can be reported. The contact temperature can be measured by a thermocouple placed right under the thin steel counterface.

According to Fengxia et al. (2016) and Li et al. (2010) PA6 reinforced carbon fiber shows significant reduction in the volume loss.During the sliding wear test it could be observed that the samples were subjected to micro-cutting and micro-ploughing of the counterface asperities. This will cause the removal of surface materials from the main body of the sample. The reduction of the volume loss for PA6 composites proves that carbon fiber has the ability in increasing the load-carrying capacity and prevents the removal of the contacting surface materials. The soft polymer matrix can be protected from easy removal from the bulk body and reduce the stress exerted by the counterface by the presence of carbon fiber in the composite. To sum up, the wear resistance of the PA6 composites will be increased.

- Worn surfaces

The worn surfaces of the composites to study distribution and engagement of the carbon fiber in the PA6 matrix can be observed under the scanning electron microscope (SEM). The surfaces of the samples are recommended to coated with e.g. gold layer by using a vacuum sputter chamber before scanning.The SEM images of worn surfaces of neat polyamide and its composites are shown in fig.2. According to researches Fengxia et al. (2016) and Li et al. (2009) the wear grooves and furrow marks caused by the micro-cutting and micro-ploughing of the counterface asperities can be observed for those materials. The reinforcement of carbon fiber of PA6 has influence on reduction the severity of wear grooves on the worn surface. On vol% carbon fiber in PA6, shallower wear grooves and smoother surfaces can be observed as compared to neat PA6. This shown that the reinforcement of carbon fiber into PA6 increase the micro-cutting and micro-ploughing resistance.

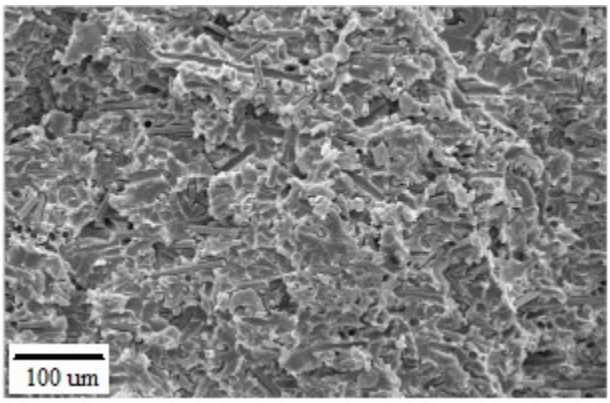


Fig. 2. Scanning electron microscope image of the fracture surface of carbon fiber/ PA6 composites(Fengxia et al. 2016)

4. Conclusions

This review presents information about tribological properties of composites of polyamide 6 (PA6) containing the carbon fiber.

The incorporation of carbon fiber into PA6 can either increase or reduce friction coefficient and reduce volumetric wear of the materials in sliding against stainless steel under dry sliding condition The coefficient of friction of PA6 have increased, while the wear resistance increased with the addition of carbon fiber, as compared to neat PA6. Neat PA6 exhibited rough, discontinuous and was fully covered, smooth and continuous. From the results obtained, PA6 composites are capable to be implemented in applications of which wear and friction issues can be reduced. Overall, the reinforcement of carbon fiber into PA6 matrix significantly improved the tribological properties of PA6. This improvement in the tribological properties of PA6 was correlated to the contribution of carbon fiber to the tribological reinforcement (wear rate and coefficient of friction) of the neat polymer which resulted in the stability of the transferred films. This leads to faster achievement of the steady state and lower values of the coefficient of friction. For the neat PA6 under dry sliding the primary wear mechanisms is the adherence and plastic deformation, but when incorporated with carbonfiber, the adherence and plastic deformation are greatly reduced.

To improve tribological properties one of major issues are suitable surface treatments and preparation methods are important for achieving a uniform dispersion of carbon fibers in polymer matrices and for increasing the interfacial adhesion between the fibers and matrix in order to achieving significantly improved useful properties.

5. References

Bahadur S., Gong D., 1992. The role of copper compounds as fillers in transfer film formation and wear of nylon. *Wear*. 154: 207–223.

Bijwe J., Naidu V., Bhatnagar N., Fahim M., 2006. Optimum concentration of reinforcement and solid lubricant in polyamide 12 composites for best tribo-performance in two wear modes. Tribolological Letters. 21:57–64.

Bolvari A., Glenn S., Janssen R., Ellis C., 1997. Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composites. *Wear*. 203–204:697–702.

Fengxia D., Guoliang H., Fengxiang C., Fengyuan Y., Liang L., 2016. The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures. *Tribology International.* 101: 291–300.

Friedrich K., Schlarb A.K., 2008. Tribology of polymeric nanocomposites. Elsevier, ISBN: 9788–0–444–53155–1.

Friedrich K., Zhang Z., Schlarb A.K., 2005. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Composites Science and Technology.* 65: 2329–2343.

Glaeser W.A., 1992. Materials for tribology. Elsevier, ISBN 0 444 88495 5.

Gordon D.H., Kukureka S.N., 2009. The wear and friction of polyamide 46 and polyamide 46/aramid-fibre composites in sliding–rolling contact. *Wear*, 267: 669–678.

Kowalewski P., Wieleba W., Ptak A., 2011. Wpływ parametrów ruchowych tarcia na mikrotwardość wybranych polimerów ślizgowych. *Tribologia*. 5: 109–116 (Polish).

Li J., Xia Y.C., 2009. The reinforcement effect of carbon fiber on the friction and wear properties of carbon fiber reinforced PA6 composites. *Fibers and Polymers*. 4: 519–525.

Li J., Xia Y.C., 2010. The friction and wear propertiesof thermoplastic pa6 composites filled with carbon fiber. *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 23: 337–349.

Liu Y., Kumar S., 2012. Recent progress in fabrication, structure and properties of carbon fibers. *Polymer Review*. 52: 234–258.

Meng H., Sui G.X., Xie G.Y., Yang R., 2009. Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology.* 69: 606–611.

Pogacnik A., Kalin M., 2012. Parameters influencing the running-in and long-term tribological behavior of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel. Wear 290–291:140–148.

Ptak A., 2016. The influence of the motion parameters on the surface layer of metal-polymer sliding pairs at low temperatures. *Tribologia.* 1: 79–87.

Shan–Shan Y., Fan–Long J., Kyong Y.R., David H., Soo–Jin P., 2018. Recent advances in carbon–fiber–reinforced thermoplastic composites: A review. Composited Part B. 142: 241–250.

Sharma M., Gao S., Maeder E., Sharma H., Wei L.Y., Bijwe J., 2014. Carbon fiber surfaces and composite interphaces. *Composites Science and Technology*. 102: 35–50.

Srinath G., Gnanamoorthy R., 2005. Effect of short fiber reinforcement on the friction and wear behaviour of nylon 66. *Applied Composite Materials*. 12: 369–383.

Srinath G., Gnanamoorthy R., 2007. Sliding wear performance of polyamide 6–clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology*. 67: 399–405.

Sun Y., Zhang Q., Gao L., Zhou X., Cheng Y., Zhang P., 2016. Experimental study on tribological properties of carbon/ polytetrafluoroethylene hybrid fabric reinforced composite under heavy loads and oil lubrication. *Tribological International.* 94: 82–86.

Watanabe M., Yamaguchi H., 1986. The friction and wear properties of nylon. *Wear*. 110: 379–388.

Zhang B., Zheng X., Li H., Lin J., 2013. Application of carbon based nanomaterials in sample preparation: a review. *Analytica Chimica Acta*. 784: 1–17.
Zhao Q., Bahadur S., 1999. The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear. *Wear.* 225–229: 660–668.

Wpływ promieniowania gamma na tarcie ślizgowe w układzie PEEK-stal

Aneta Niemiec[(1)]

[1]Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Aneta Niemiec: aneta.niemiec@pwr.edu.pl

Streszczenie
Termoplasty są materiałami o bardzo szerokich zastosowaniach np. PEEK (polieteroeteroketon). PEEK jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów termoplastycznych. Ponadto PEEK wykazuje dobrą odporność na wpływ wielu kwasów, roztworów, olejów i smarów. Wysoka biokompatybilność i zdolność do sterylizacji sprawia, że jest to odpowiedni materiał do zastosowań medycznych. Ze względu na te właściwości PEEK jest szeroko stosowany do zastosowań przemysłowych np. w motoryzacji, elektronice i diagnostyce. Ten polimer jest materiałem semikrystalicznym zawierającym amorficzne i krystaliczne fazy (łańcuchy polimerowe w regionie krystalicznym są gęstsze niż te w obszarze amorficznym).Istnieje kilka metod modyfikacji polimerów, jedną z nich jest poddanie ich wpływowi promieniowania gamma. Zabieg ten stosowany jest celem modyfikacji właściwości użytkowych polimeru np. mechanicznych i tribologicznych. W artykule opisano wpływ promieniowania gamma na tarcie pomiędzy polimerem a przeciwelementem stalowym. Analizowany PEEK podlegał wpływowi promieniowania gamma w dawce 50, 100 i 150 kGy. Materiał napromieniowany charakteryzuje się niższym zużyciem oraz zwiększeniem wartości współczynnika tarcia, co jest związane ze zwiększeniem twardości, a przede wszystkim ze zmianami strukturalnymi materiału.

Słowa kluczowe: PEEK, tarcie, zużywanie, promieniowanie gamma

Gamma irradiation effects of friction between PEEK-steel surfaces

Summary
Thermoplastics are materials with very wide applications e.g. PEEK (polyetheretherketone). PEEK is one of the most commonly used thermoplastic materials. Moreover, PEEK has good resistance to many acids, solutions, oils and greases. Its high biocompatibility and ability to be sterilized makes them highly suitable for medical applications. Due to these properties, PEEK is widely used for various applications e.g. automotive, electronics and diagnosing. This polymer is a semicrystalline material containing amorphous and crystalline phases (polymer chains in crystalline region are denser than those on the amorphous region). There are several methods for modifying polymers, one of them is modification by gamma irradiation. The aim of this method is to modify the functional properties of the polymer, e.g. mechanical and tribological properties. The article describes the influence of gamma radiation on the friction between polymer and steel counter-element. Samples of PEEK were irradiated with gamma radiation at dose of 50, 100 and 150 kGy. The irradiated material is characterized by lower wear with an increase in the coefficient of friction, which is related to the increase in hardness, and above all to the structural changes of the material.

Keywords: PEEK, friction, wear, gamma irradiation

1. Introduction

Thermoplastics are a group of materials with wide applications in various industries. Due to their possible application, their properties are being improved. One of the method using nowadays is radiation modification using gamma radiation. Ionizing radiation is widely used in our daily life. International use of radiation in industry, health and power production is increasing rapidly. The primary application of gamma radiation is for medical devices, ranging from sterile dressings, tubes, catheters, syringes, infusions assemblies and implants. Also it is used for single-use disposable technologies such as bags for holding products or devices for making aseptic connections. Gamma radiation is also used in the food industry to

dry or dehydrate fruit vegetables, herbs and meat. Although gamma radiation is commonly used to sterilize plastics, not all types of plastics can be treated at a sufficient dose to achieve sterilization without degrading the plastic. Ionising radiation generates free radicals in plastic polymers, leading to degradation from chain scission or alterations to crosslinking. The material exposed to this radiation exhibits altered features relative to non-irradiated material. Radiation dose required to bring major changes in the morphological structure of the polymer, appearance, chemical and physical states, mechanical, tribological, electrical and thermal properties.Gamma irradiation treatment provides a unique way to modify the chemical, structural, optical, mechanical and electrical properties of polymer by causing irreversible changes in their macromolecular structure (L'Annunziata 2007).

High performance materials, such as polyetheretherketone are more widely used as bearing and slider materials. The friction and wear properties of these materials become greater interest and importance, encourages research and development efforts in this field. PEEK which exhibits a very low friction coefficient against steel, is widely used in technical applications because of its high wear resistance. PEEK is a high performance and semicrystalline thermoplastic. Its relatively stiff backbone gives excellent high-temperature stability. It has a high glass transition temperature (T_g= 150°C), a high melting temperature (T_m = 343°C), high continuous service temperature with the advantages of easy processability by injection moulding and other techniques common to thermoplastic polymers. PEEK has good ductility, formability and light weight. It is making them an obvious choice for replacing ceramic and metallic components (Jones et al. 1985).

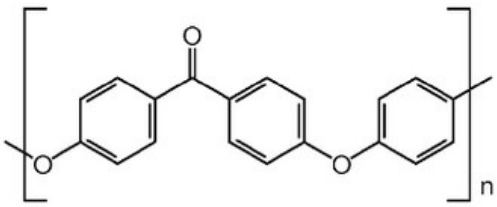


Fig. 1. Chemical structure of PEEK

Many investigations on the friction and wear properties of PEEK have been carried out (Friedrich et al. 1991) also for metal-polymer sliding pairs (Ptak 2016; Kowalewski et al. 2011).

The aim of this conducted research is to present the influence of gamma radiation on the friction process between polymeric material cooperating in sliding movement with steel. The values of coefficient of friction and intensity of wear as well as the change of the surface of the material after the friction process were subject to analysis.

2. Experimental

- Material

Commercial polyetheretherketone (Fig.1) was used in this study, because of its high thermal, oxidative and hydrolytic stability.

- Gamma irradiation

PEEK was irriadiated by using ^{60}Co as irradiation source in a gamma chamber. The irradiation was carried out in the presence of air by following delivering radiation doses 50, 100 and 150 kGy (gamma rays of energy 4 MeV) and an irradiation temperature of 25 °C.

- Friction and wear properties

The polymers samples of size: 8mm length and 30 mm diameter, were cut fromthe commercially available materials and were used without any further treatment. One sample was kept as neat polymer and the other samples were subjected to irradiation.The gamma irradiation has been found to have the ability to expose the whole area of the sample and hence expected to create homogenous modification in it. Tribological properties such as friction coefficient, linear tribological wear and friction force were measured by using *pin-on-disc* tribometer T-01 M. Measurements were carried out at room temperature in air atmosphere. The change in mechanical and tribological properties induced by irradiation of 50, 100 and 150 kGy were studied for PEEK also for non irradiated sample of this polymer. Samples cooperated during the test with a flat surface made of steel C45, the surface of which was mechanically polished and had an average of the profilometric parameter of roughness Ra= 0,6 μm and the hardness of 40 HRC. The geometrical dimensions of the steel roll were diameter 38 mm and width 5 mm. PEEK pin samples were held by a pin holder against the rotating disc mounted on disc holder. Before each test, polymer pin and C45 stainless steel discs were thoroughly cleaned with alcohol/ acetone. The tests were conveyedon a 1000 m path of friction with kinematic parameters defined by values: contact pressure p= 5, 10 and 20 N, sliding velocity v= 0.5 m/s, with an initial phase of 30 min grinding with surface thrust of 5 N and an average sliding velocity v= 1 m/s.The sliding distance of 1000 m were kept constant for all tests. The geometry of the contacting surfaces were constant. During the experiment friction force F_t was recorded with an analogue-to-digital converter. Plot of variation of friction coefficient with varying sliding distance was displaced online during the test. After stabilization of plot average value of friction coefficient was reported. Wear of the pin was evaluated by measuring volume loss after completing the test.

- Mechanical properties

Moreover, microhardness measured was performed using Vickers's method. Measurement HV 0.1 microhardness was carried out using a hardness tester. The load was 1 N with a dwell time of 30 s. These tests were carried out at room temperature. To find accurate results, at least six reading at different locations of samples under the same conditions were determined and average value was reported.

- SEM

The worn surfaces of polymer specimens were observed under scanning electron microscopy (SEM) in order to investigate the wear surface after tribological tests.

3. Results and discussions

- The microhardness

Fig.2. shows the microhardness for irradiated and unirradiated samples of PEEK. The microhardness increases with increasing radiation dose, reaches the highest value for sample irradiated with 150 kGy. The microhardness for sample irradiated with 150 kGy was higher than that of unmodified sample of 25 %.

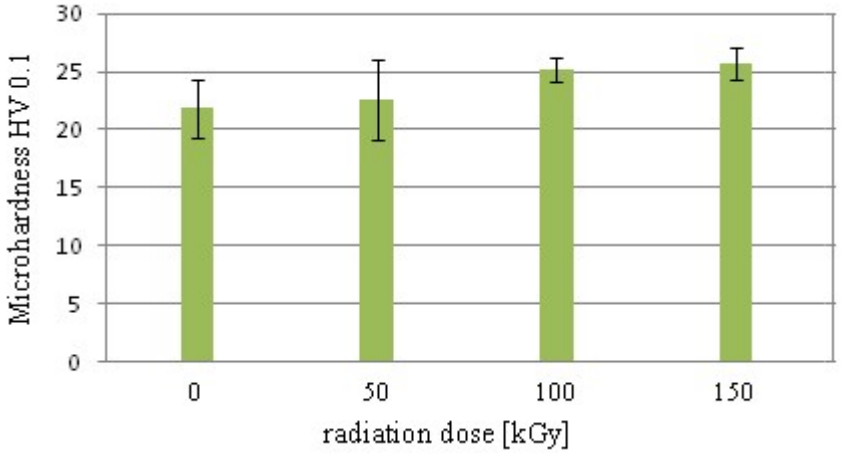


Fig. 2. Change in surface layer microhardness of PEEK as a function of radiation dose

The effect may be explained by the crosslinking process as a consequence of the modification through radiation. The reason for increasing the microhardness materials may be the changes in the chemical structure of polymers include crosslinking process. which causes curing of the polymer. With the increase in the dose of gamma radiation are possible further changes properties of materials. e.g. an increase in their fragility (Barylski et al 2016).Whether one or more physical, mechanical and chemical properties will be noted depends on the amount crosslinking and/or scission on changes in crystallinity. Polymers change their microstructure and molecular structure when they are subjected to gamma ray irradiation (Chen et al. 2014).

Radiation modification can be one of the method of strengthening the surface layer of the thermoplastics. Irradiated polymers characterized by greater resistance to wear and were harder than their unmodified counterparts. High microhardness generally produces wear resistant surface however other factors also influence this.

- The friction coefficient

The fig.3. shows the coefficient of friction (COF) of PEEK against stainless steel as a function of radiation dose and load. The friction coefficient decreases as the radiation dose increases, where the minimum friction coefficient is formed for each load. The coefficient of friction for sample irradiated with 150 kGy, after test taken under 5 N was lower than that of unmodified sample of around 8 %.It was observed that COF increased from 0 to 50 kGy and slightly decrease to 150 kGy. The reason behind increase in coefficient of friction for samples without and after exposure to radiation dose of 50 kGy dose may be increase in microhardness, which parameter was strong influence on tribological properties of surface.
It is not obvious why the coefficient of friction for samples irradiated with 100 and 150 kGy decrease, the reason behind it can be structural changes in material.

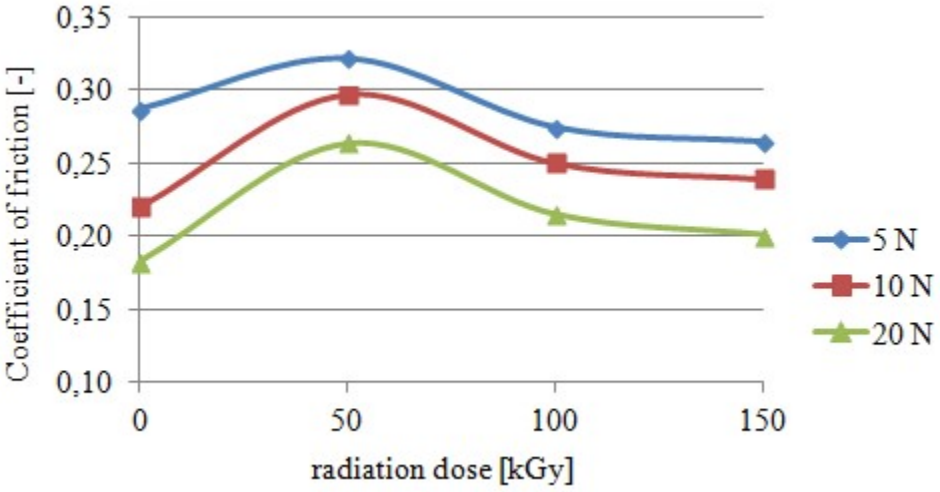


Fig. 3. The relationship between coefficient of friction of PEEK as a function of radiation dose and load

- Wear loss

Fig. 4 shows wear volume loss of PEEK against stainless steel as a function of radiation dose and load under dry conditions. It has been seen from fig.4that the wear is much lower for the irradiated samples of PEEK than for unirradiated sample.The lowest value of the linear wear was observed for samples which were irradiated with 150 kGy during test at 5 N load. The highest linear wears were characterized by samples unirradiated at each load between 5 to 20 N. It can be seen that the taking test with a lower load caused more than a 17 % reduction

of wear in the case of taking test with higher load at 20 N. Generally, samples after irradiation indicated sharp increase in wear rate with increase in contact pressure.

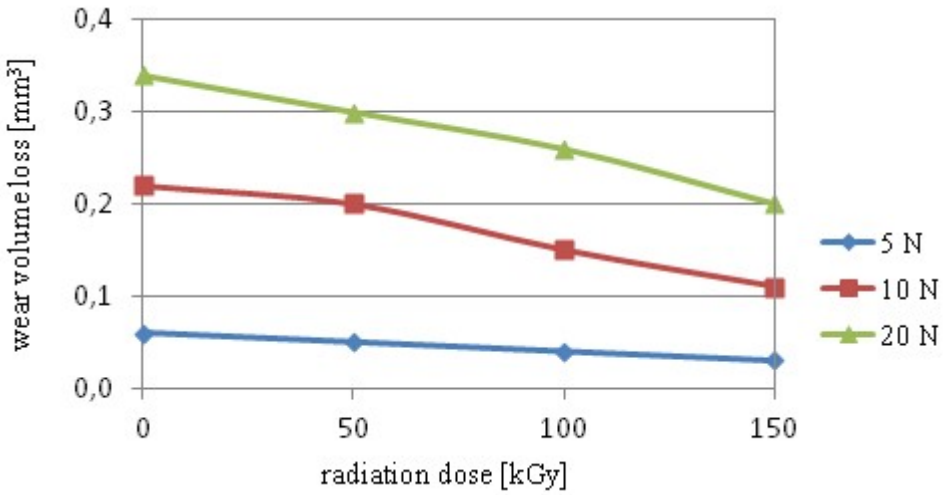


Fig. 4. The relationship between wear volume loss of PEEK as a function of radiation dose and load

Choosing the appropriate radiation dose can obviously reduce the wear of irradiated samples of PEEK than that of unmodified sample. Such a significant decrease of the tribological wear intensity of the polymer does coincide with the results of microhardness measurements.Wear rate may change with either change in microhardness. In general increased microhardness is responsible for increase wear resistance of a material. In current work, microhardness of irradiated material at all the selected doses is increasing as well as wear rate is decreasing under each load. Reason behind this may be that, radiation modification leads to changes in structure like crosslinking, degradation (very often both) surface condition is also changing (Barylski et al. 2014), which leads to change in other properties of polymer. Increased load resulted into high wear rate of irradiated polymer may be due to change in wear mechanism from abrasive to adhesive. However it depends on value of irradiation dose.

- Worn surface analysis

The tribological properties were evaluated by friction and wear tests as well as scanning electron microscopic analysis of the worn surfaces. Fig.5 shows the scanning electron microscopicsurface topographies of worn surfaces supported wear performance trends of unirradiated and irradiated samples of PEEK after the tests at 20 N load.The surface morphologies of the specimens were relatively smooth after irradiation (fig.5 b, c, d). The specimens underwent interfacial crosslinking when they were exposed to irradiation environment, during which two phases were combined tightly. On the worn surface of unirradiated PEEK as shown on fig.5 (a) large numbers of debris appeared wear and exhibited

sliding wear marks,comparing with surfaces after irradiation where less wear debris were produced.Indicated more accumulation of wear debris on the surface which might have resulted into increasing coefficient of friction and wear rate with increase in contact pressure. Fig.5 (b), (c) and (d) showed wear marks in the form of continuous narrow cutting grooves, comparatively smooth topography. Fig.5 (b) indicates worn surface of PSU irradiated at 50 kGy. It showed smooth topography compared to specimens irradiated at 100 and 150 kGy, where sliding marks are much visible. On fig.5 (c) and (d) some small wear debris formed during the sliding process.

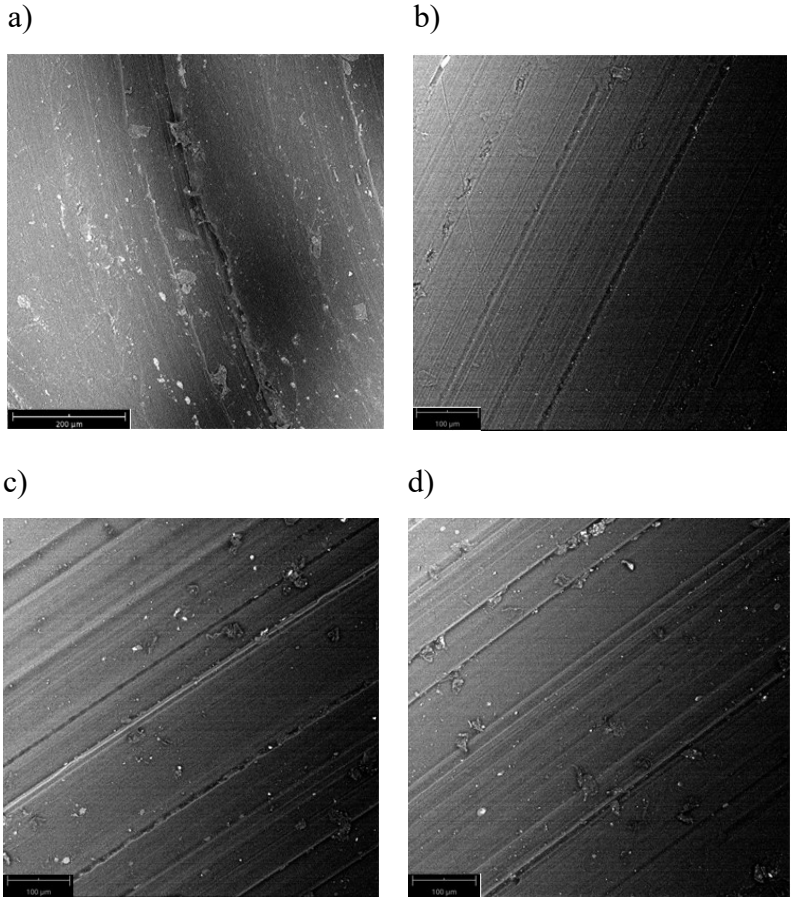


Fig. 5. Surface of PEEK pins after tribological evaluation with radiation dose: a) 0 kGy, b) 50 kGy, c) 100 kGy, d) 150 kGy

The worn surfaces of the samples with and without irradiation exhibited severe plastic deformation, which indicated that the abrasive wear took the dominant wear mechanism. Irradiation can effectively improve the wear resistance of PEEK. There was no obvious wear scar on the irradiated samples of PEEK after the friction test compared to unmodified sample, where the wear scar was well seen.

4. Conclusions

The tribological behaviors of PEEK irradiated with gamma radiation were investigated under dry friction condition. The friction and wear behavior of this polymer under different

loads and radiation dose was compared and discussed. It was found that the irradiation induced the crosslinking which wave resulted in changes in useful properties.

- Improvement of the mechanical properties of PEEK as a result of radiation modification was substantiated with the results of microhardness tests. It was found that gamma irradiation of analyzed thermoplastic induces a increase in the microhardness with the amount of the absorbed irradiation dose. This tendency is often observed for irradiated materials (Barylski et al. 2015; Chen et al. 2014).
- Tribological analysis of the PEEK subjected to gamma irradiation showed a slight increase in coefficient of friction which contributes to both an increase in load and with the radiation dose. The highest COF was observed at higher radiation dose of 50 kGy. The values of coefficient of friction are higher than for unmodified material. The radiation dose could influence on mechanical properties of polymer, which have impact on coefficient of friction. Probably the surface energy studies would provide more information about that issue.
- An increase the load within the test range should contribute to decrease the coefficient of friction, which is typical of the phenomenon of friction for the metal-polymer couples and is consistent with the postulates of adhesion and molecular-adhesive friction theory. It is justified to verify if radiation dose have impact on the effect of unit pressure.

It should be noted that a slight increase in microhardness was observed of irradiated material and had effect on reducing the wear of the irradiated polymer. Tribological tests showed more that fivefold reduction of wear volume loss when the load was reducing from 20 N to 5 N at sliding speed of 0.5 m/s.

- The obtained results should confirmed the positive effect of irradiation on tribological properties of PEEK like reduction of wear and coefficient of friction. Radiation can cause the crosslinking process as well as degradation, which manifests itself through a higher hardness and an increase in the linear wear. Related to presented results which shows that the lowest linear wear was characterized by unirradiated sample, it is believed that irradiation of PEEK with gamma radiation dose caused its degradation. However this requires further studies.
- Exposure to gamma radiation caused modification not only on surface conditions but also on structure which have impact on all analyzed properties of material. Further studies of structure properties will enable to explain how radiation modification influence on mechanical and tribological properties.
- Radiation processing is a practicable and economical method for modifying the physical properties of polymeric materials and find very variety applications.

5. References

Barylski A., Maszybrocka J., Kupka M., Aniołek K., Mieszczak Ł., 2016. The influence of electron beam irradiation. plastic deformation. and re-irradiation on crystallinity degree. mechanical and sclerometric properties of GUR 1050 used for arthroplasty. *Journal of Applied Polymer Science*. 43683: 1–7.

Barylski A., Maszybrocka J., Kupka M., Aniołek K., Kaptecz S., 2015. Radiation-chemical modification of PTFE in the presence of graphite. *Journal of Applied Polymer Science*. 42348: 1–8.

Chen P., Chen C.C., Harmon J.P., Lee S., 2014. The effect of gamma radiation on hardness evolution in high density polyethylene at elevated temperatures. *Material Chemistry and Physics*. 146: 369–373.

Friedrich K., Karger-Kocsis J., Lu Z.., 1991. Effects of counterpart roughness and temperature on friction and wear of PEEK composites. *Wear*. 148: 235–247.

Jones D.P., Leach D.C., Moore D.R., 1985. Mechanical properties of poly (ether-ether-ketone) for engineering applications. *Polymer*. 26: 1385–1393.

Khare N., Limaye P.K., Soni N.L., Patel R.J., 2015. Gamma irradiation effects on thermal. physical and tribological properties of PEEK under water lubricated conditions. *Wear*. 342–343: 85–91.

Kowalewski P., Wieleba W., Ptak A., 2011. Wpływ parametrów ruchowych tarcia na mikrotwardość wybranych polimerów ślizgowych. *Tribologia*. 5: 109–116 (Polish).

L'Annunziata M.F., 2007. Radioactivity: Introduction and History. Elsevier, ISBN–13: 978–0444527158.

Ptak A., 2016. The influence of the motion parameters on the surface layer of metal-polymer sliding pairs at low temperatures. *Tribologia*. 1: 79–87.

Modelowanie konstytutywne złącza FSW w jednoosiowym stanie naprężenia

Przemysław Nosal[(1)]

[1]Instytut Mechaniki Stosowanej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Przemysław Nosal: nosal.przemyslaw@student.pk.edu.pl

Streszczenie
W przypadku analizowania konstrukcji zawierającej połączenia nierozłączne, które z reguły posiadają inną charakterystykę niż materiał bazowy należy dodatkowo zastosować inny model konstytutywny opisujący ich zachowanie. W prezentowanej pracy przedstawiono możliwość zastosowania modelu Ottosen-Ristinmaa do opisu zachowania złącza wykonanego metodą FSW. Następnie przeprowadzono symulację numeryczną jednoosiowego rozciągania tego typu połączenia. Parametry modelu zidentyfikowano na podstawie analizy danychbadań eksperymentalnych. Otrzymane wyniki symulacji porównano z rezultatami uzyskanymidla materiału rzeczywistego.

Słowa kluczowe: zgrzewanie FSW, obciążenie jednoosiowe, model sprężysto-plastyczny

Constitutive modelling of the FSW joint at uniaxial stress state

Summary
In the case of analyzing a structure containing inseparable joints, which usually have a different characteristic than the base material, additionally a different constitutive model describing their behavior should be used. The presented work presents the possibility of using the Ottosen-Ristinmaa model to describe the behavior of a joint made with the FSW method. Then, numerical simulation of uniaxial stretching of this type of connection was performed. Parameters of the model were identified based on the analysis of experimental data. The obtained simulation results were compared with the results obtained for the real material.

Keywords: FSW, uniaxial loading, elasto-plastic model

1. Wstęp

Technologia zgrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (*ang. Friction Stir Welding – FSW*) należy do metod spajania przebiegających w stanie stałym, tzn. nie jest osiągana temperatura topnienia łączonych materiałów. Dzięki tej własności powstające złącza są wolne od kilku rodzajów wad znanych z tradycyjnych metod spawania (Nosal i in. 2017). Proces FSW bazuje na odkształceniu plastycznym wywołanym przez specjalne narzędzie składające się w ogólnym przypadku z dwóch części: wieńca opory oraz trzpienia mieszającego. Podstawowymi funkcjami narzędzia jest: (i) generowanie energii cieplnej umożliwiającej uplastycznienie łączonych materiałów oraz (ii) wymieszanie materiału, które jest determinowane jego przepływem wokół trzpienia. W spoinie wytworzonej metodą FSW najczęściej wyróżnia się specyficzne cztery obszary: strefę wymieszania (jądro zgrzeiny), strefę oddziaływania termo-mechanicznego, strefę wpływu ciepła oraz materiał bazowy. Podczas procesu zgrzewania ze względu na złożony ruch narzędzia dodatkowo możemy wyróżnić dwie charakterystyczne strony formowanego złącza: stronę natarcia oraz stronę spływu. Właściwości mechaniczne połączeń FSW uzależnione są głównie od geometrii

narzędzia oraz zastosowanych parametrów technologicznych procesu zgrzewania. Na kinematykę procesu składają się dwa zasadnicze ruchy narzędzia: (i) ruch obrotowy oraz (ii) ruch postępowy wzdłuż linii styku łączonych materiałów. Odpowiadają temu dwa podstawowe parametry technologiczne procesu: (i) prędkość obrotowa narzędzia (ω) i (ii) liniowa prędkość zgrzewania (V). Determinują one ilość ciepła generowanego w trakcie procesu, a tym samym jakość i właściwości wykonanej zgrzeiny (Costa i in. 2012, Le Jolu i in. 2015, Serio i in. 2016). Oryginalnie technologia ta została opracowana do łączenia trudno-spawalnych stopów aluminium jednak jej zalety zostały szybko wykorzystane także w przypadku łączenia innych rodzajów materiałów, również różniących się właściwościami fizyko-chemicznymi, np. aluminium z miedzią. Miedź jest przykładem materiału, który ze względu na swoje właściwości fizyczne takie jak wysoka przewodność cieplna uchodzi za trudno-spawalny. Jako materiał konstrukcyjny wykorzystywana jest między innymi przy budowie zbiorników na odpady radioaktywne a także jako komponenty transformatorów wysokoprądowych (Nosal i in. 2017). W związku z tym bardzo istotną kwestią jest przewidzenie zachowania się połączenia poddanego obciążeniu mechanicznemu, które zostało wykonane tą niekonwencjonalną metodą.

Decydującą kwestią w analizie numerycznej rozpatrywanej konstrukcji jest dobranie odpowiedniego modelu matematycznego, który poprawnie charakteryzuje użyty materiał. Newralgicznymi obszarami każdego obiektu są m. in.miejsca łączenia materiałów, np. za pomocą technologii spawania, które to ze względu na oddziaływanie wysokiej temperatury posiadają inną charakterystykę niż materiał bazowy. Podobnie jest w przypadku metody FSW, powstałe złącze charakteryzuje się specyficzną niejednorodną budową mikrostrukturalną, która przekłada się bezpośrednio na lokalne oraz globalne właściwości mechaniczne połączenia (Zhang i in. 2014). Jest to związane zarówno ze wspomnianym oddziaływaniem termicznym jakie występuje podczas procesu spajania jak i z dużym odkształceniem plastycznym wywołanym pracą narzędzia. Zjawiska te determinują rozmiary ziaren w obszarze zgrzewania (Gertsman i in. 1994). Znajomość lokalnych relacji konstytutywnych poszczególnych stref złącza umożliwia przewidzenie jego globalnej odpowiedzi podczas obciążenia na podstawie implementacji odpowiedniego modelu numerycznegodo oprogramowania MES (Lockwood i in. 2002). Pominięcie informacji o niejednorodności właściwości mechanicznych może być przyczyną dużych rozbieżności w wynikach numerycznych i eksperymentalnych (Zhang i in. 2016). Jednak globalne zachowanie się materiału nie jest jedynie determinowane przez właściwości mechaniczne najsłabszego obszaru w złączu lecz również kombinacją oddziaływań poszczególnych stref,

ich rozmiaru, właściwości oraz geometrii (Zhang i in. 2014). W celu poznania tych zależności przeprowadzane są liczne symulacje procesu wytwarzania skupiające się na rozkładzie temperatury w obszarze zgrzewania (Nosal i Ganczarski 2017) oraz przepływie materiału w obrębie pracy narzędzia, następnie dane te są weryfikowane badaniami eksperymentalnymi (Zhang i in. 2014). Celem tych wszystkich prac jest określenie optymalnych parametrów technologicznych procesu FSW w odniesieniu do żądanych właściwości mechanicznych złącza.

W prezentowanym artykule przedstawiono możliwość scharakteryzowania relacji naprężenie – odkształcenie przy użyciu modelu Ottosen-Ristinmaa dla próbki zawierającej złącze wykonane metodą FSW oraz znajdującej się w stanie jednoosiowego naprężenia. Parametry modelu zostały zidentyfikowane na podstawie analizy statystycznej danych otrzymanychz przeprowadzonych badań statycznej próby rozciągania próbek wykonanych z blachy miedzianeji dodatkowo zgrzewanych doczołowo metodą FSW. W celu weryfikacji zasadności stosowanego modelu otrzymanewyniki symulacji numerycznej porównanoz uprzednio wykorzystanymi danymi dla materiału rzeczywistego.

2. Testy statycznej próby rozciągania

Szczegółowe badania przeprowadzone na próbkach litych z materiału rodzimego oraz na próbka ze złączem zgrzewanym metodą FSW zostały przedstawione w pracy (Nosal i in. 2017). Materiałem bazowym była miedź elektrolityczna Cu-ETP w stanie R220 w postaci blachy o grubości 5 mm. Skład chemiczny materiału przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny miedzi elektrolitycznej Cu-ETP (Rudnik 1998)

Pierwiastek	Cu	Ni	Sn	Sb	Pb	Zn	Fe	As	Bi
Zawartość [%]	Min. 99.9	Max. 0.002	Max. 0.002	Max. 0.002	Max. 0.005	Max. 0.003	Max. 0.005	Max. 0.002	Max. 0.001

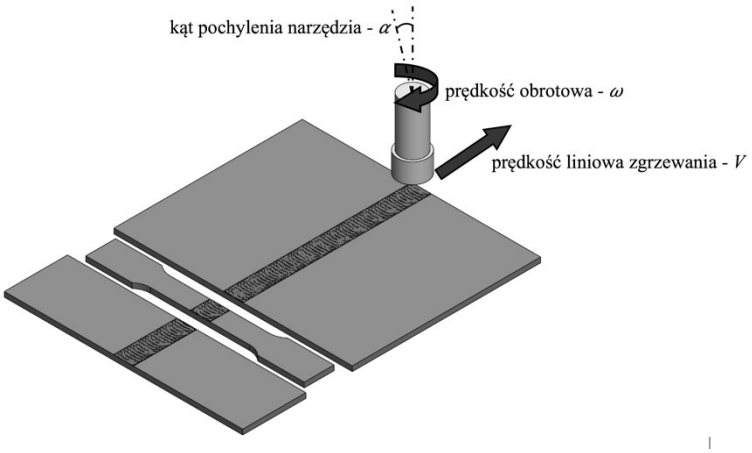
Próbki zgrzewane tarciowo zostały wykonane na konwencjonalnej frezarce firmy JaFo model FYN50ND z wykorzystaniem standardowego oprzyrządowania, jakim dysponujefirma ELECTRIS. W pracy wykorzystano wyniki dla próbki wykonanej z parametrami technologicznymi, dzięki którym otrzymane złącze było wolne od niezgodności (tab. 2).

Tabela 2. Zastosowane parametry procesu FSW (Nosal i in. 2017)

Prędkość obrotowa ω[obr·min^{-1}]	Prędkość liniowa zgrzewania V[mm·min^{-1}]	Kąt pochylenia narzędziaα[°]
580	60	1

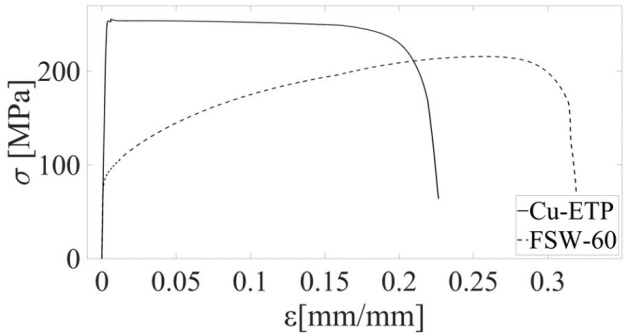
Próbki do testów wytrzymałościowych zostały wycięte w taki sposób aby wykonane złącze znajdowało się w osi symetrii długości pomiarowej (rys. 1). Badania statyczne

przeprowadzono na trzech próbkach przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej MTS 810 zgodnie z normą PN-EN 10002-1+AC1.



Rys. 1. Schemat procesu FSW (opracowanie własne)

Na podstawie porównania inżynierskich krzywych rozciągania materiału litego oraz próbki ze złączem FSW (rys. 2) można stwierdzić, że wykonane połączenie charakteryzuje się niższą granicą plastyczności σ_yo ok. 60% oraz niższą wytrzymałością doraźną σ_mo ok. 15%. Próbka z materiału bazowego charakteryzuje się w zakresie plastycznym prawie idealną plastycznością natomiast próbka ze złączem FSW po przekroczeniu granicy plastyczności wykazuje nieliniowe wzmocnienie. Szczegółowe zestawienie parametrów znajduje się w tabeli 3.



Rys. 2. Porównanie krzywych rozciągania próbki jednorodnej oraz próbki ze złączem FSW (Nosal i in. 2017)

Tabela 3. Zestawienie właściwości mechanicznych[Nosal i in. 2017]

Próbka	σ_y [MPa]	σ_m [MPa]	σ_f [MPa]	E [MPa]	v	A_5 [%]	Q [%]
Jednorodna	241	252	64	$1.19 \cdot 10^5$	0.359	37.95	81.73
FSW	87	216	54	–	–	40.55	72.31

3. Model materiału sprężysto-plastycznego oraz implementacja numeryczna

W pracy rozpatrywany jestmateriał podlegający zjawisku dyssypacyjnemu, jakim jest plastyczne płynięcie. Nie uwzględniono natomiast kolejnego zjawiska związanego z ewolucją

uszkodzenia, dlatego przeprowadzona analiza obejmuje zakres do wartości σ_{m} Zaprezentowany model opisuje relacje konstytutywne pomiędzy naprężeniem a odkształceniem, które ilustruje eksperymentalna krzywa rozciągania dla próbki ze złączem FSW (rys. 2). Pełny opis plastycznego wzmocnienia w stanie jednoosiowego naprężenia, którego korelacja z eksperymentem była dobra zarówno ilościowo jak i jakościowo przedstawiono w pracach (Ganczarski i Cegielski 2016, Sulich i Egner 2016). Opis ten dotyczył jednak problemu cyklicznego obciążenia gdzie model konstytutywny został wyprowadzony w oparciu o termodynamikę procesów nieodwracalnych z wewnętrznymi zmiennymi stanu. Jest to podejście obecnie coraz częściej stosowane. Simar (Simar i in. 2008) przeanalizował wpływ przemian fazowych, jakie występują w aluminium 6005A-T6 na zjawisko umocnienia materiału w trakcie plastycznej deformacji podczas procesu jego łączenia metodą zgrzewania tarciowego. Stwierdzono, że w przypadku porównania relacji konstytutywnych jądra zgrzeiny oraz strefy wpływu ciepła (SWC) różnice są nieznaczne.Jednak najczęstszą lokalizacjąmiejsca zerwania próbki była strefa poddana jedynie oddziaływaniu termicznemu, co jest powiązane z mniejsza możliwość kumulowania odkształcenia plastycznego w tym obszarze.Ciekawą pracę przedstawił Nielsen (Nielsen i Tvergaard 2009) stosując do opisu zachowania się złącza zmodyfikowany model Gursona, który następnie został zaimplementowany do oprogramowania MES. W równaniach konstytutywnych uwzględnił on ewolucję mikrostruktury, rozwój mikrouszkodzeń jak również efekt zarodkowania fazy wydzieleniowej, który jest regulowany naprężeniem. Zaprezentowany zaawansowany model konstytutywny jest czysto fenomenologiczny. Otrzymany trend związany z pękaniem próbek w SWC potwierdza obserwacje przeprowadzone przez Simara oraz autora niniejszej pracy. Grujicic i in. (2012) natomiast podjął próbę oszacowania wartości granicy plastyczności poszczególnych stref złącza na podstawie symulacji numerycznej procesu FSW. Swoje rozważania przeprowadził w oparciu o model Johnsona-Cooka, który został odpowiednio zmodyfikowany.Otrzymane przez niego rezultaty potwierdziły wpływ intensywnego odkształcenia plastycznego generowanego przez narzędzie FSW na wzrost granicy plastyczności po przez efekt umocnienia.

W prezentowanej pracy do opisu rozpatrywanego materiału zastosowanoprosty jednoosiowy model uwzględniający nieliniowy charakter wzmocnienia plastycznego (Ganczarski i Skrzypek 2009). Wpływ nabytej przez materiał niejednorodności mikrostrukturalnej złącza nie był rozpatrywany. Jako zależność funkcyjną do aproksymacji rzeczywistego wykresu $\sigma - \varepsilon$ wykorzystano model kombinowany Ottosen-Ristinmaa, dla któregow punkcie odpowiadającym osiągnięciu uplastycznienia nachylenie wykresu $d\sigma/d\varepsilon$ jest nieciągłe

i w zakresie plastycznymzdefiniowane jako $k\sigma_y(\varepsilon_p)^n$ $(0 < n < 1)$ (Ottosen i Ristinmaa 2005).

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \le \sigma_y/E \\ \sigma_y\left[1 + k\left(\varepsilon_p\right)^n\right] & \varepsilon \ge \sigma_y/E \end{cases} \tag{1}$$

Symbol σ_y oznacza granicę plastyczności, E moduł Younga, ε_p jest kumulowanym odkształceniem plastycznym, natomiast k jest bezwymiarowym parametrem zaś n wykładnikiem potęgi, oba powyższe parametry bezpośrednio definiują umocnienie plastyczne typu potęgowego.W szczególnych przypadkach model Ottosen-Ristinmaa redukuje się do modeluciała sprężysto-idealnie plastycznego (model Prandtla), gdy $k = 0$, bądź do modeluciała sprężysto-plastycznego z liniowym umocnieniem plastycznym, gdy $k \neq 0$ oraz wartość wykładnika wynosi $n = 1$.

Analizanumeryczna została przeprowadzona w programie MatLAB. Parametry modelu zostały zidentyfikowane na podstawie analizy statystycznej danych stosując metodę liniowej regresji dla zakresu plastycznego krzywej rozciągania określonej wzorem

$$y = a + bx \tag{2}$$

Aby przystąpić do analizy zakres danych pomiarowych został zawężony do zbioru mieszczącego się w przedziale $\langle \sigma_y, \sigma_m \rangle$. Następnie wartości naprężenia oraz odkształcenia zlogarytmowano oraz zastosowano odpowiednie zależności

$$\ln(\sigma) = \ln\left(\sigma_y\, k\right) + n \ln\left(\varepsilon_p\right) \tag{3}$$

gdzie

$$y = \ln(\sigma), \quad a = \ln\left(\sigma_y k\right), \quad b = n, \quad x = \ln\left(\varepsilon_p\right) \tag{4}$$

Po przeprowadzeniu regresji liniowej otrzymano wartości parametrów modelu Ottosen-Ristinmaa, których interpretację ilustruje rysunek 3.Ich wartości zostały oszacowane w sposób przybliżony wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, gdzie wymaga się, aby

$$\sum_{i=1}^{n} [y_i - (a + bx_i)]^2 \to \min \tag{5}$$

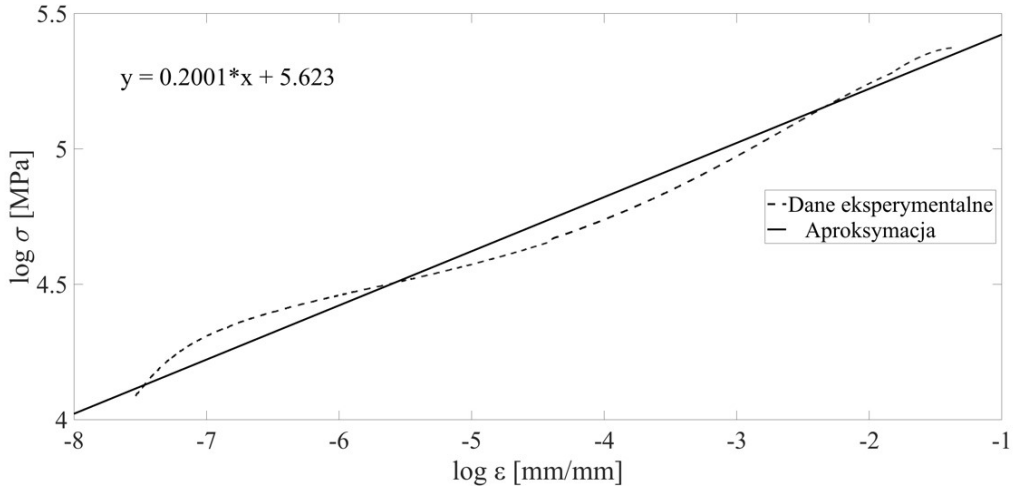
otrzymuje się oszacowania na a oraz b

$$\tilde{b} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \quad \tilde{a} = \bar{y} - \tilde{b}\bar{x} \tag{6}$$

gdzie

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad \bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \tag{7}$$

Wyznaczone parametry modelu Ottosen-Ristinmaa zestawiono w tabeli 4.



Rys. 3. Aproksymacja liniowa zakresu plastycznego krzywej rozciągania

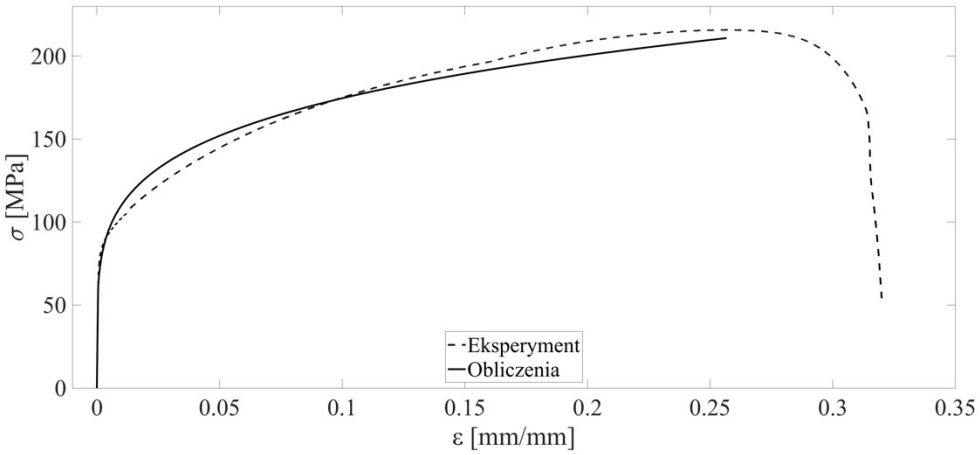
Po przeprowadzeniu regresji liniowej następuje przywrócenie oryginalnych współrzędnych naprężenia i odkształcenia

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \exp(x) = \exp\left(\ln(\varepsilon_p)\right) \\ \sigma &= \exp(y) = \exp(a + bx) = \exp(a) \cdot \exp(bx) \\ &= \exp\left(\ln(\sigma_y\, k)\right) \cdot \exp(n \ln(\varepsilon_p)) = \sigma_y k (\varepsilon_p)^n \end{aligned} \tag{8}$$

Tabela 4. Parametry modelu Ottosen-Ristinmaa

E [MPa]	n	k
$1.19 \cdot 10^5$	0.2001	5.623

Symulację numeryczną przeprowadzono dla zakresu odkształcenia całkowitego od $\varepsilon = 0$ do $\varepsilon = 0.2568$, co odpowiada wartości odkształcenia dla$\sigma = \sigma_m$.Wyniki dla modelu opisanego równaniami (1) zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Porównanie eksperymentalnej krzywej rozciągania z krzywą otrzymaną na podstawie analizy numerycznej

Wykorzystany model wykazuje pewną zgodność z danymi eksperymentalnymi zarówno w sensie jakościowym jak i ilościowym. Granica plastyczności z założenia (1) jest identyczna w obydwu przypadkach jednak wartość wytrzymałości na rozciąganie różni się o ok. 2.4%. Kształt krzywej $\sigma - \varepsilon$ dla rozwiązania numerycznego nieznacznie odbiega od kształtu krzywej dla materiału rzeczywistego, który jest złożony. Rozpatrując zakres do wartości odkształcenia wynoszącej około $\varepsilon = 0.1$ model wykazuje większą sztywność niż rzeczywisty materiał, natomiast po przekroczeniu tej granicy następuje odwrócenie relacji.

4. Dyskusja wyników oraz wnioski

Zaprezentowano model opisujący nieliniowe wzmocnienie plastyczne materiału z połączeniemblach z miedzi elektrolitycznej Cu-ETP wykonanym metodą FSW. Zastosowany opis konstytutywny dla zakresu plastycznego posiada budowę o postaci funkcji potęgowej, która jest ciągła i nie posiada „załamań”. Otrzymane różnice pomiędzy krzywymi rozciągania (rys. 4) wynikają z dodatkowych nieliniowości związanych z budową mikrostrukturalną złącza, których nie uwzględniono w przedstawionym modelu matematycznym. Niejednorodności związane z właściwościami mechanicznymi wpływają na lokalne relacje konstytutywne, które finalnie mają przełożenie na globalne zachowanie się materiału.Także naprężenia rezydualne występujące w złączu nie zostały uwzględnione w analizie (Lockwood i in. 2002).

Na podstawie przeprowadzonych prac sformułowano następujące wnioski:

(1) Zamodelowano odpowiedź materiału ze złączem wykonanym metodą FSW na przyłożone obciążenie mechaniczne, wykorzystując model wzmocnienia nieliniowego Ottosen-Ristinmaa;

(2) Prezentowany model przedstawia korelację z wynikami eksperymentalnymi zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym;
(3) Odchylenia krzywej eksperymentalnej od krzywej teoretycznej mogą być związane z niejednorodnością złącza a przez to z dodatkowymi nieliniowościami w konstytutywnym zachowaniu się poszczególnych stref w ujęciu lokalnym.

W celu poznania wpływu niejednorodności materiału w obrębie połączenia na jego globalne konstytutywne zachowanie należy przeprowadzić analizę procesu formowania się zgrzeiny, który to determinuje właściwości mechaniczne poszczególnych stref w złączu. Dodatkowo zasadnym będzie wykorzystanie podejścia bazującego na termodynamice procesów nieodwracalnych. Będzie to przedmiotem kolejnych badań oraz publikacji autora.

Podziękowania

Badania eksperymentalne zostały zrealizowane w ramach pracy magisterskiej autora. Autor pragnie podziękowaćprofesorowi dr hab. inż. Arturowi Ganczarskiemu za pomoc przy opracowaniu parametrów modelu. Wszystkie materiały wykorzystane podczas badań eksperymentalnych wraz z wykonanymi złączami FSW zostały dostarczone przez firmę ELECTRIS spółka z ograniczoną odpowiedzialnością spółka komandytowa.

5. Literatura

Costa J.D., Ferreira J.A.M., Borrego L.P., Abreu L.P., 2012. Fatigue behaviour of AA6082 friction stir welds under variable loadings. *International Journal of Fatigue*. 37: 8–16.

Ganczarski A., Cegielski M., 2016. Thermal effect accompanying low cycle fatigue of Al-2024, *Solid State Phenomena.* 240: 108-113.

Ganczarski A., Skrzypek J., 2009. Plastyczność materiałów inżynierskich, Wydawnictwo PK. Kraków. 27-38.

Gertsman V. Y., Hoffmann M., Gleiter H., Birringer R., 1994. The study of grain size dependence of yield stress of copper for a wide grain size range. *Acta metal. mater*. 42: 3539-3544.

Grujicic M., Pandurangan B., Yen C. F., Cheeseman B. A., 2012. Modifications in the AA5083 Johnson-Cook material model for use in friction stir welding computational analyses. *Journal of materials Engineering and Performance*. 21: 2207-2217.

Le Jolu T.L., Morgeneyer T.F., Denquin A., Gourgues-Lorenzon A.F. 2015. Fatigue lifetime and tearing resistance of AA2198 Al–Cu–Li alloy friction stir welds: Effect of defects. *International Journal of Fatigue*. 70: 463–472.

Lockwood W. D., Tomaz B., Reynolds A. P., 2002. Mechanical response of friction stir welded AA2024: experiment and modeling. *Materials Science and Engineering*. A323. 348-353.

Nielsen K. L., Tvergaard V., 2009. Effect of a shear modified Gurson model on damage development in a FSW tensile specimen. *International Journal of Solids and Structures*. 46: 587-601.

Nosal P., Ganczarski A., 2017. Modelling of the temperature field that accompanies Friction stir welding. ITM Web of Conferences 15. 03004. 1-5.

Nosal P., Machniewicz T., Hebda M., Korbel A., 2017. Wpływ parametrów procesu zgrzewania FSW na własności wytrzymałościowe połączeń blach miedzianych, XVI Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania. 321-328.

Ottosen N. S., Ristinmaa M., 2005. The mechanics of constitutive modeling. Elsevier. Amsterdam, 203-220.

Rudnik S., 1998. Metaloznawstwo. PWN. Warszawa.

Serio L.M., Palumbo D., de Filippis L.A.C., Galietti U., Ludovico A.D. 2016. Effect of friction stir process parameters on the mechanical and thermal behavior of 754-H111 aluminum plates. *Materials*. 9.

Simar A., Brechet Y., de Meester B., Denquin A., Pardoen T., 2008. Microstructure, local and global mechanical properties of friction stir welds in aluminium alloy 6005A-T6. *Materials Science and Engineering*. 486: 85-95.

Sulich P., Egner W., 2016. Algorytm numerycznej analizy termomechanicznych obciążeń niskocyklowych stali. Episteme. Kraków. 135-148.

Zhang L., Min J., Wang B., Lin J., Li F., Liu J., 2016. Constitutive model of friction stir weld with consideration of its inhomogeneous mechanical properties, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 29 (2): 357-364.

Zhang Z. H., Li W. Y., Li J. L., Chao Y. J., 2014. Effective predictions of ultimate tensile strength, peak temperature and grain size of friction stir welded AA2024 alloy joints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 1213-1218.

Analiza porównawcza podgrzewania wody w gospodarstwie domowym z wykorzystaniem promieniowania słonecznego

Tomasz Noszczyk[(1)], Maciej Iwański[(1)], Arkadiusz Dyjakon[(2)]

[1]Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny, Studenckie Koło Naukowe „BioEnergia"
[2]Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Rolniczej, Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami
Tomasz Noszczyk: noszczyktomasz@gmail.com

Streszczenie
W pracy przeprowadzono analizę techniczno-ekonomiczną systemów podgrzewających wodę z wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego.Porównanoukłady przygotowania ciepłej wody użytkowej w gospodarstwie domowym za pomocą instalacji fotowoltaicznych różnych producentów, kotła na węgiel, pelet, gaz ziemny oraz elektrycznego podgrzewacza wody. Wyniki wykazały, że zakres jednostkowego kosztu wytworzenia ciepła w instalacjach fotowoltaicznych wynosi od 118 PLN·GJ^{-1} do 219 PLN·GJ^{-1}.Stwierdzono, że inwestycja w instalację fotowoltaiczną przeznaczoną wyłącznie do podgrzewania wody jest ekonomicznie uzasadniona jedynie w przypadku zamiany aktualnego systemu podgrzewania wody w postaci elektrycznego podgrzewacza wody. Zwrot kosztów inwestycyjnych mieści się w przedziale od 4,5 do 8,5 lat. W pozostałych przypadkach tj. kocioł na węgiel, peletoraz gaz ziemny okres zwrotu poniesionych nakładów wynosi ponad 10 lat.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, ciepła woda użytkowa, instalacja fotowoltaiczna, analiza ekonomiczna

Comparative analysis of water heating in household using solar radiation

Summary
The work involved technical and economic analysis of water heating systems using solar radiation energy. The technical and economic analysis was based on the comparison The systems of hot water preparation in the household using photovoltaic systems of various producers, coal, pellet, natural gas boilers and electric water heater were compared. The results showed that the range of the unit cost of heat generation in photovoltaic installations is from 118 PLN·GJ^{-1} to 219 PLN·GJ^{-1}. It was found that an investment in a photovoltaic system dedicated strictly for water heating is economically justified only in case ofreplacement of electric boiler.The return of investment costs in PV installation is between 4.5 to 8.5 years. In other cases (coal, pellet and natural gas boiler) the payback period of the expenditures is more than 10 years.

Key words: solar energy, hot water, photovoltaic system, economic analysis

1. Wstęp

Perspektywa wyczerpania się zasobów paliw kopalnychoraz stale pogarszający się stan środowiska naturalnego, postawiły ochronę środowiska oraz zmianę polityki energetycznej na przyjazną naturze, jako jedno z najważniejszych i priorytetowych działań większości państw na świecie (Komisja Wspólnot Europejskich 2007). Na podstawie danych statystycznych oraz prognoz wydobycia i zużycia paliw kopalnych (Tabela 1) można oszacować okres dostępności do tych surowców.

Przy średnim wydobyciu paliw kopalnych zawartym w tabeli 1, ropy naftowej powinno wystarczyć na ok. 55 lat, gazu na ok. 53 lata, a węgla (kamiennego oraz brunatnego) na okres ponad 150 lat. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku ropy naftowej jej zużycie w roku 2016 przekroczyło poziom wydobycia. W rezultacie prognozuje się, że w kolejnych latach

wydobycie ropy naftowej oraz innych paliw kopalnych zostanie zwiększone, ze względu na rosnące zapotrzebowanie na surowiec.Wraz ze wzrostem wydobycia oraz zużycia paliw kopalnych wzrasta także bezpośrednia cena ich zakupu. W perspektywie 3 lat (na przełomie lat 2015/2018) cena węgla kamiennegow dwóch światowych spółkach węglowych wzrosła średnio aż o ok. 55%.Zmiana ceny zakupu węgla kamiennego w spółce węglowej Richards Bay (RPA) wyniosła z ok. 60 USD za tonę do poziomu ok. 104 USD za tonę (rys. 1).

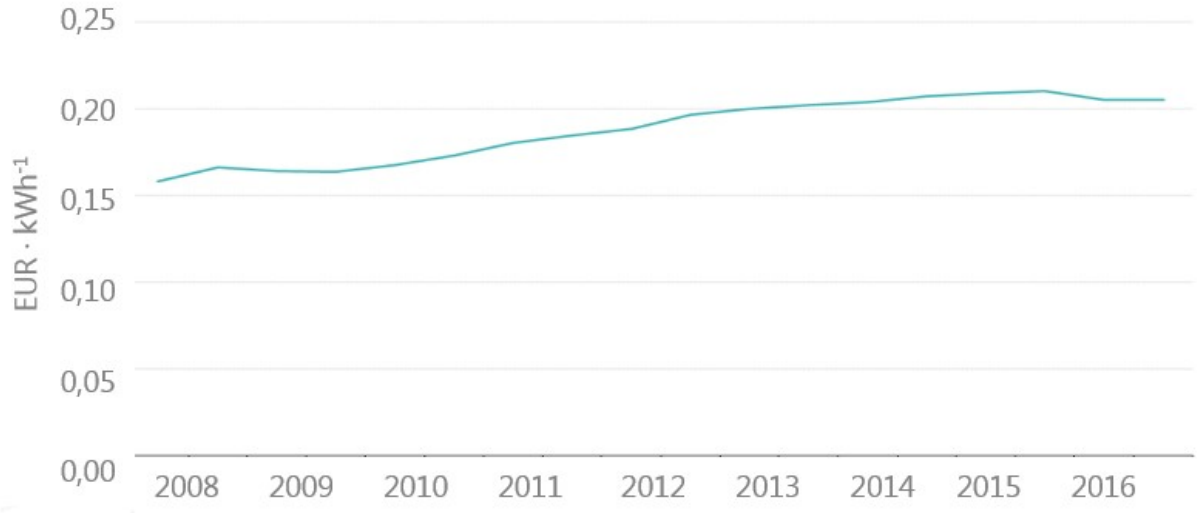
Tabela 1. Zasoby, produkcja i zużycie pierwotnych nośników energii w 2016 roku na świecie i w Unii Europejskiej

Wyszczególnienie	Jednostka	Zasoby		Produkcja		Zużycie	
		Świat	UE	Świat	UE	Świat	UE
Ropa naftowa	mld ton	240,7	0,7	4,382	0,071	4,418	0,613
Gaz	bilion m^3	186,6	1,3	3,552	0,118	3,543	0,429
Węgiel	mld ton	1139,9	748,2	7,460	0,485	3,732*	0,238*

*mld toe (1 toe = 41,87 GJ) Źródło: Gawlik, Mokrzycki 2017

Rys. 1. Notowanie ceny węgla kamiennego na dzień 15.05.2018 (USD·Mg^{-1}). Źródło: www2

W efekcie, zmiana cen węgla przekłada się na zwiększony koszt zakupu energii elektrycznej (rys. 2). W ciągu ostatnich 8 lat (na przełomie lat 2008/2016) cena energii elektrycznej dla gospodarstw domowych wzrosła aż o 30%. Jej początkowa cena w roku 2008 wynosiła ok.16 EUR za 100 kWh, natomiast pod koniec tego okresu jej cena wzrosła do poziomu 21 EUR za 100 kWh.

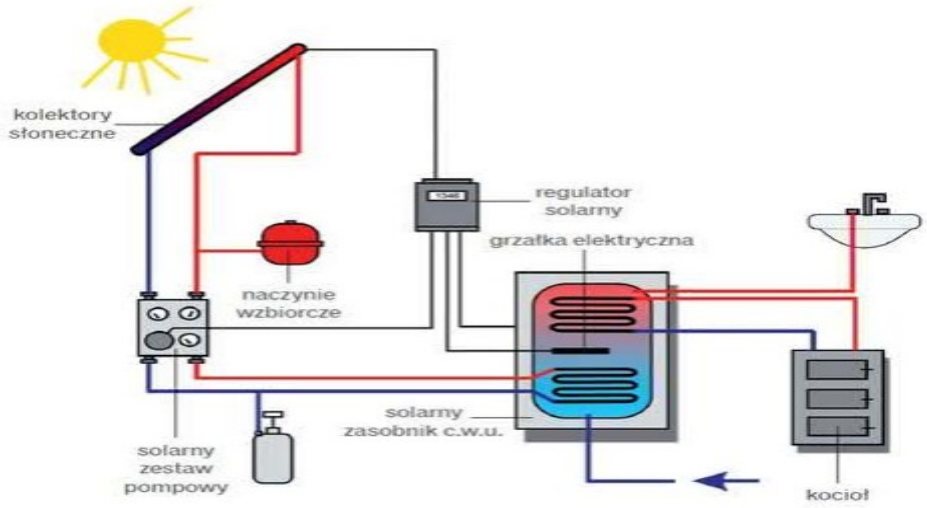


Rys. 2. Zmiana cen energii elektrycznej dla gospodarstw domowych (EUR kWh^{-1}). Źródło: www1

Obecny stały wzrost cen energii elektrycznej oraz paliw konwencjonalnych, a także stale zwiększająca się świadomość ekologiczna społeczeństwa przyczynia się do coraz większego wykorzystywania odnawialnych źródeł energii do lokalnego wytwarzania energii oraz ciepła. W przypadku gospodarstw domowych zmiany w postaci zastąpienia starej instalacji odnawialnym źródłem energii najczęściej dotyczy instalacji przygotowywania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.).

W nowoczesnych, nisko emisyjnych gospodarstwach domowych wykorzystanie promieniowania słonecznego jest już rozwiązaniem dość powszechnym. Jednak na rozwiązanie podgrzewania wody za pomocą promieniowania słonecznego może być realizowane także przez właścicieli starszych budynków z instalacjami kotłowymi zasilanymi węglem kamiennym, peletem czy gazem ziemnym. Warunkiem decydującym o inwestycji środków finansowych w słoneczne instalacje przygotowania ciepłej wody użytkowej jest przede wszystkim czynnik ekonomiczny (możliwie jak najtańsza zamiana źródła c.w.u. oraz jak najszybszy okres zwrotu poniesionych nakładów).

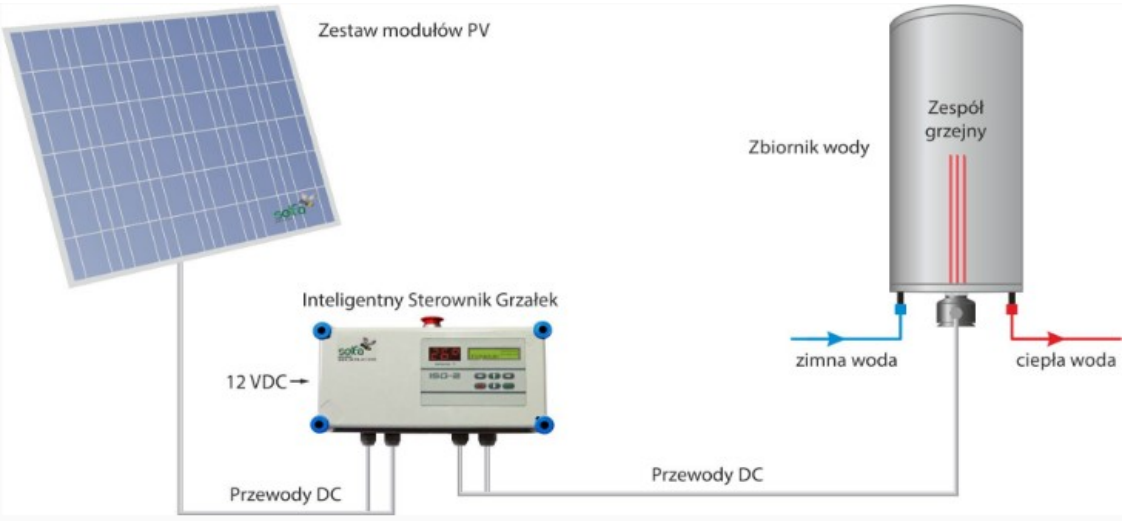
Przygotowywanie ciepłej wody użytkowej, wykorzystując promieniowanie słoneczne może się odbywać za pomocą dwóch różnych instalacji. Pierwszym sposobem może być podgrzewanie wody za pomocą kolektorów słonecznych (rys. 3).



Rys. 3. Przygotowanie ciepłej wody użytkowej za pomocą instalacji kolektorów słonecznych. Źródło: www3

Czynnik roboczy (glikol) przepływając przez kolektor słoneczny ogrzewa się do temperatury ok. 60°C przepływając następnie do solarnego zasobnika c.w.u. oddając ciepło zgromadzonej wewnątrz wodzie. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie stosunkowo dużej sprawności podgrzewania wody. Sprawność instalacji kolektorów słonecznych wynosi ok. 60-70%.

Alternatywnym rozwiązaniem dla kolektorów słonecznych są instalacje fotowoltaiczne. Ich zadaniem jest wytworzenie energii elektrycznej potrzebnej do zasilenia grzałki wewnątrz zasobnika ciepłej wody użytkowej (rys. 4).



Rys. 4. Instalacja przygotowania ciepłej wody użytkowej za pomocą instalacji fotowoltaicznej. Źródło: www4

Zastosowanie instalacji fotowoltaicznej do wyłącznego podgrzewania wody jest rzadko spotykanym rozwiązaniem z uwagi na niską sprawność konwersji promieniowania słonecznego do postaci energii elektrycznej. Sprawność paneli fotowoltaicznych wynosi ok. 15-20% (Maśnicki, Lisowski 2017). Na rynku istnieje jednak wielu producentów, a ceny

paneli fotowoltaicznych uzależnione są od mocy jednostkowej, wielkości, sprawności oraz marki producenta. Wybór odpowiedniej instalacji powinien, więc zostać dokonany na podstawie zapotrzebowania energetycznego, wolnej powierzchni pod montaż paneli fotowoltaicznych oraz możliwości finansowych gospodarstwa domowego.

2. Materiały i metody

Analiza porównawcza przygotowania ciepłej wody użytkowej w gospodarstwie domowym za pomocą instalacji fotowoltaicznych różnych producentów oraz porównanie ich z konwencjonalnymi metodami podgrzewania wody została przeprowadzona za pomocą obliczeń projektowych opartych na następujących założeniach wstępnych:

- lokalizacja inwestycji: przedmieścia Legnicy,
- obiekt: dom jednorodzinny (dach dwuspadowybez okien połaciowych, kąt pochylenia części dachu w kierunku południowym 30°, powierzchnia 200 m^2),
- obecne źródło c.w.u.: kocioł na węgiel, kocioł na pelet, kocioł gazowy oraz elektryczny wymiennik ciepła,
- liczba mieszkańców: 4 osoby,
- analizowany okres inwestycji: 10 lat,
- rodzaj alternatywnej instalacji fotowoltaicznej: panele PV o różnych mocach, sprawnościach oraz powierzchniach,
- nakłady inwestycyjne: koszt zakupu instalacji oraz montażu, koszt zakupu paliwa konwencjonalnego,

W obliczeniach uwzględniony został ponadto współczynnik pokrycia zapotrzebowania na c.w.u. na poziomie 60% (w_p=0,6), co jest wartością ogólnie przyjętą przy projektowaniu instalacji kolektorów słonecznych.

Na podstawie przyjętych założeń opracowano metodykę obliczeń:

- Średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową:

$$q_{dśr} = n_o \cdot q_c \quad (1)$$

gdzie:

$q_{dśr}$ - średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową, $m^3 \cdot d^{-1}$,

n_o - liczba osób w gospodarstwie domowym, os.,

q_c - jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową (przyjęto q_c= 80 $dm^3 \cdot d^{-1}$, ROZPORZĄDZENIE MINISTRA INFRASTRUKTURY Z DNIA 14.01.2002R.), $dm^3 \cdot d^{-1}$.

- Ilość ciepła niezbędnego do podgrzania wody użytkowej:

$$Q = q_{dśr} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \Delta T \quad (2)$$

gdzie:

Q - zapotrzebowanie na ciepło, $kJ \cdot d^{-1}$,

$q_{dśr}$ - średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową, $m^3 \cdot d^{-1}$,

ρ_w - gęstość wody (przyjęto $\rho_w = 1000\ kg \cdot m^{-3}$), $kg \cdot m^{-3}$,

c_w - ciepło właściwe wody (przyjęto $c_w = 4{,}19\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$,

ΔT - różnica temperatur pomiędzy wodą z sieci, a wodą w punkcie czerpalnym (przyjęto $\Delta T = 40$ K, PN-92/B-01706), K.

– Moc zainstalowanych paneli PV (Klugmann-Radziemska 2010) :

$$P_{pv} = \frac{Q \cdot w_p}{z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot V \cdot \eta_g \cdot \eta_z} \qquad (3)$$

gdzie:

P_{pv}- wymagana moc nominalna paneli, kW,

Q- dzienne zapotrzebowanie na energię(1 kWh=3600 kJ), $kWh \cdot d^{-1}$,

w_p- współczynnik pokrycia ($w_p = 0{,}6 \div 1{,}0$, dla instalacji pracującej cały rok przyjęto $w_p = 0{,}6$), -,

z_1- średnia dzienna ilość godzin słonecznych w warunkach STC (tab. 2), $h \cdot d^{-1}$,

z_2- współczynnik związany z odchyleniem modułu od płaszczyzny poziomej (przyjęto $z_2 = 1{,}13$, tab. 3), -,

z_3- współczynnik związany z temperaturą modułu (tab. 4), -,

V - współczynnik strat elektrycznych w instalacji fotowoltaicznej, -,

η_g- sprawność grzałki (przyjęto $\eta_g = 0{,}98$), -,

η_z- sprawność zbiornika (przyjęto $\eta_z = 0{,}925$, Romański i in. 2013), -.

- Współczynnik strat elektrycznych w instalacji fotowoltaicznej:

$$V = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \qquad (4)$$

gdzie:

V - współczynnik strat elektrycznych w instalacjach fotowoltaicznych, -,

V_1- współczynnik uwzględniający zmiany w napięciach na przewodach (przyjęto $V_1 = 0{,}94$, Łotocki 2011), -,

V_2- współczynnik, uwzględniający sprawność przemian zachodzących w akumulatorach, z uwagi na brak akumulatora w instalacji przyjęto $V_2 = 1$, -,

V_3 - współczynnik strat napięcia wynikających ze zmiennego nasłonecznienia i różnej temperatury modułu (przyjęto $V_3 = 0{,}9$, Łotocki 2011), -.

Tabela 2. Średnia ilość godzin słonecznych dla Legnicy

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
z_1,h·d^{-1}	0,7	1,33	2,81	4,39	5,12	5,54	5,32	4,57	3,17	1,96	0,94	0,61

Źródło: PV GIS

Tabela 3. Współczynnik z_2 związany z odchyleniem panelu od płaszczyzny poziomej

Kąt	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04
10	0,99	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07
15	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10
20	0,97	0,98	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,01
25	0,96	0,97	0,99	1,00	1,02	1,03	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,10	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
30	0,94	0,96	0,98	1,00	1,01	1,03	1,04	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13
35	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13

Źródło: www5

Tabela 4. Wartości współczynnika z_3 związanego z temperaturą modułu

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI
z_3	1,0	1,0	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,88	0,90	0,94	0,97	0,99

Źródło: Klugmann-Radziemska 2010

- Wymagana liczba paneli PV w instalacji:

$$n = \frac{P_{pv}}{P_m} \qquad (5)$$

gdzie:

n - liczba paneli, szt.,

P_{pv} - wymagana moc nominalna paneli, kW,

P_m- nominalna moc jednostkowa panelu, $W_p \cdot szt.^{-1}$.

- Ilość ciepła wytworzona przez instalację fotowoltaiczną w ciągu roku do podgrzania ciepłej wody użytkowej:

$$Q_i = I_p \cdot n \cdot A_{pv} \cdot \eta_z \cdot \eta_g \cdot \eta_{pv} \cdot V \qquad (6)$$

gdzie:

Q_i- ilość ciepła wyprodukowana w ciągu roku (1 kWh=3600 kJ), GJ,

I_p - średnie roczne nasłonecznienie dla miasta Legnicy (tab. 5), $kWh \cdot m^{-2} \cdot mc^{-1}$,

n - liczba paneli, szt.,

A_{pv}- powierzchnia paneli fotowoltaicznych, m^2,

η_z - sprawność zbiornika (przyjęto η_z = 0,925, Romański i in. 2013), -,

η_g - sprawność grzałki (przyjęto $\eta_g = 0{,}98$),

η_{pv}- sprawności panelu PV, -,

V - współczynnik strat elektrycznych w instalacjach fotowoltaicznych, -.

Tabela 5. Średnie nasłonecznienie dla Legnicy

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$kWh \cdot m^{-2} \cdot mc^{-1}$	21,6	37	86,8	132	158	166	164	141	94,6	60,2	28,1	18,7

Źródło: PV GIS

Analiza ekonomiczna wybranych instalacji fotowoltaicznych została przeprowadzona na podstawie następującego schematu obliczeniowego:

– Określenie kosztów inwestycji:

$$K_i = K_u + K_p + K_m \quad (7)$$

gdzie:

K_i- sumaryczny koszt instalacji fotowoltaicznej do podgrzewania wody użytkowej, PLN,

K_u- koszt paneli fotowoltaicznych, PLN,

K_p- koszt pozostałych urządzeń i elementów instalacji (inwerter, przewody, skrzynka bezpiecznikowa, stelaż montażowy itp.), PLN,

K_m- koszt montażu instalacji fotowoltaicznej, PLN.

– Jednostkowy koszt pozyskania ciepła dla wody użytkowej:

$$K_p = \frac{K_i}{Q_i \cdot t} \quad (8)$$

gdzie:

K_p- koszt pozyskania ciepła, $PLN \cdot GJ^{-1}$,

K_i- sumaryczny koszt instalacji do podgrzewu ciepłej wody użytkowej, PLN,

Q_i- ilość ciepła wyprodukowana w ciągu roku, GJ

t - rozpatrywany czas zwrotu inwestycji, lata.

– Roczny koszt paliwa stałego (węgla, peletu):

$$K_{kw} = \frac{Q \cdot w_p \cdot 365}{Q_o \cdot \eta_z \cdot \eta_{kw}} \cdot K_{kwj} \quad (9)$$

gdzie:

K_{kw}- roczny koszt paliwa stałego, $PLN \cdot rok^{-1}$,

Q- dobowe zapotrzebowanie na ciepło, $MJ \cdot rok^{-1}$,

w_p - współczynnik pokrycia ($w_p = 0{,}6 \div 1{,}0$, dla instalacji pracującej cały rok przyjęto $w_p = 0{,}6$), -,

Q_o- wartość opałowa źródła energii konwencjonalnej (tab. 6), $MJ \cdot kg^{-1}$,

η_z - sprawność zbiornika (przyjęto $\eta_z = 0{,}925$, Romański i in. 2013), -,

η_{kw}- sprawność kotła na paliwo stałe lub gazowe (tab. 6), -,

K_{kwj}- koszt nośnika energii (tab. 6), PLN·Mg^{-1}.

– Roczny koszt energii elektrycznej:

$$K_{el} = \frac{Q \cdot w_p \cdot 365}{\eta_g \cdot \eta_z} \cdot K_{1kWh} \quad (10)$$

gdzie:

K_{el}- roczny koszt energii elektrycznej z sieci, PLN·rok^{-1},

Q - dobowe zapotrzebowanie na ciepło, kWh·rok^{-1},

w_p - współczynnik pokrycia (w_p = 0,6 ÷ 1,0, dla instalacji pracującej cały rok przyjęto w_p = 0,6), -,

η_g - sprawność grzałki (przyjęto η_g = 0,98),

η_z - sprawność zbiornika (przyjęto η_z = 0,925, Romański i in. 2013), -,

K_{1kwh}- koszt energii elektrycznej (przyjęto K_{1kwh} = 0,65 PLN·kWh^{-1}), PLN·kWh^{-1}.

Wskaźniki techniczne dla poszczególnych instalacji konwencjonalnych przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wskaźniki przyjęte w instalacjach konwencjonalnych

Dane techniczne	Jednostka	Kocioł wsadowy na węgiel	Kocioł automatyczny na węgiel	Kocioł na pelet	Kocioł gazowy	Elektryczny pogrzewacz ciepła
Sprawność, η_{kw}	-	0,65	0,9	0,9	0,95	0,98
Wartość opałowa, Q_o	MJ·kg^{-1}	28	28	19	32	-
Koszt jednostkowy nośnika energii, K_{kwj}	PLN·Mg^{-1} PLN·kWh^{-1} PLN·m^{-3}	900	900	700	1,30	0,65

Źródło: www6, www7

3. Dyskusja wyników

Do analizy porównawczej instalacji PV różnych producentów wybrano 9 modeli paneli fotowoltaicznych. Dane techniczne oraz koszty instalacji paneli PV przedstawiono w tabeli 7. Na podstawie przyjętej metodologii obliczeń wyznaczono moc instalacji wynoszącą P_{pv}= 1,91 kW.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że koszt całej instalacji nie zależy tylko od jednostkowej ceny panelu fotowoltaicznego, ale także od jego sprawności, mocy oraz liczby wymaganych paneli. W przypadku analizowanych przykładów instalacji najmniejszy koszt inwestycyjny uzyskano dla instalacji składającej się z paneli o mocy jednostkowej 270 W_p. Najdroższą instalacją okazały się być panele marki Panasonic. Było to jednak zależne od jednostkowego kosztu panelu PV, który był najwyższy spośród analizowanych przykładów. Do kosztów inwestycyjnych zaliczał się także koszt montażu

instalacji. Im instalacja posiadała więcej paneli do zamontowania, tym wyższy był kosztich montażu. Dodatkowo, decydując się na panele fotowoltaiczne o mniejszej mocy, trzeba uwzględnić konieczność dostępu (posiadania) do większej wolnej powierzchni dachowejniezbędnej do ich zamontowania. Różnice w wymaganej powierzchni mogą być znaczne, nawet trzykrotne.

Tabela 7. Dane techniczne i parametry instalacji fotowoltaicznych

Dane techniczne	Jednostka	Panasonic HIT N330	Hanwa Q.PEAK G4.1	Sharp NU-RD 260	Sharp RJ-N270	Munchen Solar 270	REC290 TwinPeak	TIANWEI	SG-HN100	SCHOTT ASI 100
Moc	W_p	330	305	260	270	270	290	100	100	100
Sprawność, η_{pv}	-	0,197	0,183	0,161	0,165	0,166	0,174	0,07	0,065	0,069
Ilość paneli, n	szt.	7	7	8	8	8	8	21	21	21
Powierzchnia, A_{pv}	m^2	11,69	11,69	13,12	13,12	13,04	13,36	30,03	32,34	30,43
Wytworzona ilość ciepła, Q_i	GJ	8,34	7,75	7,65	7,84	7,84	8,42	7,61	7,61	7,61
Koszt panelu, K_u	PLN	2090	856	750	700	670	840	185	205	244
Koszt montażu + profile	PLN	1645	1645	1880	1880	1880	1880	4935	4935	4935
Koszt pozostałych elementów instalacji	PLN					2000				
Koszt inwestycyjny, K_i	tyś. PLN	18,28	9,64	9,88	9,48	9,24	10,6	10,82	11,24	12,06
Jednostkowy koszt pozyskania ciepła	$PLN \cdot GJ^{-1}$	219	124	129	121	118	126	142	148	159

Źródło: opracowanie własne na podstawie: www8, www9, www10, www11, www12, www13, www14, www15, www16

W tabeli 8 zostały przedstawione roczne koszty zakupu oraz ilości paliwa stałego i gazowego (węgiel, pelet, gaz ziemny) oraz energii elektrycznej wymagane do podgrzania wody użytkowej w gospodarstwie domowym.

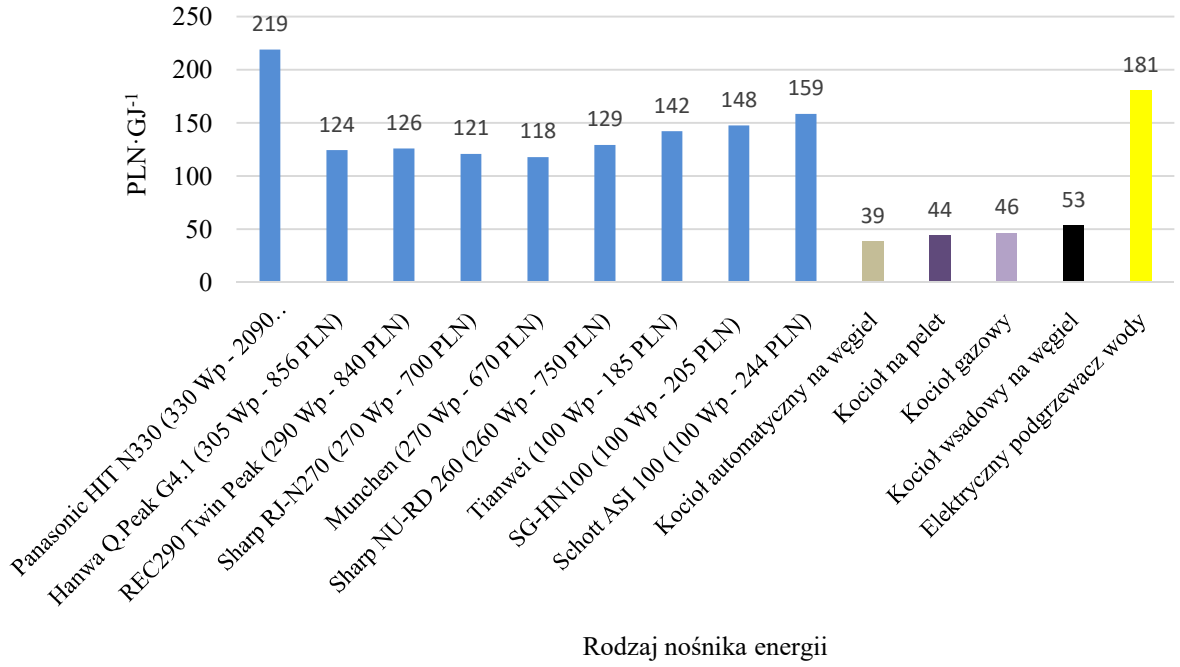
Tabela 8. Roczne koszty z tytułu podgrzewania wody użytkowej energią konwencjonalną

Dane techniczne	Jednostka	Kocioł wsadowy węglowy	Kocioł automatyczny węglowy	Kocioł na pelet	Kocioł gazowy	Elektryczny podgrzewacz wody
Ilość paliwa	kg m^3 kWh	698	504	744	418	3263
Koszt energii	$PLN \cdot rok^{-1}$	628,2	453,6	520,1	543,4	2120,95

Źródło: Opracowanie własne

Spośród analizowanych standardowych oraz obecnych źródeł ciepłej wody użytkowej w gospodarstwie domowym największy koszt zakupu był dla energii elektrycznej (2121 PLN). Jej koszt zakupu jest około 3-5 krotnie wyższy od kosztu zakupu takich paliwajak: węgiel, pelet czy gaz ziemny (od 454 do 628 PLN).

Jak wynika z rysunku 5, jednostkowe koszty uzyskania ciepła z instalacji fotowoltaicznych mieściły się w granicach od 118 PLN·GJ^{-1} do 219 PLN·GJ^{-1}. Największy koszt wytworzenia ciepła uzyskano dla panelu o największej mocy, ale także cenie zakupu (Panasonic HIT N 330). Najniższy koszt ciepła uzyskano w przypadku panelu amorficznego o mocy 270 $W_p$firmy Munchen i wyniósł118 PLN·GJ^{-1}.



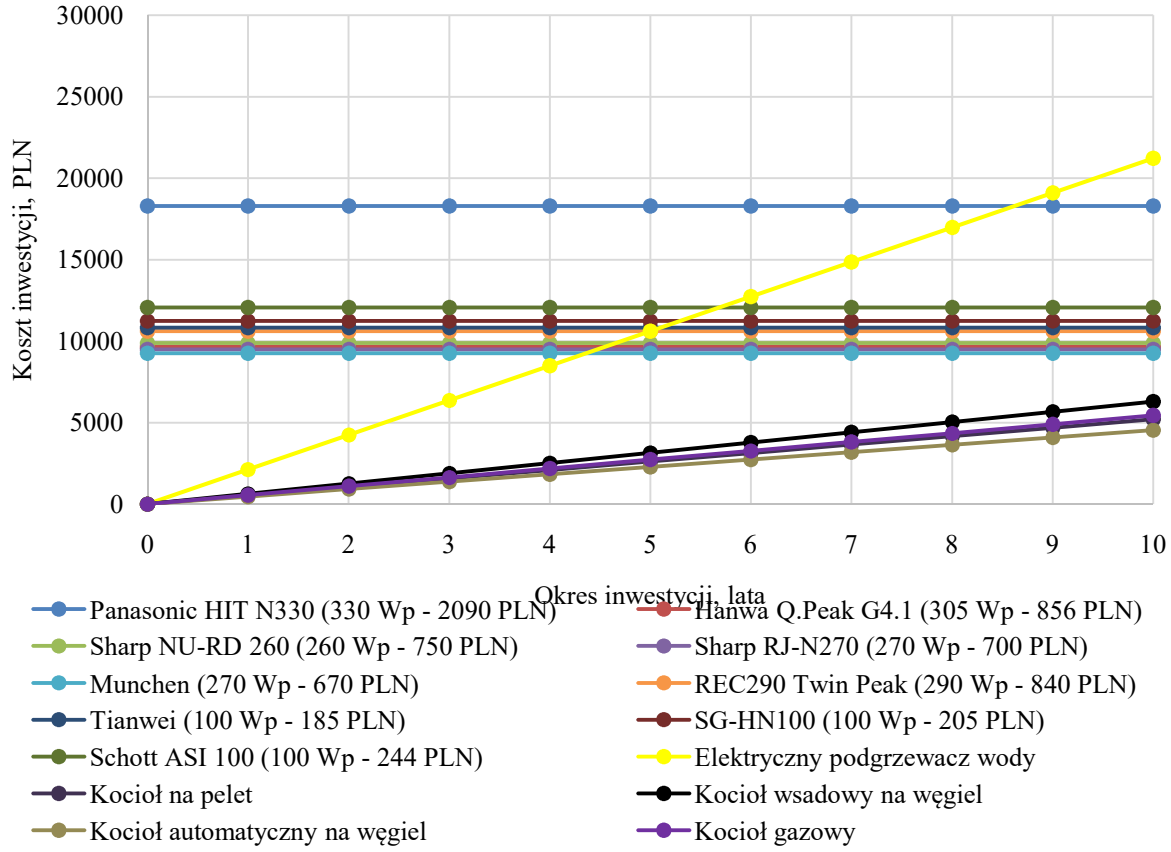
Rys. 5. Jednostkowy koszt uzyskania ciepła z paneli fotowoltaicznych dla okresu 10 lat. *Źródło: Opracowanie własne.*

Można zauważyć, że najniższy koszt wytworzenia ciepła nie przypadł instalacji składającej się z paneli o najniższej mocy i cenie (panele Tianwei). Najbardziej opłacalną instalacją są panele o średniej mocy (270 W_p·szt.$^{-1}$) oraz cenie (670 PLN·szt.$^{-1}$). Wynika to prawdopodobnie z faktu, że taka moc paneli jest obecnie najbardziej popularna wśród producentów i dostawców technologii.

W odniesieniu do tradycyjnych źródeł ciepła, najniższym jednostkowym kosztem wytworzenia ciepła nadal charakteryzuje się węgiel. Jego wartość jest zależna o rodzaju zastosowanego kotła (kocioł wsadowy – 53 PLN·GJ^{-1}; kocioł automatyczny – 39 PLN·GJ^{-1}). Porównując paliwa takie jak pelet czy gaz ziemny z pozostałymi surowcami, ich jednostkowe koszty są na zbliżonym poziomie (odpowiednio 44 PLN·GJ^{-1} oraz 46 PLN·GJ^{-1}). Najmniej opłacalnym sposobem wytwarzania ciepła jest wykorzystywanie energii elektrycznej w podgrzewaczu wody. Koszt wytworzenia ciepła wyniósł 181 PLN·GJ^{-1}.

Z analizy skumulowanych kosztów instalacji fotowoltaicznych z instalacjami konwencjonalnymi stwierdzono, że żadna z instalacji nie ma aktualnie podstaw

ekonomicznych, aby zastąpić już istniejące instalacje opalane węglem, peletemczy gazem ziemnym (rys. 6). Jest to związane z nadal wysokimi kosztami instalacji fotowoltaicznych oraz niską sprawnością konwersji energii słonecznej w energię elektryczną, która następnie zamieniana jest w użyteczne ciepło.



Rys. 6. Koszty skumulowane przygotowania c.w.u. w instalacjach fotowoltaicznych oraz w kotłach na węgiel, pelet, gaz ziemny oraz w elektrycznym podgrzewaczu wody. *Źródło: Opracowanie własne*

Zastosowanie paneli fotowoltaicznych ma ekonomiczne uzasadnienie jedynie w przypadku zastąpienia instalacji z elektrycznym wymiennikiem ciepła. Okres zwrotu dla najdroższej instalacji wynosi ok. 8,5 roku. Dla pozostałych instalacji fotowoltaicznych okres zwrotu wynosi średnio od 4 do 6 lat. W rozpatrywanym okresie eksploatacji instalacji fotowoltaicznych (10 lat) nie nastąpi zwrot kosztów inwestycji w porównaniu do aktualnego źródła c.w.u. (kocioł na węgiel, pelet, gaz ziemny).

4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanej analizy techniczno-ekonomicznej można stwierdzić, że przygotowywanie ciepłej wody użytkowej w prywatnym gospodarstwie domowym nie posiada ekonomicznego uzasadnienia w przypadku zamiany aktualnego systemu grzewczego (kocioł wsadowy lub automatyczny na węgiel, kocioł na pelet oraz kocioł gazowy) na instalację fotowoltaiczną. Jedynym i dobrym rozwiązaniem jest inwestycja w instalacje

fotowoltaiczną w przypadku obecnego przygotowywania ciepłej wody użytkowej przy pomocy elektrycznego podgrzewacza wody. Niski stopień opłacalności inwestycji jest związany z niską sprawnością konwersji promieniowania słonecznego do postaci energii elektrycznej oraz podwójnej konwersji promieniowania słonecznego. Zamiana promieniowania słonecznego (ciepło) w energię elektryczną (instalacja fotowoltaiczna) oraz następna zamiana energii elektrycznejponownie w ciepło (grzałka elektryczna) jest najmniej opłacalnym procesem prowadzącym do podgrzania ciepłej wody użytkowej. Dodatkowo stwierdzono, że panele fotowoltaiczne o dużo niższej mocy oraz cenie nie gwarantują uzyskania najmniejszego kosztu jednostkowego wytworzenia ciepła. Ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem jest inwestowanie w instalacje fotowoltaiczne o odpowiednio zbilansowanej mocy jednostkowej (optimum stosunku mocy do ceny przy aktualnym poziomie i możliwościach technicznych) oraz wymaganej powierzchni roboczej na dachu budynku gospodarstwa domowego. Pomimo ograniczonej opłacalności inwestycji, przy podejmowaniu decyzji warto jest rozpatrzyć aspekty środowiskowe związane z instalacjami fotowoltaicznymi oraz niezależność energetyczną połączoną z brakiem wpływu zmian cen rynkowych energii w przyszłości na koszty eksploatacyjne podgrzewania ciepłej wody użytkowej w gospodarstwie domowym.Potencjalny wzrost cen paliw kopalnych może znacząco przyspieszyć okres zwrotu poniesionych nakładów na instalację fotowoltaiczną.

5. Literatura

Gawlik L., Mokrzycki E. 2017. Paliwa kopalne w krajowej energetyce – problemy i wyzwania. *Energy Policy Journal*. 20(4), 6-26.

Klugmann-Radziemska E. 2010. Fotowoltaika w teorii i praktyce. Wydawnictwo BTC, Legionowo. ISBN 978-83-60233-58-0.

Komisja Wspólnot Europejskich. 2007. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów dot. średniookresowego przeglądu szóstego wspólnotowego programu działań w zakresie środowiska naturlanego. Bruksela, KOM (2007) 225.

Łotocki H. 2011. ABC systemów fotowoltaicznych sprzężonych z siecią energetyczną. Krosno ISBN: 978-62760-28-2.

Maśnicki R., Lisowski M. 2017. Analiza efektywności wybranych instalacji fotowoltaicznych w północnej Polsce. *Przegląd Elektrotechniczny* 93(9), 101-104.

Romański L, Dyjakon A., Bukowski P., Łuczycka D. 2013. Odnawialne źródła energii, Przewodnik do ćwiczeń. Oficyna Wydawnicza ATUT.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody
www1 - http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Electricity_price_statistics/pl#Ceny_energii_elektrycznej_dla_gospodarstw_domowych
www2 - http://gornictwo.wnp.pl/notowania/ceny_wegla/?zakres=4
www3 - https://www.budujemydom.pl/kolektory-sloneczne/20359-instalacja-solarna-do-przygotowania-c-w-u-5-praktycznych-porad
www4 - https://www.brewa.pl/produkty-i-uslugi/fotowoltaika/zestaw-fotowoltaiczny-do-podgrzewania-wody.html
www5 - http://ozeshop.pl/inwertery/153-inwerter-22-kw-solar-edge-se2200.html (dostęp 01.02.2018)
www6 - https://zawijan.wordpress.com/poradnik-uzytkownika/sprawnosc-cieplna/ dostęp (20.05.2018)
www7 - http://muratordom.pl/instalacje/ogrzewanie-paliwami-stalymi/kotly-na-pelety-i-palniki-na-pelety-od-a-do-z,28_2075.html (dostęp 20.05.2018)
www8 - https://eu-solar.panasonic.net/cps/rde/xbcr/solar_en/VBHN330_325SJ47_PL.pdf (dostęp 23.01.2018)
www9 - https://www.sklep.asat.pl/pl/p/Modul-PV-mono-260-W-SHARP-NU-RD260-black-/427 (dostęp 23.01.2018)
www10-https://www.q-cells.com/dam/jcr:315288fe-2a60-4f87-a57d-6f96358962bd/Hanwha_Q_CELLS_Data_sheet_QPEAK-G4.1_300-305_2017-02_Rev03_NA.pdf (dostęp 23.01.2018)
www11 - http://www.soltec.sklep.pl/panel-sloneczny-o-mocy-270w-24v-sharp-nd-rb270-p-1236.html (dostęp 23.01.2018)
www12 - https://pvplus.com.pl/pl/p/Munchen-Solar-250Wp-MSP250AS-30/67 (dostęp 23.01.2018)
www13 - https://www.mg-solar-shop.de/solar-panels/REC-Solar/REC-Solar-REC290-Twin-Peak-2-BLK-solar-panel--290Wp--polycrystalline.html (dostęp 23.01.2018)
www14 - http://www.billionpower.cn/product/s_en.asp?id=733 (dostęp 23.01.2018)
www15-http://kolektorowo.pl/index.php/oferta/inne/panele-fotowoltaiczne?page=shop.product_details&flypage=flypage_images.tpl&product_id=45&category_id=6 (dostęp 23.01.2018)
www16-http://www.solarni-paneli.hr/pdf/shott/SCHOTT%20ASI%20100-107%20data%20sheet%20EN%200111.pdf (dostęp 20.01.2018)

Analiza Monte Carlo dokładności estymatorów mediany dla różnych planów losowania

Tomasz Stachurski[(1)]

[1]Katedra Statystyki, Ekonometrii i Matematyki, Wydział Zarządzania, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
Tomasz Stachurski: tomasz.stachurski@ue.katowice.pl

Streszczenie
W pracy podjęto problem estymacji mediany w populacji i podpopulacjach. Głównym celem pracy jest porównanie własności różnych strategii estymacji mediany. Rozważane są dwa estymatory: klasyczny estymator mediany dla dowolnego planu losowania oraz estymator ilorazowy wykorzystujący wartości zmiennej pomocniczej, co, do której zakłada się, że jej wartości znane są dla całego operatu losowania.Własności estymatorów porównywane są dla dwóch różnych planów losowania próby: planu losowania prostego bez zwracania oraz planu losowania proporcjonalnego do wartości cechy dodatkowej.Własnościrozważanych strategii estymacji zostały porównane za pośrednictwem przeprowadzonego badania symulacyjnego. W tym celu napisano skrypt w języku R. W badaniu analizowano względne obciążenia estymatorów oraz względne wartości pierwiastków z błędu średniokwadratowego. Zbadano również wpływ liczebności próby na dokładność estymacji.

Słowa kluczowe: estymacja mediany, metoda reprezentacyjna, analiza Monte Carlo

The Monte Carlo analysis of precision of median estimation for different sampling designs

Summary
In the paper the problem of median estimation in the population and subpopulations is considered. The main aim of this work is to compare different strategies for estimating the median. Two estimators are considered: the estimator for any sampling design using inclusion probabilities and the ratio median estimator using the auxiliary variable that must be known for the whole sampling frame. Properties of these estimators are compared undertwo different sampling designs: simple random sampling without replacement and sampling proportional to size. In the design-based simulation study prepared in R, properties of the considered median estimation strategies are considered including relative biases and relative root of mean square errors.Moreover, the influence of sample size is considered.

Keywords: median estimation, survey sampling, Monte Carlo analysis

1. Wstęp

Przedmiotem badaństatystycznych jest populacja generalna, czyli zbiór elementów analizowanych ze względu na pewne cechy ilościowe lub jakościowe. W praktyce, przeprowadza się zazwyczaj jedynie badania częściowe, w których obserwacji poddawany jest pewien podzbiór populacji nazywany próbą. Dobór elementów do próby może być losowy lub celowy, lecz w niniejszej pracy ograniczymy się wyłącznie do losowego doboru jednostek do próby. Posługując się metodami statystyki matematycznej, na podstawie zaobserwowanego w próbie rozkładu empirycznego cechy podejmuje się próby wnioskowania o rozkładzie analizowanej zmiennej w populacji. Za pomocą rozmaitych charakterystyk dokonuje się opisu rozkładu badanej zmiennej. Podstawową grupą są miary poziomu przeciętnego. Jedną z powszechnie wykorzystywanych miar do opisu poziomu przeciętnego jest średnia arytmetyczna. Nie jest to jednak najlepsze podejście, ponieważ

nawet pojedyncze punktowe zaburzenie zmiennej, może prowadzić do dużej zmiany wartości średniej arytmetycznej i w efekcie zniekształcenia informacji o poziomie przeciętnym badanego zjawiska. Stąd też istnieje potrzeba korzystania z innych miar, które są w większym stopniu odporne na pojawiające się wartości oddalone. Do odpornych miar położenia należy m.in. mediana, dla której dopiero połowa obserwacji będących wartościami odstającymi powoduje załamanie (Trzpiot 2013), stąd też bardziej uzasadnionym jest wnioskowanie o poziomie przeciętnym zmiennej za pomocą mediany niż średniej arytmetycznej. Jest to szczególnie istotne w przypadku badań ekonomicznych, gdzie analizowane rozkłady z reguły nie są symetryczne – zazwyczaj charakteryzują się asymetrią prawostronną, a ponadto w zbiorach danych często pojawiają sięwartości oddalone. Wśród innych zalet stosowania mediany wymienia się także (Zając 1988) to, że można ją wyznaczyć nawet, jeżeli nie dysponuje się dokładnymi informacjami z próby np. w przypadku niedomkniętych przedziałów klasowych. Ponadto mediana ma duże znaczenie w statystyce społeczno-ekonomicznej. Na liście 18 wskaźników przyjętych przez Radę Europejską w Laeken w 2001 roku, które są przeznaczone do badania poziomu ubóstwa znajdują się właśnie wskaźniki opierające się na medianie m.in. linia ubóstwa wyznaczana na poziomie 60% mediany dochodów ekwiwalentnych, wskaźnik głębokości ubóstwa w odniesieniu do mediany itp. (Panek 2007). Stąd też istnieje potrzeba badania własności metod szacowania mediany.

Celem niniejszej pracy jest analiza dokładności różnych strategii estymacji mediany, w których brane będą pod uwagę różne postacie estymatorów oraz różne plany losowania, w tym nieproste plany losowania. W badaniu symulacyjnym typu Monte Carlo zostaną przeanalizowane obciążenia oraz wartości błędów średniokwadratowych dla różnych strategii estymacji mediany w populacji i podpopulacjach.

2. Podstawy podejścia randomizacyjnego

W niniejszej pracy prowadzonesą rozważania dotyczące wyłącznie podejścia randomizacyjnego, w którym zakłada się, że wektor wartości badanej cechy jest ustalony (nielosowy), a źródłem losowości ocen wybranych charakterystyk jest wyłącznie sposób losowania próby. Zdefiniujemy, zatem podstawowe pojęcia, które wykorzystywane są w tym podejściu.

Planem losowania nazywamy rozkład prawdopodobieństwa $p(s)$, oparty na przestrzeni wszystkich prób S, a więc funkcję, która każdej możliwej próbie przyporządkowuje prawdopodobieństwo jej wylosowania. Funkcja ta, musi spełniać dwa warunki:

- prawdopodobieństwo wylosowania każdej próby musi być nieujemne:

$$\bigwedge_{s \in S} p(s) \geq 0,$$

- suma prawdopodobieństw dla wszystkich prób z przestrzeni prób S powinna być równa jedności:

$$\sum_{s \in S} p(s) = 1.$$

Każdy plan losowania determinuje zestaw prawdopodobieństw inkluzji. Prawdopodobieństwo inkluzji pierwszego rzędu, jest to prawdopodobieństwo, że i-ty element populacji znajdzie się w próbie, co zapisujemy (Cassel i in. 1977, s. 10):

$$\pi_i = \sum_{\{s: i \in s\}} p(s).$$

Ponadto strategią estymacji parametru θ nazywamy uporządkowaną parę $(t_S, p\,(s))$, gdzie t_S jest estymatorem parametru θ, zaś $p(s)$ jest planem losowania próby (Wywiał 2010). W pracy są rozważane własności strategii estymacji mediany – własności różnych estymatorów mediany dla różnych planów losowania elementów do próby.

Obecnie badacze zainteresowani są nie tylko szacowaniem charakterystyk w całej populacji, lecz również w pewnych wyróżnionych podpopulacjach. Zazwyczaj dopiero po wylosowaniu próby i zbadaniu każdego z elementów możliwe jest przyporządkowanie danej jednostki do konkretnej podpopulacji (domeny) ze względu na pewną cechę. W związku z tymliczebność próby w domenie jest losowa – często liczebność ta jest bardzo niewielka, a w skrajnych przypadkach nawet zerowa. Metody wnioskowania wykorzystywane w takich przypadkach należą do metod statystyki małych obszarów, gdzie przez mały obszar będziemy rozumieć dowolną domenę, dla której uzyskanie oceny parametru podpopulacji z wykorzystaniem estymatorów bezpośrednich, (czyli takich, które wykorzystują wartości zmiennej objaśnianej wyłącznie z wyróżnionej domeny) z odpowiednim poziomem precyzji jest niemożliwe (Rao i Molina 2015). Metody te obecnie zyskują na znaczeniu. Są często wykorzystywane m.in. do ustalenia sposobu alokacji środków finansowych w celu zapewnienia zrównoważonego rozwoju regionalnego (Domański i Pruska 2001).

3. Wybrane metody estymacji mediany

Niech $y = [y_1, y_2, \ldots, y_N]$ będzie wektorem obserwacji badanej zmiennej w populacji. Wówczas medianę, czyli inaczej wartość środkową w populacji zmiennej y, określa się następująco (Wywiał 2010):

$$Me = \begin{cases} \frac{y_N + y_{N+1}}{2} \text{jeśli N jest parzyste} \\ y_{\frac{N+1}{2}} \text{jeśli N jest nieparzyste} \end{cases}.$$

Tym samym mediana jest taką obserwacją, która dzieli badaną zbiorowość na dwie równe części, w ten sposób, że co najmniej 50% obserwacji przyjmuje wartości mniejsze lub równe medianie i jednocześnie, co najmniej 50% obserwacji przyjmuje wartości większe lub równe medianie.

Na początku zostanie przedstawiona procedura estymacji mediany zaproponowana w pracy Särndal i in. 1992, s. 199-200. Pierwszym krokiem jest uporządkowanie w kolejności niemalejącej elementów należących do próby względem wartości zmiennej objaśnianej:

$$y_1 \leq y_2 \leq \cdots y_n$$

i odpowiadających im prawdopodobieństw inkluzji pierwszego rzędu:

$$\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n.$$

Prawdopodobieństwa inkluzji rzędu pierwszego mogą być uzyskane za pomocą dowolnego planu losowania. Tym samym algorytm ten może być stosowany do estymacji mediany dla prób prostych i nieprostych.

W drugim kroku definiuje się następujące sumy odwrotności prawdopodobieństw inkluzji pierwszego rzędu:

$$B_1 = \frac{1}{\pi_1},$$

$$B_2 = \frac{1}{\pi_1} + \frac{1}{\pi_2},$$

...

$$B_l = \sum_{i=1}^{l} \frac{1}{\pi_i}.$$

Stąd estymator liczebności populacji przyjmuje postać:

$$\widehat{N} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\pi_i}. \quad (1)$$

Estymator mediany dla dowolnego planu losowania jest dany poniższym wzorem (Särndal i in. 1992):

$$Me = \begin{cases} y_l \text{dla} B_{l-1} < 0{,}5\widehat{N} < B_l \\ 0{,}5(y_l + y_{l+1}) \text{dla} B_l = 0{,}5\widehat{N} \end{cases}. \quad (2)$$

Estymator dany wzorem (2) nie wykorzystuje informacji dodatkowych o jednostkach populacji, które często są dostępne dla każdej jednostki operatu losowania.

Wykorzystanie informacji dodatkowych w procesie estymacji może prowadzić do wzrostu dokładności estymacji, zwłaszcza, gdy zmienna pomocnicza jest silnie skorelowana ze zmienną badaną. Estymatorem, który wykorzystuje informacje dodatkowe o jednostkach badania (zakładamy, że informacja ta jest dostępna dla każdego elementu populacji), jest estymator ilorazowy mediany w podpopulacji będący modyfikacją dobrze znanego estymatora ilorazowego wartości globalnej (Thompson M.E i Godambe V.P, 2009):

$$\widehat{M}_{y\Omega_d}^{R} = \frac{\widehat{M}_{y\Omega_d}}{\widehat{M}_{x\Omega_d}} M_{x\Omega_d}\,, \tag{3}$$

gdzie $\widehat{M}_{y\Omega_d}$ oraz $\widehat{M}_{x\Omega_d}$ są estymatorami mediany w podpopulacji – odpowiednio dla zmiennej badanej oraz pomocniczej otrzymanymi za pomocą formuły (2), zaś $M_{x\Omega_d}$ jest znaną wartością mediany zmiennej pomocniczej w podpopulacji Ω_d. W szczególności, jeżeli w formule (3) przyjmiemy, że $\Omega_d = \Omega$, wówczas otrzymamy estymator ilorazowy mediany w całej populacji.

4. Rozważane strategie losowania

W pracy rozważano łącznie cztery strategie losowania. Własności obu zaprezentowanych w pracy estymatorów:

- estymator mediany dany wzorem(2),
- ilorazowy estymator mediany dany wzorem (3)

analizowano dla dwóch planów losowania:

- plan losowania prostego bez zwracania(Wywiał 2010) – oznaczany dalej, jako plan A:

$$p(s) = \frac{1}{\binom{N}{n}}, \tag{4}$$

gdzie prawdopodobieństwa inkluzji rzędu pierwszego są następującej postaci:

$$\pi_i = \frac{n}{N} \tag{5}$$

- plan losowania proporcjonalny do wartości zmiennej dodatkowej (Tille 1996) oznaczany dalej, jako plan B, gdzie prawdopodobieństwa inkluzji pierwszego rzędu są wyznaczane na podstawie formuły:

$$\pi_i = \frac{nx_i}{\sum_{i=1}^{N} x_i}, \tag{6}$$

gdzie x_i oznaczają wartości zmiennej pomocniczej. Jeśli dla dowolnego elementu populacji wartość $\pi_i > 1$, wówczas element ten będzie celowo dobierany do próby, a prawdopodobieństwa inkluzji pierwszego rzędu dla pozostałych elementów będą przeliczone ponownie, wykluczając powyższy element.Istnieje wiele schematów realizujących losowanie, w którym prawdopodobieństwa inkluzji pierwszego rzędu nie są równe. W naszym przypadku wybrano procedurę eliminacji opisaną w pracy Tille (1996), która polega na pojedynczym usuwaniu elementów z populacji aż do otrzymania próby o liczebności n.

5. Analiza Monte Carlo

W celu zbadania własności rozważanych estymatorów przeprowadzono badanie symulacyjne za pośrednictwem autorskiej funkcji napisanej w języku R (R Core Team 2018). Badanie symulacyjne zostało przeprowadzone dla rzeczywistych oraz sztucznych danychwygenerowanych z wielowymiarowego rozkładu normalnego, przyjmując ten sam poziom przeciętny zmiennych, te same wariancje oraz tą samą wartość współczynnika korelacji pomiędzy nimi, co w danych rzeczywistych. Natomiast zbiór danych rzeczywistych dotyczył powiatów szwedzkich. Zmienną objaśnianą były wpływy z podatków komunalnych w roku 1985 (w milionach koron szwedzkich), zaś zmienną pomocniczą była liczba pracowników miejskich w roku 1984. Pomiędzy tymi zmiennymi, występuje bardzo silna liniowa dodatnia zależność korelacyjna (współczynnik korelacji liniowej Pearsona przekracza wartość 0,99). Zmienna objaśniana charakteryzuje się również silną asymetrią prawostronną, (co jest częstym zjawiskiem w przypadku zmiennych losowych rozważanych w ekonomii). Ponadto ze zbioru danych usunięto 3 obserwacje odstające, które mogłyby mieć duży wpływ na wyniki w sytuacji niewystarczającej liczby iteracji w symulacji. W oryginalnym zbiorze populacja powiatów może zostać podzielona na 8 regionów. Niemniej jednak ze względu na małą liczebność regionu nr 7, regiony 7 i 8 zostały połączone. Stąd w badaniu symulacyjnym rozważano wartości estymatorów dla 7 domen (podpopulacji) oraz populacji.

W każdej iteracji badania symulacyjnego (liczba iteracji w symulacji wynosiła $B = 10\,000$) z populacji powiatów szwedzkich losowano próbę zgodnie z przyjętym planem losowania. Rozważano także kilka liczebności prób, stanowiących w przybliżeniu odpowiednio: 10%, 15%, 20% i 25% liczebności populacji. Dla każdej wylosowanej próby wyznaczano wartość estymatora w b-tej iteracji symulacji. Wartości uzyskane w symulacji były porównywane ze znanymi wartościami parametrów (mediany) w populacji

i podpopulacjach. W celu przeprowadzenia analizy dokładności estymacji wyznaczono następujące miary:

- względne obciążenie estymatora - informuje o przeciętnych systematycznych błędach popełnianych przy szacowaniu parametru i dane jest wzorem:

$$\frac{\sum_{b=1}^{B}\left(\hat{\theta}_d^b - \theta_d\right)}{B \cdot \theta_d} \cdot 100\%, \tag{7}$$

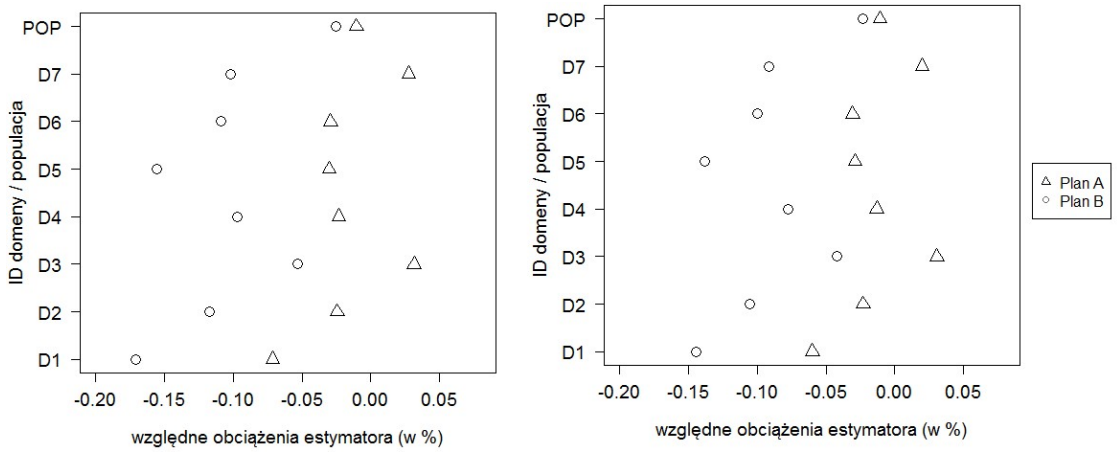
gdzie $\hat{\theta}_d^b$ jest wartością estymatora w d-tej domenie w b-tej iteracji symulacji, zaś θ_d jest rzeczywistą wartością parametru w d-tej domenie. Jeśli założymy, że domeną jest cała populacja, wówczas otrzymamy symulacyjne względne obciążenie estymatora w populacji;

- względne wartości pierwiastków z błędu średniokwadratowego (RMSE), dane wzorem:

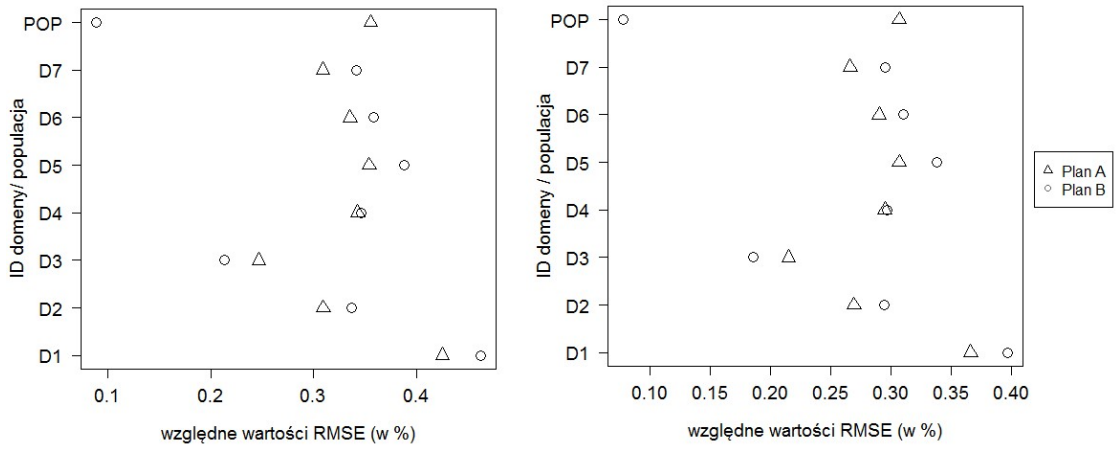
$$\frac{\sqrt{\frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B}\left(\hat{\theta}_d^b - \theta_d\right)^2}.}{\theta_d} \tag{8}$$

RMSE jest miarą dokładności estymacji i informuje o przeciętnych odchyleniach wartości estymatora od nieznanej wartości szacowanego parametru.

W pierwszym etapie przeprowadzono badanie symulacyjne dla danych wygenerowanych z wielowymiarowego rozkładu normalnego przyjmując liczebność próby $n = 28$ elementów, co odpowiada 10% rozmiaru populacji. Wyniki przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Na rys. 1 przestawiono wartości względnych obciążeń dla obu rozważanych w pracy estymatorów. Po lewej zaprezentowano wyniki dla estymatora mediany danego wzorem (2), a po prawej dla ilorazowego estymatora mediany danego formułą (3). Symulacyjnie wyznaczone obciążenia dla obu estymatorów dla rozważanych planów losowania są bliskie zero. Podobnie wartości względnych RMSE – dla każdej z rozważanych strategii estymacji nie przekraczają one 0,5%. Tym samym dla rozkładów symetrycznych te strategie estymacji charakteryzują się dobrymi własnościami.



Rys.4. Względne obciążenia estymatorów mediany danych wzorem (3) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla danychgenerowanychi $n \approx 0{,}1N$

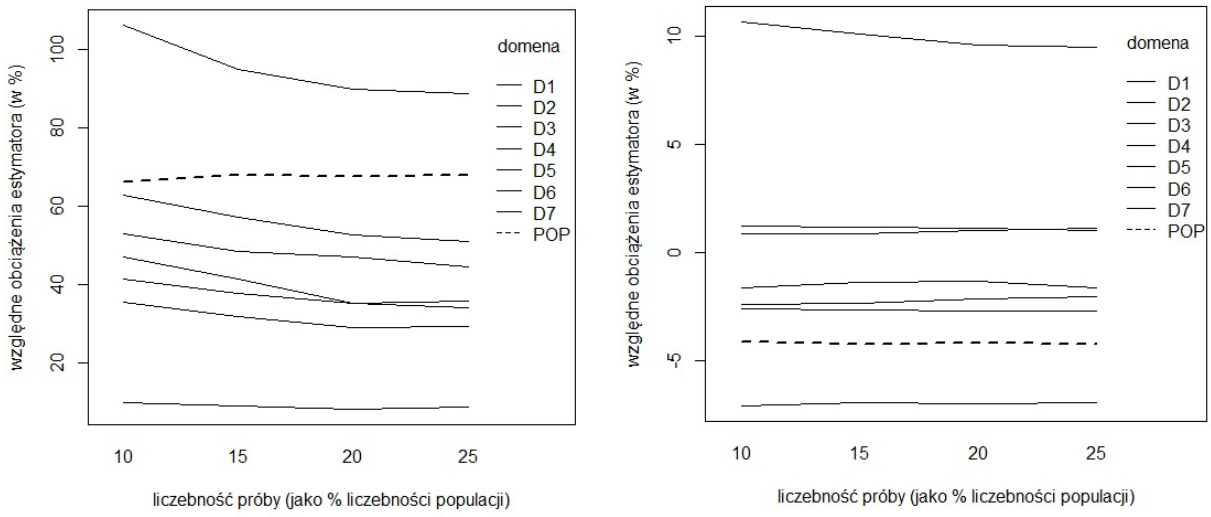


Rys.5. Względne wartości RMSE estymatorów mediany danych wzorem (2) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla danych generowanychi $\boldsymbol{n \approx 0{,}1N}$

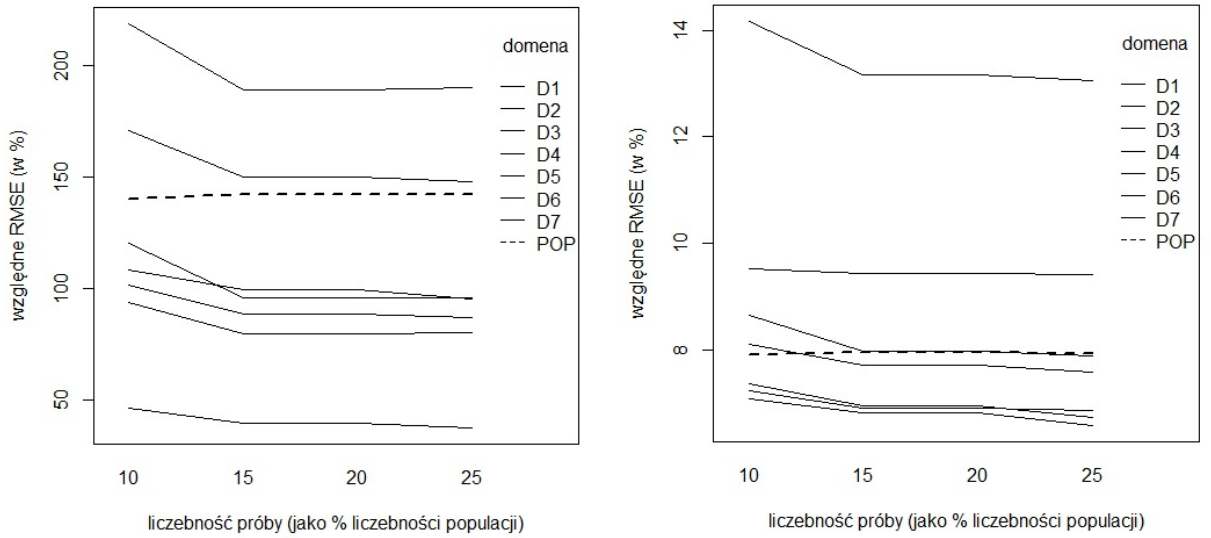
Następnie przeprowadzono badanie symulacyjne dla danych rzeczywistych dotyczących powiatów szwedzkich uwzględniając również różne rozmiary prób. Na rys. 3 przedstawiono wartości względnych obciążeń estymatorów mediany w populacji i podpopulacjach. Z lewej strony znajduje się wykres przedstawiajacy wartości symulacyjnych obciążeń dla estymatora mediany danego wzorem (2) niewykorzystującego informacji dodatkowych o elementach populacji. Zaś wykres po prawej stronie przedstawia wartości symulacyjnych obciążeń ilorazowego estymatora mediany. Symulacyjnie wyznaczone obciążenia dla estymatora (2) w populacji i podpopulacjach są rzędu nawet kilkudziesięciu procent.

Dla ilorazowego estymatora mediany uzyskano znacznie lepsze rezultaty. Względne wartości obciążeń w symulacji w większości przypadków nie przekraczają 10% (za wyjątkiem jednej z domen), a obciążenia mediany w populacji są co do modułu poniżej 5%. Widać zatem, że zastosowanie estymatora ilorazowego, który wykorzystuje informacje dodatkowe, pozwoliło na znacznie zredukowanie wartości względnych obciążeń. Ponadto

można zaobserwować niewielki spadek względnych obciążeń przy zwiększaniu liczebności próby.



Rys.6. Względne obciążenia estymatorów mediany danych wzorem (2) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla planu losowania Adla danych rzeczywistych

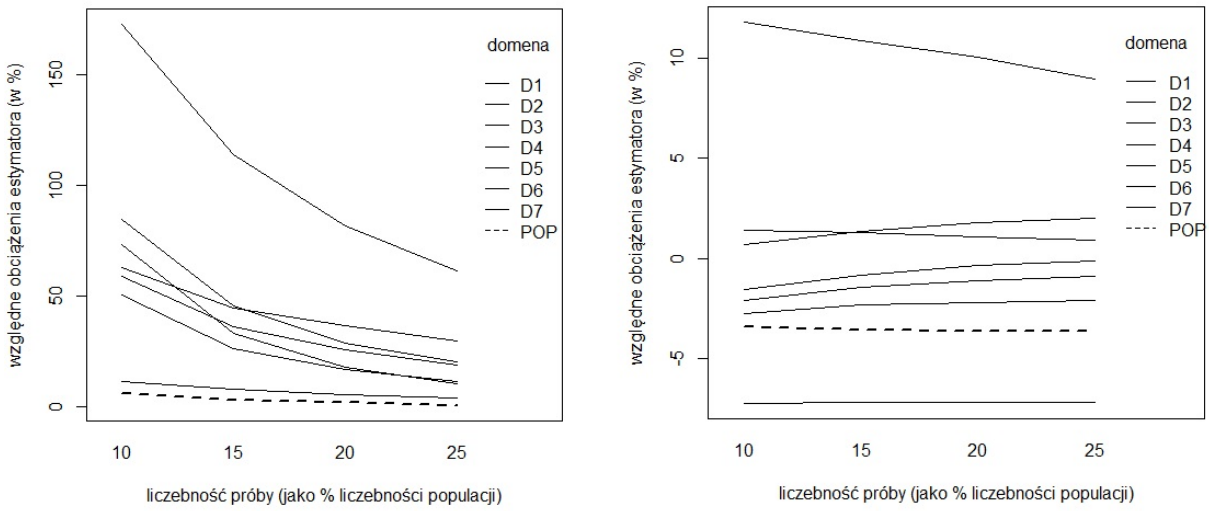


Rys.7. Względne wartości pierwiastków z błędu średniokwadratowego estymatorów mediany danych wzorem (2) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla planu losowania A dla danych rzeczywistych

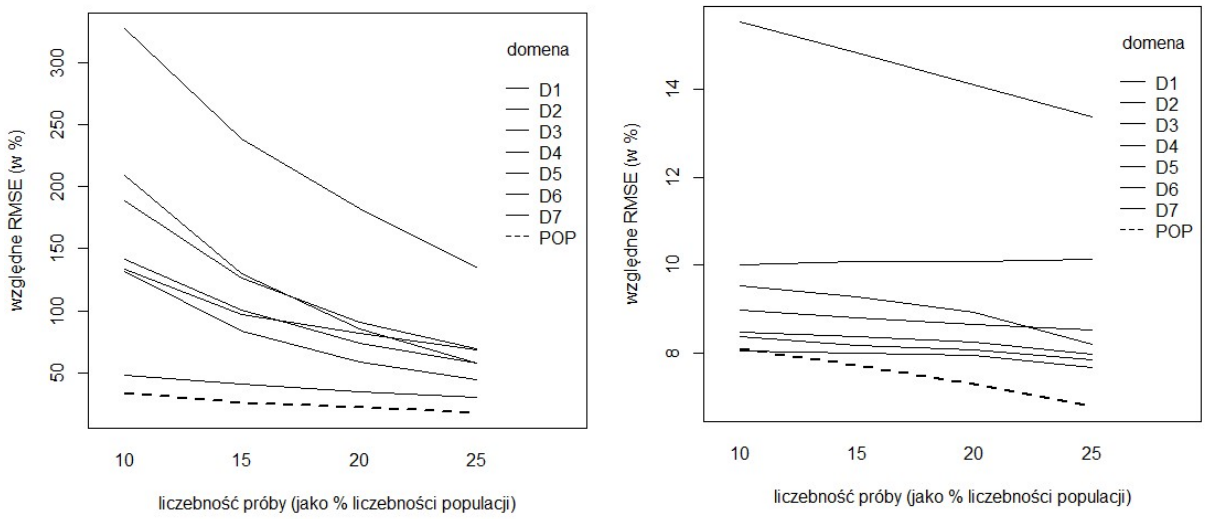
W celu zbadania dokładności estymacji wyznaczono symulacyjnie wartości względnych pierwiastków z błędu średniokwadaratowego estymatora (RMSE) – co przedstawiono na rys. 4. Dla estymatora mediany danego wzorem (2) wartości względnych RMSE wahają się od kilkudziesięciu do ponad 200%. Widoczna jest ujemna zależność między liczebnością próby, a wartościami RMSE – im mniejsza liczebność próby, tym większe wartości względnych RMSE. Ponownie dla estymatora ilorazowego mediany otrzymano znacznie lepsze wyniki. Wartości względnych RMSE tylko dla dla jednej domeny przekraczają poziom

10%. Można także zaobserwować wzrost dokładności estymacji przy wzroście liczebności próby.

Na rys.5 i 6 zilustrowano wyniki symulacji dla drugiego z rozważanych planów losowania, w którym prawdopodobieństwa inkluzji pierwszego rzędu były proporcjonalne do wartości zmiennej pomocniczej.



Rys.8. Względne obciążenia estymatorów mediany danych wzorem (2) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla planu losowania B dla danych rzeczywistych



Rys.9. Względne wartości pierwiastków z błędu średniokwadratowego estymatorów mediany danych wzorem (2) (po lewej) i wzorem (3) (po prawej) w populacji i podpopulacjach dla planu losowania B dla danych rzeczywistych

Wnioski dotyczące własności estymatorów są podobne jak w przypadku planu losowania prostego bez zwracania. Zarówno pod względem wartości względnych obciążeń jak również względnych pierwiastków z błędu średniokwadratowego estymatora, zdecydowanie lepszymi własnościami charakteryzuje się ilorazowy estymator mediany dany wzorem (3). Warto zwrócić uwagę, że w przypadku planu proporcjonalnego do wartości

cechy dodatkowej klasyczny estymator mediany w populacji charakteryzuje się bardzo małym obciążeniem – nawet niższym aniżeli estymator ilorazowy. Natomiast pod względem dokładności estymacji mierzonej względnymi wartościami RMSE estymator ilorazowy charakteryzuje się znacznie lepszą dokładnością – symulacyjnie wyznaczone wartości RMSE zazwyczaj nie przekraczają 10%.

6. Wnioski

W artykule zaprezentowano wyniki badania symulacyjnego, w którym analizowano własności różnych strategii estymacji mediany w populacji i podpopulacjach. Analizowano własności estymatora mediany dla dowolnego planu losowania niewykorzystującego informacji o zmiennej dodatkowej oraz ilorazowego estymatora mediany wykorzystującego również wartość mediany zmiennej pomocniczej. Dla danych generowanych o rozkładzie symetrycznym rozważane strategie estymacji mediany charakteryzują się dobrymi własności pod względem wielkości względnych obciążeń oraz wartości błędów średniokwadratowych. Dla danych rzeczywistych charakteryzujących się silną asymetrią własności estymatorów nie są już tak zadawalające. Niemniej jednak korzystanie z estymatorów wykorzystujących zmienne pomocnicze prowadzi do poprawienia dokładności estymacji mierzonej zarówno względnymi obciążeniami jak i wartości względnych RMSE. Wykorzystanie planu losowania proporcjonalnego do wartości cechy pomocniczej prowadzi do redukcji obciążenia estymatora mediany w populacji, natomiast nie poprawia dokładności szacowania mediany w domenach.

7. Literatura

Domański Cz., Pruska K.,2001. Metody statystyki małych obszarów. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego. Łódź.

Panek T., 2007. Statystyka społeczna. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.

R Core Team 2018. R:A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rao J.N.K., Molina I., 2015. Small Area Estimation. John Wiley & Sons. New York.

Särndal C.E, Swensson B., Wretman J.,1992. Model Assisted Survey Sampling. Springer-Verlag, New York.

Thompson M.E., I Godambe V.P, 2009. Estimating Functionsand Survey Sampling. [W]: *Handbook of Statistics. Sample Surveys: Inference and Analysis. 29B* (Pfeffermann D., and Rao C.R., red.), Elsevier Science, Oxford.

Tille Y., 1996. An Elimination Procedure for Unequal Probability Sampling without Replacement. *Biomterika.* 83 (1): 238-241.

Trzpiot G., (red.), 2013. Wybrane elementy statystyki odpornej. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice.
Wywiał J., 2010. Wprowadzenie do metody reprezentacyjnej, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach. Katowice.
Zając K., 1988. Zarys metod statystycznych. PWE. Warszawa.

Tworzenie głębi w przestrzeni audiowizualnej

Witold Szymański[(1)], Sylwia Prygoń[(2)], Maurycy Kin[(3)]

[1] Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej
[2] Dolby Poland
[3] Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
Witold Szymański: witoldszymanski@o2.pl

Streszczenie
W pracy przedstawione podstawowe metody kształtowania perspektywy wizualnej, a także audialnej, odnoszącej sie do nagrań dźwiękowych. Wskazano na podobieństwa w ocenie głębi obrazu oraz przedstawiono wskaźniki lokalizacyjne, służące do kreowania wrażenia perspektywy. Artykuł jest wprowadzeniem do dalszych rozważań w zakresie deformacji perspektywy pod wpływem zniekształcenia obrazu, a także wskutek zmniejszenia objętości informacji podczas transmisji dźwięku z wykorzystaniem kodowania.

Słowa kluczowe: perspektywa, zjawisko pogłosu, percepcja

Creation of depth in audio-visual space

Summary
In the paper the basic methods of audio-visual perspective. The similarities of both kinds of the depth impressions are pointed out, and the basic indicators used by human sensors for localization in sound- and visual domains. The paper is an introduction for discussion of perspective distortion caused by deformation of the image as well as by the perceptual coding used for transmission of the signals.

Keywords: the depth of image, reverberation, audio-visual perception

1. Wprowadzenie

Perspektywa, w jakiej człowiek widzi trójwymiarową przestrzeń to rzut środkowy punktów i obiektów przestrzeni wizualnej na dwuwymiarową siatkówkę oka.Własnością perspektywy naszego oka jest to, że niezakrzywioną przestrzeń naszego otoczenia postrzegamy, jako zdeformowaną. Nasz mózg modyfikuje ten efekt tak, abyśmy dostrzegali zgodność obiektu z jego obrazem.

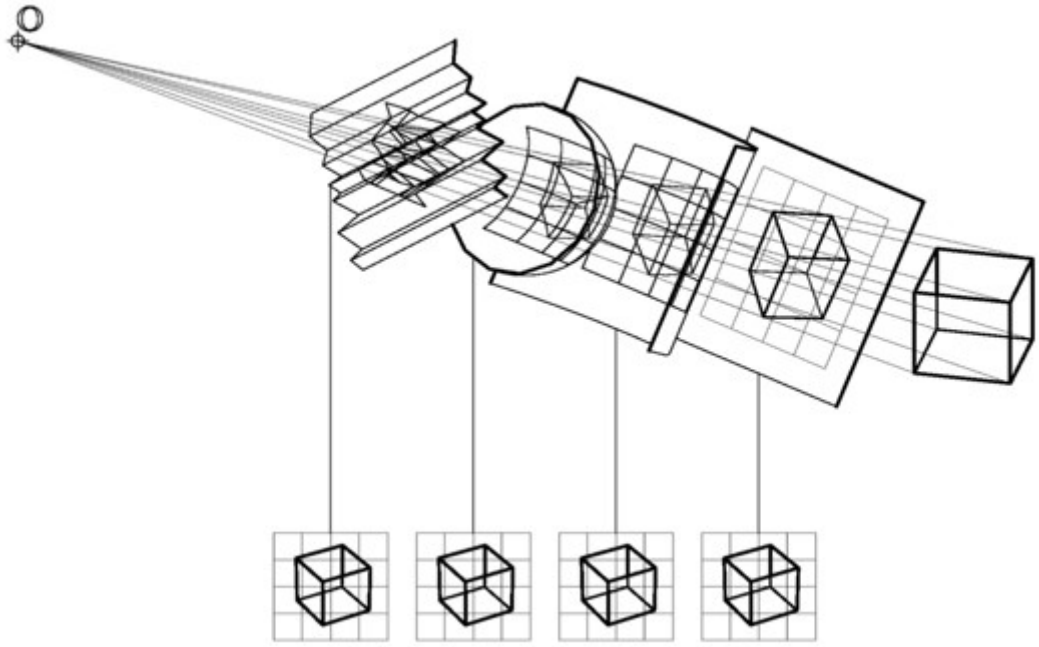
Jednym z przejawów postępu w sztuce i technice jest rozwój teorii i praktyki perspektywy. Śledząc dzieje sztuki z punktu przedstawiania rzeczywistości trójwymiarowej w dwóch wymiarach, można stanowczo stwierdzić, że rozwój wiedzy o perspektywie i sposobów jej tworzenia ma ogromne znaczenie. Perspektywa służy do tworzenia dwuwymiarowych obrazów przestrzeni fizycznej na płaszczyźnie oraz na innych powierzchniach. Wymusiło to szczególnie w okresie renesansu, później i baroku, stworzenie wielu metod obserwacji i określenie schematów do jej konstruowania. Czołowymi reprezentantami wśród badaczy i praktyków perspektywy, wykorzystujących zdobycze ówczesnej wiedzy, byli Albrecht Dürer i Leonardo da Vinci (reprezentanci nurtu konstruktywizmu ówczesnej sztuki), którzy stosowali np. ramki kadrowe (tzw. furtaDürera) z układami odniesienia w formie siatek prostokątnych, rysunek na szkle, odbicie lustrzane

(tożsame z perspektywicznym obrazem przestrzeni). Metody te znakomicie ilustrują drzeworyty Dürera oraz jego traktat z 1525 roku, *Pouczenieo użyciu cyrkla i liniału do wykonywania pomiarów* (Białostocki, 1956).

Związki pomiędzy perspektywą ludzkiego oka, a perspektywą uzyskiwaną poprzez stosowanie bezpośredniej obserwacji (oraz stosowanie schematów lub konstrukcji z użyciem elementów geometrycznych) zauważyli już starożytni Grecy. Prawdopodobnie nie wiedzieli, że perspektywa ludzkiego oka powstaje na sferycznej siatkówce, ale byli świadomi tego, iż obrazami wzrokowymi linii prostych są łuki krzywych.W literaturze przedmiotu wspomniane jest doświadczenie Euklidesa z przecięciem stożka widzenia sferą (Bartel 1958, Russo 2005). Można zauważyć, że podziały lub spory w zakresie metod i definiowania perspektywy na gruncie geometrii, optyki, psychofizjologii i teorii widzenia wynikają z różnej interpretacji i pojmowania tego samego zjawiska – rzutu środkowego, i to niezależnie od tego czy rozpatrujemy je w przestrzeni geometrycznej czy przestrzeni wizualnej człowieka. Obraz perspektywiczny obiektów przestrzeni geometrycznej (dla określonego punktu, środka rzutu) lub fizycznej (dla ich obserwatora w tym punkcie) jest zawsze taki sam i nie zależy od powierzchni (tła perspektywicznego), na którym obrazy owych obiektów powstały (w tym także na siatkówce oka ludzkiego). I aby widzieć tak samo różne obrazy tych samych obiektów realizowane na dowolnie różnych powierzchniach (np. sklepień) spełnić trzeba zaledwie jeden warunek (wiedzieli o nim, rzutując światłem, praktycy perspektywy, twórcy nasklepiennych anamorfoz, iluzyjnego malarstwa baroku), oko widza musi znajdować się w środku perspektywicznego rzutu, dla którego powstał obraz–anamorfoza układów przestrzennych. Historia perspektywy dowodzi jednak, że zależność ta nie była, i nie jest także dzisiaj, równie jasna dla wielu historyków i komentatorów perspektywy (rys. 1).

O ile w przypadku perspektywy „wizualnej" nie ma wątpliwości, na czym to zjawisko polega i jak wpływa na percepcję obrazu, to w przypadku przestrzeni audialnej należałoby mówić o pewnej adaptacji terminu dla potrzeb oceny wrażeniowej dźwięku. W dziedzinie reżyserii dźwięku funkcjonują dwa równoważne pojęcia: głębi obrazu słuchowego (czasami zwanego też dźwiękowym) oraz perspektywy słuchowej, jako analogicznego wrażenia do zjawiska perspektywy wizualnej, tylko odbieranego przez inny zmysł. Perspektywa w przestrzeni audialnej przejawia się zdolnością do różnicowania dystansu pomiędzy pozornym źródłem dźwięku, a obserwatorem, lub pomiędzy kilkoma niezależnymi źródłami pozornymi (Fastl, Zwicker 2007, Łętowski 1976). Pozwala to na ukonstytuowanie się w wyobraźni słuchacza planów dźwiękowych (plan bliski, plan daleki itp.) w sposób analogiczny do zjawisk wizualnych. W literaturze przedmiotu funkcjonuje także,

wprowadzony przez Blauszteina, termin akuzja, który można skrótowo wyjaśnić, jako „widzenie dźwięków”w sferze tak estetycznej, jak i emocjonalnej i wyobrażeniowej (Blausztein 1938). Można, zatem z dużym podobieństwem stosować analogie pomiędzy przestrzenią dźwiękową oraz wizualną, gdyż zjawiska występujące w obu dziedzinach prowadzą do podobnych doznań, chociaż dźwięku „nie można zobaczyć”, co czasem prowadzi do niejednoznacznych interpretacji bodźców dźwiękowych (Bregman 1990).



Rys. 1. Przykład rzutowania siatki prostokątnej na dowolne powierzchnie i widok tych rzutów z punktu rzutowania oraz z dowolnego punktu obserwacji. Rysunek autorski.

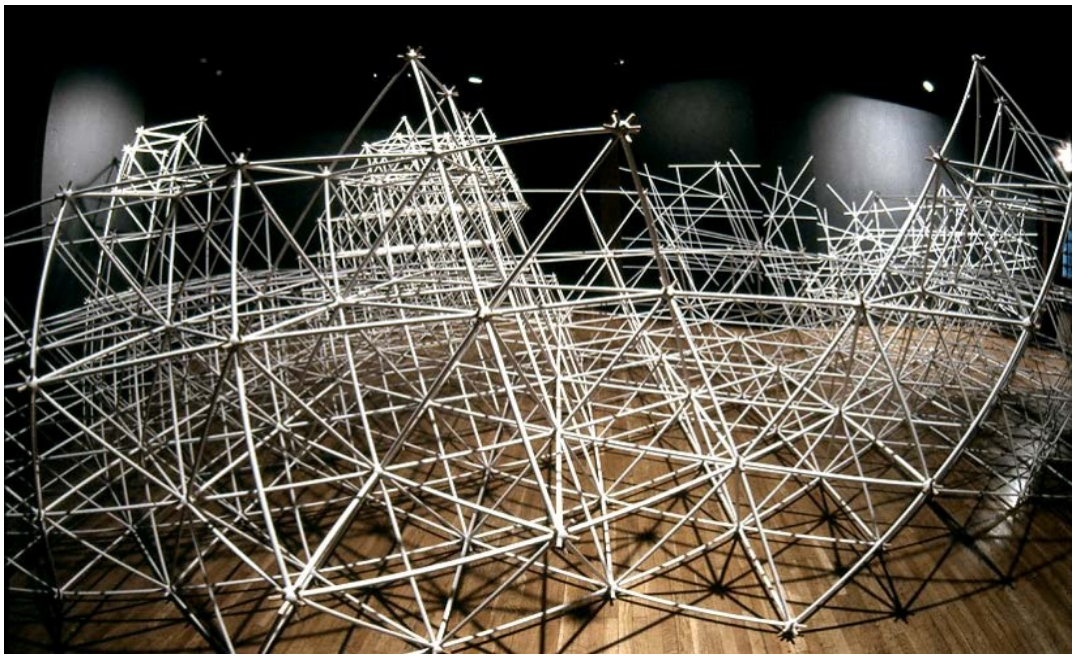
2. Przestrzeń wizualna

Przestrzeń naszego świata wypełnia światło. Widzialny dla człowieka zakres stanowi jego wizualną przestrzeń, podobnie jak zakres słyszalny dźwięków jego audiosferę. Obiekty przestrzeni świecą światłem własnym jak galaktyki, gwiazdy i odbitym jak np. planety, księżyce. Gwiazdy obserwowane z dużych odległości postrzegamy, jako punkty świecące. W najbliższym nam otoczeniu są nimi punktowe źródła światła np. żarówka, płomień świecy itp., ale też w dużym uproszczeniu – słońce. Perspektywa, w jakiej człowiek widzi trójwymiarową przestrzeń to rzut środkowy (jedno z praw przyrody) punktów i obiektów przestrzeni na dwuwymiarową, sferyczną siatkówkę oka.

Oko jest narządem wzroku, ale widzenie odbywa się w mózgu. Kamera fotograficzna rzutuje obraz posługując się przysłoną i soczewką, ale przetwarzanie zachodzi na błonie. Podobnie ma się sprawa ze źrenicą, soczewką i siatkówką. Przetwarzanie odbywa się w tej części układu nerwowego, która interpretuje informacje, docierające tam za pośrednictwem

nerwu wzrokowego. Widzenie rozpatrywane, jako działanie kamery jest nieskomplikowane. Soczewka skupia trójwymiarowy świat na dwuwymiarowej powierzchni. Obraz może być mniejszy, odwrócony lub nawet zniekształcony, ale wciąż przypomina widziany przedmiot. Widzenie człowieka nie jest jednak tak proste. Soczewka każdego oka skupia otrzymywany obraz na siatkówce, ale ta część układu widzi w nie większym stopniu niż każda kamera fotograficzna. Właściwe widzenie, czyli interpretacja impulsów elektrycznych biegnących wzdłuż nerwu wzrokowego, odbywa się w mózgu. Informacja z siatkówki, początkowo prosta, ulega niezmiernemu przemieszaniu na swej drodze ku korze mózgu. Neurony muszą ją tu rozszyfrować, nadać jej sens i odtworzyć ją dla nas w postaci trójwymiarowego wyobrażenia. Obraz musi, więc w rezultacie ulec skonstruowaniu od początku. Drugie źródło komplikacji polega na tym, że mózg jest narządem składającym się z dwóch części, otrzymuje informację z obydwu oczu, połowa pola widzenia trafia do lewego płata ciemieniowego i na odwrót (Smith,1989).

Własnością perspektywy naszego oka jest to, że linię prostą widzimy, jako krzywą (tym różni się ona od geometrycznej perspektywy malarzy, ale też perspektywy kamery fotograficznej, bowiem są one realizowane na płaskim tle, na którym obrazem prostej jest prosta). Niezakrzywioną przestrzeń naszego otoczenia postrzegamy, jako zdeformowaną. Nasz mózg modyfikuje zakrzywienia obrazów powstających na siatkówce tak, abyśmy dostrzegali zgodność obiektu z jego obrazem. Ta własność naszego mózgu, była jednym z ważnych warunków przystosowania się naszego gatunku do środowiska naturalnego. Należy wspomnieć o tym, że aparat perspektywy – rzut środkowy stanowi prawo fizyki (każdy punkt świecący emituje środkową wiązkę promieni o kształcie kuli, rozchodzących się we wszystkich kierunkach przestrzeni). Natomiast do oka dociera wiązka promieni światła tylko tych, które przecinają się w ognisku jego układu optycznego, realizując, geometrycznie rzecz ujmując, tę samą zależność. Wrażenie głębi przestrzennej uzyskujemy na poziomie odruchu dostrzegając jedną z własności perspektywy, tzw. zbieżność. Istnieją jednak (formy geometrycznego obrazowania stosowane w technice i projektowaniu przestrzennym) perspektywy pozbawione tej własności zwane równoległymi albo rzutami ukośnokątnymi. Obrazowanie przestrzeni, i jej obiektów za ich pomocą, pozbawione jest w istocie iluzji (wrażenia) głębi.



Rys. 2. Ilustracja obrazu przestrzeni powstającego na siatkówce oka.

Obraz przestrzeni powstający na siatkówce, wykazuje podobny efekt zniekształcenia jak ten przedstawiony na fotografii. Mózg modyfikuje taki obraz i w wyniku uzyskujemy wrażenie, że obrazami linii prostych są proste. Jednak, jeśli posiadamy świadomość tej modyfikacji to zaczniemy dostrzegać zakrzywienie (perspektywicznego) obrazu przestrzeni.

Ostatnio wiele prac poświęca się widzeniu dwuocznemu (stereopsji). Nazwa pochodzi z greckiego i oznacza „pełne widzenie", a odnosi się do zdolności postrzegania głębi. Potrzebne jest do tego dysponowanie dwoma punktami widzenia, jak na przykład parą oczu, które zostają zogniskowane na tym samym przedmiocie, ale od razu natrafiamy tu na paradoks. Po pierwsze, zarówno zwierzęta, jak i człowiek potrafią bardzo dobrze oceniać odległość przy pomocy jednego oka. Poza tym jedna osoba na 50 w całej populacji w zasadzie posługuje się jednym okiem; jej para oczu nie współpracuje we właściwy sposób.

W zwykłych warunkach układ wzrokowy człowieka używa różnych sposobów, by lepiej ocenić odległość, takich jak na przykład paralaksa uzyskiwana przez ruch głowy, wobec czego poruszająca się głowa widzi lepiej niż głowa nieruchoma, zwłaszcza, gdy używa się tylko jednego oka. Zdumiewającą zdolnością ludzkiego wzroku jest nie ocena odległości, lecz jej dokładne i zdecydowane określenie nawet wtedy, gdy brak jest innych wskazówek. Jeśli dywan ma pewien powtarzalny wzór i jeśli dywan ten wypełnia całe pole widzenia obserwatora, wciąż potrafi on ocenić odległość. Każdy fragment wzoru jest prawidłowo dostrzegany obydwojgiem oczu, a informacja zbierana przez każde z nich jest precyzyjnie zestawiana z informacją docierającą z oka przeciwległego. Tak samo ma się sprawa z przypadkowymi punktami. Mózg nie znajduje niczego sensownego, na czym mógłby skupić

zainteresowanie, lecz działa nadal równie efektywnie, jak mając do czynienia z normalnym otoczeniem. Stereopsji poświęcono w ostatnich latach większość badań mających na celu rozwiązanie problemu numer jeden w dziedzinie ludzkiego układu zmysłów, a mianowicie wzroku (Smith, 1989). Nic, zatem dziwnego, że wszelkie próby oszukiwania oka poprzez stosowanie wynalezionej przez Greków perspektywy, dla potrzeb tworzenia iluzji głębi, i mimo artystycznego kunsztu takich gigantów Renesansu jak A. Dürer, Leonardo da Vinci, F. Brunelleschi, nie dało nigdy pełnego wrażenia przestrzeni. Łatwo wyjaśnić ten efekt przez porównanie perspektywy ludzkiego oka (dwuwymiarowego obrazu przestrzeni powstającego na sferycznej siatkówce) z tożsamą geometrycznie fotografią, (jeśli wykonana byłaby na identycznej powierzchni). Owe dwie identyczne perspektywy nasz mózg rozróżni; jedną, jako obraz punktów przestrzeni, drugą, jako obraz punktów dwuwymiarowej fotografii. Zapewne, dlatego, że nie ma on problemu, właśnie, z określeniem odległości. Stereopsja człowieka jest tak sprawna, że wysunięto nawet przypuszczenie, iż pierwotnie rozwinęła się ona nie po to, by wspomagać ocenę odległości.

3. Przestrzeń audialna

Sygnały dźwiękowe, zarówno muzyczne jak i mowy, charakteryzują się widmem, którego obwiednia opada wraz ze wzrostem częstotliwości, dodatkowo są to sygnały niestacjonarne, a co za tym idzie: ich widmo zmienia się także w czasie. Percepcja takich sygnałów jest więc złożona i o ile w przypadku dźwięków mowy wystarczy posługiwać się terminem „percepcja wzorców (zdaniowych czy wyrazowych)" (Levinson 2005), o tyle w muzyce mamy dodatkowo do czynienia z powstawaniem skojarzeń rozumianych pod postacią znaków i symboli (Wallis 1963).

Iluzja perspektywy w nagraniu dźwiękowym (lub inaczej głębi obrazu słuchowego) jest związana zpogłosem. Pogłos jest zjawiskiem występującym w prawie każdym zamkniętym środowisku akustycznym. Jest on reakcją pomieszczenia na pobudzenie dźwiękowe i składa sie z trzech faz: czasu krótkiego opóźnienia (koniecznego na powstanie reakcji), wczesnych odbić na ogół od ścian bocznych pomieszczenia, występujących po tym czasie oraz serii powtórzeń sygnałów odbitych od wszystkich powierzchni, nierozróżnialnych przez aparat słuchowy. W tej ostatniej fazie amplitudy kolejnych odbić maleją wraz z upływem czasu, a szybkość zaniku jest związana ze strukturą fizyczną powierzchni odbijających. Spowodowana odbiciem duża liczba źródeł dźwięku pozornych powoduje, że różnice pomiędzy nimi stają się niesłyszalne, w miarę oddalania się od obserwatora, podobnie jak zacieranie się różnic między źródłami przy rozwiązywaniu równania falowego przy użyciu źródeł dyskretnych (Doieu i in. 2000). Związana z tym faktem barwa dźwięku pogłosowego

zależy od stopnia odbicia fali dźwiękowej dla różnych częstotliwości – kształtuje ona specyficzne brzmienie, bez którego źródło brzmi nienaturalnie. Istotny jest także punkt obserwacji sygnału odbitego: inny charakter brzmienia dźwięku zaobserwuje sie w polu równomiernie rozproszonym, a odmienne brzmienie uzyska się w miejscu skupienia fal odbitych, np. przez strukturę zakrzywioną, nawet, jeśli obydwa przypadki będą występować w tym samym pomieszczeniu (Kim, Choi 2013).

Właściwe użycie pogłosu zapewnia odczucie przestrzenności oraz wywołuje iluzję percepcji rozmiaru pomieszczenia, w którym rozgrywa się akcja dźwiękowa. Pogłos pozwala też na efektywne ustalenie dystansu tak pomiędzy źródłami, jak i między źródłem i obserwatorem (słuchaczem): mniejszy pogłos – źródło jest percypowane bliżej odbiorcy, podczas gdy większy pogłos (dłuższy czas pogłosu i jego większa amplituda w stosunku do sygnału bezpośredniego) powoduje wrażenie oddalenia źródła od słuchacza (Bregman 1990, Russ 2009). Dodatkowym czynnikiem, który efektywnie wspomaga kreowanie perspektywy w nagraniu jest zależność subiektywnego położenia źródła od jego wyrazistości. Ze względu na fakt, iż większy pogłos powoduje mniejszą wyrazistość źródła dźwięku, można zastosować celowe pogorszenie wyrazistości celem odsunięcia danego źródła dźwięku na dalszy plan. Odpowiednio, więc wykreowana warstwa pogłosowa nagrania stwarza wyobrażenie o pomieszczeniu, w którym nagranie zostało dokonane, ponieważ zmiana poszczególnych składników warstwy pogłosowej nagrania (wczesne odbicia, charakter zaniku czy przejrzystość zdarzeń dźwiękowych) wpływa na wrażenia estetyczne (Vorländer, 2008). Wraz z ciągłością przestrzenną tworzy się kontinuum w przestrzeni dźwiękowej, w którym różnice między poszczególnymi źródłami zacierają się. Można ten fakt uogólnić na całość konstrukcji dźwiękowej: jeżeli z pojedynczych form (części) utworzona jest spójna całość, to dodanie lub usunięcie elementów tworzących tę spójna całość jest zawsze spostrzegane, podobnie jak to ma miejsce w przypadku przestrzeni wizualnej (Żórawski 1962).

Tworzenie warstwy pogłosowej można realizować metodami odpowiednich ujęć mikrofonowych (Streicher, Dooley 1985, Huber, Runstein 2014), czy zabiegów realizacyjnych (Rumsey 2017) lub specjalnych tricków, jak choćby bramkowanie sygnału pogłosowego (Kin, Prygoń 2018). Warstwę pogłosową można też tworzyć syntetycznie, poprzez wygenerowanie ważonej sumy szeregu składowych harmonicznych występujących w danej chwili i dodanych do sygnału oryginalnego. Idea ta ma źródło w metodzie sterowania adaptacyjnego, przydatnego choćby do aktywnego tłumienia drgań w układach; eliminuje się za jej pomocą te składowe, które najbardziej wzbudzają dana strukturę do drgań, a rozróżnienie tych składowych występuje na drodze sprzężenia zwrotnego (Elliot, 2001).

Oprócz tego, stosowanie pogłosu pozwala także na rozszerzenie rozmiaru pozornych źródeł dźwięku, poprzez dodanie takiego samego sygnału pogłosowego z lewej i prawej strony źródła. Ma to na celu wywołanie efektu „zanurzenia" słuchacza w głąb sceny dźwiękowej, poprzez wywołanie wrażenia otaczania dźwiękiem obserwatora z obu stron. Ze względu na warstwę pogłosową, gdzie wyższe składowe są na ogół stłumione, występuje efekt „wciągania" słuchacza w środek sceny dźwiękowej (Kin 2013). Należy wszakże odnotować fakt, iż samo rozbicie sygnału w panoramie, bez warstwy pogłosowej, powoduje wrażenie zwiększenia szerokości pozornego źródła dźwięku; dopiero sygnał pogłosowypowoduje wrażenie „wciągania" w głąb obrazu (Bazil 2008).

Tworzenie perspektywy w nagraniu powinno mieć charakter hierarchiczny – podobnie jak w przypadku kodowania i dekodowania obrazów: najpierw bierze sie pod uwagę ogólny zarys tekstury dźwiękowej, potem operuje się źródłami istotnymi semantycznie, a na końcu, względem tych wiodących źródeł, ustala się drobne szczegóły, najbardziej odpowiedzialne za kształt estetyczny (Nikiel 2007). Tym sposobem zapewnia się właściwy stosunek wartości estetycznych i semantycznych danego dzieła sztuki, którym jest nagranie dźwiękowe.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe metody kształtowania perspektywy wizualnejoraz audialnej, odnoszącej sie do nagrań dźwiękowych. Omówiono podobieństwa w ocenie głębi obrazu oraz przedstawiono podstawowe wskaźniki lokalizacyjne używane przez zmysły postrzegania człowieka, służące do kreowania wrażenia perspektywy i głębi obrazu. Artykuł jest punktem wyjściowym do rozważań w zakresie deformacji postrzegania perspektywy w przestrzeni audio-wizualnej człowieka pod wpływem zniekształcenia obrazu, spowodowanego różnymi procesami, m.in. kodowaniem percepcyjnym, służącym do ograniczenia objętości rozmiaru sygnałów, tak wizualnych, jak i dźwiękowych, a wykorzystywanym powszechnie w telekomunikacji.

Podziękowania

Niniejsza praca została wykonana w ramach działalności statutowej Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej - zlecenie nr 0401/0139/17.

6. Literatura

Bartel K., 1958. Perspektywa malarska, tom II, Warszawa. 153-158.

Bazil E., 2008. Sound Mixing: Tips and Tricks, PC Publishing, 79-83.

Białostocki J., 1956. Symbole i obrazy w świecie sztuki, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2008. 136-156.

Blausztein L., 1938. O percepcji słuchowiska radiowego, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas, 2005. 145-196.

Bregman A. S., 1990. Auditory scene analysis, MIT Press, Cambridge, MA. 595-607.

Doieu A., Eremin Y., Wriedt T., 2000. Acoustic and Electromagnetic Scattering Analysis. Academic Press. San Diego. 65-66.

Elliot S., 2001. Signal Processing for Active Control, Academic Press, London. 392-397.

Fastl H., Zwicker E., 2007. Psychoacoustics – Facts and Models, 3rd Edition, Springer, Berli., 359-368.

Huber D. M., Runstein R. E., 2014. Modern Recording Techniques, 8th Edition, *Focal Press.* 506-512.

Kim Y-H., Choi J-W., 2013. Sound Visualization and Manipulation, Wiley. 219-220.

Kin M. J., 2013. Controlling a size of virtual sources in musical recordings, w: Signal processingin sound engineering /Jan A. Adamczyk (ed.), Warszawa, IPPT PAN. 19-34.

Kin M., Prygoń S., 2018. Wykorzystanie pogłosu bramkowanego w realizacji nagrań muzycznych, w: Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018, Nauki techniczne i ścisłe, Idea Knowledge Future. 151-159.

Levinson S. E., 2005. Mathematical Models for Speech Technology, Wiley. 14-28.

Łętowski T., 1976. Słuchowa ocena urządzeń elektroakustycznych, Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Radia i Telewizji. 56-57.

Nikiel S., 2007. Iterated Function Systems for Real-Time Image Synthesis, Springer. 41-45.

Rumsey F., 2017. Recording and reproduction. Studio myths and new technology. *Journal of Audio Engineering Society*. 65(9): 776-780.

Russ M., 2009. Sound Synthesis and Sampling. *Focal Press*. 440-450.

Russo L., 2005. Zapomniana rewolucja – grecka myśl naukowa a nauka nowoczesna, Kraków. Universitas. 149-153.

Smith A., 1989. Umysł, Państwowy Zakład Wyd. Lekarskich, Warszawa. 251-265.

Streicher R., Dooley W., 1985. Basic stereo microphone perspective – a review. *Journal of Audio Engineering Society*. 33 (7-8): 548-556.

Vorländer M., 2008. Auralization, Springer, RWTH edition, Berlin. 92-99.

Wallis M., 1963. Świat sztuk i świat znaków, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków, Universitas. 247-248.

Żórawski J., 1962. O budowie formy architektonicznej, [w]: Wybór pism estetycznych, Kraków Universitas. 146-147.

Grafen jako napełniacz kompozytów na osnowie poli(chlorku winylu) – przegląd literatury

Sławomir Wilczewski[(1)]

[1]Zakład Technologii Tworzyw Polimerowych i Powłok Ochronnych, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy.
Sławomir Wilczewski: slawil3444@gmail.com

Streszczenie
Niniejsza praca przedstawia przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie metod wytwarzania, właściwości oraz potencjalnego wykorzystania grafenu (GN). Badania nad wykorzystaniem tego materiału o unikatowych właściwościach do modyfikacji tworzyw polimerowych są szeroko prezentowane w literaturze, jednak niewielka ilość publikacji dotyczy stosowania grafenu do modyfikacji poli(chlorku winylu) (PVC).
Przegląd obejmuje głównie tematykę związaną z wykorzystaniem grafenu, jako nanonapełniaczakompozytów polimerowych na osnowie PVC. W publikacji uwzględniono metody wytwarzania oraz właściwości termiczne, mechaniczne i elektryczne nanokompozytów PVC/GN.

Słowa kluczowe: grafen, poli(chlorek winylu), nanokompozyty polimerowe

Graphene as a filler of composites based on poly (vinyl chloride) - literature review

Summary
This work presents an overview of the current state of knowledge in the field of production methods, properties and potential use of graphene (GN). Research on the use of this material with unique properties for modification of polymer materials is widely presented in the literature, however a small number of publications concern the use of graphene for modification of poly (vinyl chloride) (PVC).
The review mainly covers topics related to the use of graphene as a nanofiller polymer composites based on PVC. The publication includes production methods as well as thermal, mechanical and electrical properties of PVC/GN nanocomposites.

Keywords: graphene, poly (vinyl chloride), polymer nanocomposites

1. Wstęp

Grafen jako samodzielny materiał został wyizolowany z grafitu w 2004 roku, przez AndreGeima i KonstantinaNovoseleva, którzy otrzymali za to osiągnięcie nagrodę Nobla w 2010 w dziedzinie fizyki (Janik i in. 2016). Od tego czasu nastąpił ogromny wzrost zainteresowania grafenem, nie tylko środowiska akademickiego ale również przemysłu. Celem prowadzonych badań jest nie tylko poznanie właściwości tego materiału, ale również opracowanie skutecznej metody jego produkcji na skalę przemysłową ze wskazaniem potencjalnych zastosowań (Phiri i in. 2017).

Grafen jest alotropową odmianą węgla, zbudowaną z pojedynczej warstwy atomów węgla ułożonych w heksagonalną sieć przypominającą plaster miodu o grubości jednego atomu. Ta dwuwymiarowa struktura posiada wiele unikalnych właściwości, do których można zaliczyć moduł Younga około 1 TPa, wytrzymałość na rozciąganie 130 GPa, wyjątkowe właściwości optyczne (grafen jest w stanie zaabsorbować 2,3% światła białego), znakomite przewodnictwo cieplne od 4840 do 5300 W/m*K oraz oporność elektryczną rzędu

$10^{-3}\Omega$*cm.Niezwykłe właściwości grafenu sprawiają, że stanowi on ciekawy materiał do zastosowania w modyfikacji tworzyw polimerowych.

Poli(chlorek winylu) (PVC) jest tworzywem termoplastycznym, który znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Stosowny jest do produkcji m.in. profili okiennych, rur, folii izolacyjnych, technicznych, spożywczych i biurowych, izolacji kabli, oraz wielu innych produktów użytkowych (Piszczek i in. 2015). Korzystne właściwości PVC, a zwłaszcza łatwość modyfikacji i niski koszt sprawiają, że jest on atrakcyjnym materiałem do wytwarzania kompozytów, w tym z nanonapełniaczami węglowymi.

W literaturze opisano wiele przykładów zastosowań grafenu do modyfikacji polimerów, jednak stosunkowo niewiele jest doniesień na temat badań wpływu tego napełniacza na właściwości poli(chlorku winylu). W niniejszej publikacji przedstawiono podstawowe informacje dotyczące otrzymywania, struktury i właściwości grafenu. Zasadniczą jej część stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie zastosowania grafenu do wytwarzania kompozytów na osnowie poli(chlorku winylu Większość prac na ten temat zostało opublikowanych w ciągu ostatnich pięciu lat.

2. Grafen

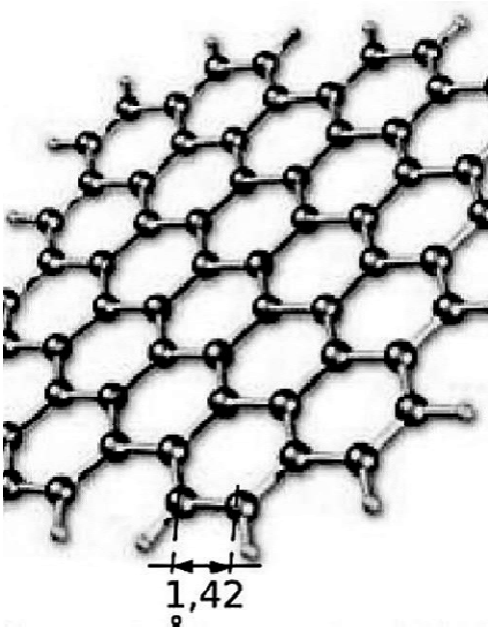
W literaturze opisano wielemetod otrzymywania grafenu o różnej geometrii i wymiarach (AbdelGhanyi in. 2017, Sreenivasulu i in. 2018). Jedną z metod o dużym potencjale aplikacyjnym jest Chemical Vapor Deposition (CVD).W metodzie tej do komory reakcyjnej wprowadza się metan wraz z podłożem (metalem przejściowym np. Ni, Cu). W wyniku działania ciepła (temperatura ok. 1000^{o}C) dochodzi do rozkładu metanu i dyfuzji węgla do wnętrza podłoża. Po jego nasyceniu atomami węgla następuje chłodzenie, w wyniku, którego węgiel z metalu osadza się na powierzchni tworząc warstwy grafenowe (Garg 2014, Świercz 2015). Kolejną powszechną metodą pozyskiwania warstw grafenowych jest sublimacja krzemu z płytek krzemowych SiC, która następuje po ich podgrzaniu do temperatury powyżej 1600^{o}C (Stańczyk i in. 2014).

Również polskie ośrodki naukowe mają znaczące osiągnięcia w opracowywaniu metod syntezy grafenu. Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych opracował metodę osadzania grafenu, na płytkach SiC z fazy gazowej. Na Politechnice Łódzkiej otrzymano grafen na podłożu z ciekłego metalu (Świercz 2015, Kula 2016 Patent PL 224409 B1).

- Struktura grafenu

Grafen jest materiałem zbudowanym z atomów węgla, którego orbitale występują w hybrydyzacji sp2i tworzą sześcioatomowe pierścienie ułożone w siatkę plastra miodu. Ze względu na jednoatomową jego grubość przyjmuje się, że grafen jest materiałem

dwuwymiarowym, o największym poznanym dotąd stosunku objętości do powierzchni. Powierzchnia właściwa grafenu wynosi 2360 m^2/g, a długość wiązań C-C 1,42 Å (rys. 1) (Janik i in. 2016, Geim i in. 2007, Kugler i in 2013, Szczęśniak i in. 2016).



Rys.1. Struktura grafenu (Trzaska 2016)

- Właściwości grafenu

Do najważniejszych zalet grafenu należą wysokie przewodnictwo cieplne i elektryczne. Jego przewodnictwo cieplne, w temperaturze pokojowej waha się w przedziale od 4840 do 5300 W/m*K i jest dwukrotnie większe od przewodnictwa diamentu (Balandin i in. 2008). Znakomite przewodnictwo elektryczne tego materiału związane jest z ruchliwością elektronów w temperaturze pokojowej wynoszącą 200000 cm^2/Vs. Charakteryzuje go niewielka oporność, rzędu 10^{-8} Ω*m, prędkość elektronów w grafenie wynosi 10^{-6} m/s (Hebda i in. 2012). Ponadto, grafen jest materiałem prawie idealnie przezroczystym, pochłania bowiem jedynie 2,3% światła białego. Wyróżniają go doskonałe właściwości barierowe dla gazów, nie przepuszcza nawet atomów helu (Janik i in. 2016).

Pomimo tego, że grafen zbudowany jest z pojedynczej warstwy atomów węgla, jest niezwykle twardy i wytrzymały, dodatkowo jest materiałem elastycznym. Badania właściwości mechanicznych grafenu pozwoliły na określenie wartości modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie wynoszących odpowiednio 1TP oraz 130 GPa. Udowodniono również, że pochodne grafenu poprawiają właściwości mechaniczne innych materiałów (Hebda i in. 2012, Lee i in. 2008).

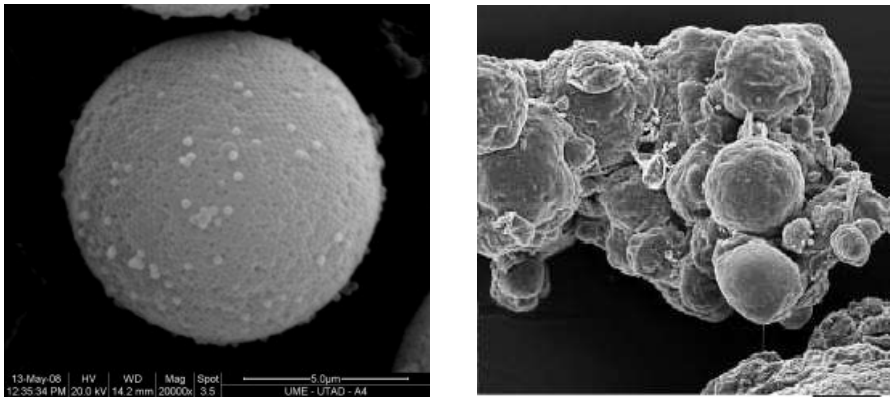
- Możliwości zastosowania grafenu

Niezwykłe właściwości grafenu sprawiają, że może mieć wiele potencjalnych zastosowań, szczególnie w elektronice, gdzie upatruje się w nim następcę krzemu. Elektronicy wskazują na możliwość zastosowania grafenu do produkcji m.in. wyświetlaczy LED i OLED, elektronicznego papieru, elastycznych telefonów, superszybkiego komputera, elementów tranzystorów i super kondensatorów (Hebda i in. 2012).

Unikalne właściwości grafenu mogą być wykorzystane nie tylko w przemyśle elektronicznym, ale również w wielu innych dziedzinach, m.in. w medycynie (opatrunki i aktywne biologicznie hydrożele, rekonstrukcja tkanek, transportery leku, obrazowanie molekularne) i przemyśle motoryzacyjnym (elastyczne karoserie do samolotów i samochodów, inhibitory starzenia uszczelek i opon) (Kruk 2012). Możliwe jest również zastosowanie grafenu w przemyśle zbrojeniowym m.in. do produkcji materiałów balistycznych, przezroczystych warstw grzewczych oraz jako pokrycia mundurów (Szczęśniak i in. 2016). Inne ciekawe zastosowanie grafenu to elementy filtrów do wody oraz jako wzmocnienie cementowych materiałów budowlanych (Kruk 2012). Opisywany materiał doskonale sprawdza się również, jako modyfikator właściwości tworzyw polimerowych (Sreenivasului in. 2018).

3. Poli(chlorek winylu)

PVC $[\text{-}CH_2\text{-}CHCl\text{-}]_n$ jest termoplastycznym polimerem otrzymywanym w wyniku polimeryzacji chlorku winylu wg mechanizmu rodnikowego. W warunkach przemysłowych polimeryzację PVC można prowadzić metodą emulsyjną, suspensyjną oraz blokową. W zależności od wybranej metody polimer różni się rozmiarem i strukturą ziaren(rys. 2) (Rasteiro i in. 2009, Obłój-Muzaj i in 2006).



A B

Rys. 2. Obraz SEM poli(chlorku winylu) A emulsyjny, B suspensyjny (Rasteiro i in. 2009, Obłój-Muzaj i in 2006).

Poli(chlorek winylu) jest odporny na działanie czynników atmosferycznych oraz chemicznych. Jest tworzywem trudnopalnym i samogasnącym o korzystnych właściwościach mechanicznych. Ponadto stosunkowo łatwo ulega modyfikacji zarówno właściwości przetwórczych, jak i użytkowych (Skórczewska i in. 2014). Do niekorzystnych właściwości PVC należy jego stosunkowo wysoka temperatura zeszklenia (80^{o}C) oraz niska temperatura degradacji, która powoduje, że w warunkach przetwórstwa jest niestabilny termicznie. Z tego powodu popolimeryzacyjny proszek PVC nie nadaje się bezpośrednio do, przetwórstwa. Przetwarza się go w postaci mieszanek zawierających oprócz stabilizatorów termicznych wiele innych środków pomocniczych m.in. plastyfikatory, środki smarujące, pigmenty itd. Mieszanki poli(chlorku winylu) zawierające do 5% plastyfikatora (PVC-U) noszą nazwę twardych, w odróżnieniu od plasyfikowanych mieszanek PVC (PVC-P). Właściwości gotowych produktów zależą istotnie od rodzaju użytych dodatków (Piszczek i in. 2015). Charakterystyczne właściwości PVC-U przedstawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Właściwości PVC-U (opracowanie własne)

Parametr	**Jednostka**	**Wartość**
Gęstość	g/cm^3	1,38
Absorpcja wody	%	≤ 0,1
Przewodnictwo cieplne (temp. 23^{o}C)	W/m*K	0,15
Temperatura mięknienia wg. Vicata	^{o}C	≥ 76
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	mm/m*K	0,07-0,08
Cieplna trwałość kształtu HDT A	^{o}C	66
Udarność z karben wg. Charpy'ego (Temp 23^{o}C)	kJ/m^2	≥ 6
Udarność z karben wg. Charpy'ego (Temp 0^{o}C)	kJ/m^2	≥ 3
Twardość kulkowa (358N/30s)	MPa	≥ 105
Naprężenie przy granicy plastyczności	N/mm^2	≥ 52
Moduł Younga (Temp. 23^{o}C)	N/mm^2	≥ 2500
Wytrzymałość dielektryczna	kv/mm	35
Oporność powierzchniowa	Ω	1013
Indeks tlenowy (LOI)	%	21

4. Nanokompozyty PVC z grafenem

Nanokompozyty, podobnie jak kompozyty konwencjonalne, składają się, z co najmniej dwóch składników, z których przynajmniej jeden ma wymiary nanometryczne. Powoduje to, że materiały takie mają lepsze właściwości w stosunku do kompozytów standardowych. (Kurzydłowski, Lewandowska 2010). Znane są trzy metody syntezy nanokompozytów polimerowych, do których zalicza się mieszanie bezpośrednie w stanie stopionym, metodę rozpuszczalnikową oraz polimeryzację *in situ*. Opisane w literaturze wyniki badań nanokompozytów poli(chlorku winylu) z grafenem dotyczą głównie materiałów

wytworzonych metodą rozpuszczalnikową, która przebiega w dwóch etapach.Pierwszy polega na wprowadzeniu nanonapełniacza metodą sonikacji do roztworu polimeru w odpowiednim rozpuszczalniku. W drugim etapie następuje odparowanie rozpuszczalnika, wskutek czego powstaje folia kompozytu (Sreenivasulu i in. 2018).

- Metody wytwarzania nanokompozytów PVC/GN

Kompozyt PVC/GN otrzymany w postaci włókien syntezuje się w dwóch etapach. Pierwszy etap polega na przygotowaniu dyspersji grafenu w roztworzePVC metodą mieszania z wykorzystaniem ultradźwięków. W drugim etapie mieszaninę wylewa się do wody destylowanej energicznie mieszając w celu pozyskania włókien (Mudassir i in. 2015).

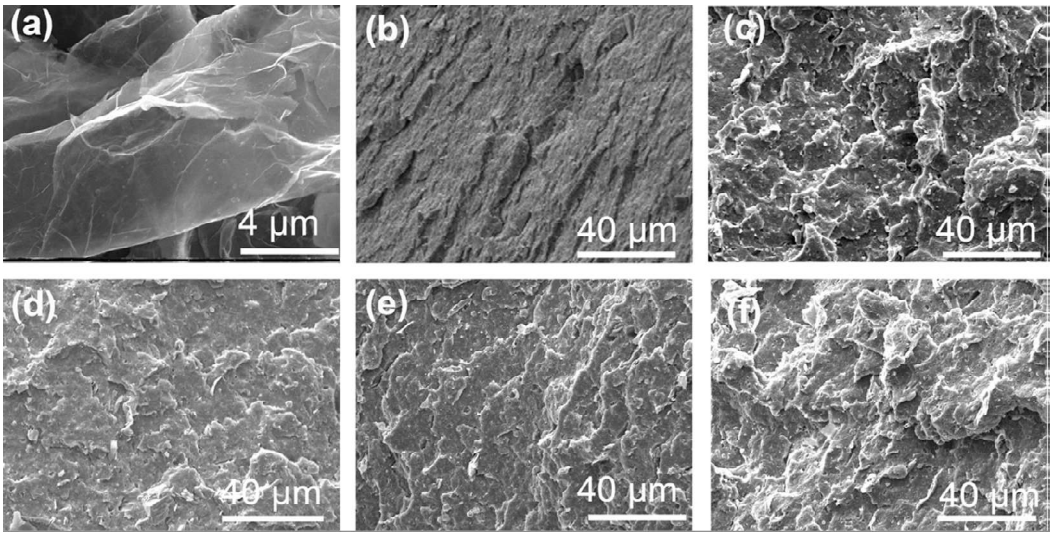
Kompozyty w postaci cienkich arkuszy uzyskuje się w procesie walcowania z zastosowaniem walcarki dwuwalcowej. W pierwszym etapie przygotowuje się proszkową mieszaninę PVC, grafenu i stabilizatorów przy użyciu miksera wysoko obrotowego. Następnie uplastycznia się ją i homogenizuje w reometrze obrotowym (60 obrotów/min,temp. 165^{o}C, czas 5 min). W kolejnym etapie przetworzone wstępnie tworzywo poddaje się walcowaniu (Wang i in. 2014).

Otrzymywanie nanokompozytów metodą rozpuszczalnikową w postaci cienkich folii opisano w (Vadukumpully i in. 2011, Deshmukh i in. 2014). Roztwór PVC w THF i DMF zmieszano z grafenem przy pomocy ultradźwięków w czasie 2 lub 1,5 godziny. W celu otrzymania folii stosowano różny czas oraz temperaturę odparowania rozpuszczalnika.

Na podstawie obserwacji mikroskopowych metodą SEM stwierdzono, że grafen i poli(chlorek winylu) tworzą jednorodny kompozyt bez wtrąceń i defektów struktury (rys. 3) (Wang i in. 2014,Wang i in. 2015 Wang i in. 2017).

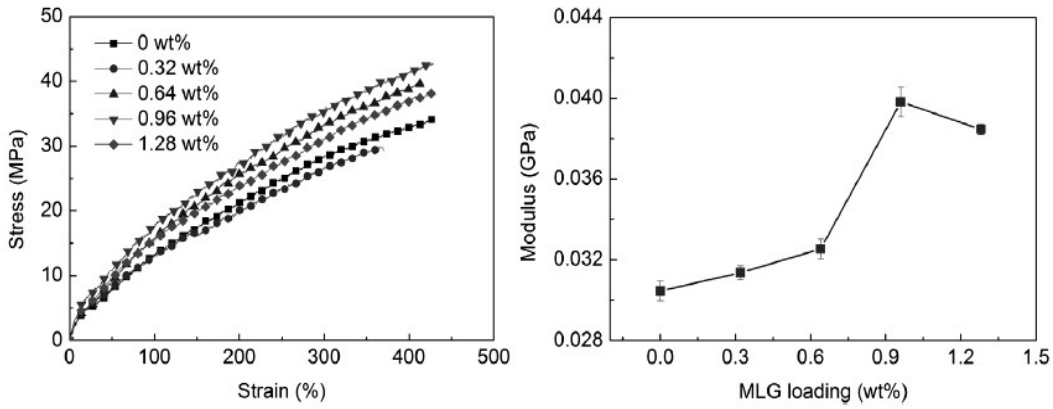
- Właściwości mechaniczne nanokompozytów PVC/GN

Autorzy (Mudassir i in. 2015, Deshmukh i in. 2014) zbadali właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu kompozytów PVC/GN. Stwierdzili, że mają one wyższy o około 60% moduł Younga w stosunku do czystego PVC. Dodatek grafenu powoduje również gwałtowny wzrost wytrzymałości na rozciąganie od 24 MPa (niemodyfikowany PVC) do 55 MPadla kompozytów z 2% zawartością grafenu. Istotny wzrost wytrzymałości na rozciąganie ma jednak miejsce przy niskich zawartościach grafenu tj. do około 2-3%. Dalszy wzrost jego zawartości nie powoduje znaczących zmian wytrzymałości (56 MPa w przypadku kompozytu PVC/5% GN). Nanokompozyty PVC/GN mają również niższe wydłużenie przy zerwaniu w stosunku do niemodyfikowanego PVC.



Rys 3. Obrazy SEM (a) grafen wielowarstwowy, (b) PVC, (c) PVC/GN 0,54%, (d) PVC/GN 0,9%, (e) PVC/GN 1,08%, (d) PVC/GN 1,8% (Wang i in. 2014).

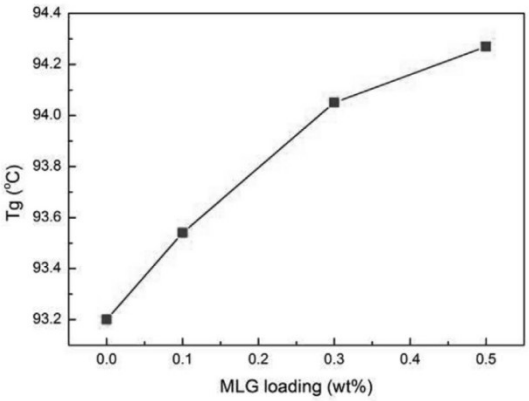
Dodatek grafenu do PVC powoduje zazwyczaj poprawę właściwości mechanicznych(rys.4.) Jednak cecha ta istotnie zależy od struktury napełniacza oraz składu mieszanki PVC stosowanej, jako osnowa kompozytu (Wang i in. 2015).



Rys 4. Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu kompozytów PVC/ grafen wielowarstwowy (Wang, Xie i in. 2015).

- Właściwości termiczne nanokompozytów PVC/GN

Wyniki analizy TGA opisane w literaturze wskazują na większą stabilność termiczną nanokompozytu PVC/GN w stosunku do czystego PVC. Rozkład termiczny kompozytu, następuje w dwóch etapach. Pierwszy z nich związany jest z odszczepieniem HCl, (reakcja dehydrochlorowania) drugi natomiast z dalszym rozkładem polimeru. Temperatura pierwszego etapu zależy od postaci kompozytu i mieści się w zakresie 260-360^{o}C (włókna) oraz 200-300^{o}C dla kompozytu w postaci folii. Drugi etap rozkładu próbki zachodził odpowiednio w temperaturze 421-500^{o}C i 300-500^{o}C (Mudassir i in. 2015, Deshmukh i in. 2014). Dodatek grafenu do PVC powoduje również podwyższenie temperatury zeszklenia wyznaczonej z pomiarów DMTA(rys. 5) (Wang i in. 2017).

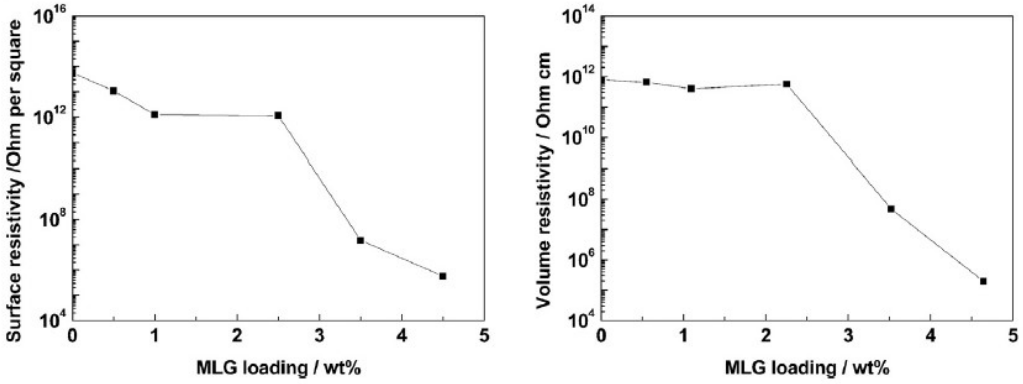


Rys 5. Temperatura zeszklenia kompozytów PVC/ grafen wielowarstwowy (Wang i in. 2017)

- Właściwości elektryczne nanokompozytów PVC/GN

Przewodność kompozytów PVC/GN jest znacznie wyższa od przewodności czystego PVC, która kształtuje się na poziomie 10^{-16} S/cm. Istotny wpływ grafenu na poprawę przewodności zaobserwowano wówczas, gdy zawartość grafenu w osnowie wynosiła powyżej 0,1%. W pracy (Vadukumpully i in. 2011) stwierdzono gwałtowny przyrost przewodności próbek kompozytów zawierających 0,6% napełniacza, a maksymalną przewodność wynoszącą 0,058 S/cm dla nanokompozytu o stężeniu i 6,47% grafenu.

Wartość stałej dielektrycznej nanokompozytów PVC/GN maleje wraz ze wzrostem częstotliwości do 1MHz, niezależnie od zawartości napełniacza. Wielkość strat dielektrycznych nanokompozytów maleje również wraz ze wzrostem zawartości grafenu (Deshmukh i in. 2014), oporność elektryczna nanokompozytów opisana w pracy (Wang i in. 2015) maleje łagodnie wraz ze wzrostem zawartości grafenu (rys.6), o jej istotnym spadku można mówić dopiero w przypadku kompozytów, w których stężenie napełniacza wynosi 3,5%. Współczynnik oporności elektrycznej wynosi wówczas 10^7 Ω/ m^2.



Rys 6. Rezystywność kompozytów PVC/ grafen wielowarstwowy (Wang i in. 2015)

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy literatury stwierdzono, że możliwe jest wytworzenie nanokompozytów poli(chlorku winylu) z grafenem o jednorodnej strukturze. Wytworzone materiały charakteryzują się lepszymi właściwościam i mechanicznymi przy statycznym rozciąganiu (wyższy moduł Younga oraz wytrzymałość na rozciąganie) w porównaniu do właściwości niemodyfikowanej osnowy. Kompozyty PVC/GN są bardziej stabilne termicznie oraz mają wyższą temperaturę zeszklenia od poli(chlorku winylu).

Jednak poprawa właściwości termicznych i mechanicznych istotnie zależy od struktury zastosowanego grafenu oraz składu mieszanki PVC użytej, jako osnowa. Rezystywność kompozytów PVC/GN znacznie zmniejsza się wraz ze wzrostem stężenia nanonapełniacza w osnowie.

6. Literatura

Abdel Ghany N. A., Elsherif S. A., Handal H. T., 2017. Revolution of Graphene for different applications: State-of-the-art, Surfaces and Interfaces (9): 93-106

Balandin A. A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C. N., 2008. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Letters.* 8: 902-907.

Deshmukh K., Joshi G., M., 2014.Thermo-mechanical properties of poly (vinyl chloride)/ graphene oxide as high performance nanocomposites. *Polymer Testing*. 34: 211–219.

Garg B., 2014. Graphene-Based Nanomaterials as Heterogeneous Acid Catalysts: A Comprehensive Perspective. *Molecules*. 19: 14582-14614

Geim A. K., Novoselov K. S., 2007. The rise of graphene. *Nature Materials*. 6: 183-191.

Hebda M., Łopata A., 2012. Grafen- materiał przyszłości. *Mechanika Czasopismo Techniczne* 22: 45-53.

Jonik J., Purchała M., Grajek H., 2016. Metody syntezy i badania właściwości Grafenu. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna 2: 110-117.

Kruk T., 2012. Cienkie wielowarstwowe powłoki przewodzące zawierające tlenek grafenu/ grafen. LAB Laboratoria Aparatura Badania. 17: 12-17.

Kugler S., Spychaj T., 2013. Nanostruktury węglowe i błony lub powłoki polimerowe z ich udziałem. Cz. I. Charakterystyka ogólna, funkcjonalizacja oraz metody badań kompozycji z nanorurkami lub grafenem, Polimery. 58: 93-99.

Kula P., Rzepkowski A., Piotrasik R., Artaszkiewicz R., Dybowski K., Modrzyk W., Sposób wytwarzania grafenu z ciekłego metalu, Patent PL 224409 B1.

Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J., 2008. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science.* 321: 385-388.

Mudassir H., Arghya N., B., Moonyong L., 2015. Enhanced thermo-optical performance and high BET surface area of grapheme @ PVC nanocomposite fibers prepared by simple facile deposition technique: N2 adsorption study. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 21: 828–834.

Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne. pod red. Kurzydłowski K., Lewandowska M., Wyd. PWN, Warszawa 2010.

Obłój-Muzaj M., Zielecka M., Kozakiewicz J., Abramowicz A., Szulc A., Domanowski W., 2006. Polymerization of vinylchloride in the presence of nanofillers - effects on the shape and morphology of PVC grains, Polimery. 51: 133-137.

Phiri J., Gane J., Maloney T. C., 2017. General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites. *Materials Science and Engineering B*. 215: 9-28.

Piszczek K., Tomaszewska J., Skórzczewska K., Lewandowski K., 2015. Badania odporności handlowych plastyfikatów PVC na czynniki spęczniające. Przetwórstwo tworzyw. 163:33-38.

Rasteiro M., G., Tomás A., Ferreira L., Figueiredo S., 2009. PVC Paste Rheology: Study of Process Dependencies. *Journal of Applied Polymer Science.* 112: 2809-2821.

Skórczewska K., Tomaszewska J., Piszczek K., Lewandowski K., 2014. Wytwarzanie i właściwości nanokompozytów modyfikowanego poli(chlorku winylu) (PVC) z nanorurkami węglowymi (MWCNT). *Przetwórstwo Tworzyw*. 6: 567-571.

Sreenivasulu B., Ramji B. R., Madeva N., A., 2018. Review on Graphene Reinforced Polymer Matrix Composites. Materials Today: Proceedings 5: 2419–2428.

Stańczyk B., Dobrzański L., Jagoda A., Możdżonek M., Natarajan S., 2014. Grafen otrzymywany metodą elektrolityczną na podłożach z węglika krzemu, Materiały Elektroniczne (Electronic Materials). 42: 20-25.

Świercz R., 2015. Grafen – kierunki rozwoju, zastosowanie. *Mechanik* 12: 67-70.

Szczęśniak B., Choma J., Jaroniec M., 2016. Otrzymywanie i właściwości adsorpcyjne materiałów grafenowych. *Wiadomości Chemiczne*. 70: 189-217.

Trzaska Z., Trzaska M., 2016. Nanokompozyty z grafenem: wytwarzanie, właściwości i znaczenie w budownictwie. Mazowsze Studia regionalne. 19: 223-245.

Vadukumpully S., Paul J., Mahanta N., Valiyaveettil S., 2011. Flexible conductive graphene/poly(vinyl chloride) composite thin films with high mechanical strength and thermal stability. Carbon. 49: 198-205.

Wang H., Xie G., Ying Z., Tong Y., Zeng Y., 2015. Enhanced Mechanical Properties of Multi-layer Graphene Filled Poly(vinyl chloride) Composite Films. *Journal of Materials Science & Technology* 31: 340-344.

Wang H., Xie G., Zhu Z., Ying Z., Zeng Y., 2014. Enhanced tribological performance of the multi-layer graphene filled poly(vinyl chloride) composites. *Composites: Part A*. 67:268–273.
Wang H., Xie G., Fang M., Ying Z., Tong Y., Zeng Y., 2017. Mechanical reinforcement of graphene/poly(vinyl chloride)composites prepared by combining the in-situ suspension polymerization and melt-mixing methods. *Composites: Part B*. 113: 278-284.
Wang H., Xie G., Fang M., Ying Z., Tong Y., Zeng Y., 2015. Electrical and mechanical properties of antistatic PVC films containing multi-layer graphene. Composites Part B. 79: 444-450.

Badanie parametrów dynamicznych prototypu serwomechanizmu

Dorota Zaborniak[(1)], Mateusz Turzyniecki[(1)]

[1] Katedra Mechatroniki i Automatyki, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski
Dorota Zaborniak: dorota.zaborniak@gmail.com

Streszczenie
W artykule przedstawiono wyniki badań silnika prądu stałego wyposażonego w enkoder kwadraturowy, który ma pełnić funkcję serwomechanizmu, odpowiedzialnego za skręcanie modułu kołowego w tworzonym przez uczelniane koło naukowe, łaziku marsjańskim. Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie najbardziej optymalnych parametrów dynamicznych, dla powstałego prototypu serwomechanizmu cyfrowego. Zaprezentowano charakterystyki dynamiczne będące odpowiedzią na wymuszenie skokowe o różnych amplitudach. Określono warunki pracy układu, zapewniające kompromis pomiędzy wielkością oscylacji wokół wielkości zadanej, a czasem ustalenia odpowiedzi. Efektem badań sąnajbardziej optymalne parametry wejściowe silnika prądu stałego. Pozwoliły one na uzyskanie zadanej pozycji przy jak najmniejszej liczbie oscylacji, dzięki temu usprawnione zostanie działanie powstałego prototypu.

Słowa kluczowe: serwomechanizm cyfrowy, enkoder, pozycjonowanie silnika prądu stałego

Analysisof dynamic parameters of the servo prototype

Summary
The article presents the results of research of DC motor with a quadrature encoder. Its task is to act as a servomechanism to turn in horizontal axis the wheel module of the Mars rover that is created by the university scientific group.The tests carried out were aimed to determine the best values of the voltage, which will ensure to optimal time of reaching and maintaining the desired angular position. Dynamic characteristics were presented as a response to step excitation with different amplitudes. The working conditions of the whole system were determinated to ensure a compromise between the amount of oscillations at the output and the time of determining the response. The result of the research arethe most efficient input parameters for a DC motor. All the data collected allows to obtain a given position with the smallest number of oscillations. Thanks to this, the operation of the prototype will be improved.

Keywords: digital servomechanism, encoder, positioning of DC motor

1. Wstęp

Człowiek korzystając z rozwoju nauki, stworzył mechanizmy wykorzystujące różne źródła energii. Pozwalają onewykonać wiele czynności bez fizycznego udziału. Jednak każdy mechanizm potrzebuje siły napędowej, wprawiającej całość w ruch. Tak powstały różne rodzaje napędów, które można w łatwy sposób podzielić według źródła energii tj. napędy wykorzystujące energię elektryczną, cieplną, kinetyczną czy potencjalną. Każdy z tych rodzajów energii posiada specyficzne cechy predysponujące do użycia wróżnych zastosowaniach. Projektując pojazd zdalnie sterowany o niewielkich gabarytach, wybór zazwyczaj pada na wykorzystanie napędu elektrycznego.Tego typu napędy są często używane z powodu swojej prostoty.

Dostarczając energię do napędów elektrycznych, następuje zamiana energii elektrycznej na mechaniczną (Przyborowski i in. 2014). Silniki elektryczne mogą przenosić napęd bezpośrednio na mechanizm bądź przy użyciu specjalnie przystosowanych przekładni

pozwalających na wydajną prace. Na bazie silników elektrycznych powstały serwomechanizmy. Są to urządzenia pozwalające na precyzyjne określenie prędkości, przyspieszenia oraz samego kąta obrotu. Serwomechanizmy działają w układzie sprzężonym, którego sygnałem wyjściowym jest wartość aktualnie sterowana, tj. prędkość, położenie lub przyspieszenie. W celu dokładniejszego przekształcania danych o zmianie położenia, serwomechanizmy zostały wyposażone we wbudowane enkodery (Krupanek i in. 2010). Najczęściej spotykanym typem serwomechanizmu jest serwomechanizm pozycyjny, który z reguły używany jest w trybie regulacji położenia. W takiej konfiguracji przyjmuje on od użytkownika pozycję kątową. Serwomechanizmy można podzielić na analogowe i cyfrowe.

- Serwomechanizmy analogowe

Serwomechanizmy analogowe składają się z silniku prądu stałego z zamontowanymi przekładniami oraz z układu elektronicznego generującego sygnał PWM, który umożliwia sterowanie silnikiem. Układ elektroniczny może dokładnie określić pozycję, w jakiej znajduje się wał silnika. Dzieje się to na podstawie danych zaczerpniętych z enkodera lub ze sprzężonego z przekładniami potencjometru. Wraz z ruchem przekładni porusza się wał potencjometru zmieniający różnicę potencjałów układu. Dzięki czemu ze zbliżaniem się do zadanej pozycji maleje wspomniana różnica napięć pomiędzy potencjometrem a napięciem wejściowym. Prowadzi to do zmniejszenia wartość PWM podawanej na silnik, tzn. silnik zwalnia. Takie rozwiązanie jednak prowadzi do niskiej prędkości działania układu oraz dokładność mechanizmu nie jest czasami wystarczająca. Wykorzystanie takiego rodzaju serwomechanizmów jest dobre ze względu na niskie skomplikowanie mechaniczne oraz prostą obsługę (Żabiński i in. 2005).

- Serwomechanizmy cyfrowe

Serwomechanizmy cyfrowe cechują się dokładnością i szybkością działania. Składają się z wbudowanego mikrokontrolera, który pozwala ustalić zakres ruchu, jego przyspieszenie i zwrot. Główna zasada działania jest taka jak w serwomechanizmach analogowych, jednak w tym rodzaju serwomechanizmów to układ mikrokontrolera porównuje aktualną pozycję wału silnika z tą zadaną przez użytkownika. Wykorzystując cyfrowy serwomechanizm mamy możliwość zadawania różnych prędkości ruchu oraz otrzymany moment obrotowy może być znacznie większy od analogowego.

- Geneza pracy

Koło naukowe „Mechatron” działające przy Uniwersytecie Rzeszowskim zajmuje się między innymi konstruowaniem łazika marsjańskiego. Celem pracy jest udział w konkursie University Rover Challenge organizowanym w USA. Po stworzeniu prototypowej konstrukcji

podwozia pojazdu, następnym krokiem stało się tworzenie mechanizmów odpowiedzialnych za pozycjonowanie modułu kołowego. W tym celu konieczne stało się użycie pozycjonera, który posiada wysoką dokładność i optymalny moment obrotowy i nie jest ograniczony pod względem zakresu obrotu. Serwomechanizmy analogowe charakteryzujące się niską ceną, są także niedokładne i powolne.W przeciwieństwie do serwomechanizmów analogowych, cyfrowe cechują się wysoką dokładnością oraz prędkością. Jednak ich koszt stanowi sporą wadę. Mimo tak wielu zalet, gotowe rozwiązania nie spełniły oczekiwań konstruktorskich. Powstał pomysł, wykorzystania silnika prądu stałego z wbudowanym enkoderem w celu stworzenia serwomechanizmu cyfrowego z dodatkowymi funkcjonalnościami. Jednostka decyzyjna w postaci prostego mikroprocesora z rodziny AVR, została zaprogramowana w środowisku Eclipse za pomocą języka C.

2. Materiały i metody

Serwomechanizmy cyfrowe często zostają zastąpione autorskimi rozwiązaniami z powodu wysokiego kosztu i ograniczonych funkcjonalności. Podobnie stało się opisywanym przypadku.Zdjęcie stworzonego serwomechanizmu znajduje się na rysunku stanowiska pomiarowego (rys.3).

- Stworzony serwomechanizm

W celach badawczych został stworzony serwomechanizm, który składa się z:
Silnika prądu stałego z wbudowanym enkoderem kwadraturowym.

Użyty silnik został oznaczony przez producenta jako: „70:1 Metal Gearmotor 37Dx70L mm with 64 CPR Encoder”.Podczas wyboru silnika, należało pamiętać o konieczności posiadania przez niego wbudowanego enkodera. Ten dodatkowy element pozwoli na dokładne określenie aktualnej pozycji wału silnika. W przeciwnym przypadku, niezbędne stałoby się dołączenie enkodera do modelu. Ta operacja mogłaby prowadzić do braku dokładności pomiarów wynikającej z trudności sprzężenia enkodera zwałem silnika. Parametry silnika przedstawia tabela (Tab.1).

Tabela 8. Parametry silnika(opracowanie własne)

Napięcie zasilania	6 – 12V
Przekładnia	70:1
Wymiary	70 x 37 mm
Średnica wału	6mm
Masa	215g
Prędkość obrotowa	75-150 obr/min

Silnik zawiera wbudowany enkoder kwadraturowy z rodziny enkoderów obrotowo – impulsowych. Dzięki przesunięciu kanałów w fazie, możliwe jest określenie kierunku obrotu silnika.Parametry enkodera zostały przedstawione w tabeli (Tab. 2).

Tabela 9. Parametry enkodera (opracowanie własne)

Napięcie zasilania	3,5-20V
Rozdzielczość	64 impulsy/obr (po przekładni 4480)

mikroprocesor ATtiny2313

Optymalnym rozwiązaniem okazał się mikroprocesor z rodziny AVR wykonujący operacje na 8 bitach. Prostota rozwiązania była priorytetem podczas tworzenia prototypu.

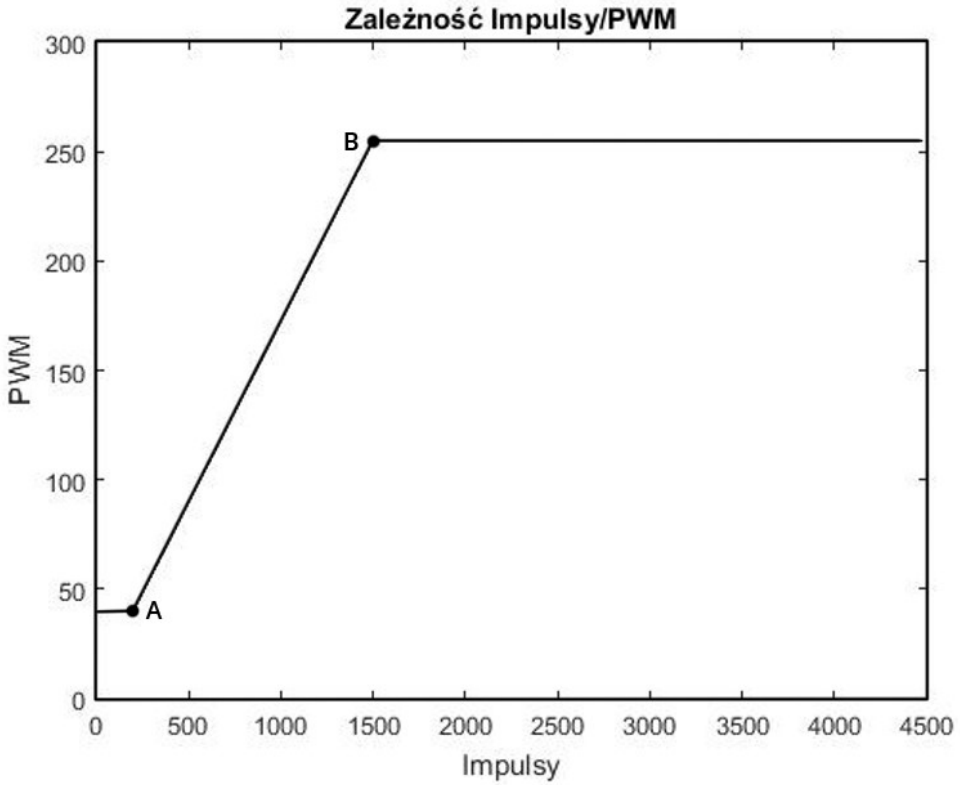
Zasada działania stworzonego serwomechanizmu jest analogiczna jak w przypadku gotowych serwomechanizmów cyfrowych. Jednostka decyzyjna, którą jest mikroprocesor ATtiny2313, steruje pracą serwomechanizmu na podstawie danych pobieranych do użytkownika przez interfejs USART. Po odebraniu komendy, jest ona analizowana, a następnie uruchomiona zostaje odpowiednia instrukcja. Istnieje możliwość uruchomienia silnika z zadaną prędkością w określoną stronę.Co więcej, pozycjonowanie silnika odbywa się z programowo dobieraną prędkością – zależną od odległości od pozycji zadanej. Pętla główna działa w oparciu o przerwania: otrzymania komendy z USART'aoraz zmiany stanu na wyjściach enkodera kwadraturowego. Przerwania obsługi enkodera zostały zabezpieczone przed analizowaniem nieprawidłowych informacji, poprzez użycie tablicy z potencjalnymi przebiegami zestawienia zmian stanu.Sterowanie prędkością odbywa się za pomocą sterowania modulacją szerokości impulsu (PWM) (Francuz 2011).

- Prędkość dojścia do pozycji zadanej

Prędkość obrotów silnika dobierana jestna podstawie odległości od zadanej wartości lub zostaje zadana odgórnie przez użytkownika. Ten wybór jest rozszerzeniem funkcjonalności zawartych w gotowych rozwiązaniach. Funkcja opisująca zależność pomiędzy uchybem, a zadaną wartością PWM została przedstawiona na rysunku (rys.1).

Na podstawie bieżącego położenia oraz pozycji zadanej obliczana jest odległość kątowa, następnie określony zostaje kierunek obrotów silnika poprzez wybór krótszej drogi dojścia do pozycji zadanej. Rozdzielczość serwomechanizmu (1) określona jest na podstawie rozdzielczości enkodera wynoszącej $N = 4480\ \frac{imp}{obr}$.

$$\frac{360}{N} = \frac{360}{4480} \approx 0,0803^{\circ} \qquad 1)$$



Rys. 10. Wykres zależnościprzyspieszenia względem odległości kątowej od pozycji zadanej

Wartość wypełnienia przebiegu PWM sterującego prędkością silnika została obliczona na podstawie dwóch punktów w przestrzeni: A= (200, 40) oraz B= (1500, 255). Na ich postawie zostało wyznaczone równanie:

$$\begin{cases} 40 = 200a + b \\ 255 = 1500a + b \end{cases} \quad (2)$$

Które sprowadzono do wzoru:

$$y = \frac{215}{1300}x+, \left(40 - \frac{430}{13}\right), \quad 3)$$

gdzie:

y – wartość PWM, $y \in \langle 40{,}255 \rangle$

x – ilość impulsów do przebycia

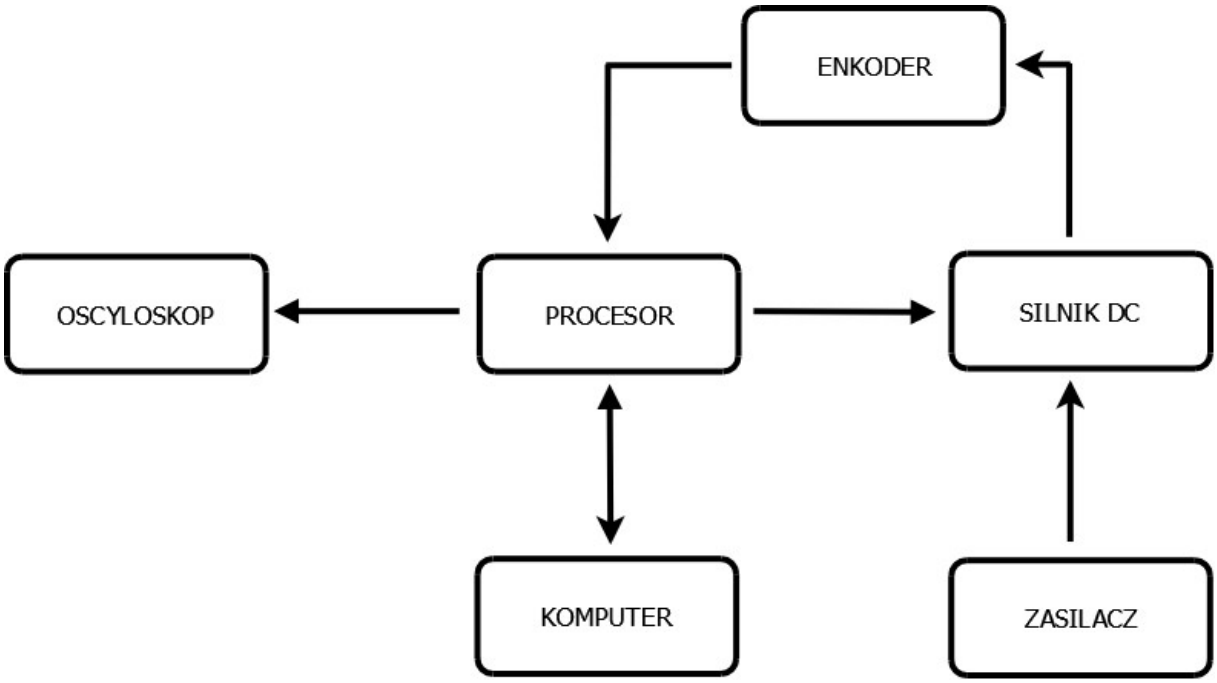
Silnik prądu stałego rozpoczyna pracę przy wypełnieniu PWM: y = 40, dlatego przyjęto ją, jako wartość minimalną dla małych odległości kątowych. Zapewnia to utrzymanie stabilnego momentu obrotowego na wale silnika.Wartości stałych zostały dobrane przy zachowaniu warunków utrzymania optymalności obliczeń stałoprzecinkowych na mało wydajnym, ośmiobitowym mikrokontrolerze ATtiny z rodziny AVR. Tak proste rozwiązanie sterowania prędkością obrotu, zmniejszyło problem występowania przeregulowań, jednak nie

wyeliminowało go całkowicie. Zostały również oscylacje wokół pozycji zadanej, które powodowane były zbyt dużą podażą mocy dla małych odległościach od wartości zadanej.

Określanie aktualnej pozycji wału silnika, odbywa się dzięki instrukcji przerwania, która wyzwalana jest zmianą stanu na wejściu enkodera kwadraturowego. W ten sposób zliczanie impulsów odbywa się w procesorze i istnieje możliwośćokreślania pozostałej do przebycia liczby impulsów. Ponadto uwzględniona została funkcja, analizująca przebieg zwracany przez czujnik, która po wykryciu błędu, zatrzymuje silnik.

- Stanowisko badawcze

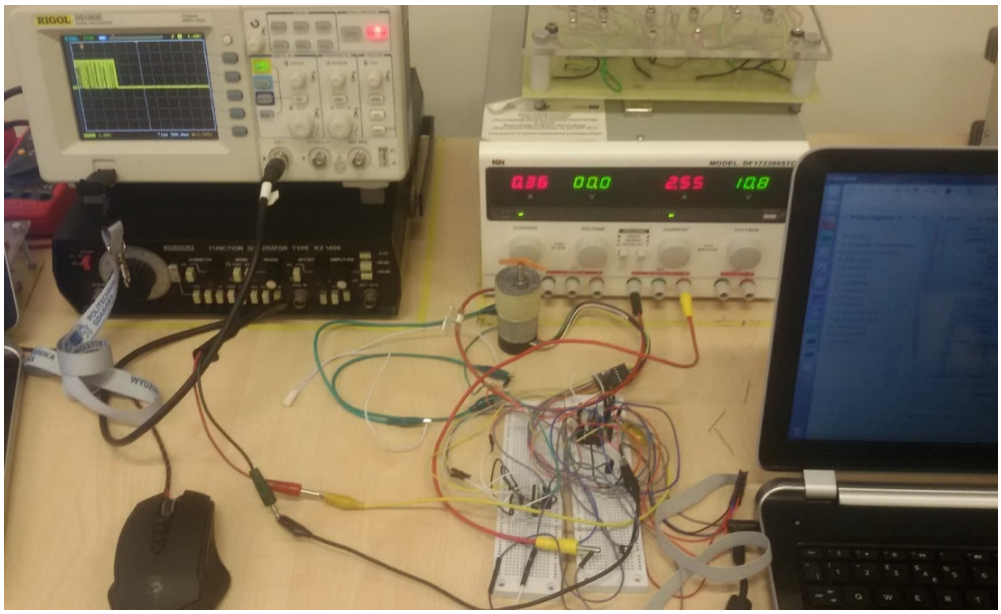
W celu przeprowadzenia badań, konieczne było przygotowanie stanowiska badawczego, pozwalającego na dokładny odczyt danych (rys.2).



Rys. 11. Schemat stanowiska badawczego

Zasilacz napięciowy NDN DF1723005TC posłużył do zasilaniasilnika prądu stałego. Zasilanie procesora poprowadzone zostało poprzez programator USBasp połączony z komputerem. Pobrane przez procesor dane z enkodera zostały poddane analizie i zwrócone do komputera za pośrednictwem interfejsu szeregowego USART, co pozwoliło na wygenerowanie przebiegów ustalania pozycji zadanej w czasie rzeczywistym. W celu otrzymania zależności prędkości ustalania pozycji zdanej względem podanego na silnik napięcia, do stanowiska został dołączony oscyloskop Rigol DS1052E.

Całość stanowiska badawczego została przedstawiona na rysunku 3.



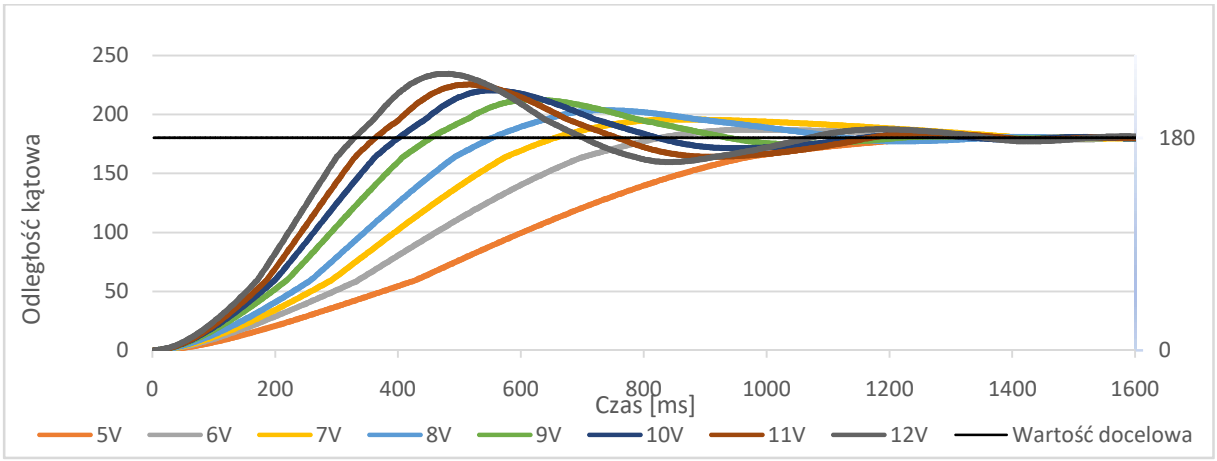
Rysunek 12. Stanowisko badawcze

3. Wyniki i dyskusja

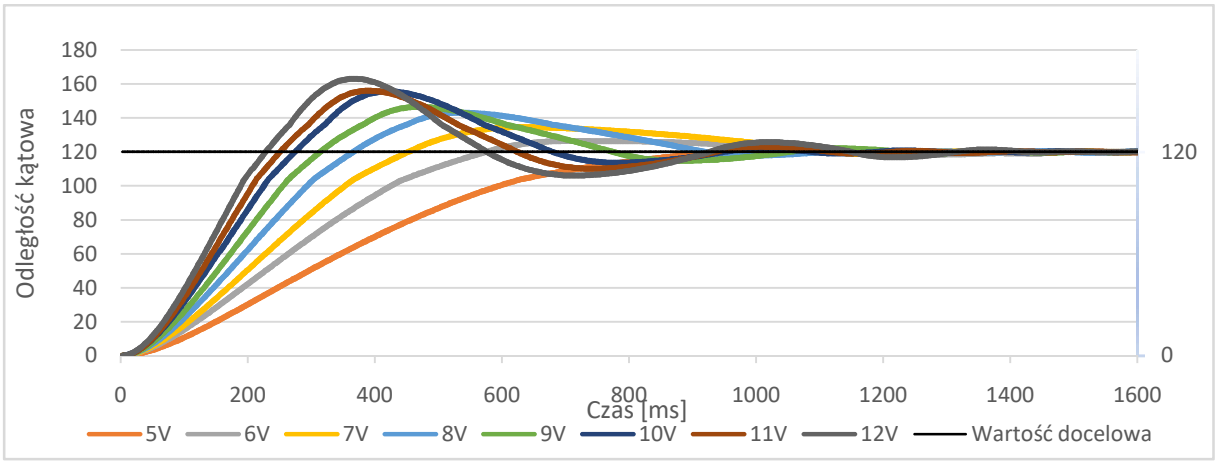
Wygenerowane zostały wykresy dla różnych odległości zadanych. Dzięki temu możliwe stało się znalezienie najbardziej optymalnego napięcia względem wartości bezwzględnej posuwu.

- Przebiegi położenia kątowego w czasie

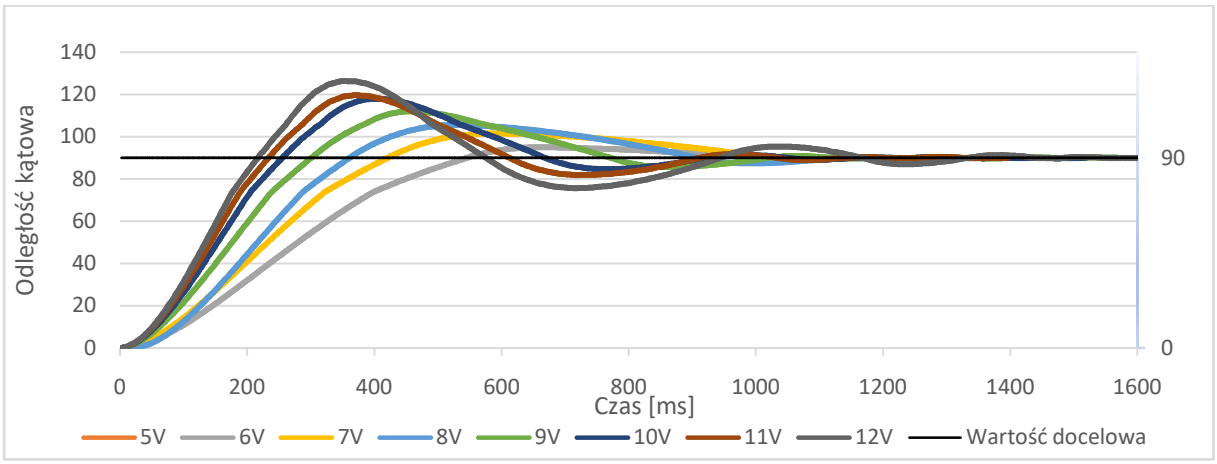
Ważnym elementem podczas tworzenia przebiegu położenia kątowego była ciągłość wykresów, dlatego zostały one wygenerowane przy użyciu dużej ilości danych. Próbkowanie rzędu około 400 S/s umożliwiło otrzymanie precyzyjnego przebiegu ustalania pozycji kątowej. Wykresy przedstawiają jedynie część przebiegu możliwą do zaobserwowania. Serwomechanizm działa z dokładnością do 0,0803˚, a oscylacje wokół wartości zadanej są w końcowej fazie ustalania bardzo niewielkie i w efekcie niewidoczne na wykresie w przedstawionej skali.



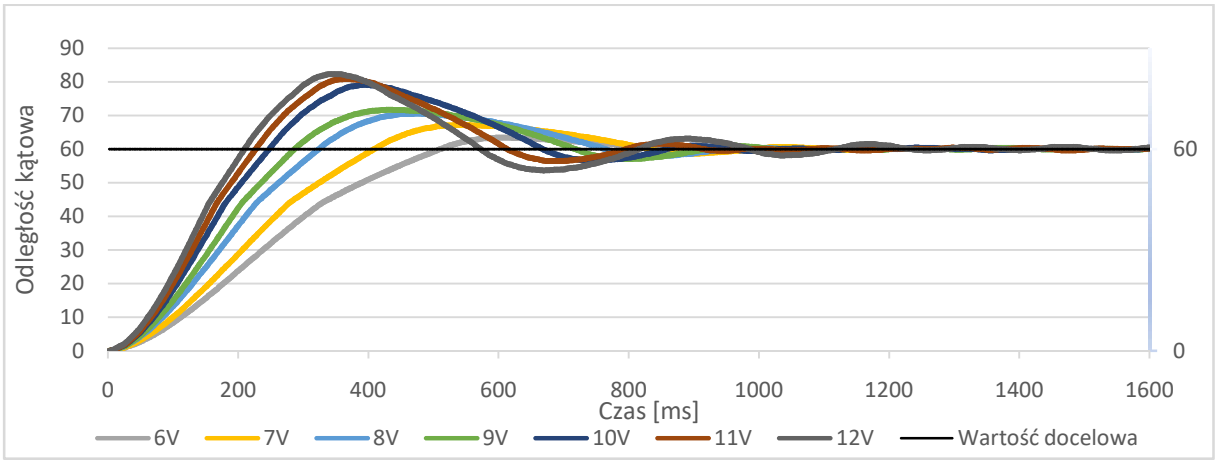
Rys. 13. Przebieg położenia kątowego w czasie dla 180˚



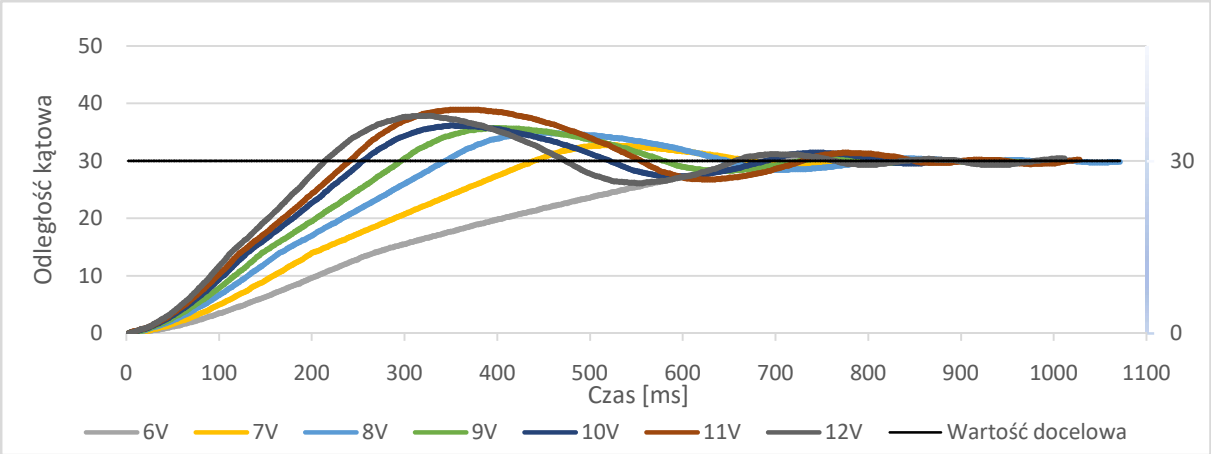
Rys. 14. Przebieg położenia kątowego w czasie dla 120˚



Rys. 15. Przebieg położenia kątowego w czasie dla 90˚



Rys. 16. Przebieg położenia kątowego w czasie dla 60˚



Rys. 17. Przebieg położenia kątowego w czasie dla 30˚

Układ został zbadany dla odległości kątowych w zakresie $\alpha = \{30, 60, 90, 120, 180\}$ a wartości napięcia zasilającego silnik $U \in \langle 5, 12 \rangle$ ze skokiem, co 1V. W celu otrzymania optymalnego czasu dojścia do zadanej pozycji, niezbędne było przeanalizowanie powstałych wykresów. Wyznaczenie odpowiedniej wartości napięcia, umożliwiło docelowo znaczące zmniejszenie oscylacji i przeregulowań.

Dla najwyższych wartości napięcia U = 12 [V] występują duże przeregulowania, które powodują zmniejszenie stabilności układu. Przekroczenie pozycji zdanej sięga aż do 30% tj. około 60˚. Dla odległości kątowej α = 180˚ oraz α = 60˚ najbardziej optymalne okazało się napięcie U = 8[V]. Taka wartość napięcia, umożliwiła relatywnie szybkie ustalenie wartości zadanej przy rozsądnym, nieprzekraczającym 10% przesterowaniu.

Dla wartości α=120˚ oraz α = 30˚ najlepsze parametry pracy uzyskano przy napięciu zasilania U = 7[V].Z prostych obliczeń wynika, żeprzerzut o wartości 30˚, stanowi 25%wartości zadanej α = 120˚. Nasuwa się konkluzja, że dla mniejszych przesunięć kątowych, zmniejsza się również wartość przerzutu.

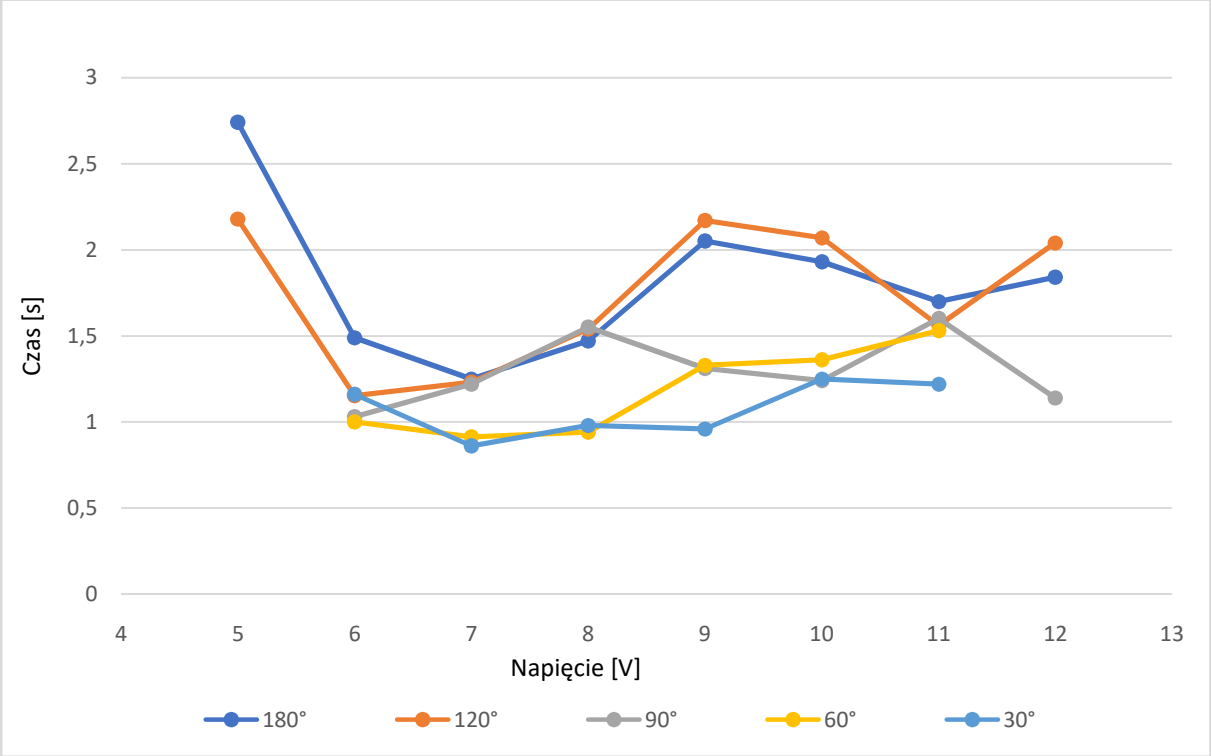
Przy odległości kątowej α=90˚ optymalną wartością napięcia zasilającego jest U = 6[V]. Wartość docelowa zostaje osiągnięta, co prawda powoli jednak z jednoczesnym uniknięciem dużych wartości przerzutu.

- Zależność prędkości ustalenia pozycji od napięcia

W przeciwieństwie do wykresów zawartych powyżej, wykres zależności prędkości ustalenia pozycji od napięcia jest wygenerowany na podstawie bardzo niewielkiej ilości danych. Z tego powodu przebieg funkcji został wygładzony.

Czas podany na wykresie jest czasem dokładnego ustalenia pozycji zadanej i jest o wiele dłuższy niż mogłoby się wydawać na podstawie analizy wykresów przebiegu

położenia kątowego w czasie (rys. 4-8). Zależność czasu ustalenia zadanego kąta względem podanego napięcia została przedstawiona w postaci wykresu na rysunku (rys. 9).



Rys. 18. Zależność prędkości ustalenia pozycji od napięcia

- Konkluzja

Stworzony serwomechanizm cyfrowy, prawidłowo się pozycjonuje i spełnia złożenia koncepcyjne postawione podczas tworzenia łazika. Pozycjonowanie serwomechanizmu jest dość powolne, jednak bardzo dokładne, co umożliwiaprecyzyjne sterowanie położeniem kątowym zespołów kołowych w docelowym urządzeniu. Istnieje możliwość zmniejszenia dokładności pozycjonowania, poprzez programowe ustalenie zatrzymania silnika w odległości kilku impulsów od celu. Dzięki czemu znacznie zmniejszy się czas ustalenia pozycji zadanej, ponieważ zlikwidowane zostaną oscylacje rzędu 1˚.

Należy pamiętać, że badanie silnika było przeprowadzone w warunkach bez obciążenia, dlatego przy wyższych napięciach występowały znaczne oscylacje. Jeżeli silnik zostanie obciążony, odpowiednio do obciążenia zmienią się optymalne wartości napięć. Dla wartości napięcia powyżej U = 8[V] znacznie wzrastają czasy ustalenia pozycji zadanej. Dzieje się tak z powodu wysokich przerzutów i dużych oscylacji. Zarówno zbyt wysoki jak i zbyt niskie napięcie zasilania powoduje wydłużenie czasu ustalenia pozycji. Dla U < 6[V] następuje zbyt wolne dochodzenie do zadanej pozycji i pomimo braku występowania oscylacji, niska prędkość powoduje duże i nieakceptowalne opóźnienia. Najbardziej optymalnym napięciem do sterowania serwomechanizmu bez obciążenia jest wartość z zakresu $U \in \langle 6{,}8 \rangle$.

Rozwiązanie powyższego problemu umożliwiamodyfikacja powstałego algorytmu obliczającegozadanie prędkości obrotowej względem odległości od zadanej pozycji, poprzezzastosowanie regulatora PID. Jest to kolejny krok do rozwoju serwomechanizmu. Jeżeli regulacja okaże się mieć zbyt wysoką złożoność obliczeniowo – czasową, priorytetem stanie się zaimplementowanie regulatora PD. Zastosowanie hamowania przeciwprądem pozwoli na zminimalizowanie przerzutów pozycji.

Konieczne będzie także przeprowadzenie badań w warunkach obciążenia silnika zewnętrznym momentem hamującym oraz masą bezwładną. Umożliwi to dobór odpowiedniego napięcia zależnego od zadanego przesunięcia kątowego oraz od przyłożonego obciążenia.

4. Podsumowanie

Przeprowadzenie badań zawsze stanowi ważny proces poznawania powstałego rozwiązania. Często to właśnie wtedy ukazują się dalsze możliwości rozwoju koncepcji, a konstruktor zauważa popełnione przez siebie błędy. Z tego powodu, przyłożono dużą wagę do zachowania jak najwyższej dokładności danych, podczas przeprowadzania testów. Przeprowadzone badania znacząco pomogły w wyborze dalszego kierunku rozwoju serwomechanizmu. Co więcej, lepiej poznano charakterystykę pracy powstałego urządzenia, a także ustalone optymalne zakresy napięć.

Znajomość przeprowadzonych badań stanowi ważny element podczas użytkowania serwomechanizmu. Dzięki wygenerowanym wykresom, możliwe stanie się dobranie odpowiedniej wartości napięcia zasilającego silnik prądu stałego. Jego dobór będzie zależał od odległości od pozycji zadanej przez użytkownika. Natomiast prędkość obrotowa zostaje ustalona na podstawie odległości aktualnej pozycji, od zadanej. Z każdym stopniem, prędkość jest aktualizowana względem odpowiedniej funkcji. Z kolei prędkość obrotowa uwarunkowuje czas ustalenia zadanej pozycji. Zbyt wysoka prędkość prowadzi do występowania przerzutów, a więc wydłużenia czasu ustalania. Zbyt niska, nie powoduje przerzutów jednak dojście do celu zajmujedługi odcinek czasu. Z badań wynika, że najbardziej optymalne wartości napięć należą do zakresu $U \in \langle 6{,}8 \rangle$ [V].

Badania zostały przeprowadzone przy jałowym obciążeniu silnika, co niewątpliwie ma wpływ na otrzymane rezultaty. Po zamocowaniu na wał silnika przekładni zębatej i umieszczeniu go na profilu modułu kołowego łazika niemal pewnym jest, że wyniki będą się różnić. Będzie to wynikać z wielu czynników zewnętrznych mających wpływ na stopień trudności ruchu, np.rodzaj podłoża, czy ewentualne przeszkody. Wtedy też koniecznym stanie

się przeprowadzenie nowych badań, pozwalających wyłonić wartości napięć, dla których silnik zadziała najbardziej efektywnie.

5. Literatura

Dudzikowski I., Ciurys M., 2011. Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi. Postępy napędu elektrycznego i energoelektryki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Vol. 20. ISBN 978-83-7493-653-8.

Elbayomy, Karam M., Jiao Zongxia, and Zhang Huaqing., 2008. "PID controller optimization by GA and its performances on the electro-hydraulic servo control system." *Chinese Journal of Aeronautics* 21.4: 378-384.

Krupanek B., Bogacz R., Kubik B., 2010. Robot kroczący "Heksapod". Pomiary Automatyka Robotyka. 14: 79-83.

Przyborowski W, Grzegorz K. 2014. Maszyny elektryczne.

Reed, David E., Richard T. Beherns, William G. Bliss., 1997. Detecting servo data and servo bursts from discrete time samples of an analog read signal in a sampled amplitude read channel.

Sabo D. A., Brunner, D., Engelmayer, A., 2005. Advantages of digital servo amplifiers for control of a galvanometer based optical scanning system. Optical Scanning. 5873, pp. 113-121). International Society for Optics and Photonics.

Żabiński T., Leszek T. 2005. Nastawianie kontrolera serwomechanizmu cyfrowego. Pomiary Automatyka Kontrola. 51(1): 50-52.

Francuz T., 2011. Język C dla mikrokontrolerów AVR: od podstaw do zaawansowanych aplikacji. Helion.

Nauka, Badania i Doniesienia Naukowe 2018

Część II

Nauki techniczne i ścisłe

ISBN 978-83-951445-2-3