

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Nauki techniczne i inżynieryjne



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2021

Redakcja naukowa

dr Jędrzej Nyćkowiak

dr hab. Jacek Leśny, prof. UPWR

Wydawca

Młodzi Naukowcy

www.mlodzinaukowcy.com

wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com

ISBN (całość 978-83-66743-20-5)

ISBN (wydanie online 978-83-66743-60-1)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66743-59-5)

Ilość znaków w książce: 300 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 7.5

Data wydania: sierpień 2021

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

Spis treści

1. Metody magazynowania wodoru w pojazdach samochodowych	7
<i>Cieślak Kacper, Śliwka Mateusz</i>	
2. Wykorzystanie metody Szywnych Elementów Skończonych do wyznaczenia drgań swobodnych belki utwierdzonej	15
<i>Cieślak Kacper, Śliwka Mateusz, Kubok Tymoteusz</i>	
3. Mechanizmy obronne komórek bakteryjnych w kontakcie ze srebrem oraz miedzią	24
<i>Mateusz Dubicki, Paulina Rokicka-Konieczna</i>	
4. Przyszłość lotnictwa- podniebne taksówki	30
<i>Jurkiewicz Martyna</i>	
5. Rozkład ciśnienia na profilu lotniczym w miarę zmieniających się parametrów przepływu	37
<i>Jurkiewicz Martyna</i>	
6. Dwuklockowe hamulce przemysłowe, rozwiązania konstrukcyjne, tok obliczeniowy	44
<i>Mateusz Kucharski</i>	
7. Wstępny projekt małogabarytowego tunelu aerodynamicznego	52
<i>Mateusz Kucharski</i>	
8. Metody usuwania zanieczyszczeń organicznych występujących w wodach	60
<i>Kucio Karolina</i>	
9. Badanie modułu ściśliwości torfu uwzględniające oddziaływanie nasypu przeciążającego	66
<i>Olszewska Magdalena</i>	
10. Współczesne metody charakterystyki powłok osadzonych na podłożu stałym	73
<i>Kacper Przykaza</i>	
11. Zastosowanie wybranych metod symulacyjnych w elektroenergetyce	80
<i>Karol Sidor</i>	
12. Mikroskopia sił atomowych (AFM) i jej zastosowanie	87
<i>Szafran Klaudia</i>	
13. Modelowanie obróbki czopów wałów korbowych samochodowych silników spalinowych	93
<i>Śliwka Mateusz, Cieślak Kacper</i>	

Przedmowa

Szanowni Państwo, wydawnictwo „Młodzi Naukowcy” oddaje do rąk czytelnika kolekcję monografii naukowych dotyczących szerokiego spektrum nauk. Znajdują się tutaj pozycje dotyczące nauk medycznych i nauk o zdrowiu, nauk przyrodniczych, nauk technicznych i inżynierskich oraz szeroko pojętych nauk humanistycznych i społecznych.

W prezentowanych monografiach poruszany jest bardzo szeroki przekrój zagadnień, jednak każda z osobna składa się z kilkunastu rozdziałów, spójnych tematycznie, dających jednocześnie bardzo dobry przegląd tematyki naukowej jaką zajmują się studenci studiów doktoranckich lub ich najmłodszy absolwenci, którzy uzyskali już stopień doktora.

Czytelnikom życzymy wielu przemyśleń związanych z tematyką zaprezentowanych prac. Uważamy, że doktoranci i młodzi badacze z pasją i bardzo profesjonalnie podchodzą do swojej pracy, a doświadczenie jakie nabierają publikując prace w monografiach wydawnictwa „Młodzi Naukowcy”, pozwoli im udoskonalać swój warsztat pracy. Dzięki temu, z pewnością wielu autorów niniejszych prac, z czasem zaczną publikować prace naukowe w prestiżowych czasopiśmie. Przyczyni się to zarówno do rozwoju nauki, jak i każdego autora, budując jego potencjał naukowy i osobisty.

Redakcja

1. Metody magazynowania wodoru w pojazdach samochodowych

Hydrogen storage methods in motor vehicles

Cieślak Kacper⁽¹⁾, Śliwka Mateusz⁽²⁾

⁽¹⁾ Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

⁽²⁾ Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Cieślak Kacper: kcieslar@ath.bielsko.pl

Słowa kluczowe: wodór, zbiorniki ciśnieniowe, metody magazynowania wodoru.

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane metody magazynowania wodoru w pojazdach samochodowych. Wodór jest najczęściej występującym pierwiastkiem we wszechświecie i jego praktycznie niewyczerpalne zasoby mogą stanowić potencjalne, ekologiczne źródło napędu. Pierwsze wykorzystanie wodoru do napędu pojazdów samochodowych stanowiły próby zasilania silników spalinowych, jednak tutaj pojawił się problem z tworzeniem optymalnej mieszanki potrzebnej do prawidłowego przebiegu spalania. Obecne trendy związane z ekologicznymi źródłami napędu doprowadziły do rozwoju pojazdów elektrycznych, których największym ograniczeniem jest niewielki zasięg. Zamiast jednak magazynować energię w akumulatorach pojazdy elektryczne mogą ją wytwarzać w ogniwach elektrycznych dzięki wodorowi, co pozwala na zwiększenie zasięgu tego typu pojazdów. Obecnie wyróżnia się trzy podstawowe metody magazynowania wodoru: w fazie gazowej, w fazie ciekłej oraz magazynowanie w wodorkach metali. Magazynowanie w zbiornikach ciśnieniowych wymaga wodoru sprężonego do wysokich ciśnień, rzędu 70 MPa. Zbiorniki ciekłego wodoru natomiast wymagają utrzymywania gazu w niskich temperaturach, czyli stosowania superizolacji oraz dodatkowego osprzętu. Korzyści tego rodzaju metody przechowywania to duże gęstości wodoru: grawimetryczna oraz objętościowa cieczy LH₂. Z kolei wodorki metali są materiałami zdolnymi do magazynowania wodoru przy niskiej temperaturze i ciśnieniu, ale wykazują niewielką jego pojemność.

1. Wstęp

Pojazdy z ogniwami paliwowymi mają duży potencjał w zakresie zmniejszenia zarówno zużycia energii, jak i emisji dwutlenku węgla. Jednak ze względu na małą gęstość wodoru problem stanowi jego zmagazynowanie w odpowiednich ilościach. Magazynowanie wodoru w przemyśle chemicznym nie stwarza problemów, gdyż jest on produkowany na miejscu i dostarczany do instalacji na czas („just-in-time”). W przypadku pojazdów magazynowanie wodoru stwarza znacznie większe problemy niż przechowywanie paliw płynnych, a przejechanie 500 km z pełnym obciążeniem wymaga od 5 do 13 kg wodoru. Porównując dwie metody magazynowania wodoru czyli skroplony oraz sprężony wodór do zbiornika paliwa mieszczącego 70 litrów benzyny wymaga się następujących odpowiedników „wodorowych”:

- w przypadku sprężonego wodoru (250 atm, 20°C) zbiornika 650 litrowego,
- w przypadku skroplonego wodoru 184 litrów.

Zalety wodoru przemawiającymi za jego wykorzystaniem w transporcie:

- w reakcji wodoru w ogniwie elektrycznym powstaje woda,
- wysoka wydajność spalania (o 60% większą niż inne paliwa),
- szeroki zakres zapalności - od 4% do 70% wodoru w mieszaninie z powietrzem (w przypadku silników spalinowych),
- praktycznie niewyczerpalne zapasy,
- spalanie paliwa „wodorowego” nie jest źródłem dwutlenku węgla.

2. Opis zagadnienia

Wymogi stawiane samochodowym zbiornikom na wodór przedstawiają się następująco:

- możliwość zmagazynowania wodoru pozwalająca przejechać 500÷700 km,
- mała objętość zbiornika (maks. ~200 l),
- mała masa zbiornika,
- niska temperatura pracy maks. ~80°C,
- niewielkie ciepło wydzielane przy ładowaniu/rozładowaniu,
- duża gęstość wodoru w stosunku do masy całego zbiornika,
- wytrzymałość mechaniczna,
- bezpieczeństwo,
- krótki czas ładowania ~ 5 min.

Obecnie do magazynowania wodoru wykorzystuje się zbiorniki na wodór sprężony, zbiorniki na wodór ciekły, pojemniki z wodorkami metali, materiały węglowe oraz chemiczne metody magazynowania wodoru o dużej jego zawartości. Przechowywanie wodoru w formie gazu, cieczy, wodorków metali oraz sorbentów (chemicznych metod magazynowania) stanowi odwracalną metodą magazynowania (ponowne napełnienie lub regeneracja). W przypadku chemicznego przechowywania wodoru przepracowany materiał regeneruje się poza pojazdem.

Wodorki metali czyli materiały o odwracalnym sposobie magazynowania wodoru absorbują go bezpośrednio do swojej struktury. Następuje to poprzez przyłączenie wodoru w położenie międzywęzłowe sieci krystalicznej metalu, a ta forma magazynowania wyróżnia się możliwością zgromadzenia dużych ilości wodoru w małych objętościach, pod niskim ciśnieniem w temperaturze pokojowej.

Sorbenty węglowe umożliwiają adsorpcję fizyczną bądź chemiczną bazując na energetycznych mechanizmach adsorpcji. Do procesów sorpcyjnych wykorzystuje się materiały o dużej porowatości co przekłada się na maksymalne zwiększenie pola powierzchni dostępnej dla cząsteczek wodoru i ułatwia procesy sorpcji i desorpcji pierwiastka z materiału.

Magazynowanie wodoru gazowego wymaga w celu zapewnienia przebiegu rzędu 500 km dla pojazdu samochodowego sprężenia gazu do ciśnienia od 350 do nawet 700 atm. Zbiorniki umożliwiające ten sposób magazynowania to zbiorniki kompozytowe. Obecnie przechowywanie pod ciśnieniem 200-350 barów nie jest technicznie zbyt wymagające i możliwe w tym przypadku jest wykorzystanie samych stopów metali do konstrukcji zbiorników. Jednakże, gęstość objętościowa sprężonego wodoru przeciętnego pojazdu samochodowego pozostaje wciąż około 10 razy niższa niż w przypadku benzyny. Rozwijana jest również technologia zbiorników krio-ciśnieniowych. W tym przypadku sprężony wodór jest przechowywany w obniżonej temperaturze (od około -120 do -196 °C). W przypadku zbiorników na ciekły wodór temperatura przechowywania to temperatura niższa niż 200 K (-73°C) co wymaga zastosowania superizolacji oraz bardzo energochłonnego skroplenia wodoru. Pomimo tego, że zbiorniki na ciekły wodór wymagają skomplikowanego układu dodatkowego osprzętu zwykle jest to bardziej odpowiednia metoda jego przechowywania. Producenci samochodów, tacy jak BMW i General Motors prowadzą badania nad samochodami wyposażonymi w zbiornik z ciekłym wodorem oraz wodorowy silnik spalinowy lub ogniwo paliwowe.

Wodorki chemiczne uwalniają wodór pod wpływem reakcji chemicznej lub termicznej a reagentem zazwyczaj jest woda lub alkohol. Po wyczerpaniu „paliwo” podlega regeneracji poza pojazdem. Zarówno związanie wodoru jak i jego uwolnienie wymaga reakcji chemicznej. Zwykle reakcja uwalniania wodoru jest reakcją odwracalną i wymaga zmiany ciśnienia i temperatury.

3. Przegląd literatury

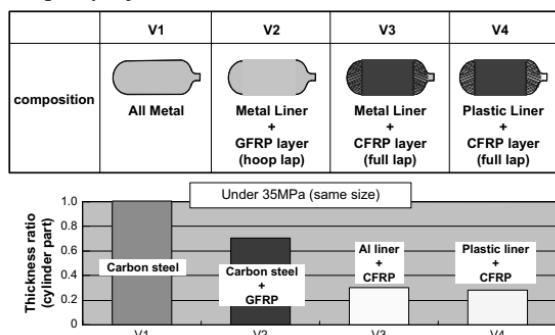
3.1 Zbiorniki ciśnieniowe wodoru gazowego

Większość pojazdów zasilanych ogniwami wodorowymi to obecnie samochody wyposażone w kompozytowy zbiornik wysokociśnieniowy. Wynika to z jego prostej budowy i łatwego

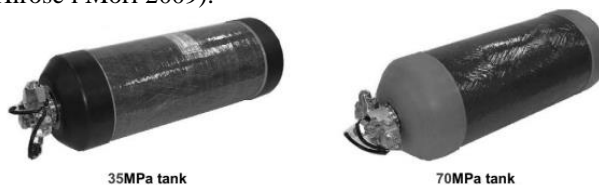
uzupełniania w wodór. Gęstość wodoru można zwiększyć sprężając go, przykładowo dolne ciepło spalania wodoru pod ciśnieniem 1 atm to $10,05 \text{ GJ/m}^3$, pod ciśnieniem 200 atm 1820 GJ/m^3 , a pod ciśnieniem 690 atm – 4500 GJ/m^3 . Zbiorniki pierwszej generacji pojazdów samochodowych zbudowane były ze stopów metali i umożliwiały przechowywanie wodoru pod ciśnieniem w zakresie od 15÷25 MPa (Rys.1). Współczesne zbiorniki to przede wszystkim zbiorniki kompozytowe często zawierające włókna węglowe lub konstrukcje aluminium-kompozytowe przechowujące gaz pod ciśnieniem do 70 MPa (Rys.2). Zależność między ciśnieniem a ilością zmagazynowanego wodoru jest nieliniowa, zwiększenie ciśnienia dwukrotnie powoduje zmagazynowanie o 40 do 50% więcej wodoru.

Istnieją cztery typy zbiorników wodoru (www.zs9elektronik.pl):

- Typ pierwszy to zbiorniki metalowe wykonane ze stali, wytrzymujące ciśnienie 200 bar, lub z aluminium, wytrzymujące maksymalne ciśnienie 175 bar.
- Typ drugi to aluminiowe zbiorniki zbrojone włóknem szklanym/aramidowym lub włóknami węglowymi. Maksymalne ciśnienia robocze dla zbiorników aluminium/włókno szklane oraz stal/włókna węglowe wynosi 263 bar, a dla zbiorników zbrojonych włóknem szklanym/aramidem – około 300 bar.
- Butle trzeciego typu wykonane są z kompozytów włókno szklane/aramid lub włókno węglowe z wkładem metalowym. Maksymalne ciśnienie wynosi odpowiednio 305 i 438 bar.
- Butle typu czwartego wykonane są z włókna węglowego pokrytego warstwą polimerową. Są w stanie wytrzymać ciśnienie powyżej 650 bar.

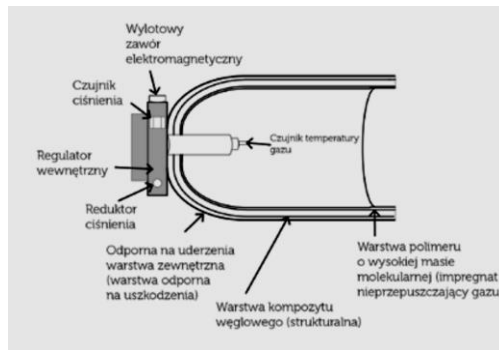


Rys. 1. Podział ciśnieniowych zbiorników na wodór (ze względu na technikę wykonania oraz grubość ścianki zbiornika) (Hirose i Mori 2009).



Rys. 2. Przykłady zbiorników ciśnieniowych (Hirose i Mori 2009).

W przypadku budowy zbiorników ciśnieniowych to warstwę wewnętrzną stanowi polimer o dużej masie cząsteczkowej zapobiegający przenikaniu wodoru (Rys.3). Zjawisko to nosi nazwę kruchości wodorowej i polega na tym że wodór pod wpływem wielu czynników dzieli się na pojedyncze atomy wodoru (wodór atomowy, H) które ze względu na swoje niewielkie wymiary, na tyle małe że pozwalają na przenikanie do struktury krystalicznej metalu, gdzie łączą się tworząc wodór cząsteczkowy. Akumulacja wodoru wewnątrz struktury metalu powoduje naprężenia wewnętrzne materiału prowadzące do jego pęknięć. Warstwa zewnętrzna stanowi skorupę o dużej wytrzymałości na rozrywanie, a między nią a polimerem znajduje się dodatkowo tkanina węglowa i żywica epoksydowa. Dodatkowo wewnątrz zbiornika znajduje się czujnik temperatury, czujnik ciśnienia oraz regulator ciśnienia. Większość obecnie produkowanych zbiorników posiada kształt cylindryczny co uzasadnione jest łatwością jego zabudowy i łatwością produkcji.

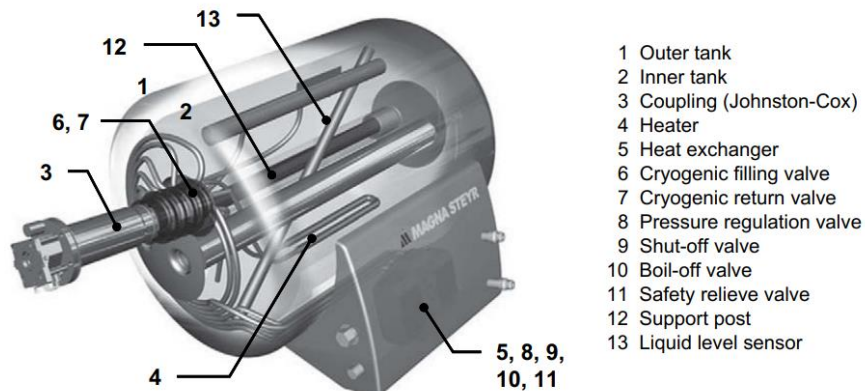


Rys. 3. Budowa ciśnieniowego zbiornika na wodór (www.zs9elektronik.pl).

Zasięg pojazdu napędzanego wodorem zależy od jego typu, pojemności zbiornika oraz ciśnienia wodoru. Zatem przy projektowaniu zbiornika optymalizacji wymagają: masa, ciśnienie, objętość oraz komfort związany z kształtem oraz umiejscowieniem zbiornika. Największy koszt przy wytwarzaniu zbiornika stanowi koszt tkaniny węglowej (bądź innej) stanowiącej wzmocnienie lekkiej konstrukcji zbiornika (Krainz i in. 2004). Poza zwiększaniem ciśnienia istnieją również inne metody na poprawę pojemności tego typu konstrukcji, a jest nimi wytwarzanie zbiorników kriociśnieniowych, gdzie obniżenie temperatury przy ustalonym ciśnieniu i objętości powoduje wzrost pojemności masowej. Chłodząc zbiornik z temperatury 20°C do temperatury ciekłego azotu (-196°C) jego pojemność wzrośnie 4-krotnie (Surygała 2008).

3.2 Zbiorniki na ciekły wodór

Gęstość wodoru można zwiększyć skraplając go (wodór występuje w fazie ciekłej po schłodzeniu do temperatury 20K), jednak potrzebny do tego jest znaczny nakład energii (30÷40% wartości energetycznej zmagazynowanego pierwiastka), podobnie zresztą jak utrzymanie go w stanie ciekłym. Koszt magazynowania wodoru zależy od objętości zbiornika, jego masy oraz materiału izolacyjnego. Zbiorniki ciekłego wodoru mają konstrukcję dwuścienneą – składają się z dwóch cylindrów o dużym stosunku średnicy do długości między którymi znajduje się superizolacja. Izolacja termiczna minimalizuje przewodność cieplną dzięki zastosowaniu wielowarstwowej izolacji próżniowej (MLI – multi-layer insulation). MLI zawiera dodatkowo cienką warstwę metalu dystansowego zapobiegającego promieniowaniu termicznemu. Dodatkowo warstwa ta zapobiega intruzji ciepła oraz konwekcji gazowej. Najnowsze zbiorniki ograniczają przepływ ciepła do kilku watów na sekundę, co przekłada się na odparowanie kilku procent wodoru dziennie. Zbiorniki tego typu wyposażone są we wskaźnik poziomu cieczy, zawór i linię bezpieczeństwa, zawór odcinający, podgrzewacz elektryczny, chłodnicę wodną, zawór zwrotny, zawór i linię doprowadzającą wodór oraz linie wyprowadzania cieczy i gazu (Hirose i Mori 2009).

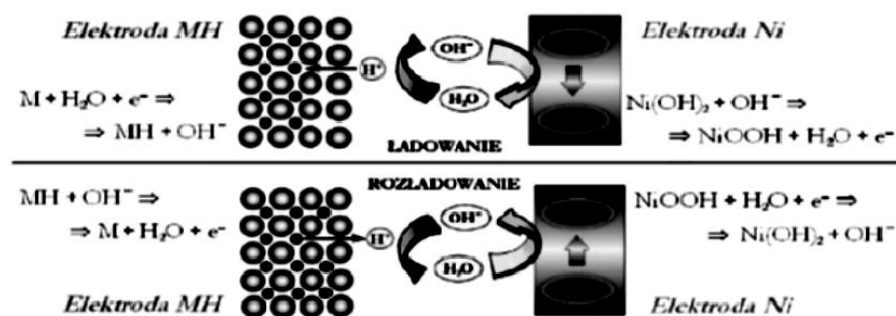


Rys. 4. Ogólny schemat zbiornika na ciekły wodór (Hirose i Mori 2009).

Zbiorniki hybrydowe z wodorem kriosprężonym, czyli zaizolowane naczynia ciśnieniowe są rozwiązaniem lżejszym niż pojemniki z wodorkami i o większej gęstości energetycznej niż zbiorniki ciśnieniowe w temperaturze pokojowej. Wymagana temperatura nie jest tak niska jak w przypadku ciekłego wodoru, a zapotrzebowanie energetyczne na skroplenie i utrzymanie gazu w stanie płynnym jest mniejsze, podobnie zresztą jak straty odparowania (Aceves i in. 2000).

3.3 Wodorki metali

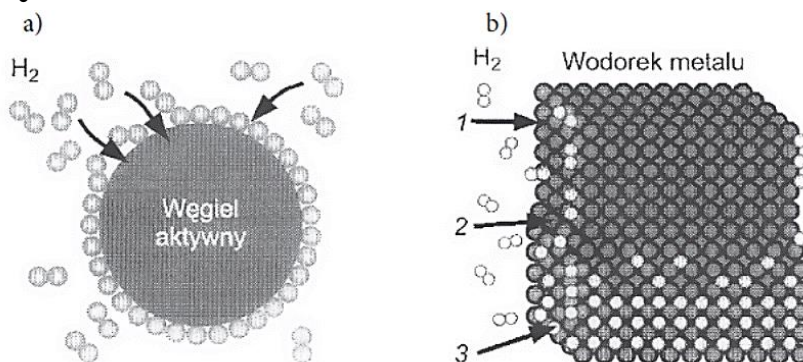
Przechowywanie wodoru w postaci wodorków metali było przedmiotem intensywnej badań ostatnich 25 lat. Wodór wchodzi w reakcje z różnymi stopami metali i fazami międzymetalicznymi tworząc wodorki (Rys.5). Możliwe jest modyfikowanie kierunku takiej reakcji chemicznej dzięki odpowiedniej kontroli temperatury i ciśnienia. Innymi słowy, wodór można naładować jonami metalicznymi, a następnie rozładować. Wodorki metali są materiałami zdolnymi do magazynowania wodoru na powierzchni ciał stałych (adsorpcja) lub wewnątrz nich (absorpcja). Dla wodoru cząsteczkowego lub atomowego zachodzi Adsorpcja, natomiast w absorpcji cząsteczki wodoru są zdysocjowane na atomy i tak przyłączane do sieci krystalicznej.



Rys. 5. Schemat procesów elektrochemicznych zachodzących podczas rozładowania i ładowania ogniwa wodorkowego (Feng i in. 2001).

Wyróżnia się osiem kategorii wodorków:

- AB₅,
- AB₂,
- AB,
- A₂B,
- związki kompleksowe,
- stopy glinu,
- połączenia międzymetaliczne,
- roztwory stałe (Surygała 2008).



Rys. 6. Adsorpcja wodoru na węglu aktywnym (a), adsorpcja wodoru w metalu (b) (Surygała 2008).

Większość wodorków metali jest niestabilna w temperaturze około 20°C i pod ciśnieniem atmosferycznym, choć istnieją takie, które są w takich warunkach stabilne. Jest nim na przykład wodorek palladu, który pochłania wodór w ilości będącej 900-krotnością swojej objętości. Jednak cena palladu uniemożliwia jego wykorzystanie na skalę przemysłową. Pierwsze szerokie zastosowanie wodorków metali obejmowało wykorzystanie wodorku niklu, który obecnie zastępowany jest przez akumulatory niklowo-kadmowe.

Wodór może reagować z wieloma metalami i ich stopami, a tworzenie wodorku metalu polega na adhezji gazowego wodoru na powierzchni metalu i następnie dyfuzji atomu wodoru do wewnętrznej struktury metalu. Wodór jest przechowywany wśród węzłowej sieci krystalicznej atomów metalu. Reakcji tworzenia wodorków towarzyszy wydzielanie się dużej ilości ciepła (reakcja egzotermiczna). Uwolnienie wodoru z sieci krystalicznej metalu zachodzi w określonej temperaturze i ciśnieniu w zależności od stosowanej technologii. Przechowywanie wodoru w postaci wodorków metali ma wiele zastosowań, lecz większość z nich jest nadal ograniczona z powodu niewielkiej masy wodoru, która jest wiązana przez metal (w wodorkach metali wodór stanowi tylko 2% masy) (Surygała 2008).

W celu skutecznego uwalniania wodoru, wodorki metali powinny spełnić następujące kryteria:

- Zdolność do przechowywania znacznej ilości wodoru w przeliczeniu na jednostkę masy i objętości. Właściwość ta decyduje o ilości dostępnej energii.
- Uwalnianie wodoru przy niewielkim wkładzie energii.
- Nie mogą emitować dużej ilości ciepła w trakcie tworzenia wodorku oraz w trakcie wprowadzania i uwalniania wodoru.
- Zapewnić długoterminową stabilność w obecności tlenu i wysokiej wilgotności.
- Niewielki koszt produkcji, a proces wprowadzania i uwalniania wodoru powinien być bezpieczny.

Grupą ciekawych i intensywnie badanych materiałów są alanaty i amidy litu. Alanaty (AlH₄) mogą uwalniać więcej wodoru niż konwencjonalne wodorki metali. Alanaty uwalniają około 3,7% wagowo wodoru w temperaturze 33°C, a inne wodorki 1,8 % w temperaturze 110°C. Alanaty mogą magazynować wodór w sposób odwracalny w obecności katalizatorów promotowanych tytanem. Intensywnie badane są także kompleksy amidowo litowe, które umożliwiają przechowywanie około 6,5% wagowo wodoru z możliwością zwiększenia tej ilości nawet do 10%. Reakcje tworzenia tych wodorków przebiegają jednak w wysokich temperaturach; można je obniżyć do 220°C przy podwyższeniu ciśnienia oraz przez obecności magnezu (www.zs9elektronik.pl).

3.4 Materiały węglowe

Materiały węglowe obejmują: węgle aktywne, nanorurki węglowe, aerozele, nanowłókna. Obecnie największe zainteresowanie ośrodków badawczych obejmują nanorurki, na które zwrócono uwagę 15 lat temu ze względu na ich unikalną strukturę. Nanorurki mają strukturę sześciokątnej sieci atomów węgla w kształcie cylindra o średnicy około kilku nanometrów, a długości kilkudziesięciu nanometrów. Nanorurki o strukturze otwartej i heksagonalnym uporządkowaniu wykazują największą pojemność wodoru spośród wszystkich materiałów węglowych (Takeichi i in. 2003). Absorbowany wodór kondensuje wewnątrz nanorurek lub tworzy warstwę na ich strukturze. Gęstość zgromadzonego wodoru zależy w sposób liniowy od średnicy nanorurki, dla średnic większych niż 0,671 nm wynosi 1,5% *m/m* (stężenie procentowe masowe), ale zależy również od odległości między nanorurkami. Natomiast maksymalna absorpcja powierzchniowa w warstwie monomolekularnej wynosi 3,3% *m/m*. Absorpcja wodoru rośnie wraz z obniżaniem temperatury i podwyższaniem ciśnienia. Nanorurki o średnicy 2,2 nm w temperaturze 77 K i pod ciśnieniem 10 MPa mają pojemność absorpcyjną na poziomie 11% *m/m*. Nanorurki wzbogacane metalami są zdolne do magazynowania wodoru w dużych ilościach w temperaturze pokojowej i pod ciśnieniem atmosferycznym. Ciągłe trwają prace nad wzrostem pojemności nanorurek w wodór i nie określono jeszcze jej maksymalnej wartości (Züttel i in. 2002).



Rys. 7. Budowa nanorurek węglowych: po lewej jednowarstwowych (SWNT) , po prawej wielowarstwowych (MWNT) (www.zs9elektronik.pl).

3.5 Chemiczne magazynowanie wodoru

W tej technologii wodór otrzymywany jest na drodze reakcji chemicznej – oddziaływania wodorem lub wodą na połączenia zawierające wodór. Największym problemem tej technologii jest nieodwracalność procesu tzn. ponowne zatankowanie wodoru odbywa się poza pojazdem. Typowymi materiałami które umożliwiają chemiczne magazynowanie wodoru są wodorki metali lekkich. Występują one na ujemnym stopniu utleniania (-1) w związku i poddaje się je reakcji ze związkiem, w którym wodór występuje na dodatnim (+1) stopniu utleniania (np. H₂O, NH₃, H₂S) (Swesi i in. 2007).

Aby powyższy układ można było stosować wymagane są następujące warunki:

- układ ma być termodynamicznie samorzutny i kinematycznie sterowalny,
- reagenty powinny być proste i łatwo dostępne,
- wytwarzany wodór powinien mieć czystość wymaganą przez ogniwa paliwowe (Surygała 2008).

Hydroliza wodorków to reakcje samorzutne, egzotermiczne i nieodwracalne, choć niektóre wodorki kompleksowe jak np. alanat sodu (NaAlH₄), wykazują odwracalność w obecności katalizatorów tytanowych (Fakioglu i in. 2004).

Tab. 1. Przykłady wytwarzania wodoru przez hydrolizę wodorków (Surygała 2008).

Reakcja	Wydajność H ₂	
	% m/m	kWh/kg
LiH+H ₂ O→LiOH+H ₂	7,7	1,46
NaH+H ₂ O→NaOH+H ₂	4,8	0,91
CaH ₂ +2H ₂ O→Ca(OH) ₂ +2H ₂	5,2	0,99
LiAlH ₄ +4H ₂ O→LiOH+Al(OH) ₃ +4H ₂	7,3	1,38

Oprócz wodorków metali lekkich duże znaczenie jako połączenia magazynujące wodór mają borowodorki, a zwłaszcza LiBH₄ i NaBH₄. W wyniku kontrolowanej egzotermicznej reakcji NaBH₄ i H₂O w temperaturze 20°C i pod ciśnieniem atmosferycznym wydziela się wodór, bez reakcji ubocznych i niebezpiecznych produktów. Borowodorek sodu ma największą szansę komercjalizacji ze względu na łagodne warunki przebiegu odwracalnych reakcji magazynowania i uwalniania H₂ ze związku niskocząsteczkowego (Zhang i in. 2006).

Tab. 2. Zawartość wodoru w niektórych borowodorkach (Surygała 2008).

Wodorek	Zawartość H ₂ , % m/m
NaBH ₄	10,6
Al(BH ₄) ₃	16,8
Ca(BH ₄) ₂	11,5
Zr(BH ₄) ₃	8,8

4. Podsumowanie

Zagrożenie ze strony wyczerpania zasobów paliw kopalnych, jak i pogłębienie się efektu cieplarnianego stymulują poszukiwania alternatywnego zasilania pojazdów w postaci wodoru jak i innego rodzaju biopaliw. Wodorowe ogniwa paliwowe będą z pewnością następcą tradycyjnego silnika spalinowego, a samochody elektryczne stanowią jedynie generację przejściową. Z czasem będzie możliwe obniżenie kosztów produkcji ogniw paliwowych oraz zbiorników na wodór co pozwoli na znaczne upowszechnienie się tej technologii.

5. Literatura

- Aceves SM, Martinez-Frias J, Garcia-Villazana O (2000) Analytical and experimental evaluation of insulated pressure vessels for cryogenic hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* 25(11): 1075–1085.
- Fakioglu E, Yurum Y, Veziroglu TN (2004) A review of hydrogen storage system based on boron and its compounds. *International Journal of Hydrogen Energy* 29(13): 1371–1376.
- Feng F, Geng M, Noorthwood DO (2001) Electrochemical behavior of intermetallic-based metal hydrides used in Ni/metal hydride (MH) batteries: a review. *International Journal of Hydrogen Energy* 26: 725–734.
- Hirose K, Mori D (2009) Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. *International journal of hydrogen energy* 34: 4569–4574.
- Krainz G, Hödl P, Hofmeister F (2004) Automotive production of liquid hydrogen storage systems. *The International German Hydrogen Energy Congress*: 1-6.
- Surygała J (2008) Wodór jako paliwo. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Swesi Y, Ronze D, Pitault I et al. (2007) Purification process for chemical storage of hydrogen for fuel cell vehicles applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 5059–5066.
- Takeichi N, Senoh H, Yokota T et al. (2003) Hybrid hydrogen storage vessel. *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 1121–1129.
- Zhang Q, Smith G, Wu Y et al. (2006) Catalytic hydrolysis of sodium borohydride in auto-thermal fixed-bed reaktor. *International Journal of Hydrogen Energy* 31: 961–965.
- Züttel A, Sudan P, Mauron P et al. (2002) Hydrogen storage in carbon Nanostructures. *International Journal of Hydrogen Energy* 27(2): 203-212.
- www.zs9elektronik.pl/inne/karolina/podr_6_magazynowanie_i_transport_wodoru.pdf, data odczytu 19.04.2021.

2. Wykorzystanie metody Sztywnych Elementów Skończonych do wyznaczenia drgań swobodnych belki utwierdzonej

The use of the Rigid Finite Elements method to determine the free vibrations of a fixed beam

Cieślak Kacper⁽¹⁾, Śliwka Mateusz⁽²⁾, Kubok Tymoteusz⁽³⁾

⁽¹⁾ Katedra Samochodów i Silników, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

⁽²⁾ Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

⁽³⁾ Kierunek Automatyka i Robotyka, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Cieślak Kacper: kcieslar@ath.bielsko.pl

Słowa kluczowe: drgania własne, SES, metody numeryczne

Streszczenie

W niniejszej pracy zawarto opis modelowania drgań swobodnych utwierdzonej belki za pomocą metody sztywnych elementów skończonych (MSES). Obecnie występuje wiele metod numerycznych służących do obliczeń konstrukcji o złożonej geometrii, spośród których dominuje metoda elementów skończonych. Zastąpiła ona popularną kiedyś metodę różnic skończonych. MSES charakteryzuje się dosyć skomplikowanym aparatem matematycznym względem popularnych obecnie metod obliczeniowych jednak wydajność obliczeniowa gotowego programu przewyższa pozostałe. Obecnie metoda ta nie jest na tyle popularna by znaleźć komercyjne zastosowanie, jednak w naszym kraju są ośrodki, które ją wykorzystują. MSES cieszy się głównie zainteresowaniem ośrodków naukowych m.in. z Gdańska i Bielska-Białej.

1. Wstęp

Pierwsze wzmianki o Metodzie Sztywnych Elementów Skończonych (MSES) sięgają końca lat sześćdziesiątych (Kruszewski 1969). Pierwszy raz MSES została zastosowana do obliczeń drgań swobodnych urządzeń okrętowych na podkładach sprężystych (Kruszewski i in. 1999). Metoda SES bazuje na zupełnie innych założeniach niż metoda elementów skończonych, która została rozpowszechniona w latach sześćdziesiątych (Holland i Bell 1969), (Rakowski 1996), (Waszczyszyn i in. 1990), (Zienkiewicz 1972). Metoda SES w ogólności polega na przygotowaniu modelu obliczeniowego, składającego się z nieodkształcalnych elementów skończonych (SES), które łączone są za pomocą elementów sprężysto-tłumiących (Kruszewski i in. 1999). Metoda SES stosowana jest w kilku różnych sformułowaniach (Adamiec-Wójcik i Grinke 2017). W ujęciu klasycznym pozycja i-tego SESa opisywana jest za pomocą sześciu współrzędnych uogólnionych (Kruszewski i in. 1975). Rozwijanie metody sztywnych elementów skończonych doprowadziło do powstania uproszczonego zapisu nazywanego modyfikacją (Wittbrodt 2013). Pierwsza modyfikacja polega na uproszczeniu modelu obliczeniowego do opisu ruchu za pomocą trzech współrzędnych uogólnionych, a układ współrzędnych i-tego SES-a umieszcza się w poprzedzającym go elemencie sprężysto-tłumiącym (Adamiec-Wójcik i Grinke 2017), (Wittbrodt 2006). W drugiej modyfikacji, w porównaniu do metody klasycznej, wprowadzono dodatkowy element sprężysty w środku elementu sztywnego, dzięki któremu można uwzględnić podatność wzdłużną ustroju mechanicznego (Adamiec-Wójcik i Grinke 2017). Ponadto w tej modyfikacji eliminuje się ścinanie w elementach (Adamiec-Wójcik i in. 2013).

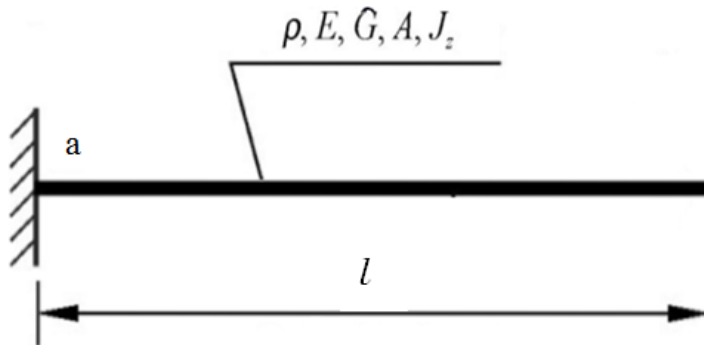
Zagadnienie wyznaczenia częstości drgań własnych metodą sztywnych elementów skończonych sprowadza się do realizacji kolejnych etapów:

- a) Wyznaczenie masy oraz masowego momentu bezwładności dla każdego sztywnego elementu skończonego względem punktu środkowego,

- b) sformułowanie wektora współczynników bezwładności,
- c) wyznaczenie macierzy sztywności,
- d) rozwiązanie zagadnienia własnego, czyli wyznaczenie wektora wartości własnych.

2. Materiały i Metody

Analizie została poddana belka wspornikowa, której schemat poglądowy przedstawiono na Rys.1. Pierwsze cztery częstości drgań własnych belki pryzmatycznej sztywno utwierdzonej w jednym końcu wyznaczone zostały za pomocą dwóch metod numerycznych oraz analitycznie. Wśród metod numerycznych zastosowane zostały metoda elementów skończonych oraz metoda sztywnych elementów skończonych.



Rys.1. Rysunek poglądowy analizowanej belki.

Wyjaśnienie oznaczeń widocznych na schemacie belki (Rys.1.):

ρ – gęstość materiału belki,

E, G – moduł Younga i moduł Kirchhoffa materiału belki,

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego belki,

J_z – moment bezwładności przekroju poprzecznego belki względem osi obojętnej względem osi obojętnej.

Wymiary geometryczne i właściwości fizyczne analizowanej belki:

$$l = 1\text{ m}$$

$$b = 0,012\text{ m}$$

$$h = 0,02\text{ m}$$

$$E = 2,06 \cdot 10^{11}\text{ MPa}$$

$$G = 8,34 \cdot 10^{10}\text{ MPa}$$

$$m = 2\text{ kg}$$

$$\rho = 8333,334 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,012 \cdot 0,02^3}{12} = 8 \cdot 10^{-9}\text{ m}^4$$

$$A = b \cdot h = 0,012 \cdot 0,02 = 2,4 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$$

$\chi=1,2$ dla przekroju prostokątnego (współczynnik kształtu przekroju poprzecznego belki uwzględniający nierównomierny rozkład naprężeń stycznych).

3. Wyniki i dyskusja

Obliczenia częstości drgań własnych przeprowadzone zostały z wykorzystaniem różnych metod obliczeniowych. Wyniki tych obliczeń zestawione zostały w kolejnych podrozdziałach pracy.

3.1 Obliczenia analityczne

Częstości drgań własnych belki dla drgań giętnych metodą analityczną wyznacza się ze wzoru (1) (Osiński 1978).

$$\omega_n = \frac{\alpha_n^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \quad (1)$$

gdzie:

n – numer częstości drgań własnych,

$\alpha_1 = 1.875$, $\alpha_2 = 4.694$, $\alpha_n = (n-0.5)\pi$ dla $n = 3, 4, \dots, \infty$,

Poniżej zamieszczono cztery pierwsze częstości drgań własnych - wyrażenia (2-5).

$$\omega_1 = \frac{\alpha_1^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} = \frac{1,875^2}{2\pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{8333,334 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 16,062 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$\omega_2 = \frac{\alpha_2^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} = \frac{4,694^2}{2\pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{8333,334 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 100,663 \text{ Hz} \quad (3)$$

$$\omega_3 = \frac{\alpha_3^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} = \frac{((3-0.5)\pi)^2}{2\pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{8333,334 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 281,815 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$\omega_4 = \frac{\alpha_4^2}{2\pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} = \frac{((4-0.5)\pi)^2}{2\pi \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^{11} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{8333,334 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 553,357 \text{ Hz} \quad (5)$$

3.2 Metoda Elementów Skończonych (MES)

Wyznaczenie częstości drgań własnych belki utwierdzonej zostało przeprowadzone również z wykorzystaniem programu FEMAP. Pracę w programie rozpoczęto od stworzenia bryły odpowiadającej modelowanej belce. Następnie zdefiniowano materiał (stal o stałych materiałowych podanych w punkcie 2). Kolejny etap sprowadził się do określenia wielkości elementu skończonego $\Delta x = 0,005$ m, po czym model został zdyskretyzowany ośmiowęzłowymi elementami skończonymi typu bryłowego. Przyjęto warunki brzegowe poprzez zamodelowanie utwierdzenia belki na jednym końcu (węzłom w tym miejscu odebrano wszystkie stopnie swobody) oraz dokonano wyboru analizy numerycznej na normal modes/eigenvalue. Pierwszą postać drgań własnych utwierdzonej belki, wyznaczonej za pomocą MES przedstawiono na Rys.2.



Rys.2. Pierwsza postać drgań własnych utwierdzonej belki.

Pierwsza częstość drgań własnych wynosi 16,276 Hz. Wartości czterech pierwszych częstości drgań własnych wyznaczonych w symulacji numerycznej opartej na MES zestawiono w Tab.1.

Tab.1. Cztery pierwsze częstości drgań własnych.

Postać	Częstość
	Hz
f_{1MES}	16,276
f_{2MES}	101,818
f_{3MES}	284,369
f_{4MES}	553,733

3.3 Metoda Sztywnych Elementów Skończonych (MSES)

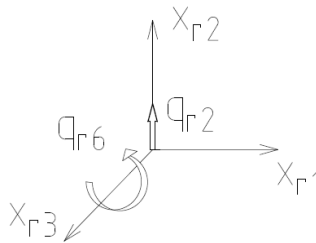
Równanie różniczkowe drgań swobodnych wyprowadza się z ogólnego równania różniczkowego ruchu. Przy założeniu, że nie ma oddziaływań zewnętrznych na układ, równanie przyjmuje postać (6).

$$A \cdot \ddot{q} + B \cdot \dot{q} + C \cdot q = 0 \quad (6)$$

W obliczaniu drgań swobodnych większości konstrukcji można pominąć wpływ tłumienia. Pominięcie tłumienia znacznie upraszcza proces obliczeń. Wówczas równanie (6) redukuje się do postaci (7).

$$A \cdot \ddot{q} + C \cdot q = 0 \quad (7)$$

Wyznaczenia częstości drgań własnych z wykorzystaniem MSES sprowadziło się do zagadnienia płaskiego. Pierwsze cztery częstości własne odpowiadają drganiom giętnym, stąd belkę można podzielić na sztywne elementy skończone o dwóch stopniach swobody. Każdy SES może przemieszczać się wzdłuż osi x_{r2} i obracać względem osi x_{r3} , co przedstawione zostało na Rys.3 (Kruszewski 1975).



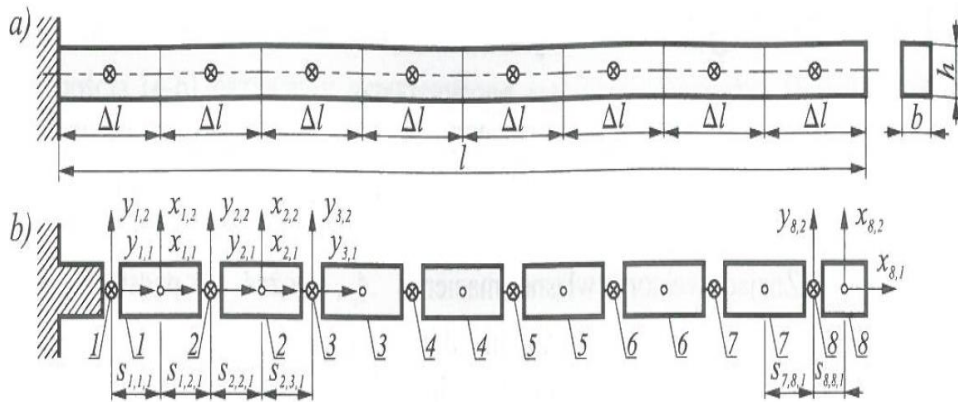
Rys.3. Współrzędne uogólnione SES z uwzględnieniem dwóch stopni swobody: przemieszczenia wzdłuż osi x_{r2} i obrotu wzdłuż osi x_{r3} .

Analizowaną belkę o długości 1 m podzielono na 8 równych części, stąd długość elementu Δl wyniosła 0,125 mm.

Własności sprężyste zostają skupione w środkach odcinków. Otrzymuje się w ten sposób osiem elementów sprężysto-tłumiących (EST), których współczynniki sztywności wyrażają formuły (8) i (9).

$$C_{1,2} = C_{2,2} = \dots = C_{8,2} = \frac{GA}{\chi \Delta l} = 1,334 \cdot 10^8 \text{ N/m} \quad (8)$$

$$C_{1,6} = C_{2,6} = \dots = C_{8,6} = \frac{EI}{\Delta l} = 1,318 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (9)$$



Rys.4. Belka wspornikowa: a) podział pierwotny – podział belki na 8 równych odcinków (w geometrycznym środku każdego prostokąta są skupiane własności sprężyste odcinków belki o długości Δl), b) podział wtórny – podział belki na SES (Kruszewski 1999).

Miedzy elementami sprężystymi znajdują się sztywne elementy skończone. Długość pierwszego i ostatniego SESa wynosi $\Delta l/2$, natomiast pozostałych elementów – Δl . Ze względu na sztywne utwierdzenie belki pierwszy SES nie jest uwzględniany w ruchu i zostaje pominięty. SES ten traktowany jest jako ostoja. W ruchu bierze udział osiem SES-ów (Rys.4).

Wartości współczynników bezwładności SES zostały przedstawione poniżej (10-13).

$$A_{1,2} = A_{2,2} = \dots = A_{7,2} = \frac{m}{8} = 0,25 \text{ kg} \quad (10)$$

$$A_{8,2} = A_{1,2} = 0,125 \text{ kg} \quad (11)$$

$$A_{1,6} = A_{2,6} = \dots = A_{7,6} = A_{1,2} \left(\frac{\Delta l^2}{12} + \frac{J}{A} \right) = 3,339 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (12)$$

$$A_{8,6} = A_{8,2} \left(\frac{(0,5\Delta l)^2}{12} + \frac{J}{A} \right) = 4,490 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (13)$$

Współrzedne zamocowania elementów sprężysto-tłumiących do sztywnych elementów skończonych wzdłuż osi x_{r1} zostały zestawione poniżej (14-16), przy czym współczynniki zamocowania wzdłuż osi x_{r2} wynoszą zero.

$$s_{1,1,1} = s_{2,2,1} = \dots = s_{7,7,1} = -0,0625 \text{ m} \quad (14)$$

$$s_{1,2,1} = s_{2,3,1} = \dots = s_{7,8,1} = 0,0625 \text{ m} \quad (15)$$

$$s_{8,8,1} = -0,03125 \text{ m} \quad (16)$$

Ponieważ wszystkie osie układów x_{r1}, x_{r2}, x_{r3} i układów y_{k1}, y_{k2}, y_{k3} są równoległe, nie ma potrzeby podawania współczynników kierunkowych.

Następnie tworzy się bloki macierzy sztywności (17) i (18) zgodne z obciążeniami (Rys.3):

a) C_{rrk} dla $k = 2; r=1; p=1$

$$\begin{bmatrix} C_{k2} & C_{k2}S_{rk1} \\ C_{k2}S_{rk1} & C_{k2}S_{rk1}^2 + C_{k6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,334 \cdot 10^8 & 1,334 \cdot 10^8 \cdot 0,0625 \\ 1,334 \cdot 10^8 \cdot 0,0625 & 1,334 \cdot 10^8 \cdot 0,0625^2 + 1,318 \cdot 10^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,334 \cdot 10^8 & 8,340 \cdot 10^6 \\ 8,340 \cdot 10^6 & 5,344 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

b) C_{ppk} dla $k = 2; r=1; p=2$

$$\begin{bmatrix} -C_{k2} & -C_{k2}S_{pk1} \\ -C_{k2}S_{pk1} & -C_{k2}S_{pk1}^2 + C_{k6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,334 \cdot 10^8 & -1,334 \cdot 10^8 \cdot 0,0625 \\ -1,334 \cdot 10^8 \cdot 0,0625 & -1,334 \cdot 10^8 \cdot (-0,0625) \cdot 0,0625 + 1,318 \cdot 10^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,334 \cdot 10^8 & 8,340 \cdot 10^6 \\ -8,340 \cdot 10^6 & 5,081 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Następnie dokonuje się agregacji macierzy sztywności C_{ppk} i C_{rrk} (dla pojedynczego EST). Macierz sztywności C_k pojedynczego EST przedstawiono poniżej (19).

$$C_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 \dots 0 & C_{rrk} & 0 \dots 0 & C_{ppk} & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 \dots 0 & C_{ppk} & 0 \dots 0 & C_{rrk} & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{pasmo nr } r \\ \\ \\ \leftarrow \text{pasmo nr } p \\ \\ \end{matrix} \quad (19)$$

$\uparrow \qquad \qquad \uparrow$
pasmo nr r *pasmo nr p*

W kolejnym kroku tworzy się bloki macierzy współczynników bezwładności dla układów złożonych z SES zgodne z obciążeniami (Rys.3). Poniżej przedstawiono pojedynczy blok macierzy współczynników bezwładności A_r (20).

$$\begin{bmatrix} A_{r2} & 0 \\ 0 & A_{r6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,25 & 0 \\ 0 & 3,339 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (20)$$

W podobny sposób agreguje się macierz współczynników bezwładności dla sztywnych elementów skończonych.

Wyznaczenie częstości i postaci drgań własnych wymaga rozwiązania tzw. zagadnienia własnego z algebry liniowej – wyrażenia (21) (Markiewicz 2014).

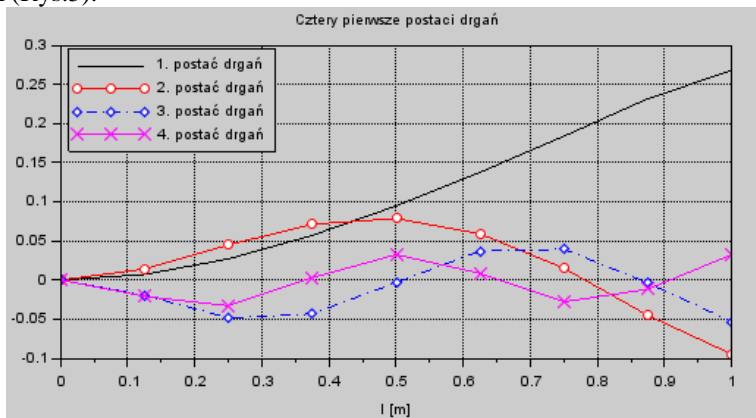
$$\left. \begin{aligned}
 A \cdot \ddot{q} + C \cdot q &= 0 \quad / \cdot A^{-1} \cdot (.) \\
 A^{-1} \cdot A \cdot \ddot{q} + A^{-1} \cdot C \cdot q &= 0 \\
 A_c &= A^{-1} \cdot C \\
 I \cdot \ddot{q} + A_c \cdot q &= 0 \\
 (A_c - I \cdot \lambda)q &= 0 \\
 \det(A_c - I \cdot \lambda) &= 0 \\
 \lambda &= \omega_o^2 \\
 \omega_o &= \sqrt{\lambda} \\
 f &= \frac{\omega_o}{2\pi}
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Wyznaczone z wykorzystaniem Metody Sztywnych Elementów Skończonych częstotliwości drgań własnych zestawione zostały w Tab.2.

Tab.2. Cztery pierwsze częstotliwości drgań własnych.

Postać	Częstość
	Hz
$f_{1\text{MSES}} - 8 \text{ el.}$	16,116
$f_{2\text{MSES}} - 8 \text{ el.}$	101,709
$f_{3\text{MSES}} - 8 \text{ el.}$	286,065
$f_{4\text{MSES}} - 8 \text{ el.}$	561,447

Kolejne cztery postacie częstotliwości drgań własnych zostały przedstawione w formie charakterystyk (Rys.5).



Rys.5. Cztery pierwsze postaci drgań własnych belki wyznaczone z wykorzystaniem metody SES.

4. Wnioski

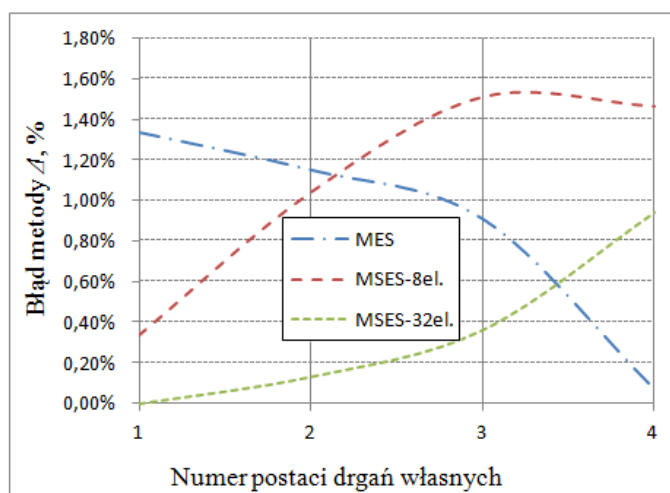
Poprawność skryptu (programu obliczeniowego) została zweryfikowana za pomocą wzorów analitycznych oraz metody elementów skończonych. Wyniki czterech pierwszych częstotliwości drgań własnych wyznaczone na podstawie wzorów analitycznych, symulacji MES oraz MSES zestawiono w Tab.3. Obliczenia dla metody SES przeprowadzono na bazie dwóch modeli z różną siatką elementów skończonych. Pierwszy model składał się z 8 elementów, a drugi z 32 elementów.

W tabelicy zestawiono również błędy metod numerycznych względem wyników uzyskanych ze wzorów analitycznych.

Tab.3. Zestawienie wyników częstości drgań własnych różnymi metodami.

Częstość drgań własnych							
Postać	Wzory analitycz.	MES		MSES			
				8 elementów		32 elementy	
	f_n	f_{nMES}	Δf_{nMES}	$f_{nMSES-8el.}$	$\Delta f_{nMSES-8el.}$	$f_{nMSES-32el.}$	$\Delta f_{nMSES-32el.}$
	Hz	Hz	%	Hz	%	Hz	%
1	16,062	16,276	1,33%	16,116	0,34%	16,062	0,00%
2	100,66	101,818	1,15%	101,709	1,04%	100,53	0,13%
3	281,82	284,369	0,91%	286,065	1,51%	280,797	0,36%
4	553,36	553,733	0,07%	561,447	1,46%	548,172	0,94%

Uzyskane wyniki częstości drgań własnych wyznaczone metodami numerycznymi są zbliżone do wyników opartych na zworach analitycznych, a błąd maksymalny wynosi 1,51%. Wykres zmienności błędu każdej z metod numerycznych w funkcji kolejnej postaci przedstawiono na Rys.6.



Rys.6. Wykres błędów różnych metod w zależności od postaci drgań własnych.

Na podstawie otrzymanych wyników (Rys.6) można stwierdzić, że dokładność metod numerycznych w tym zagadnieniu jest zbliżona do siebie - w każdym przypadku błąd nie przekroczył 2%. W metodzie SES uzyskuje się dokładniejsze wyniki wraz ze zwiększeniem ilości elementów. Nakłady pracy konieczne do przygotowania skryptu, w którym wyznacza się częstości drgań własnych metodą SES są nieuzasadnione w przypadku gdy jest potrzeba obliczenia jednego konkretnego zadania. Przygotowanie skryptu jest uzasadnione w przypadku przeprowadzania wielu analiz dla urządzeń nośnych o różnych wymiarach i przekrojach, gdyż w bardzo prosty sposób można te dane modyfikować w zadaniu.

5. Literatura

Adamiec-Wójcik I, Brzozowska L, Wojciech S (2013) Modification of the rigid finite element method in modeling dynamics of lines and ropes. The Archive of Mechanical Engineering 60(3): 409-429.

- Adamiec-Wójcik I, Grinke L (2017) Metoda sztywnych elementów skończonych i jej modyfikacje. Modelowanie inżynierskie 62: 1-11.
- Holland I, Bell H (1969) Finite element methods in stress analysis. Tapir Forlag, Trondheim.
- Kruszewski J, Gawroński W, Wittbrodt E i in. (1975) Metoda sztywnych elementów skończonych. Arkady, Warszawa.
- Kruszewski J, Sawiak S, Wittbrodt E (1999) Metoda sztywnych elementów skończonych w dynamice konstrukcji. WNT, Warszawa.
- Kruszewski J (1969) Application of finite element method to calculation of ship structure vibrations. Theory, European Shipbuilding 3: 38-42.
- Markiewicz T, Szmurło R, Wincenciak S (2014) Metody numeryczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Osiński Z (1978) Teoria drgań. PWN, Warszawa.
- Rakowski G (1996) Metoda elementów skończonych – wybrane problemy. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Waszczyszyn Z, Cichoń C, Radwańska M (1990) Metoda elementów skończonych w stateczności konstrukcji. Arkady, Warszawa.
- Wittbrodt E, Adamiec-Wójcik I, Wojciech S (2006) Dynamics of flexible multibody systems rigid finite element method. Springer, Berlin.
- Wittbrodt E, Szczotka M, Maczyński A i in. (2013) Rigid finite element method in analysis of dynamics of offshore structures. Springer, Berlin.
- Zienkiewicz OC (1972) Metoda elementów skończonych. Arkady, Warszawa.

3. Mechanizmy obronne komórek bakteryjnych w kontakcie ze srebrem oraz miedzią

Mechanisms of bacterial cells resistance to silver or copper

Mateusz Dubicki, Paulina Rokicka-Konieczna

Katedra Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Szczeciński w Szczecinie

Opiekun naukowy: dr Paulina Rokicka-Konieczna

Mateusz Dubicki: mateusz.dubicki@zut.edu.pl

Słowa kluczowe: pompy transportujące, oporność na metale szlachetne/półszlachetne, *E. coli*

Streszczenie

Powszechne stosowanie antybiotykoterapii spowodowało wzrost oporności bakterii na antybiotyki prowadząc tym samym do problemu na skalę globalną. Nanomateriały wydają się być obiecującym - na miarę czasów narzędziem, które w sposób bezpośredni rozwiążą problem wielolekooporności bakterii. Metale szlachetne takie jak srebro, czy półszlachetne – jak miedź w postaci nanocząstek tlenków metali są jednymi z częściej badanych nanomateriałów. W badaniach *in vitro* uzyskiwane są obiecujące wyniki potwierdzające skuteczność przeciwdrobnoustrojową względem szerokiego spektrum gatunków opornych. Niektóre z mechanizmów obronnych bakterii związane są z odpychaniem elektrostatycznym, pompami jonowymi czy pozakomórkową ekspresją oraz adaptacją biofilmów, czy prowadzeniem mutacji. Metody nanotechnologii są w stanie zwiększyć kliniczną trwałość działania przeciwko infekcjom, w szczególności powstałym w wyniku zanieczyszczeń powietrza. Unikalne właściwości fizykochemiczne nanocząstek mogą zapobiegać mechanizmom obronnym u bakterii.

1. Wstęp

Zapobieganie rozprzestrzenianiu się chorób przenoszonych przez patogenne mikroorganizmy poprzez stosowanie różnych środków o właściwościach biobójczych jest praktykowane od dawna. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat popularne stały się preparaty zawierające nanocząstki metali takie jak np. srebro czy miedź (Hobman i in. 2015). Metale te są coraz częściej wykorzystywane ze względu na ich biobójcze właściwości wraz z szerokim spektrum działania przeciwbakteryjnego, przeciwwirusowego oraz przeciwgrzybicznemu i przeciwdrożdżakowym. Cu wraz z jej stopami jest stosowane na powierzchniach szpitalnych, podczas gdy srebro stosuje się w urządzeniach mieszkalnych, jako składnik opatrunków na rany (przy oparzeniach) czy np. cewnikach. W zastosowaniach poza-klinicznych miedź wykorzystywana jest w ogrodnictwie, jako pestycyd oraz środek przeciwdrobnoustrojowy lub dodatek do pasz zwierzęcych. Suplementacja miedzią w diecie, lub jako dodatek paszowy może prowadzić do wystąpienia zjawiska oporności bakterii na ten półmetal. Srebro zaś uzyskało komercyjne zastosowanie w domowych systemach oczyszczania wody, aplikacjach higieny osobistej, opatrunkach, jako składnik ubrań oraz farb. Nanocząstki srebra to środek przeciwdrobnoustrojowy w filtrach do oczyszczania wody i powietrza, oraz w urządzeniach biomedycznych, które uwalniają niski poziom jonów srebra w celu zapewnienia ochrony przeciwbakteryjnej (Poole i in. 2017). Biobójcze mechanizmy metali obejmują uszkodzenia błony, ściany komórkowej, wewnętrznych składników cytoplazmatycznych, uwalniania jonów, uszkodzenia DNA oraz doprowadzenia do stresu oksydacyjnego. Bakterie wchodząc w interakcję z nanocząstkami Ag lub Cu nie są w stanie zawsze generować oporności. Niektóre mechanizmy oporności obejmują odpychanie elektrostatyczne, pompy jonowe, ekspresje macierzy pozakomórkowych, mutacje oraz adaptację biofilmu (Niño-Martínez i in. 2019).

Pomimo, iż komórki mają zdolność do przeprowadzenia takich procesów jak metylacja lub demetylacja metali, będących głównie produktami ubocznymi normalnego metabolizmu

komórkowego, to również są zdolne do odpowiedzi na działanie leków czy środków przeciwdrobnoustrojowych, czyli odpowiedzi na stres. Przyczynia się to do występowania przypadkowej tolerancji lub odporności na jony metali oraz uruchomienia mechanizmów naprawczych. Dochodzi do wytwarzania specyficznych białek transportowych bądź kompleksów białkowych, które zmieniają jony metalu w formy mniej toksyczne dla komórki bakteryjnej. Może także dochodzić do zakodowania przez białka mechanizmu odporności, a funkcje te związane są z białkami opiekuńczymi (chaperony) jonów metalu dla transporterów jonów metalu lub reduktazy jonów metalu (Hobman i in. 2015).

2. Opis zagadnienia

W pracy przeglądowej omówione zostaną mechanizmy odporności bakterii wobec srebra oraz miedzi. Celem jest przedstawienie mechanizmów odporności na poziomie molekularnym oraz strategii ochronnych stosowanych przez bakterie.

3. Przegląd literatury

3.1 Oporność bakteryjna na działanie srebra

Srebro od dawna jest znane ze swoich właściwości biobójczych. Dobre właściwości antybakteryjne oraz rozwój nanotechnologii sprawiły, że nanocząstki srebra są coraz szerzej stosowane w wielu gałęziach przemysłu np. przemyśle kosmetycznym. Zbyt częste i niekontrolowane stosowanie srebra doprowadziło do ryzyka narastania i rozprzestrzenienia się oporności drobnoustrojów na ten metal (Hobman i in. 2014). Oporność bakterii na srebro związane jest przede wszystkim z systemem pMG101 sil. Plazmid pMG101 nadaje odporność mikrokomom na chloramfenikol, ampicylinę, tetracyklinę, streptomycynę, sulfonamid, rtęć, tellur i srebro. Proponowany mechanizm odporności na srebro został zaobserwowany w systemie cus, który jest znany jako nadający odporność na niskie stężenia srebra, a niektóre z genów Sil pochodzące z pMG101 są blisko spokrewnione z genami cus. Istnieje 71% zbieżności pomiędzy SilC i CusC, 67% tożsamości pomiędzy SilB i CusB oraz 87% tożsamości pomiędzy SilA i CusA, które tworzą kompleksy białka pompy transportującej (lub nieswoistej, wypływowej) SilCBA i CusCBA. Mechanizm oporności na srebro związany jest z dwuskładnikowym układem regulacji transkrypcji SilRS (homologiczny dla CusRS i PcoRS) kontrolujący ekspresję pompy transportującej srebro dla ATP-azy, SilP trójskładnikowej pompy transportującej srebro SilCBA i SilF, która jest uważana za periplazmatyczny chaperon srebra. W systemie SilF występuje kilka innych genów lub otwartych ramek odczytów (będących częściami sekwencji nukleotydów między kodonem START a kodonem STOP). SilE odgrywa główną rolę w obwodowym wiązaniu srebra, a pomiędzy silA i silP występuje niewielka otwarta ramka odczytu o nazwie orf105, która może hipotetycznie kodować białko o wartości 105aa, ale którego funkcja jest nieznaną. Istnieje inny system odporności na srebro w środowisku bakterii *Cupriavidus metallidurans* CH34, który składa się z silCBA i znajduje się na jednym z dwóch dużych plazmidów, pMOL28. Homologie systemu sil zostały wykryte przy użyciu specyficznych primerów sil w plazmidach z grupy IncH1-2 bakterii Gram(-). Oporność na srebro u różnych patogenów, działa na zasadzie przenoszenia genów sil (Hobman i in. 2015). Oporność na srebro jest nadana właśnie w sil locus, którego geny składają się z dziewięciu otwartych ramek odczytu - SilPGABFCRSE, a związany z tym mechanizm oporności na Ag związany jest przede wszystkim z systemami cus i pco. Geny sil są podzielone na trzy jednostki transkrypcyjne: silCFBAGP, silRS i silE - każda z nich jest wyrażona przez innego promotora. SilP to przypuszczalna kationowa membrana wewnętrzna typu pompy transportującej ATP-azy typu PIB. Przypuszcza się również, że SilG to periplazmatyczne białko opiekuńcze wiążące srebro. SilCBA jest homologiczny do kompleksu CusCBA i domniema się, że jest on „błoną komórkową” obejmującą trójdzielny kationowo-protonowy antyporter białek RND. Wspólnie elementy te, tzn. błona zewnętrzna zlokalizowana w SilC (białko periplazmatyczne), błona wewnętrzna - antyporter SilA, oraz periplazmatyczny SilB, który stabilizuje kompleks, tworzą pompę transportującą, która wypompowuje jony srebra z komórki. Periplazmatyczny SilF (homologiczny dla CusF) jest prawdopodobnie chaperonem uczestniczącym w przenoszeniu jonów srebra z SilP do kompleksu

SilCBA. Uważa się, że jednostka genu silCFBAGP jest transkrypcyjnie regulowana przez odmienną ekspresję SilRS (Poole i in. 2017). Wspólnie SilS (transmembranowy transduktor kinazy histydynowej) wraz z SilR (transkrypcyjny regulator wywołujący odpowiedź) tworzą dwuskładnikowy system regulujący odpowiedź na metale. Za silRS znajduje się silE, będący zdefiniowanym biomarkerem oporności na srebro. Ekspresja związana z genem SilE jest powiązana z funkcjonowaniem własnego promotora, który po części jest współ-regulowany przez system cusRS. Pomimo, iż dokładna rola SilE w oporności nie jest jednoznacznie potwierdzona, SilE jest nieuporządkowanym, samoistnym białkiem (tak jak PcoE), które funkcjonuje jako obwodowe białko wiążące metale – wiąże ono do ośmiu jonów srebra. Sugerowane jest, że SilE przyczynia się do powstawania mechanizmu oporności jako peryplazmatyczna tzw. „gąbka chłonna metale” i/lub jako pierwszy komunikator odpowiadający, który może być białkiem chaperonowym i dostarczać srebro do innych komponentów w locus sil w celu dalszej dezaktywacji w mechanizmie oporności. Jednakże należy zwrócić uwagę, iż wiele loci, które nazwane są „opornością na srebro”, to w rzeczywistości głównie systemy oporności na miedź, które jednocześnie wykazują oporność na srebro. Geny oporności na miedź i srebro tworzą klastery genów na MGE zwaną „miedzianą homeostazą i wyspą oporności srebra” (CHASRI), a także określane jako pco/sil (Poole i in. 2017). Mechanizm, który jest odpowiedzialny za zapobieganie skutkom przeciwdrobnoustrojowym nanocząstek mniejszych niż 10 nm i jonów srebra uwalnianych przez większe nanocząstki, dotyczy zmiany ekspresji genów i mutacji, które powodują zmniejszenie możliwych dróg wniknięcia nanocząstek do wnętrza cytoplazmatycznej bakterii. Na przykład nanocząstki mniejsze niż 10 nm mogą dostać się do bakterii i reagować z różnymi elementami wewnętrznymi. W przypadku niskich stężeń AgNPs, niektóre z bakterii są w stanie generować oporność w wyniku mutacji, a to zaś wpływa na procesy regulacyjne kilku genów. Zmiana ekspresji genów prowadzi do obniżenia regulacji poryn, co uniemożliwia wejście nanocząstek do wnętrza bakterii. W przypadku *Pseudomonas putida* zaobserwowano, że jest on w stanie zmienić konformację nienasyconych kwasów tłuszczowych obecnych w zewnętrznej membranie. Zmiana konformacji powoduje zmianę płynności membrany, co czyni ją mniej przepuszczalną i zapobiega jednocześnie przenikaniu nanocząstek i jonów srebra (Niño-Martínez i in. 2019). Przenikanie nanocząstek metali do wnętrza komórek bakteryjnych uzależnione jest od wielkości zastosowanego metalu czy tlenków metali. Dodatkowo, istotnymi właściwościami mającym znaczenie w działaniu przeciwdrobnoustrojowym jest ładunek elektryczny, który obecny jest na powierzchni różnych rodzajów nanocząstek metali i tlenków metali. Nanocząstki mają działanie bakteriobójcze. Ponadto NPs posiadają ładunek dodatni i w związku z tym cechują się właściwościami przyciągania patogenów, które są ujemnie naładowane. Innym ciekawym mechanizmem oporności bakterii na metale jest regulowanie ładunku elektrycznego na powierzchni, co pozwala im odpychać nanocząstki o różnych rodzajach ładunku (na ich powierzchni). Nanocząstki mogą charakteryzować się ładunkiem powierzchniowym; dodatnim, ujemnym lub neutralnym. Interakcja z jednym z tych trzech rodzajów ładunku z ładunkiem elektrycznym obecnym na powierzchni bakterii, w niektórych przypadkach wydaje się być najważniejszym czynnikiem determinującym aktywność przeciwdrobnoustrojową nanocząstki. Najskuteczniejsze działanie przeciwdrobnoustrojowe wykazują AgNPs o ładunku dodatnim względem bakterii gram-dodatnich oraz gram-ujemnych (NPs o ładunku ujemnym wykazują najmniejszą aktywność przeciwdrobnoustrojową). Wynika to ze skutecznego odpychania metalu przez komórki bakterii spowodowane wytworzeniem ładunków o tych samych właściwościach pomiędzy metalami a bakteriami. Jest to rozwój oporności na kationowe peptydy przeciwdrobnoustrojowe (CAMP), w którym bakterie są w stanie modulować ładunek elektryczny na swojej powierzchni poprzez modyfikacje struktury fosfolipidów. Wynika to z regulacji poprzez odpowiedź powłoki na stres (ESR – *envelope stress response*). ESR jest obecny zarówno u bakterii G(+) i G(-) i stale monitoruje biogenezę komórki oraz chroni integralność otoczki komórek bakteryjnych. ESR może chronić bakterie przed kontaktem z dodatnio naładowanymi nanocząstkami poprzez włączenie D-alaniny do ściany komórkowej bakterii G(+) i G(-) i doprowadza do zmniejszenia ich ogólnego ujemnego ładunku. U bakterii G(-) ESR bierze udział w modyfikacjach lipopolisacharydu (LPS) i jego głównego składnika - lipidu-A (Niño-Martínez i in. 2019).

Oporność *E. coli* na srebro można także wyjaśnić innym złożonym mechanizmem. Mechanizm obronny związany jest z genem naprawczym w uszkodzeniach membrany, po uszkodzeniach wywołanych przez srebro. Gen *fabR* koduje regulator biosyntezy kwasów tłuszczowych i jest niezbędny do syntezy jednonienasyconych kwasów tłuszczowych. Ten czynnik transkrypcyjny reguluje wyłącznie ekspresję enzymów syntazy kwasów tłuszczowych typu II, oraz bezpośrednio wpływa na homeostazę lipidową błony zewnętrznej, która może być istotną dla oporności bakterii na działanie srebra. Delecja genu *fabR* zmniejsza oporność bakterii na Ag^+ , co sugeruje, że mechanizm naprawy membrany jest ważną odpowiedzią komórki bakteryjnej na ekspozycję srebra (Xiu i in. 2014). Istotnym składnikiem oporności jest pompa transportująca srebro (ang. *silver efflux*), w którym pośredniczy transporter *CusCFBA* oraz *SilCFBA* w przypadku oporności u *E. coli*. Transportery te są ściśle powiązаныmi homologami, z większością odpowiadających im białek z systemów *CusCFBA* i *SilCFBA* wykazujących tożsamość sekwencji aminokwasów na poziomie 80%. *SilE* jest w stanie zwiększać fenotyp oporności na srebro związany z transporterem *CusCFBA*, natomiast *CusF* jest najwyraźniej w stanie uzupełnić utratę *SilF*, wskazując jednocześnie na funkcjonalne nakładanie się obu systemów. Struktury krystaliczne transportera *CusCBA* i *CusF* ujawniają, że *CusCBA* wykorzystuje transfer metioniny do transportu Ag^+ i Cu^+ z komórki, podczas gdy *CusF* wykorzystuje interakcje kation- π i metioniny do wiązania pojedynczego jonu Ag^+ lub Cu^+ w celu dostarczenia do *CusCBA* i późniejszego wypływu z komórki. W związku z wysokim stopniem tożsamości sekwencji i nakładania się na siebie funkcji *Sil* i przewodników *Cus*, wydaje się bardzo prawdopodobne, że system *SilCFBA* działa w ten sam sposób. Ekspresja transporterów wypływu w systemie *Cus* i *Sil* jest regulowana w każdym przypadku przez system dwuskładnikowy (*CusRS* i *SilRS*). Ekspresja transportera na mechanizm dezaktywacyjny srebra prowadzi w komórce bakteryjnej do podstawiania aminokwasów w obrębie sensora kinazy poznawczej (*CusS* lub *SilS*). Czasem dochodzi do zwiększenia tempa napływu Ag^+ , co skutkuje niemożnością do transportowania srebra i wnikania niektórych $AgNPs$ w obrzeża błony zewnętrznej (Randall i in. 2015).

3.2 Oporność bakteryjna na działanie miedzi

Wiele badań naukowych wykazało, że miedź podobnie jak srebro charakteryzuje się dobrymi właściwościami bakteriobójczymi i bakteriostatycznymi (Santo i in. 2012). W rolnictwie związki miedzi stosowane są jako środki przeciwbakteryjne, przeciwdrobnoustrojowe i przeciwgrzybicze. Dotychczas potwierdzono, że stałe powierzchnie ze stopu miedzi sprzyjają szybkiemu zabijaniu bakterii $G(-)$ i $G(+)$, na zasadzie „mechanizmu kontaktowego z powierzchnią”. W celu zmniejszenia zanieczyszczenia mikrobiologicznego i przenoszenia infekcji nabytych w szpitalu, stosuje się instalacje urządzeń zawierających miedź na oddziałach i w klinikach. Miedź i stopy miedzi jako produkty przeciwdrobnoustrojowe, wykorzystywane są szeroko w miejscach zdrowia publicznego (Hobman i in. 2014).

Miedź jest metalem mającym zdolność do naprzemiennego zmieniania stanu utlenienia od $Cu(I)$ do $Cu(II)$. Miedź może przenikać do komórek bakteryjnych bez potrzeby stosowania specyficznych układów pobierania miedzi. Natomiast wysokie stężenia miedzi są niezwykle toksyczne dla komórek bakteryjnych. Aby uniknąć nadmiaru tego pierwiastka oraz wywołania toksyczności pośredniej, muszą zostać wzmoczone procesy homeostazy, które umożliwiają odpowiednią podaż miedzi w procesach komórkowych. U Enterobakterii tzw. sieci białkowo-homeostatyczne Cu składają się z czterech układów: *cue*, *cus*, *pco* i *cop*. Większość bakterii gramujemnych stosuje chromosomalne systemy sygnalizacji oraz *cus*. Systemy te detoksykują i poprawnie rozdzielają miedź w komórkach na części poprzez modyfikację jego ładunku i transportu (Poole i in. 2017).

System *Cue* (ang. *Cu efflux*) jest uważany za podstawowy mechanizm odpowiedzialny za oporność miedzi u *E. coli* zarówno w warunkach tlenowych jak i beztlenowych. Układ *Cue* składa się z membrany wewnętrznej $Cu(I)$ -przenoszącej $P1B$ typu ATP-azy transportującej *CopA* i obwodowej wielomiedziowej oksydazy *CueO* predysponującej do utleniania $Cu(I)$ do $Cu(II)$. Ekspresja białek *Cue* jest regulowana przez homologowe białko *MerR* i *CueR*. *CueR* to cytoplazmatyczne białko wiążące miedź, które może być indukowane przez podwyższony poziom

Cu(I). (Poole i in. 2017). System CueO zapewnia tolerancję na miedź przy jego niskim i umiarkowanym poziomie w warunkach tlenowych. Natomiast system ten jest nieaktywny w warunkach beztlenowych. Dlatego też, w warunkach beztlenowych i ekstremalnych stężeniach miedzi, komórki *E. coli* wykorzystują mechanizm transportujący CusCFBA znajdujący się w systemie Cus. Operon cusCFBA jest transkrypcyjnie regulowany w odpowiedzi na stres i podwyższone poziomy Cu(I) w otoczeniu komórki, przez różnie transkrybowany dwuskładnikowy system sensoryczno-regulacyjny CusRS. CusS, jest również indukowany przez jony srebra Ag(I), i wówczas wyczuwa periplazmatyczne stężenie miedzi i fosforylanów CusR, aktywując tym samym ekspresję cusCFBA. Produkty białkowe genów cusC, cusB i cusA tworzą CusCBA: wieloskładnikową miedzianą pompę transportującą, która rozciąga się na obu membranach i na peryferiach jako antyporter protono-podobny. Kompleks CusCBA, (CusC - białko błony zewnętrznej; CusB - białko fuzyjne błony; oraz CusA - białko transportera wewnętrznej błony wiążącej z rodziny białek RND) jest proponowany do wydalania miedzi bezpośrednio z cytoplazmy do środowiska zewnątrzkomórkowego. CusF jest małym peryferyjnym metallochaperonem (10 kDa), który pozyskuje pojedyncze Cu(I) lub Ag(I) do CusB i/lub CusC mechanizmu transportującego CusCBA (Poole i in. 2017). System pco jest kodowany plazmidem i zapewnia odporność na miedź u *E. coli*. System pco jest kodowany przez klaster dziewięciu (lub sporadycznie 10) genów pco: pcoGFE, pcoABCDS i pcoE, które są ułożone jako: dwa operony i jako oddzielny gen. System ten polega na transkrypcyjnej regulacji genów pcoABCDEFG przez dwuskładnikowy system regulacyjny podobny do CopRS: PcoRS. PcoA jest oksydazą homologiczną do CueO, która może detoksykować miedź, obok utlenionej sekwestracji katecholowej sideroforu, poprzez utlenianie Cu(I) do mniej toksycznego Cu(II). Wraz z PcoA postuluje się, że PcoC jest istotnym składnikiem systemu pco. PcoC jest małym peryferyjnym chaperonem, który może wiązać się z Cu(I) i Cu(II) i została zaproponowany do pełnienia kilku ról. PcoC może albo dostarczać Cu(I) do PcoA w celu dalszego utleniania, cha peron miedzowy zaś do PcoD lub być zaangażowany w transporcie elektronów. PcoD jest pompą miedzianą, która znajduje się w wewnętrznej membranie i chociaż jej dokładna funkcja jest nieznana, przewiduje się, że będzie działać jako pojedyncza jednostka z PcoC do dostarczania miedzi do PcoA. PcoB to przewidywany transporter membrany zewnętrznej, który potencjalnie współpracuje z PcoA. Innym białkiem, które potencjalnie wchodzi w interakcję z miedzią i przenosi ją na PcoA, jest PcoE, które jest współregulowane przez CusRS. PcoE jest dodatkowym miedzianym chaperonem, który może działać jako pierwsza linia obrony białka tzw. „molekularnej gąbki”, nadając również ograniczoną odporność na srebro. Istotnym w oporności na miedź jest CopI, który odgrywa rolę w peryferyjnej detoksykacji/transporcie miedzi za pośrednictwem genów CopABCD (Poole i in. 2017).

Ogólnie, wyspecjalizowane geny kodują trzy różne typy rodzin białek odpowiadając za wydalanie jonów uwalnianych przez metale i nanocząstki tlenków metali poza komórkę bakteryjną. Pierwszą linię obrony tworzy nadrodzina białek związana z opornością-nodulacją-podziałem komórki (RND). Ta nadrodzina białek składa się z siedmiu białek rozproszonych. RND białka na ogół tworzą kompleksy receptorów wraz z dwoma innymi rodzajami białek. Pierwsze z nich to dwa białka fuzyjno-błonowe (MFP), a także białka przynależne do rodziny zewnętrznych czynników błony (OMF). Kompleks białek transportujących jest nazywany systemem transportującym CBA lub transporterami CBA. Drugą linię obrony tworzy rodzina CDF zwana: „kationami dla dyfuzji mediatorów”. Ta rodzina pośredniczy w emisji Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} i Fe^{2+} . Zaś trzecią linię obrony tworzą członkowie ATP-az typu-P. W tych białkach transport jest napędzany przez hydrolizę ATP i białka te pośredniczą w emisji m.in. H^+ , Cu^+ , Ag^+ . Oprócz kompleksów transportujących istnieją inne mechanizmy odpowiedzialne za ochronę komórek bakteryjnych przeciwko jonom uwalnianym przez nanocząstki. Mechanizmy te obejmują wewnętrzną i zewnętrzną sekwestrację pozakomórkową, bio-precypitację, enzymatyczną detoksykację lub biotransformację. Te mechanizmy odporności na metale i nanocząstki tlenków metali zostały słabo zbadane. W sekwestracji wewnątrzkomórkowej bakterie używają białek, aby zatrzymać nadmiar toksycznych jonów metali w swojej cytoplazmie. Dzięki temu jony nie powodują uszkodzeń struktury wewnątrzkomórkowej i pozwalają bakteriom na aktywowanie innych mechanizmów obronnych, takich jak transport. Na przykład u bakterii z operonami odpornymi na metal operony te zawierają geny kodujące dla białek sekwestrujących jony metali, takich jak gen SilG w operonie sil. W sekwestracji pozakomórkowej bakterie wytwarzają

ECS, który unieruchamia nanocząsteczki i zapobiega ich kontaktowi z bakteriami, zmniejszając ich aktywność bakteriobójczą (Niño-Martínez i in. 2019).

4. Podsumowanie

Obecna wiedza na temat działania przeciwdrobnoustrojowego nanocząstek metali oraz tlenków metali jest ciągle pogłębiana. Pomimo wielu starań w poszukiwaniu nowych metod leczenia różnych chorób i infekcji na tle m.in. bakteryjnym, wytwarzana jest oporność u bakterii, co prowadzi do pozostawiania kluczowych pytań - jak choćby tych związanych z wpływem nowych preparatów na środowisko i zdrowie ludzi na całym świecie. Ciągłe badane są mechanizmy adaptacji bakterii i wytwarzania przez nie oporności na leki czy nanocząstki metali, co z drugiej strony prowadzi do nasilenia infekcji i ich częstości, które odporne są na dotychczasowe leczenie (Niño-Martínez i in. 2019). Jednym z tych systemów są systemy Sil i Cus, których czujniki, reagują na wiązanie z jonami Ag^+ oraz Cu^+ poprzez fosforylację regulatorów odpowiedzi – CusR. Dzięki CusR dochodzi do tłumienia ekspresji CusFBA, który eksportuje Ag^+/Cu^+ do transportu poza komórkę bakteryjną. Zarówno system Cus i Sil składają się z podobnych komponentów, a dzięki mechanizmowi obronemu dochodzi do wypływu metali poza obręb komórki, co potwierdza odporność bakteryjną na działanie metali (Randall i in. 2015).

Podziękowania: Praca została sfinansowana w ramach projektu badawczego LIDER/31/0115/L-9/17/NCBR/2018 przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

5. Literatura

- Hayleeyesus SF, Manaye AM (2014) Microbiological Quality of Indoor Air in University Libraries. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, (4): 312–317.
- Hobman JL, Crossman LC, (2014) Bacterial antimicrobial metal ion resistance. *Journal of Medical Microbiology*, 64(5), 471–497.
- Kumar M, Curtis A, Hoskins C (2018) Application of Nanoparticle Technologies in the Combat against Anti-Microbial Resistance. *Pharmaceutics* 10(11): 1-17.
- Niño-Martínez N, Orozco MFS, Martínez-Castañón GA, et al. (2019) Molecular Mechanism of Bacterial Resistance to Metal and Metal Oxide Nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences* 20(2808): 1-15.
- Poole RK, Pal C, Asiani K et al. (2017) Microbiology of Metal Ions. *Advances in Microbial Physiology*. 1-392.
- Randall CP, Gupta A, Jackson N, et al. (2015) Silver resistance in Gram-negative bacteria: a dissection of endogenous and exogenous mechanisms. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 70: 1037–1046
- Santo ChE, Quaranta D, Grass G. (2012) Antimicrobial metallic copper surface kill *Staphylococcus haemolyticus* via membrane damage. *Microbiol Open*; 1: 46-52.
- Xiu Z, Liu Y, Mathieu J, et al. (2014) Elucidating the genetic basis for *Escherichia coli* defense against silver toxicity using mutant arrays. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(5): 993–997.

4. Przyszłość lotnictwa- podniebne taksówki

The future of aviation- Air Taxi

Jurkiewicz Martyna

Wydział Mechaniczno- Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Opiekun naukowy dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Martyna Jurkiewicz: m.jurkiewicz9mj@gmail.com

Słowa kluczowe: awiacja, bezzałogowe samoloty, VTOL, napęd elektryczny

Streszczenie

Jedną z perspektyw rozwoju rynku lotniczego jest wykorzystanie bezzałogowych konstrukcji typu VTOL, mogących służyć jako środek transportu osób w obrębie aglomeracji miejskich. Podniebne taksówki to konstrukcje zasilane energią elektryczną, niewymagające pasa startowego, o niewielkiej masie własnej, mogące jednorazowo przetransportować 4-5 osób. W pracy określone zostały wymagania dotyczące latających taksówek, dokonano przeglądu wybranych konstrukcji oraz przeanalizowano możliwości rozwojowe tej technologii.

1. Wstęp

Rozwój technologii wpłynął na migrację ludności do miast, co doprowadziło do powiększenia obszarów miejskich. Pojawiły się problemy komunikacyjne, objawiające się szczególnie podczas prób przemieszczania się pomiędzy oddalonymi od siebie punktami. Codzienne podróże wydłużają się, co generowane jest głównie poprzez postoje w kilometrowych korkach. Poszukiwane są zatem sposoby na pokonanie problemu zatłoczonych miast. Mogłyby zostać one częściowo rozwiązane, dzięki przebudowie infrastruktury miast, jednak nie zawsze jest ona możliwa, jak i wystarczająca. Ciągły rozwój technologii pozwala na zastosowanie innych metod. Jedną z nich jest przeniesienie części ruchu drogowego na drogi powietrzne. Jest to możliwe dzięki niewielkim statkom powietrznym, mogącym wykonywać loty nad miastami, startując np. z dachów budynków, bądź specjalnie wydzielonych terenów. Konstrukcje tego typu nazywane są podniebnymi, latającymi bądź powietrznymi taksówkami (Rajendran i Shulman 2020).

2. Opis zagadnienia

Bezzałogowe statki powietrzne, to konstrukcje na pokładzie których nie występuje pilot. Maszyna jest pilotowana w sposób zdalny z centrum znajdującego się na ziemi, bądź trasa jej przelotu jest z góry zaprogramowana. Konstrukcje te wzbudzają różne odczucia pośród potencjalnych pasażerów i wśród środowiska związanego z lotnictwem. Najważniejszym z zagadnień jest to dotyczące bezpieczeństwa pasażerów podczas lotu. W przypadku lotnictwa bezpieczeństwo zawsze stawiane jest na pierwszym miejscu, a opracowane procedury kontroli i eksploatacji pozwalają na utrzymaniu go na najwyższym poziomie. Nie inaczej jest w przypadku statków bezzałogowych, nim ich eksploatacja będzie możliwa, przed dopuszczeniem do lotu maszyna musi przejść szereg specjalistycznych testów (volocopter.com).

Podniebne taksówki są opracowywane, jako konstrukcje typu VTOL (Vertical Take off and Landing), czyli zdolne do przeprowadzania pionowego startu i lądowania. Pionowe wykonanie tych operacji, umożliwia start maszyny z dowolnego miejsca, niebędącego specjalnym pasem startowym. Dzięki czemu nie ma konieczności budowania odpowiedniej, rozległej infrastruktury w miastach. Planowanym jest, by konstrukcje przemieszczały się pomiędzy dotychczas niezagospodarowanymi dachami budynków, a tam, gdzie są one zabudowane, wydzielone zostałyby odpowiednie tereny umożliwiające „przystanki” statków powietrznych. Zasilanie tych konstrukcji pochodzi ze zmagazynowanej w akumulatorach energii elektrycznej. Co jest niezwykle istotne, ze względu na wysoki stopień zanieczyszczenia miast i wzrastający problem ocieplenia klimatu, powodowany gazami cieplarnianymi, w tym gazami będącymi produktami spalania paliw kopalnych. Konstrukcje

łącznie w sobie właściwość pionowego startu i lądowania oraz zasilanie energią elektryczną określane są mianem eVTOL. By zminimalizować ilość siły ciągu (potrzebnej do startu i przeprowadzenia lotu) konstrukcje projektowane są, jako konstrukcje typu ultralight, których masa startowa nie powinna przekraczać 450 kg. Jak opisano, niska masa to mniejsze zapotrzebowanie na siłę ciągu, a więc i mniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną, co ma istotny wpływ na ekonomiczność samolotu. Konstrukcje wykonujące przelot nad zatłoczonymi, głośnymi miastami, powinny być możliwie ciche. Zwykle elementem generującym największy hałas jest zespół napędowy. Część hałasu zniwelowana została już poprzez zastosowanie napędu elektrycznego, który generuje mniejszy hałas, niż tradycyjny zespół wykorzystujący, jako napęd paliwo kopalne. Prędkości obrotowe wirników nośnych muszą być dobrane tak, by zapewniać dostateczną siłę, ale nie generować przy tym zbyt wiele hałasu. Istotne jest również zastosowanie wielu mniejszych wirników, w miejsce wirnika głównego. Grupa mniejszych śmigieł obracać może się z prędkością niższą, niż jeden wirnik główny, a niższe prędkości to mniejszy hałas.

Obecnie powstające konstrukcje opracowywane są tak, by były zdolne do odbycia lotów trwających 30 minut. Jest to czas wystarczający do pokonania miejskich odległości. Szacuje się, że czas przeciętnego przelotu pomiędzy miejscem startu a miejscem docelowym trwać będzie ok. 10-15 minut. Konstrukcje nie są projektowane, by pokonywać znaczne odległości, właściwe przelotom międzymiastowym. Projektanci konstrukcji zapewniają, że ich maszyny będą dysponować zasięgiem na poziomie 80- 100km, a niektóre konstrukcje osiągają wartości trzykrotnie wyższe (lilium.com). By przelot taksówką faktycznie zapewniał oszczędność czasu, powinna ona osiągać prędkość większą, niż pojazdy poruszające się po miejskich drogach. Szacowana wartość prędkości, jaka będzie optymalna dla przelotu nad miastami to ok. 90km/h.

3. Przegląd konstrukcji

Wiele firm zarówno lotniczych „gigantów”, nowopowstałych startup’ ów, jak i firm, które dotychczas nie były częścią branży lotniczej, pracuje nad stworzeniem własnego modelu powietrznej taksówki. Pierwszymi miastami w których mają się one pojawić są: Dubaj, Szanghaj, Los Angeles, Singapur, Tokio, Nowy Jork i Paryż. W Niektórych z nich (np. w Dubaju) wprowadzenie taksówek do użytku publicznego ma nastąpić już w 2023r (geekweek.pl). Poniżej dokonano przeglądu wybranych konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych.

3.1 Volocopter

Volocopter to projekt niemieckiego startup’ u, noszącego tę samą nazwę, powstałym w 2011r. Jest on pionierską i najbardziej rozwiniętą pod względem możliwości wprowadzenia na rynek konstrukcją bezzałogową, spośród wymienionych w poniższym przeglądzie. Firma Volocopter jako pierwsza na świecie otrzymała zezwolenie na pilotaż pasażerskiego multikoptera.



Rys. 1. Volocopter (oiot.pl).

Projekt Volocoptera bazuje na konstrukcji miniaturowego helikoptera. Maszyna zaprojektowana jest, by pomieścić dwoje pasażerów, układ miejsc jest taki, jak układ miejsc w helikopterze. Maszyna napędzana jest 18 wirnikami nośnymi znajdującymi się powyżej kadłuba. Ilość wirników zapewnia niezwykle ciche przemieszczanie się. Poziom natężenia dźwięku jaki generuje Volocopter jest wyznacznikiem dla kolejnych powstających prototypów podniebnych taksówek (volocopter.com). Wirniki rozmieszczone są na okręgu, który połączony jest z kadłubem za pomocą sześciu ramion. Prędkość, jaką może osiągnąć statek powietrzny wynosi ok. 100km/h. Silniki napędzające maszynę zasila energia elektryczna. Zapas energii zgromadzonej w akumulatorach umożliwia wykonanie 30 minutowego lotu. Ze względów bezpieczeństwa maszyna wyposażona zostanie w zapasową, awaryjną baterię zasilającą, zapasowe rotory oraz spadochrony. Masa startowa jest niska, tak, by konstrukcja mogła być zaliczona do statków powietrznych typu ultralight i wynosi ona 450kg.

Volocopter po przejściu szeregu testów w roku 2017 odbył lot pasażerski. Miał on miejsce w Dubaju, na pokładzie znalazł się jego książę- Hamdan ibn Muhammad Al Maktum. Maszyna przebywała w powietrzu 5 minut na wysokości 200m (instalki.pl).

Volocopter spełnia wymagania określone przez EASA w międzynarodowej podstawie certyfikacji, w której zawarte zostały wymagania dotyczące taksówek powietrznych EASA SC-VTOL- 01. Według tych postanowień, podniebne taksówki muszą być ta samo bezpieczne, jak samoloty. Volocopter spełnia wymienione standardy.

Dnia 24.03.2021r., firma Volocopter opublikowała białą księgę „Mapa drogowa skalowanej mobilności powietrznej w miastach”. W księdze zawarte zostały informacje dotyczące obsługi kompletnego systemu mobilności powietrznej w miastach. Firma określiła kluczowe kroki, konieczne by stworzyć niezbędny system wspierający, umożliwiający wprowadzenie i wykorzystanie komercyjnych usług powietrznych taksówek w obrębie aglomeracji miejskich. Miasta obsługiwane przez Volocoptery nazywane są mianem VoloCity. Planowane jest wprowadzenie maszyny do użytku publicznego najpierw w Dubaju do roku 2023. A w następnym roku powstać mają kolejne VoloCity (volocopter.com).

3.2 Lilium

Lilium jest prototypem powietrznej taksówki, zaprojektowanym przez niemiecką firmę o tej samej nazwie. Stworzony w 2015r., zaprezentowany w 2017r.- wtedy to odbył się jego pierwszy lot.



Rys. 2. Lilium (geekweek.pl).

Konstrukcję wyróżnia klasyczny układ przypominający samoloty pasażerskie, co widoczne jest na powyższym rysunku (Rys.2.). Maszyna posiada skrzydła o obrysie prostokątnym (skrzydła proste), na których, jak i na stateczniku poziomym umieszczone zostały silniki. Jest to aż 36 silników elektryczno- odrzutowych. Wykorzystanie silników odrzutowych umożliwia pionowy start nawet w ciasnych przestrzeniach, poprzez odpowiednie wektorowanie wytwarzanego przez nie ciągu. Po wzniesieniu Lilium wykonuje lot, jak tradycyjny samolot. Kolejnym czynnikiem wyróżniającym ten

statek powietrzny jest ponad trzykrotnie wyższa prędkość lotu, w stosunku do pozostałych latających taksówek, wynosi ona aż 300km/h. Przy czym wysoka wartość prędkości idzie w parze ze znacznym zasięgiem. Maszyna może jednorazowo pokonać odległość 300 km.

Lilium obecnie jest w stanie przetransportować pięcioro pasażerów, opracowywane jest dopasowanie konstrukcji tak, by zdolna była pomieścić ich siedmioro. Loty pasażerskie obsługiwane przez Lilium mają rozpocząć się do 2025r, a koszt przelotu miałby być zbliżony do wysokości opłat za przejazd tradycyjną taksówką (whatnext.pl; lilium.com).

3.3 Boeing PAV

Również firmy należące do grona lotniczych gigantów opracowują własne konstrukcje bezałogowe. Firma Boeing podczas Paris Air Show 2019 przedstawiła prototyp Boeing PAV, będący konstrukcją autonomiczną i dwuosobową. Skrót PAV- Passenger Autonomus Vehicel, oznacza autonomiczny pojazd pasażerski.



Rys. 3. Boeing PAV (geekwire.com).

Boeing PAV charakteryzuje ciekawe połączenie konstrukcyjne. Skrzydła mają za zadanie wytworzenie części siły nośnej, a zastosowanie na nich wingletów zmniejsza opór indukowany, w efekcie czego zwiększona zostaje doskonałość aerodynamiczna statku. Napęd konstrukcji zapewnia osiem śmigieł rozmieszczonych symetrycznie na dwóch szynach, zamontowanych po bokach kadłuba. Dodatkowo za kadłubem umieszczono śmigło pchające, wytwarzające siłę ciągu. Dzięki zastosowaniu powyższej konfiguracji napędu, maszyna może rozwinąć prędkość na poziomie 180 km/h. A zasięg jakim dysponuje wynosi 85 km. Konstrukcja nie należy do najlżejszych, masa własna wynosi 575kg, a maksymalna masa startowa to 800kg.

Pierwszy lot maszyna odbyła w styczniu 2019r, był to lot kontrolny, bez udziału pasażerów. W czerwcu podczas piątego lotu testowego miała miejsce awaria w wyniku której doszło do uszkodzenia maszyny, jednak żadna z obecnych osób nie odniosła obrażeń. Firma Boeing planuje wprowadzić konstrukcję PAV na rynek w roku 2024 (businessinsider.com.pl).

3.4 Hyundai PAV S-A1 i Uber

W gronie firm dotychczasowo niezwiązanych, planujących wkroczyć na rynek lotniczy, jest m.in. Uber- znany jako firma przewozowa wykorzystująca transport samochodowy. Zamówienie latającej taksówki Ubera ma być tak proste, jak zamówienie klasycznej taksówki, a do tego cena przewozu ma być do nich zbliżona. Wprowadzenie pierwszej konstrukcji, które miałyby latać pod znakiem Ubera, planowane jest na rok 2023r., a do 2028r. firma zapowiada powiększenie floty o dodatkowe modele. Uber nie zajmie się wykonaniem własnej konstrukcji, zamierza on wykorzystywać maszyny zaprojektowane przez współpracujące z nim przedsiębiorstwami. Wśród

nich znajdują się m.in. Pipistrel, Aurora Flight, Bell i Hyundai (antyweb.pl). Ten ostatni przedstawił poniższy (Rys.4.) prototyp latającej taksówki.



Rys. 4. Hyundai- Uber Air PAV S-A1 (aerocarjournal.com).

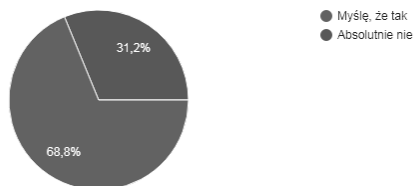
Model Hyundai- Uber Air PAV S-A1 został zaprezentowany podczas targów Consumer Electronics Show (CES) w Las Vegas 6 stycznia 2020r. Obecnie wymaga pilotażu, jednak w przyszłości planowana jest jego pełna autonomiczność. Maszyna zaprojektowana jest do przewozu 4 pasażerów wraz z ich bagażami. Napęd zapewniają silniki elektryczne. Czas potrzebny do naładowania akumulatorów to zaledwie 5-7 minut. Wirniki nośne rozmieszczone zostały na skrzydłach, na każdym z nich znajdują się trzy wirniki, oraz dwa na ogonie statku. Cztery śmigła są przechylny, by możliwy był lot pionowy do przodu, a cztery śmigła współbieżne zapewniają lot pionowy.

Zastosowanie wielu wirników polega na zredukowaniu hałasu, jaki generują. Wysokość przelotowa zawiera się w przedziale 300- 600m. Na tej wysokości S-A1 poruszać się może z prędkością równą 290km/h. A zasięg, jakim dysponuje taksówka wynosi 100km (aerocarjournal.com). Ze względów zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcja ma uzyskać wyposażenie w postaci spadochronów. Wybranymi do testowych przelotów Air PAV S-A1 miastami są Dallas, Los Angeles i Melbourne (antyweb.pl).

3.5 Analiza rynku

Przeprowadzona została ankieta, mająca na celu uzyskanie opinii respondentów na temat technologii latających taksówek. W ankiecie odpowiedzi udzieliło 189 osób. Grono respondentów, obejmowało osoby, w wieku szkolnym, studentów, osoby pracujące oraz osoby powyżej 65 roku życia. A formularzu zapytano o chęć odbycia lotu latającą taksówką. Podgląd pytania wraz z procentowym rozkładem odpowiedzi znajduje się na poniższej grafice (Rys.5.).

Czy bybyś/ bybyś chętna odbyć lot bezałogowym statkiem powietrznym, w którym nie ma pilota, a sterowanie odbywa się za pomocą zaawansowanych systemów elektronicznych?
189 odpowiedzi

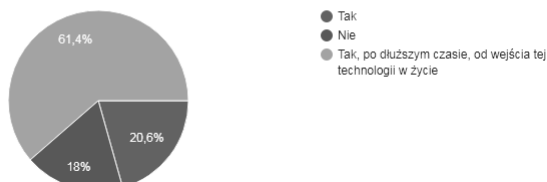


Rys. 5. Fragment ankiety dotyczącej powietrznych taksówek.

Większość osób ankietowanych opowiedziała się za chęcią odbycia lotu bezzałogowym statkiem powietrznym, jest to aż 68,8 % .

Wiedząc, że ponad 70% wypadków spowodowanych jest błędem czynnika ludzkiego, zaufałaś/ zaufałeś technologii bezzałogowych statków powietrznych?

189 odpowiedzi



Rys. 6. Fragment ankiety dotyczącej powietrznych taksówek.

Po uwzględnieniu dodatkowej opcji Rys.6. zauważa się wzrost odpowiedzi przemawiających za odbyciem lotu bezzałogowym statkiem powietrznym. Osoby ankietowane wykazały chęć odbycia lotu, po upływie pewnego czasu od wprowadzenia tej technologii do użytku publicznego (61,4% ankietowanych). Może wynikać to z chęci zaobserwowania kierunku rozwoju tej technologii, korzyści jakie ona wprowadza, a przede wszystkim upewnienie się, że konstrukcje te istotnie są konstrukcjami dopracowanymi na każdej płaszczyźnie, sprawdzonymi i bezpiecznymi. Łącznie jedynie 18% ankietowanych nie wykazało chęci skorzystania z autonomicznych podniebnych taksówek.

4. Podsumowanie i wnioski

O los latających taksówek nie pyta się już czy powstaną, a kiedy powstaną. Bezzałogowe konstrukcje są coraz bliższe rzeczywistości. Branża lotnicza dąży do rozwoju i wprowadzenia nowych form transportu. Latać nie będą jedynie ogromne samoloty pasażerskie, pokonujące trasy międzymiastowe, przekraczające granice państw, czy kontynentów. Mniejsze statki powietrzne, o przeznaczeniu krótkodystansowym będą transportować kilku pasażerów w obrębie aglomeracji miejskich, a także pomiędzy niedaleko położonymi od siebie wyspami w krajach wyspiarskich (np. Grecja). Postęp technologiczny umożliwi wprowadzenie technologii bezzałogowej na rynek lotniczy. Konstrukcje porównać można do „wyrośniętych” zdalnie sterowanych dronów.

Wprowadzenie latających taksówek pozwoli na przeniesienie części ruchu drogowego na drogi powietrzne, a tym samym doprowadzić do skrócenia korków. Przeniesienie części ruchu na drogi powietrzne to nie tylko szybkie przemieszczanie osób z nich korzystających, to także mniejsze zatłoczenie ulic, a więc korzyść dla osób przemieszczających się w sposób tradycyjny. Dodatkowym atutem statków powietrznych przelatujących nad aglomeracjami miejskimi jest wprowadzenie alternatywy dla tradycyjnych taksówek. Która pozwoliłaby osobom zainteresowanym szybkim transportem na omińnięcie korków i faktycznie szybkie dotarcie do celu (Rajendran, Shulman, 2020).

Kolejnym czynnikiem przemawiającym za wprowadzeniem bezzałogowych statków powietrznych, jako latających taksówek przemieszczających się ponad obszarami miejskimi są skutki wywołane przez pandemię z 2020r. Transport małej ilości pasażerów w jednym środku transportu (liczba pasażerów latającej taksówki porównywalna z liczbą pasażerów samochodu osobowego), pozwala na bezpieczne przemieszczanie się w niestłoczonych pojazdach.

Spoglądając w stronę kontrowersji, jakie budzi zastosowanie technologii bezzałogowych statków powietrznych, dopatrzeć można się przede wszystkim obaw dotyczących bezpieczeństwa. Wynikać mogą one z braku zaufania do technologii sterowanych komputerowo. Pasażerowie czują się pewniej, gdy za sterami zasiadają piloci. Jednak przed wprowadzeniem każdej nowej technologii przeprowadzane są szeregi testów i kontroli. W lotnictwie kwestie bezpieczeństwa są najistotniejsze, dlatego testy są bardzo restrykcyjne. Nie inaczej jest w przypadku latających taksówek, nim konstrukcja uzyska certyfikaty zezwalające na jej eksploatację. Obawy związane z technologią porównać można do etapu wprowadzania samochodów osobowych pod koniec XIX wieku. Pierwsze

pojawiające się konstrukcje wzbudzały niepokoje ludności, która nie ufała tym twórcom. Porównanie to ma na celu spojrzenie z perspektywy czasu i rozwoju technologicznego. Przeprowadzona analiza rynku pozwala na wysnucie wniosków o pozytywnym spojrzeniu ankietowanych na technologię bezzałogową. Zatem można uznać to za oznakę popytu na przeloty nad miastami.

5. Literatura

Wykorzystane w niniejszej pracy informacje pochodzą z następujących źródeł:

<https://aerocarjournal.com/uber-and-hyundai-debut-full-scale-air-taxi-model-at-ces/>

<https://antyweb.pl/uber-wybral-trzy-miasta-w-ktorych-bedzie-testowal-podniebne-taksowki/>,

<https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/boeing-pav-autonomiczna-latajaca-taksowka/832wq2w>

<https://www.geekweek.pl/news/2019-12-25/oto-kolejny-test-powietrzny-lilium-latajacej-taksowki-prosto-z-niemiec/>

<https://www.geekwire.com/2019/boeings-passenger-air-vehicle-prototype-rises-air-first-test-flight/>

<https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/hyundai-motor-takes-human-centered-mobility-vision-to-new-heights-at-ces-2020-0000016386>

<https://www.instalki.pl/aktualnosci/technika/28192-volocopter-latajace-taxi.html>

<https://lilium.com/>

<https://oiot.pl/volocopter-powietrzna-taksowka-singapur-2023/>

Rajendran S, Shulman J, Study of emerging air taxi network operation using discrete – event systems simulation approach, Journal of Air Transport Management, 2020, roz.87

<https://www.volocopter.com/en/>

<https://whatnext.pl/latajaca-taksowka-lilium-jet-odbyla-swoj-dziewiczny-lot/>

5. Rozkład ciśnienia na profilu lotniczym w miarę zmieniających się parametrów przepływu

Pressure distribution on the airfoil as flow parameters change

Jurkiewicz Martyna

Wydział Mechaniczno- Energetyczny, Politechnika Wroclawska

Opiekun naukowy dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Martyna Jurkiewicz: m.jurkiewicz9mj@gmail.com

Słowa kluczowe: kąt natarcia, NACA0020, współczynnik ciśnienia, siła nośna

Streszczenie

Rozkład ciśnienia na profilu lotniczym ulega zmianie w miarę zmieniających się parametrów lotu. Wykonane zostały badania zmienności wartości współczynnika ciśnieniowego w zależności od kąta natarcia profilu NACA0020. Badane wartości kąta natarcia to 0, 5, 10, 15 i 20 stopni. Wyniki badań przedstawione zostały w tabeli i w formie wykresu. Otrzymane wartości współczynnika ciśnienia są najwyższe w okolicy noska profilu i opadają wraz z przemieszczeniem się wzdłuż cięciwy profilu. Spośród badanych kątów najwyższe wartości tego parametru zostały uzyskane dla kąta natarcia równego 15 stopni.

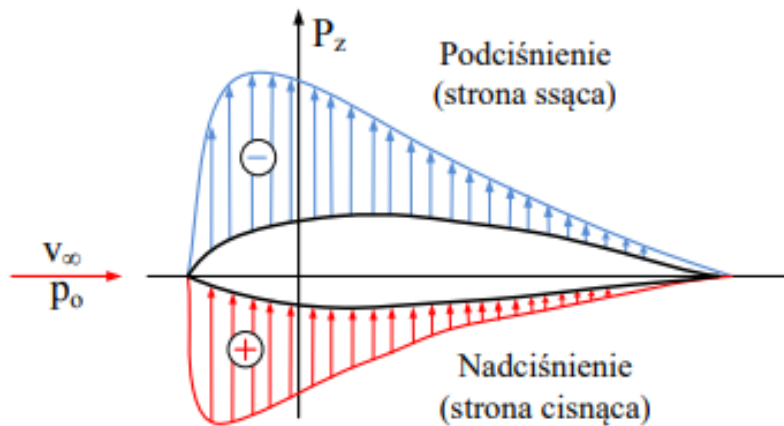
1. Wstęp

Zmienność wartości ciśnienia na profilu lotniczym jest uzależniona od parametrów przepływu czynnika opływającego profil. By profil lotniczy mógł spełniać swoją rolę, tj. wytwarzać niezbędną do lotu wartość siły nośnej, musi on być cyrkulacyjnie opływany przez napierające na niego strugi powietrza. Opływ cyrkulacyjny polega na niesymetrycznym rozkładzie prędkości cząsteczek czynnika opływającego profil. Niesymetryczny rozkład prędkości pomiędzy stroną dolną i górną profilu lotniczego, wywołuje również niesymetryczny rozkład ciśnienia powstającego na obu stronach opływającego ciała. Osiągane wartości ciśnienia są odwrotnie proporcjonalne do wartości osiąganych prędkości, tzn. tam gdzie panuje wysokie ciśnienie, otrzymywane są niższe wartości prędkości, niż ma to miejsce dla niższych wartości ciśnienia. Otrzymanie cyrkulacyjnego opływu profilu lotniczego jest kluczowe, by możliwe było uzyskanie odpowiednich własności nośnych tego profilu.

Bowiem powstanie siły nośnej jest możliwe dzięki niesymetrycznemu rozkładowi ciśnień po obu stronach profilu. Na górnej stronie profilu prędkość opływających strug jest wyższa, a więc ciśnienie jest niższe, jest to strona ssąca. Natomiast w dolnej części profilu strugi mają niższą prędkość, a ciśnienie analogicznie jest wyższe, ta strona nazywana jest stroną cisnącą. Tym samym profil lotniczy jest „zasysany” w górę przez stronę niższego ciśnienia. Powstała różnica ciśnień odpowiada za powstawanie siły nośnej, która powoduje unoszenie się profilu w górę (Ostapkowicz 2011). Na Rys.1 przedstawiony został przykładowy niesymetryczny profil lotniczy, na który napierają strugi powietrza pod kątem natarcia α .

W celu uzyskania odpowiednio wysokiej wartości siły nośnej, na etapie konstrukcyjnym profil lotniczy projektuje się, jako profil wygięty po stronie wyższego ciśnienia, co zapewnia większe różnice ciśnienia pomiędzy stronami profilu. Natomiast już podczas eksploatacji sterowanie wielkością siły nośnej odbywa się poprzez odpowiednie ustawienie noska profilu względem napływających strug. Kąt pod jakim ustawiony jest profil względem napływających strug nosi nazwę kąta natarcia (Domański 1974). W zależności od jego wartości uzyskuje się pożądane właściwości lotne. Dla każdego z dostępnych profili lotniczych, kąt ten będzie miał inną wartość, zależy on bowiem od budowy profilu. Przy czym kąt natarcia nie może być wartością dowolnie wybraną. Jego zakres jest ograniczony poprzez wartość krytycznego kąta natarcia, będącą maksymalną wartością przy której badany profil aerodynamiczny zachowuje swoje właściwości umożliwiające kontynuowanie lotu. Przekroczenie krytycznej wartości kąta natarcia powoduje oderwanie się strug

powietrza, na skutek czego następuje utrata siły nośnej oraz brak kontroli nad sterownością statku powietrznego (Domański 1974). W efekcie statek może wejść w niekontrolowany korkociąg, który może doprowadzić do rozbicia maszyny.



Rys. 1. Strona ssąca i cisząca profilu lotniczego (fluid.itcmp.wroc.pl).

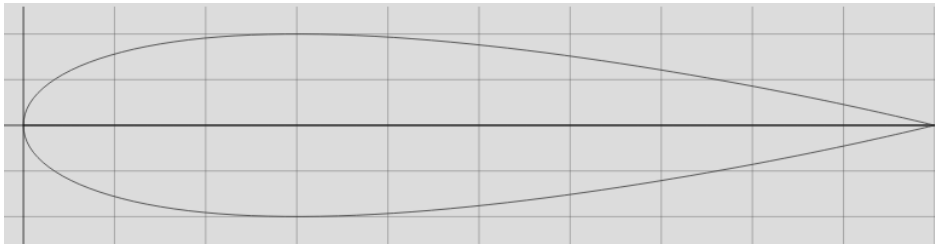
Badanie własności profilu aerodynamicznego NACA0020, a w szczególności wartości współczynnika ciśnienia, w zależności od zadanych wartości kąta natarcia opisane zostało w dalszej części pracy. Przeprowadzenie badań mających na celu wyznaczenie kąta natarcia przy którym profil cechują najwyższe wartości współczynnika ciśnienia jest istotne ze względu na różnice w osiąganych parametrach lotu dla danego kąta. Wyznaczenie najkorzystniejszego kąta natarcia ma wpływ na efektywność i ekonomię lotu statku powietrznego, który wyposażony jest w badany profil. Wytworzone w okolicy profilu różnice ciśnień pomiędzy dolną, a górną stroną pozwalają na uzyskanie niezbędnej do lotu wartości siły nośnej. Im jej wartość będzie większa, tym większe będzie unoszenie statku powietrznego. Zatem wykonując lot na optymalnej pod względem uzyskanych różnic w ciśnieniach, wartości kąta natarcia osiągnąć można lepsze właściwości aerodynamiczne, redukując tym samym ilość zużytego podczas przelotu paliwa. Co wpływa na wzrost ekonomiczności lotu, a także zwiększa zasięg statku powietrznego, z uwagi na fakt, że na tej samej ilości paliwa może pokonać dłuższą trasę.

Jako, że wypadkowa siła aerodynamiczna działająca na dany profil lotniczy jest wypadkową siły nośnej i siły oporu, dąży się do uzyskania takiej wartości kąta natarcia, która zapewni możliwie największą wartość siły nośnej, przy jak najniższej wartości siły oporu, która wpływa niekorzystnie na poruszanie się statku powietrznego w przestrzeni powietrznej.

2. Materiał i Metody

Badany profil jest profilem symetrycznym. Jego oznaczenie NACA0020 pozwala na odczytanie pewnych własności określających jego budowę. Analizując kolejne cyfry czterocyfrowego kodu profilu: pierwsza z nich określa wielkość maksymalnej krzywizny, jako procent cięciwy, w przypadku badanego profilu jest to „0”- czyli strzałka ugięcia nie występuje. Druga z cyfr oznacza odległość punktu największej krzywizny od krawędzi natarcia, jej wartość podawana jest jako wartość odległości liczona co 10%, w przypadku badanego profilu ta wartość również wynosi „0”, ponieważ jak wspomniano, strzałka ugięcia nie występuje. Kombinacja dwóch ostatnich cyfr to stosunek maksymalnej grubości profilu do długości jego cięciwy, dla wybranego profilu jest to „20”, co oznacza, że maksymalna grubość profilu NACA0020 jest równoważnością 20% jego długości. (fluid.itcmp.wroc.pl). Przekrój opisanego profilu aerodynamicznego przedstawiony został na rysunku zamieszczonym poniżej (Rys.2). Jak widać profil cechuje zaokrąglony nosek,

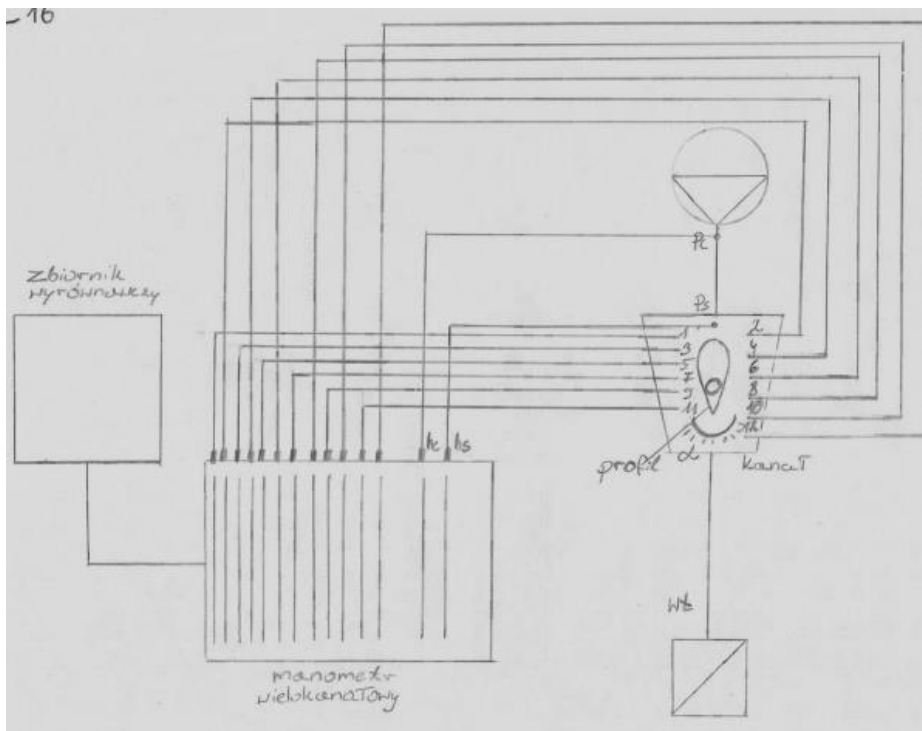
zwiększona grubość znajdująca się na około 25% cięciwy patrząc od noska. Po przekroczeniu maksymalnej grubości, profil zwęża się, aż do zaostrej krawędzi spływu.



Rys. 2. Profil NACA 0020. (tiny.pl)

W warunkach laboratoryjnych wykonane zostało badanie profilu lotniczego NACA0020, o średniej cięciwie aerodynamicznej równej 63mm. Stanowisko pomiarowe składało się ze specjalistycznej aparatury pomiarowej, w skład której wchodziły: badany profil, odczepy na których dokonywano pomiaru, manometr wielokanałowy, kanał doprowadzający czynnik roboczy opływający profil, zbiornik wyrównawczy, wentylator, zasilacz, przełącznik, oraz termometr. Na badanym modelu profilu znajduje się 10 odczepów w których dokonywane są pomiary wartości ciśnień panujących w jego okolicy podczas przepływu czynnika roboczego. Uzyskiwane w wyniku pomiarów wartości zmierzonych ciśnień, przedstawione zostały jako wysokości słupków cieczy manometrycznej, widoczne dzięki wskazaniom manometru wielokanałowego.

Schemat stanowiska został rozrysowany i przedstawiony na poniższym rysunku (Rys.3).



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego.

W pierwszej kolejności odczytane zostały odpowiednie parametry otoczenia, takie jak temperatura otoczenia, wysokości ciśnień, gęstość powietrza, a ich wartości umieszczono w poniższej tabeli (Tab.2). Po przygotowaniu i sprawdzeniu stanowiska pomiarowego, zostało ono włączone,

następnie wykonane zostały kolejne pomiary. Wartości ciśnień panujących w okolicy profilu odczytywane były dla uprzednio określonych 10 odczepów, których rozmieszczenie określone jest jako stosunek ich położenia do długości cięciwy, stosunki te zostały zamieszczone w tabeli poniżej (Tab.1).

Dla pierwszego z badanych kątów ustawienia profilu, równego 0°, wykonano 10 pomiarów, po jednym na każdym z określonych odczepów. Następnie, w ten sam sposób wykonane zostały pomiary wartości ciśnienia dla kolejnych kątów, tj. dla kątów: 5°, 10°, 15° i 20°. Po zakończeniu pomiarów aparatura została bezpiecznie rozłączona. Uzyskane drogą pomiarową wyniki zostały zebrane i umieszczone w tabeli zbiorczej (Tab.3), znajdującej się w rozdziale „Wyniki”.

Tab. 1. Rozmieszczenie odczepów.

x/c												
0,016	0,032	0,071	0,119	0,175	0,23	0,317	0,413	0,51	0,603	0,698	0,794	

Tab. 2. Warunki otoczenia.

Warunki pomiaru		
T	°C	19,7
Pb	hPa	988
φ	%	37
h ₀	mm	180
ρ _p	$\frac{kg}{m^3}$	1,172
ρ _w	$\frac{kg}{m^3}$	997,975
P _{nas}	hPa	22

3. Wyniki

Dokonano pomiarów wysokości ciśnienia dla poszczególnych kątów natarcia równych 0, 5, 10, 15 i 20 stopni. Na podstawie zmierzonych wartości obliczono prędkość właściwą dla kolejnych pomiarów. Znając wartość prędkości obliczono wartości współczynników ciśnienia.

Wartość prędkości strugi niezakłóconej liczona jest w następujący sposób:

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{2(p_c - p_{pl})}{\rho}} v_{\infty} = \sqrt{2 * g * (h_c - h_{pl}) \frac{\rho_w}{\rho_p}}, ms^{-1} \quad (1.1)$$

Współczynnik ciśnienia obliczany jest poniższej zależności:

$$C_p = \frac{p_n - p_{pl}}{\frac{1}{2} \rho_p v_{\infty}^2} = \frac{(h_n - h_{pl}) g * \rho_w}{\frac{1}{2} \rho_p v_{\infty}^2}, \quad (1.2)$$

Wzory 1.1 i 1.2 zostały powzięte z instrukcji do badań laboratoryjnych „Rozkład ciśnienia przy opływie płata” (fluid.itcmp.wroc.pl)

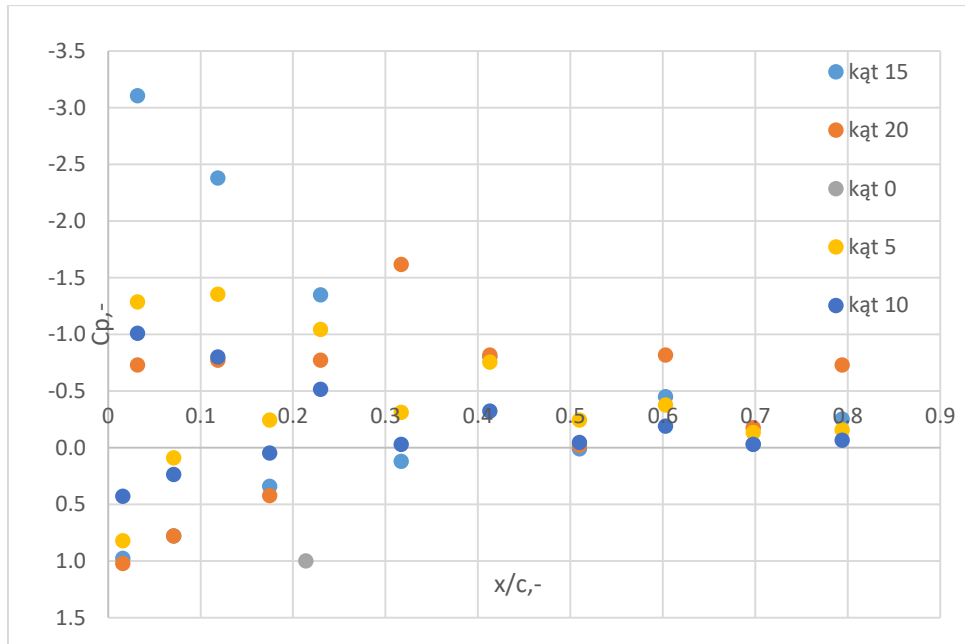
Wyniki pomiarów dla każdego z badanych kątów wraz z wartościami obliczonymi na podstawie powyższych wzorów (wzory 1.1 i 1.2), odpowiadające kolejnym odczepom umiejscowionym na profilu lotniczym zostały zebrane i zamieszczone w poniższej tabeli zbiorczej (Tab.3). Dane zamieszczone w tabeli (Tab.3) zostały uszeregowane według wartości kątów natarcia dla których zostały zmierzone bądź obliczone.

Tab. 3. Wyniki pomiarów dla poszczególnych kątów.

Nr odczepu	h	h _{pl}	v _∞	C _p	h	h _{pl}	v _∞	C _p	h	h _{pl}	v _∞	C _p
	mm	mm	m/s		mm	mm	m/s		mm	mm	m/s	
dla kąta 0°				dla kąta 5°				dla kąta 10°				
1	192	2	27,66	0,214	220	3	27,43	0,822	228	-3	41,89	0,429
2	175			-0,158	125			-1,287	77			-1,009
3	160			-0,485	187			0,09	208			0,238
4	153			-0,638	122			-1,354	99			-0,799
5	154			-0,617	172			-0,243	188			0,048
6	154			-0,617	136			-1,043	129			-0,514
7	159			-0,507	169			-0,31	180			-0,028
8	161			-0,464	149			-0,754	149			-0,323
9	166			-0,354	172			-0,243	178			-0,047
10	167			-0,333	166			-0,377	163			-0,19
11	172			-0,223	177			-0,132	180			-0,028
12	179			-0,07	176			-0,155	176			-0,066
hc	228		0,214	228			288					
hs	186			188			188					

dla kąta 15°				dla kąta 20°				
Nr odczepu	h	h _{pl}	v _∞	C _p	h	h _{pl}	v _∞	C _p
	mm	mm	m/s		mm	mm	m/s	
1	229	-4	27,588	0,978	235	9	27,45	1,022
2	43			-3,105	156			-0,729
3	220			0,78	224			0,778
4	76			-2,38	154			-0,773
5	200			0,341	208			0,424
6	123			-1,349	154			-0,773
7	190			0,122	116			-1,616
8	148			-0,8	152			-0,818
9	185			0,012	188			-0,02
10	164			-0,449	152			-0,818
11	183			-0,032	181			-0,175
12	173			-0,251	156			-0,729
hc	230				234			
hs	192				204			

Zależność współczynnika ciśnienia od miejsca położenia na cięciwie profilu dla każdego z rozpatrywanych kątów przedstawiona została na wykresie zamieszczonym na poniższym rysunku (Rys.4). Oś pionowa (y) na której znajdują się wartości współczynnika ciśnienia, został przedstawiona odwrotnie, wartości ujemne znajdują się w górnej części osi poziomej, co pozwala na lepsze zobrazowanie faktycznego występowania wartości nadciśnienia i podciśnienia na badanym profilu. Ponieważ, jak zostało niejednokrotnie wspomniane górna strona profilu jest stroną ssącą- występuje na niej podciśnienie, natomiast poniżej profilu panuje nadciśnienie- jest to strona pchająca.



Rys. 4. Wartości współczynnika Cp w zależności od położenia na cięciwie profilu.

4. Dyskusja i wnioski

Analizując otrzymane wyniki zauważyć można zmienność wartości współczynnika w zależności od położenia odczepu na cięciwie badanego profilu. Im odczepy znajdują się w większej odległości od noska profilu, tym otrzymane wartości współczynników ciśnienia są niższe. Dla odczepów położonych w pobliżu ostrza (końcówki profilu) wartości współczynnika bliższe są wartości równej zero. Wskazuje to, że w tym miejscu różnice w wartościach ciśnienia są najmniejsze, a wręcz znikome. Zgodnie z modelem teoretycznym największe różnice pomiędzy stroną ssącą, a cisnącą znajdują się w okolicy noska profilu, co obrazuje jego własności aerodynamiczne. Własność ta pośrednio również tłumaczy dlaczego profile projektowane są w taki sposób, że w okolicy noska są grubsze i zwężają się ku krawędzi spływu.

Przyglądając się otrzymanym wartościom współczynników ciśnienia dla rozpatrywanych kątów natarcia, zauważa się największe zmiany w wartościach nadciśnienia i podciśnienia dla kąta natarcia równego 15°. Przy czym wartości współczynników ciśnienia po stronie ssącej, dla tego kąta w okolicy noska osiągają znacznie wyższe wartości, niż ma to miejsce dla pozostałych spośród badanych kątów. Zatem uważa się ten kąt natarcia za najkorzystniejszy spośród rozpatrywanych w powyższym doświadczeniu dla badanego modelu profilu lotniczego typu NACA0020. Dla tej wartości kąta natarcia siła nośna wytwarzana na profilu ma największą wartość, zatem parametry aerodynamiczne osiągają najkorzystniejsze wartości. Co pozwala na osiągnięcie najlepszych właściwości lotu, podczas przelotu statku powietrznego wyposażonego w badany doświadczalnie profil. Wartość zasięgu powinna wzrosnąć na skutek obniżenia zużycia paliwa, które zmniejszone zostało poprzez wzrost siły nośnej.

Dla ostatniego z badanych katów natarcia równego 20° obserwuje się relatywnie wysokie wartości współczynnika ciśnienia po stronie cisnącej. Jednak wartości współczynnika ciśnienia po stronie ssącej uległy znacznemu obniżeniu dla pierwszych dwóch odczepów w porównaniu do poprzedniego kąta równego 15° . Może być to oznaką odrywania się strug, co w przypadku dalszego zwiększania wartości kąta natarcia doprowadzić może do przeciągnięcia, a tym samym utraty siły nośnej. Zatem długotrwały lot na tej wartości kąta nie jest wskazany.

W przypadku mniejszych wartości kąta natarcia obserwuje się zanik podciśnienia od miejsca określonego jako stosunek położenia odczepu na cięciwie równy 0,3 dla kąta 10° , wartości współczynnika są bliskie zeru. W przypadku kąta natarcia równego 5° wartości współczynnika przechodzą po obu stronach profilu w wartości dodatnie już przed miejscem określonym jako stosunek położenia odczepu na cięciwie równy 0,2. Świadczy to o braku podciśnienia dla tego kąta, a więc i o braku nośności.

1. Literatura

<https://tiny.pl/rbl4k>

http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~zmp/Dodatki/Lab/instruk/L16*.pdf

Domański J (1974) 1000 słów o samolocie i lotnictwie, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 175; 271.

Ostapkowicz P (2011) Analiza koncepcji sterowania lotem bezzałogowych modeli latających typu MAV z wykorzystaniem urządzeń manewrowych umieszczonych na krawędzi natarcia skrzydła, Prace Instytutu Lotnictwa 216: 128-129

6. Dwuklockowe hamulce przemysłowe, rozwiązania konstrukcyjne, tok obliczeniowy

Two-brake pads industrial brakes, design solutions, calculation course

Mateusz Kucharski

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Akademicki Klub Lotniczy

Mateusz Kucharski : mateusz.kucharski16@gmail.com

Słowa kluczowe: mechanika, tarcie, projektowanie

Streszczenie

Od początku rewolucji przemysłowej hamulce były nieodłącznym elementem każdej maszyny. Wraz z rozwojem technologii stawiane są im coraz większe wymagania. Restrykcje bezpieczeństwa, wydajności, a także niezawodności, spowodowały, że obecne hamulce są dopracowywane i poddawane licznym testom wytrzymałościowym i cieplnym. Dzięki nowym osiągnięciom techniki, w tym w dziedzinie analiz numerycznych, elementy cierne takie jak klocki, czy też tarcze, są coraz lżejsze i odporniejsze na ekstremalne warunki pracy.

W tej pracy zostaną omówione podstawowe rodzaje hamulców dwuklockowych przemysłowych, ich zastosowanie, rozwiązania konstrukcyjne jak i tok obliczeniowy. Pojawi się porównanie z hamulcami jednoklockowymi, a także zostaną przedstawione innowacje z zakresu metod numerycznych. Poruszony zostanie temat realizowania hamowania przy użyciu takich urządzeń jak siłownik hydrauliczny, czy zwalniak elektromagnetyczny.

Celem tej pracy jest zapoznanie czytelnika z zagadnieniami wytrzymałościowymi, a także cieplnymi hamulców dwuklockowych. Dodatkową ideą jest pokazanie podstawowych mechanizmów ich działania, parametrów opisujących ich pracę, a także ograniczeń konstrukcyjnych wynikających z norm wprowadzanych przez instytucje takie jak Unia Europejska lub inne działające na rzecz ochrony środowiska.

1. Wstęp

Hamulce cierne są najczęściej stosowane spośród wszelkich hamulców. Znajdują one szerokie zastosowanie w motoryzacji, przemyśle, transporcie, czy górnictwie. Ze względu na funkcje spełniane w maszynie rozróżnia się hamulce: Trzymające - w czasie pracy danej maszyny są zluźnione, a w czasie postoju - zahamowane. Stosowane np. w dźwignicach, windach. Hamulec trzymający jest zastosowany też np. w Polince na Politechnice Wrocławskiej, gdzie w razie awarii prądu ma za zadanie zapobiec zsunięciu się wagonu. Wstrzymujące - służą do regulacji prędkości, stosowane chociażby w szeroko pojętych napędach gąsienicowych. Pomiarowe - jak nazwa sama wskazuje, służą do pomiaru, stosowane do obciążania badanych maszyn na tzw. hamowniach. W niniejszym referacie skupiono się na hamulcach dwuklockowych przemysłowych.

2. Jednoklockowe kontra dwuklockowe

Praktycznie w dzisiejszych układach napędowych hamulca jednoklockowego nie spotkamy. Biorąc pod uwagę wydajność układu hamulcowego, zastosowanie dwóch klocków ma wiele korzyści. Większa siła tarcia usprawnia hamowanie, pozwala zastosować mniejszy nacisk, co przekłada się na mniejsze zużycie elementów ciernych. Ponadto, w układzie dwuklockowym, symetryczne rozmieszczenie nacisków nie powoduje obciążenia wału, osi, czy też łożysk, co ma miejsce w przypadku jednego klocka. Kolejną bardzo istotną zaletą układu dwuklockowego jest identyczna siła włączająca w obydwu kierunkach.

3. Budowa

Hamulec dwuklockowy jest stosunkowo prosty w budowie. Składa się z: bębna osadzonego na wale maszyny, dwóch klocków osadzonych na bębnie, zespołu dźwigni, włącznika w różnych

postaciach (siła obciążająca najczęściej realizowana jest w postaci sprężyny) i zwalniaka. Wyróżniamy trzy sposoby osadzenia klocków: na zewnętrznej powierzchni bębna, wewnętrznej i doczołowej. Hamulce bębnowe dwuklockowe z osadzeniem doczołowym, często potocznie nazywane są tarczowymi.

4. Parametry

W literaturze zagranicznej (Childs 2004) istnieje jeszcze podział każdego z wyżej wymienionego osadzenia klocka w zakresie długości szczęk hamulca (tzw. kąta opasania). Wyróżniamy:

- Krótkie szczęki - jeżeli kąt rozwarcia szczęk jest mniejszy niż 45° ;
- Długie szczęki - jeżeli kąt rozwarcia szczęk jest większy niż 45° .

W zagranicznych pozycjach literaturowych (Childs 2004) wyróżniamy także kilka parametrów opisujących pracę hamulców. Jedne z nich to:

- współczynnik hamowania (ang. brake factor) - jest to stosunek siły tarcia do faktycznej siły użytej aby to tarcie wywołać;
- stabilność - wyraża jak bardzo moment hamujący jest wrażliwy na zmiany współczynnika tarcia. Jeżeli zmiany te spowodowane na przykład wilgocią są małe, mówimy że hamulec jest stabilny. Natomiast, jeżeli małe zmiany współczynnika tarcia powodują znaczące w momencie hamowania, mówimy, że hamulec jest niestabilny.

Hamulce dwuklockowe z osadzeniem wewnętrznym znajdują zastosowanie w motoryzacji (przeważnie w tylnej osi kół w samochodzie). Osadzenie zewnętrzne znajduje zastosowanie w przemyśle: w windach, nawijarkach, młynach itd.

5. Zasada działania

Zasada działania hamulca dwuklockowego jest prosta, za pomocą włącznika, dźwignie dociskają klocki do bębna. Siłę włączania można zrealizować na kilka sposobów. W przeszłości była ona realizowana ręcznie, chociażby w kolejach. Hamulce były uruchamiane na gwizdek maszynisty. Obecnie ze względu na najczęstszy charakter pracy (trzymający), pracę włącznika realizuje zazwyczaj zwora elektromagnetyczna w postaci sprężyny. Jeżeli chcemy układ rozpiąć, podajemy prąd elektryczny, który rozciąga sprężynę i rozłącza klocki hamulcowe. W przypadku zaniku napięcia, zwora automatycznie się zamyka, blokując hamulec. W przemyśle znajdziemy też zwalniaki elektrohydrauliczne, czy odśrodkowe. Wybór zwalniaka jest zdeterminowany charakterem pracy hamulca. W przypadku elektrohydraulicznego, przyrost momentu hamowania jest stosunkowo łagodny. Zwalniak elektromagnetyczny działa znacznie radykalniej (Dietrich 2017).

6. Budowa zwalniaka elektromagnetycznego

Obudowa zwalniaka składa się z podstawy wykonanej z żeliwa. Jest ona wyposażona w komorę tłumika powietrznego i blaszaną osłonę. W osłonie zamocowany jest trójkolumnowy elektromagnes. Końce cewek elektromagnesu wyprowadzone są na zewnątrz osłony do tabliczki zaciskowej osłoniętej pokrywą blaszaną wyposażoną w dławik służący do wyprowadzenia przewodu zasilającego. W komorze tłumika na wodzidle połączonym ze zworą elektromagnesu zamocowany jest tłok tłumika powietrznego. Wodzidło w części wystającej poza korpus zwalniaka, ma otwory przeznaczone do połączenia ze zwalnianym układem hamulcowym. Do regulacji tłumienia służy śruba znajdująca się w korpusie komory tłumika powietrznego. Zwalniaki elektromagnetyczne dobiera się do danego hamulca obliczając pracę, jaką wykonują w czasie jednego działania. Musi być ona mniejsza, niż ta podana w katalogu, który oczywiście musi spełniać normy. Ponadto, siła sprężyny powinna mieścić się od 65% do 100% udźwigu znamionowego zwalniaka (polimet.com.pl).

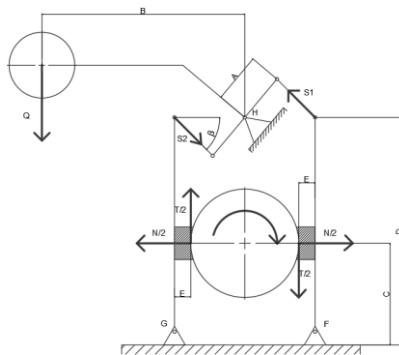
7. Zwalniak elektrohydrauliczny

Innym rozwiązaniem rozłączania hamulca jest zastosowanie zwalniaków elektrohydraulicznych. Zwalniak taki napędzany jest trójfazowymi silnikami indukcyjnymi. Te

z kolei, zasilają pompy hydrauliczne, które powodują wysunięcie tłoka i związanego z nim tłoczyska zwalniaika w górne położenie, zwalniając w ten sposób hamulce. Z energetycznego punktu widzenia, ciągła praca silników elektrycznych jest nieopłacalna. W tym celu stosuje się cewki elektromagnesu, które po doprowadzeniu do nich napięcia, przyciągają zworę wraz z tłokiem w górnym położeniu. Powoduje to rozwarzenie wyłącznika krańcowego w zwalniaiku i od tej pory tłoczysko utrzymywane jest w górnym położeniu jedynie przez elektromagnes. Powrót do położenia dolnego następuje po wyłączeniu zasilania elektromagnesu. W celu większego bezpieczeństwa takiego układu, często stosuje się akumulatory ciśnienia, a także agregaty prądotwórcze. Zwalniak taki zastosowany jest w Polince na Politechnice Wrocławskiej.

Przy doborze zwalniaika elektrohydraulicznego powinniśmy kierować się siłą wysuwu tłoczyska. W celu wyłączenia hamulca, powinna ona pozwolić na ściśnięcie sprężyny do tego stopnia, aby klocki zostały zluźnione. Norma opisująca dobór zwalniaika elektrohydraulicznego to DIN 15430 opisująca urządzenia elektrohydrauliczne (polimet.com.pl).

8. Obliczenie siły włączającej



Rys.1 Schemat hamulca dwuklockowego.

Najważniejsze podczas procesu hamowania jest to aby moment hamowania był większy od momentu na wale maszyny, którą chcemy zatrzymać.

$$M_H > M_o = \frac{P}{\omega}$$

Moment hamowania jest spowodowany tarciem, jest on równy:

$$M_H = T \cdot R, \text{ gdzie: } R \text{ to średnica bębna, a } T \text{ to siła tarcia.}$$

Z kolei siła tarcia równa jest:

$$T = N \cdot \mu$$

gdzie N to siła normalna, a μ to współczynnik tarcia.

W celu obliczenia siły włączającej Q , zastosowano poniższe warunki równowagi.

$$\begin{aligned} \sum M_H &= 0 \\ \sum M_H &= Q \cdot B - A \cdot (S_1 + S_2) \\ Q &= \frac{A \cdot (S_1 + S_2)}{B} \end{aligned}$$

Siły S_1 i S_2 obliczymy z kolejnych równań równowagi:

$$\begin{aligned} \sum M_G &= 0 \quad \text{i} \quad \sum M_F = 0 \\ \sum M_G &= 0.5 \cdot N \cdot C + 0.5 \cdot T \cdot E - S_2 \cdot D \cdot \cos \alpha \\ \sum M_F &= -0.5 \cdot N \cdot C + 0.5 \cdot T \cdot E + S_1 \cdot D \cdot \cos \alpha \\ S_1 &= 0.5 \cdot (N \cdot C - T \cdot E) / (D \cdot \cos \alpha) \\ S_2 &= 0.5 \cdot (N \cdot C + T \cdot E) / (D \cdot \cos \alpha) \end{aligned}$$

9. Obliczenia wytrzymałościowe

W celu dobrania wymiarów klocka, należy wyjść z warunku na docisk między klockiem, a bębniem. Musi być on mniejszy od dopuszczalnego, który z kolei wynika bezpośrednio z użytego materiału ciernego.

Siła tarcia jest równa:

$$T = \frac{2 \cdot M_H}{D}$$

gdzie: M_H to moment hamujący, a D to średnica bębna.

Wiemy jednak, że siła tarcia równa jest sile normalnej pomnożonej przez współczynnik tarcia.

$$T = N \cdot \mu$$

A więc:

$$N = \frac{T}{\mu} = \frac{2 \cdot M_H}{D \cdot \mu}$$

W celu wyliczenia nacisku, należy znać powierzchnię tarcia między klockiem, a bębniem. Przyjmijmy, że klocek osadzony jest na zewnętrznej powierzchni bębna. Nacisk wynosi wtedy:

$$P = \frac{2 \cdot N}{b \cdot D \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

gdzie: b to szerokość czynna hamulca, a α to tzw. kąt opasania.

Podstawiając N , otrzymujemy :

$$P = \frac{4 \cdot M_H}{b \cdot D^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

warunek $P < P_{dop}$ musi być spełniony (Osiński 1988).

10. Trwałość klocków hamulcowych

W celu obliczenia trwałości okładziny klocków, należy obliczyć maksymalną ilość włączeń hamulca.

$$Z = \frac{V}{q \cdot L}$$

gdzie:

V - objętość klocka, która może być zużyta do wymiany;

q - jednostkowe zużycie;

L - praca hamowania.

$$L = \frac{1}{2} \cdot M_H \cdot \omega \cdot t$$

gdzie:

M_H - moment hamujący;

ω - prędkość na początku hamowania;

t - czas hamowania.

$$V = \frac{\alpha \cdot D \cdot b \cdot s}{57,3 \cdot 2}$$

gdzie:

α - kąt opasania w radianach;

D - średnica bębna;

b - szerokość klocka;

s - grubość klocka, która może zostać zużyta.

Po obliczeniu Z i oszacowaniu liczby zahamowań na godzinę Z_g można otrzymać trwałość klocków w godzinach pracy (Osiński 1988).

$$T_k = \frac{Z}{Z_g}$$

11. Przybliżona metoda obliczania wytrzymałości cieplnej

Uproszczone sprawdzenie hamulca na rozgrzewanie opiera się na sprawdzeniu pracy tarcia w jednostce czasu na powierzchni tnącej. Jest ona rozpraszana w postaci ciepła. Gdy jest ono za duże, układ nie nadaje go odprowadzać i następuje wzrost temperatury.

Pracę jednostkowego tarcia możemy wyrazić jako nacisk pomnożony przez prędkość i współczynnik tarcia. Musi być ona mniejsza od dopuszczalnej.

$$\mu p v \leq (\mu p v)_{dop}$$

Nacisk p wynika z obliczeń wytrzymałościowych i wynosi:

$$p = \frac{4 \cdot M_H}{b \cdot D^2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Prędkość v jest prędkością względną obwodową. W celu bezpieczeństwa, przyjmujemy jej wartość maksymalną, czyli na początku hamowania (Osiński, 1988).

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

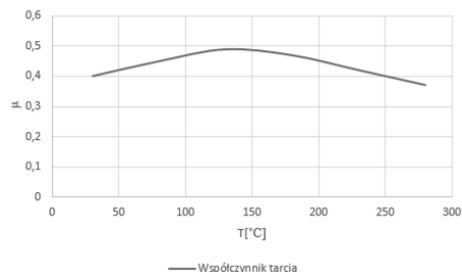
n - liczba obrotów na minutę bębna.

Tab. 1. Wybrane wartości parametrów określających wytrzymałość cieplną hamulca (Dziurski, Kania, Mazanek 2012).

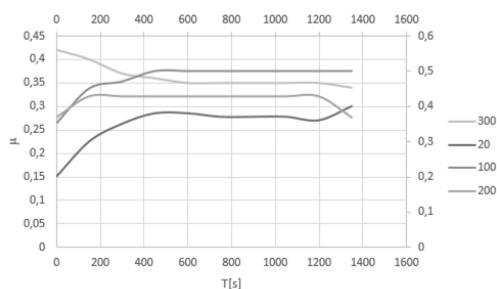
Średnica bębna hamulcowego, [mm]	Dopuszczalna średnia moc hamowania dla hamulców klockowych, [W]	Jednostkowa dopuszczalna praca tarcia, [MPa m s ⁻¹]	Maksymalny moment hamowania przy prędkości obrotowej bębna hamulcowego n , [obr min ⁻¹]		
			1500	1000	750
			[Nm]		
200	800	0,75	80	120	-
250	1000	0,80	130	190	260
320	1500	0,90	-	350	460
400	2100	1,00	-	620	830
500	3000	1,10	-	-	1400
630	4200	1,25	-	-	2600
710	6000	1,35	-	-	3200

12. Numeryczna metoda obliczania wytrzymałości cieplnej

Zjawisko tarcia i odprowadzania ciepła jest jednak dużo bardziej złożonym zjawiskiem i do potrzeb inżynieryjnych nie można go uprościć do obliczeń takich jak powyżej. Współczynnik tarcia zależy od rodzaju materiału, chropowatości powierzchni, prędkości bębna, a także od temperatury i czasu tarcia. Tak więc mamy do czynienia z pewną funkcją. Poniższy wykres (Rys.2) przedstawia zależność współczynnika tarcia w funkcji temperatury. Próba została wykonana przy użyciu okładziny ciernej firmy TRW i żeliwa stosowanego w tarczach hamulcowych (Z1250). Spadek współczynnika tarcia przy wyższych temperaturach jest najprawdopodobniej spowodowany rozpuszczaniem się żywic spajających, co powoduje tworzenie się warstwy gazów pomiędzy pracującymi elementami (Krupa 2008).



Rys.2 Zależność współczynnika tarcia skojarzenia tarcza-klocki od temperatury

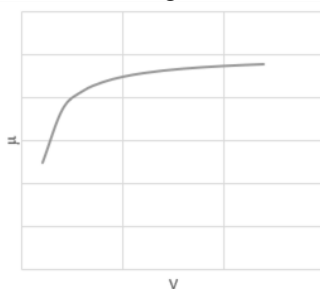


Rys.3 Zależność współczynnika tarcia od czasu tarcia dla danej temperatury.

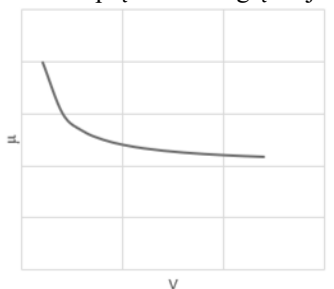
Kolejnym ważnym parametrem jest czas hamowania. Dla tej samej próby sporządzono cztery wykresy (Rys.3) współczynnika tarcia od czasu dla danej temperatury. Jak widać z wykresu, dla różnych temperatur mamy różne zachowanie współczynnika tarcia w funkcji czasu. Może on rosnąć, maleć albo być stały. Dotyczy to oczywiście tylko układu klocek- tarcza z materiałów określonych wyżej.

Prędkość względna także ma wpływ na współczynnik tarcia. Dla niektórych materiałów maleje on wraz z jej wzrostem, a dla niektórych rośnie. Na poniższych wykresach przedstawiono taką zależność dla stali i tworzyw sztucznych, które trą po stali na sucho (home.agh.edu.pl).

Wszystkie te zmienne parametry powodują, że nie da się obliczyć z zadowalającą dokładnością wytrzymałości cieplnej hamulca metodami upraszczającymi. Wraz z postępem technologicznym i wzrostem mocy obliczeniowej komputerów, coraz częściej modeluje się takie zjawiska chociażby w programie Ansys. Nie jest to jednak proste. Podstawą jest znajomość wszelkich danych materiałowych, poprawne określenie warunków brzegowych, a także zaimportowanie odpowiednich równań wyrażających zależności takie jak powyżej. Innym ważnym etapem jest odpowiednie przedstawienie geometrii hamulca w postaci elementów skończonych. Należy dobrać odpowiedni jego rodzaj, wielkość, a także należy zdefiniować miejsca, gdzie ilość tychże elementów powinna być gęstsza - przełoży się to na dokładność obliczeń. Cały proces jest skomplikowany, wymaga wiedzy teoretycznej jak i praktycznej. Poprawna interpretacja wyników jest kluczem podczas projektowania takiego układu hamulcowego (Belhocine i Bouchetara 2012).



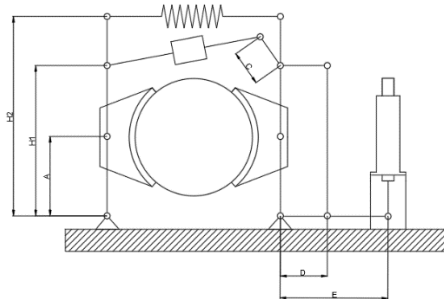
Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia od prędkości względnej dla tworzywa sztucznego



Rys.5 Zależność współczynnika tarcia od prędkości względnej dla stali

13. Dobór sprężyny i zwalniaka

W przypadku hamulca trzymającego, bardzo istotny jest odpowiedni dobór sprężyny i zwalniaka. Oba te elementy muszą ze sobą ściśle pracować. Rozpatrzmy poniższy uproszczony schemat:



Rys.6 Schemat hamulca do obliczeń.

Założmy następujące wymiary:

Tab.2 Założone wymiary charakterystyczne.

H_1	H_2	A	D	C	E
450 mm	550 mm	140 mm	140 mm	80 mm	280 mm

Korzystając ze wzoru: $s = 2 \cdot \delta \cdot \frac{H_1 \cdot E}{A \cdot C}$

gdzie: δ to luz między bębnem, a klockiem w stanie zluźowanym. Przyjmijmy, że jest on równy 2 mm.

$$\text{Zatem: } s = 2 \cdot 2 \cdot \frac{450 \cdot 280}{140 \cdot 80} = 45 \text{ mm}$$

Dobieramy do układu hamulcowego zwalniak DZEM 20 o skoku równym 50mm. Aby obliczyć siłę napięcia sprężyny należy zdefiniować ciężary dźwigni, a także ciężar zwory.

G_z - ciężar zwory dla danego zwalniaka wynosi 80N

Zakładamy ciężar dźwigni o długości E równy 15 N (G_e), a dźwigni H_1 równy 17 N (G_h).

Korzystając z poniższego wzoru:

$$S = \frac{A}{H_2} \cdot \left[N - \frac{H_1}{A} \cdot \left(G_z \cdot \frac{E}{D} + G_e \cdot \frac{E}{2D} + G_h \right) \cdot \frac{D}{C} \cdot \sqrt{1 - \frac{C^2}{d^2}} \right]$$

Przyjmijmy średnicę bębna $d = 360 \text{ mm}$, a nacisk na klocki $N = 3000 \text{ N}$

Wtedy:

$$S = \frac{140}{550} \cdot \left[3000 - \frac{450}{140} \cdot \left(80 \cdot \frac{280}{140} + 15 \cdot \frac{280}{280} + 17 \right) \cdot \frac{140}{80} \cdot \sqrt{1 - \frac{80^2}{360^2}} \right] = 496 \text{ N}$$

Do realizowania takiej siły użyjemy sprężyny ze stali stopowej sprężynowej walcowanej na gorąco dla której moduł G wynosi $81,4 \cdot 10^3 \text{ MPa}$, średnica drutu 7 mm(d), średnica zwojów 70 mm(D), liczba zwojów 12(i), a maksymalna obciążająca siła wynosi ok. 1100 N.

Liczmy sztywność sprężyny

$$c = \frac{Gd^4}{8D^3i} = \frac{81,4 \cdot 10^3 \cdot 7^4}{8 \cdot 70^3 \cdot 12} = 5,94 \text{ N/mm}$$

Ugięcie sprężyny f wyniesie więc:

$$f = \frac{S}{c} = \frac{496}{5,94} = 84 \text{ mm}$$

Podczas luzowania hamulca sprężyna ulega dodatkowemu napięciu:

$$\Delta f = 2 \cdot \delta \cdot \frac{H_2}{A} = 4 \cdot \frac{550}{140} = 15,7 \text{ mm}$$

Sumaryczna siła napięcia sprężyny wynosi:

$$S_1 = S + \Delta f c = 496 + 15,7 \cdot 5,94 = 589 \text{ N}$$

Siła zwalniająca niezbędna do zluźnienia hamulca wynosi:

$$Z = S_1 \cdot \frac{H_2}{H_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{C^2}{d^2}}} \cdot \frac{C}{E} + G_h \cdot \frac{D}{E} + \frac{1}{2} \cdot G_e + G_z$$

$$Z = 589 \cdot \frac{550}{450} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{80^2}{360^2}}} \cdot \frac{80}{280} + 17 \cdot \frac{140}{280} + \frac{1}{2} \cdot 15 + 80 = 307 \text{ N}$$

Praca wykonana przez zwalnik wynosi: $A = Z \cdot s = 307 \cdot 0,045 = 13,8 \text{ J}$

Jest ona mniejsza od maksymalnej pracy dla wybranego zwalnika, więc został on dobrany poprawnie (Dziurski i in. 2012).

14. Klocki hamulcowe

Przy projektowaniu hamulców, dobór odpowiednich materiałów ciernych ma ogromne znaczenie. Powierzchnia bębna, zazwyczaj wykonana z żeliwa lub stali, musi posiadać dobre właściwości tarcia. Powinny one być stabilne w zakresie użytkowanych temperatur. Ponadto, bęben taki powinien mieć dobrą przewodność cieplną, a także być odporny na zużycie cieplne. Aby zredukować ubytek materiału ciernego w klocku, powierzchnia bębna powinna być gładka, o małej chropowatości. Przy projektowaniu układu hamulcowego powinno uwzględniać się rozszerzalność cieplną materiałów użytych - nie uwzględnienie tego podczas konstrukcji może być tragiczne w skutkach.

Klocki hamulcowe powinny natomiast charakteryzować się wysokim, jak i stabilnym współczynnikiem tarcia dynamicznego. Niewielka ilość brudu, oleju, wilgoci nie powinna wpływać na jego wartość. W celu lepszej dystrybucji nacisku na bęben, powinny być one także elastyczne. W przeszłości podstawowym materiałem klocków hamulcowych był azbest. Pełnił on funkcję tzw. włókien wzmacniających. Rozpoznanie zagrożeń dla zdrowia spowodowanych tą substancją spowodowało duży rozwój w kierunku opracowania nowoczesnych materiałów ciernych. Większość dziś stosowanych klocków hamulcowych składa się z metali formowanych, tkanych lub spiekanych. Te pierwsze są najbardziej powszechne, a zarazem najmniej kosztowne. W ich skład wchodzi spoiwo w postaci żywicy termoutwardzalnych, włókna wzmacniające i różne dodatki/wypełniacze. Tkane metale są najczęściej spotykane w hamulcach taśmowych, gdzie wymagana jest duża elastyczność. Spiekane materiały cierne z metalu są najdroższe ale najlepiej nadają się do ciężkich zastosowań, gdzie praca jest ciągła w temperaturach powyżej 260°C. Klocki takie wykonuje się z proszku metalicznego i wypełniaczy, które formowane są pod wysokim ciśnieniem, a następnie spiekane. Najmniej kosztownymi klockami są z tzw. materiału papierowego. Są one wykonane z włóknistych arkuszy nasączonych żywicą z dodatkami w postaci wypełniaczy, czy modyfikatorów tarcia. Klocki takie charakteryzują się wysoką pojemnością cieplną (Juvinall i Marshek 2017).

15. Spis literatury

- Belhocine A, Bouchetara M (2012) Thermal analysis of a solid brake disc
 Childs P (2004) Mechanical Design Second Edition: 205-210, ISBN 0 7506 5771 5
 Juvinall RC, Marshek KM (2017) Fundamentals of Machine Component Design sixth edition: 704-705, ISBN: 978-1-118-98768-1
 Dietrich M (2015) podstawy konstrukcji maszyn, tom 3: 190-192, ISBN 83 204 2343 0
 Dziurski A, Kania L, Mazanek E (2012) Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn tom 2: 140;188-189, ISBN 9788393491353
 Krupa M (2008) Wpływ temperatury na wartość współczynnika tarcia samochodowych hamulców ciernych
 Osinki Z (1988) Sprzęgła i hamulce: 173-175, ISBN 83 01 08859 1
www.polimet.com.pl
www.agh.edu.pl

7. Wstępny projekt małogabarytowego tunelu aerodynamicznego

Preliminary design of a small-sized wind tunnel

Mateusz Kucharski

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Akademicki Klub Lotniczy

Mateusz Kucharski : mateusz.kucharski16@gmail.com

Słowa kluczowe: mechanika płynów, przepływy, lotnictwo, aerodynamika

Streszczenie

Tunele aerodynamiczne istnieją i są dopracowywane od zarania dziejów. Jest to spowodowane pewnymi komplikacjami związanymi z klasyczną mechaniką płynów. Podstawowymi równaniami opisującymi zasadę zachowania pędu poruszającego się płynu są równania Naviera-Stokesa. W przypadku prostych zagadnień tj. przepływ laminarny, model ten pozwala na analityczne obliczenie rozwiązania. Bardziej skomplikowane problemy tj. wyznaczenie siły nośnej płata są nierozwiązywalne. Jest możliwość przybliżenia wyniku dzięki metodom numerycznym przy użyciu komputerów, jednak nadal nie będzie to pełne rozwiązanie. Wynika to z faktu, że wszelkie oprogramowania obliczają dane zagadnienie metodami iteracyjnymi. W związku z powyższą komplikacją, w 2000 roku Instytut Matematyczny Claya ogłosił równania Naviera- Stokesa jednym z siedmiu problemów milenijnych matematyki. Brak bezpośredniego rozwiązania wspomnianych równań powoduje, że badania doświadczalne nadal są podstawowym elementem analiz aerodynamicznych. W tej pracy zostaną umówione podstawowe rodzaje tuneli aerodynamicznych, ich zalety oraz wady. Zostanie przedstawiony tok obliczeniowy podczas projektowania takiego stanowiska. Pojawi się przykład symulacji przepływowej, a także wstępny szkic konstrukcji. Celem tej pracy jest zapoznanie czytelnika z zagadnieniami przepływowymi, a także ciśnieniowymi. Dodatkową ideą jest porównanie maszyn wirnikowych.

1. Wstęp

Tunele aerodynamiczne dzielą się na dwie zasadnicze grupy. Poddźwiękowe, w których prędkość w sekcji pomiarowej nie przekracza liczby Macha równej 1 oraz naddźwiękowe, w których przekracza - te z kolei znajdują duże zastosowanie w lotnictwie militarnym, gdzie zjawisko ściśliwości powietrza jest wszechobecne. Tunele generujące małe prędkości przepływu są powszechnie stosowane w lotnictwie małym jak i w całej branży motoryzacyjnej. Zasada działania tunelu aerodynamicznego jest stosunkowo prosta. Wentylator umieszczony w kanale generuje strumień powietrza, który opływa badany obiekt. Ten z kolei zazwyczaj przymocowany jest do tensometru, dzięki któremu możemy odczytać działające na niego siły. Na ich podstawie, można obliczyć współczynnik siły nośnej jak i oporu. Niniejsza praca dotyczy tuneli poddźwiękowych.

2. Opis zagadnienia

Tunele poddźwiękowe dzielimy na dwie zasadnicze grupy ze względu na konstrukcje: otwarte (Rys.1) i zamknięte (Rys.2).

Oba rozwiązania mimo tego samego przeznaczenia charakteryzują się innymi zaletami i wadami.

Konstrukcja tunelu aerodynamicznego powinna być odpowiednio zoptymalizowana pod kątem strat ciśnienia w kanale. Badany obiekt, bardzo często jest mniejszy, niż ten w rzeczywistości. Jest to związane z ograniczeniami gabarytowymi kanału. Aby zapewnić ten sam charakter przepływu w tunelu, stosuje się efektywne wentylatory które generują duże strumienie powietrza. Parametrem porównawczym przepływów jest przede wszystkim liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

Gdzie

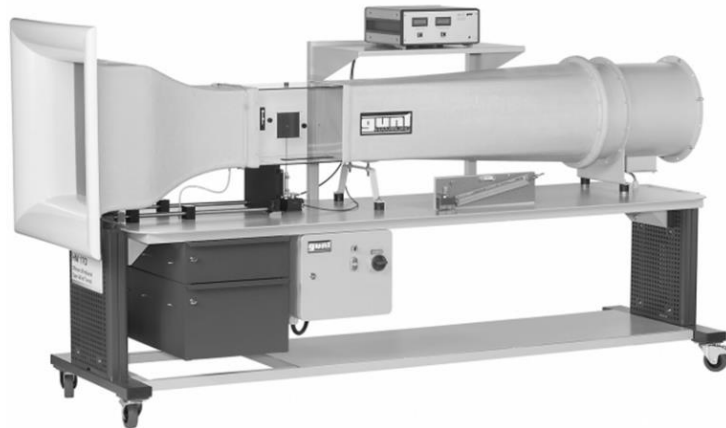
v -prędkość przepływu;

l - wymiar charakterystyczny zagadnienia;

ν -lepkość kinematyczna płynu.

Widzimy więc, że przy zachowaniu tej samej lepkości płynu, na wartość liczby Reynoldsa wpływa prędkość i gabaryt obiektu. W celu zachowania jej wartości względem przepływu rzeczywistego, prędkość w tunelu aerodynamicznym powinna być większa od rzeczywistej o tyle razy o ile badany obiekt został zmniejszony liniowo względem rzeczywistego. Wymóg ten determinuje w tunelach aerodynamicznych bardzo duże prędkości. Te z kolei generują bardzo duże straty ciśnienia. Jeżeli przy zadanej wydajności wentylatora, jego spręż jest mniejszy niż ilość strat, będzie on zmuszony pracować na mniejszej wydajności, a co za tym idzie- prędkość w kanale będzie mniejsza. Charakterystyka typowego wentylatora przedstawia Rys.3.

W tunelach aerodynamicznych stosuje się zasadniczo dwa rodzaje wentylatorów: osiowe i promieniowe. Wentylator osiowy charakteryzuje się bardzo dużą wydajnością ale małym sprężem. Promieniowy wręcz odwrotnie, przy mniejszym strumieniu dysponuje większym sprężem. Zobrazowanie różnic w osiągniętych parametrach przez oba rodzaje urządzeń przedstawia Tab.2.



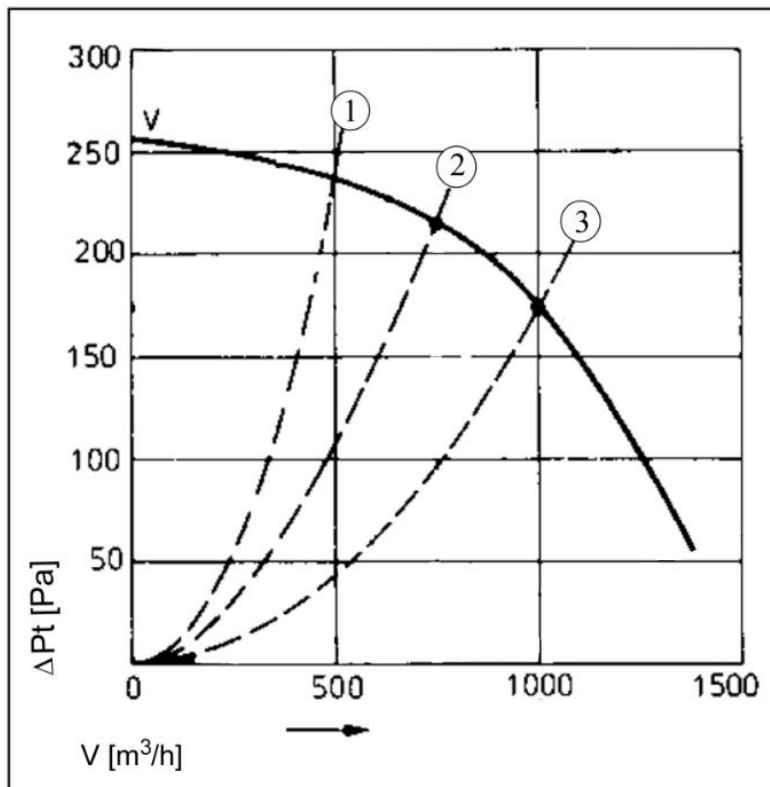
Rys. 1. Tunel o obiegu otwartym (gunt.de).



Rys. 2. Tunel o obiegu zamkniętym (aerolab.com).

Tab. 1. Porównanie zalet i wad tunelu zamkniętego i otwartego.

	Tunel otwarty	Tunel zamknięty
Zalety	Stosunkowo niski koszt produkcji (małe wymiary, brak kolanek, kierownic)	Dobra jakość przepływu w sekcji pomiarowej
	Przyjazna konstrukcja dla wizualizacji przepływu w postaci dymu - brak gromadzenia spalin	Niski koszt eksploatacji- w czasie cyrkulacji powietrza wentylator musi jedynie pokonać straty związane z tarciem i z zakrętami Cicha praca
Wady	Duży hałas podczas pracy	Duży koszt produkcji (kolanka, dłuższa długość kanału).
	Stosunkowo słaba jakość przepływu w sekcji pomiarowej. Konieczność instalacji prostownic strug.	Większe straty ciśnienia wymagają zastosowania wentylatora o większym sprężu.
	Tunel należy trzymać z dala od przedmiotów w pomieszczeniu, z powodu wypływającego z dużą prędkością powietrza jak i z powodu widma ssania.	Większa temperatura w kanale- wymagane zastosowanie wymienników ciepła lub aktywnego chłodzenia.
	Wentylator musi stale przyspieszać przepływ przez tunel.	



Rys. 3. Charakterystyka wentylatora (instalreporter.pl).

Wybór wentylatora zdeterminowany jest więc charakterystyką kanału jak i pożądaną w nim prędkością.

Tab. 2. Porównanie wentylatorów (orox.pl; wentylatorysklep.pl).

Typ wentylatora	Osiowy	Promieniowy
Model	WO-100/1 3F	WPR-7
Moc silnika elektrycznego [kW]	7,5	7,5
Wydajność maksymalna [$m^3 h^{-1}$]	45000	14200
Spręż maksymalny [Pa]	530	3150

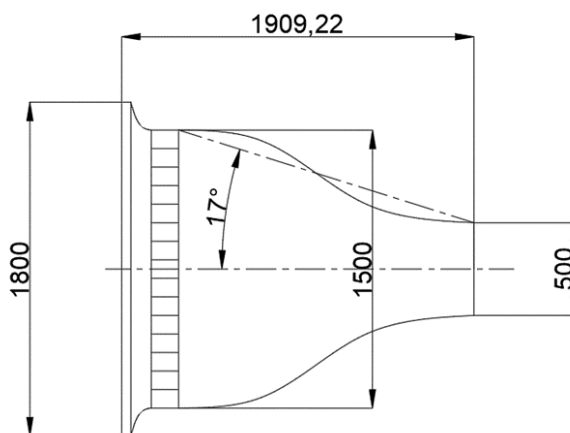
3. Przegląd literatury i obliczenia

Na podstawie danych literaturowych i Tab.1 można stwierdzić, że tunel o obiegu otwartym jest prostszy konstrukcyjnie. Z tego też powodu bardzo cieszy się popularnością i z powodzeniem używany jest na uczelniach wyższych w celach dydaktycznych.

W celu przedstawienia toku projektowania takiego stanowiska, założmy na potrzeby tego artykułu, że przekrój pomiarowy tunelu wynosi $0,25 m^2$, a pożądana w nim prędkość $50 m s^{-1}$. Strumień powietrza wynosi więc $12,5 m^3 s^{-1}$.

3.1 Konfuzor

Podstawowym elementem tunelu otwartego jest konfuzor. To w nim dochodzi do przyspieszania powietrza. Kąt rozwarcia tego kanału wynosi zazwyczaj ok. 30 stopni. Nie ma jednak przeciwwskazań do zwiększenia tej wartości- nie dochodzi tu do oderwania strug.



Rys. 4. Wstępny rysunek konfuzora.

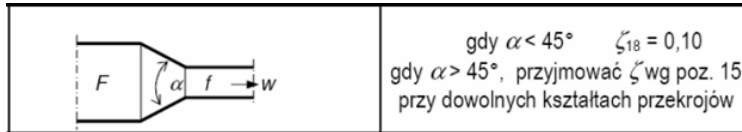
Zaprojektowany konfuzor mimo, aż 34 stopni rozwarcia, został poprowadzony z łagodną zmianą przekroju, w celu redukcji strat miejscowych. Element na wejściu zaznaczony kilkoma prostokątami w linii, to prostownica strug. Ma ona za zadanie zredukować turbulencję przepływu. Cały konfuzor ma przekrój kwadratowy. Zaokrąglony wlot ma na celu rozszerzenie widma ssania. Straty ciśnienia na tym odcinku można policzyć ze wzoru (Pelech 2008):

$$\Delta p_m = \zeta \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}$$

gdzie:

ζ – współczynnik oporu miejscowego;
 ρ – gęstość powietrza ($1,225 kg m^{-3}$);

w - prędkość na końcu konfuzora.



Rys. 5.Straty miejscowe dla konfuzora (Pelech 2008).

Na podstawie Rys.5. straty miejscowe w konfuzorze wynoszą:

$$\Delta p_m = 0,1 \cdot \frac{50^2 \cdot 1,225}{2} \sim 153,1 \text{ Pa}$$

3.2 Sekcja pomiarowa

Kanał pomiarowy powinien być odpowiednio długi. Mimo, że jest on za konfuzorem, w którym nie chodzi do oderwania strug, warto, aby jego długość wynosiła co najmniej 2 długości boków. Zdecydowano się na długość równą 1,2m. Sekcja ta musi mieć odpowiedni dostęp, bowiem to w niej będą umieszczane badane obiekty. W celu lepszej wizualizacji badań, kanał ten powinien być wykonany chociażby z przezroczystego szkła akrylowego. Straty liniowe ciśnienia, które powoduje opór tarcia, podczas przepływu burzliwego przez przewód o dowolnym kształcie opisuje zależność Darcy-Weisbacha (Pelech 2008):

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{4 \cdot R} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2}$$

gdzie:

λ - bezwymiarowy współczynnik tarcia;

R – promień hydrauliczny (0,5 m);

w – średnia prędkość przepływu (50 m s⁻¹);

l -długość kanału (1,2 m).

Liczba Re dla kanału pomiarowego o długości 1,2m wynosi:

$$Re = \frac{50 \cdot 0,5}{0,0000157} = 1592 \text{ 357}$$

Bezwymiarowy współczynnik strat możemy obliczyć ze wzoru Nikuradse:

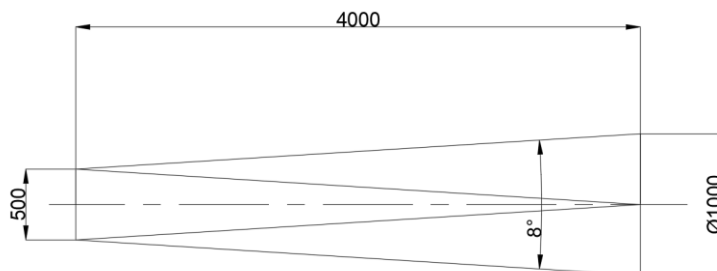
$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \sim 0,0107$$

Wobec tego straty liniowe w kanale pomiarowym wynoszą:

$$\Delta p = 0,0107 \cdot \frac{1,2}{4 \cdot 0,125} \cdot \frac{50^2 \cdot 1,2}{2} = 40,14 \text{ Pa}$$

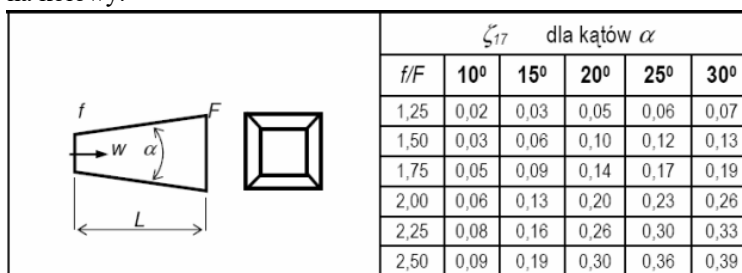
3.3 Dyfuzor

Kanał dyfuzorowy jest sekcją, w której pole przekroju rośnie wzdłuż strumienia powietrza, a prędkość maleje. Jego kąt rozwarcia nie może być za duży, gdyż przy około 35°-40° jego straty miejscowe są maksymalne, czyli takie jak w przypadku nagłego rozszerzenia przewodu. Z tego też powodu stosowanie dyfuzorów o za dużym kącie rozwarcia jest bezcelowe. Ponadto, przy kącie rozwarcia większym niż 10 stopni, dochodzi do oderwania strugi powietrza. Z tego też powodu, zdecydowano się na kąt rozwarcia 8 stopni.



Rys. 6. Wstępny schemat dyfuzora.

Ze względów technologiczno-montażowych, kształtka dyfuzora przechodzi z przekroju kwadratowego na kołowy.



Rys.7. Straty miejscowe dla dyfuzora (Pełech 2008).

Kąt rozwarcia dyfuzora równy jest 8 stopni. Przyjęto $\alpha = 10^\circ$.

$$f = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ m}^2$$

$$F = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{1}{4} \text{ m}^2$$

$$\frac{F}{f} = \pi \cdot \frac{0,25}{0,25} = \pi$$

Przyjęto wartość $\frac{F}{f}$ równą 2,50.

$$\xi = 0,09$$

$$w = 50 \text{ m s}^{-1}$$

$$\Delta p_m = 0,09 \cdot \frac{50^2 \cdot 1,225}{2} \sim 137,81 \text{ Pa}$$

3.4. Pozostałe straty ciśnienia.

Oprócz wyżej wymienionych strat, należy uwzględnić przede wszystkim spadek ciśnienia na wylocie. Opór prostownicy strug został pominięty, gdyż przy dużym stopniu zagęszczeniu otworów i małej prędkości przepływu jest on znikomy.



Rys.8. Straty miejscowe dla wylotu (Pełech 2008).

Prędkość na wylocie:

$$w = \frac{12,5}{\pi \cdot \frac{1}{4}} \sim 15,92 \text{ m s}^{-1}$$

$$\xi = 1$$

$$\Delta p_m = 1 \cdot \frac{15,92^2 \cdot 1,225}{2} \sim 155,24 \text{ Pa}$$

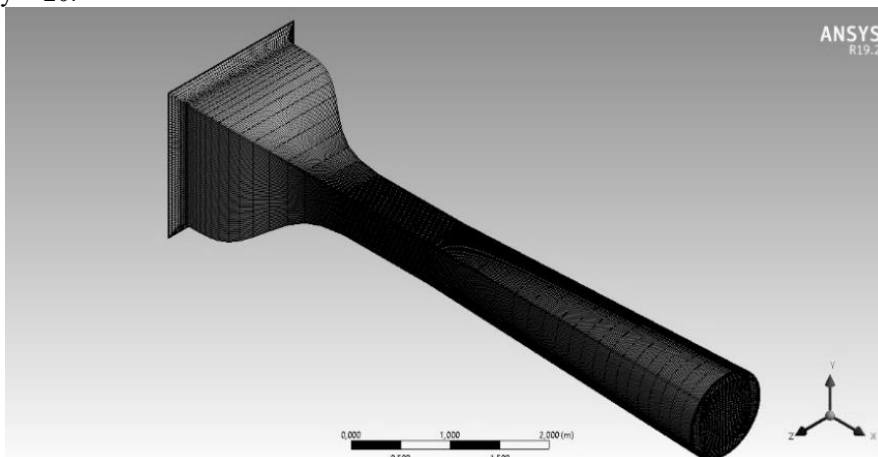
Suma strat ciśnienia całego kanału:

$$\sum p_m = 153,1 + 137,81 + 155,24 = 446,15 \text{ Pa}$$

3.4 Weryfikacja obliczeń w programie Ansys Fluent

W celu sprawdzenia obliczeń analitycznych przeprowadzono symulacje przepływu w programie Ansys Fluent. Jest to narzędzie powszechnie stosowane w przemyśle. Nie jest ono

jednak proste w obsłudze. Bardzo istotne jest odpowiednie zamodelowanie siatki obliczeniowej jak i zadanie poprawnych warunków brzegowych. Najważniejsze podczas tworzenia siatki jest odpowiednie zdefiniowanie warstwy przyściennej. Parametrem opisującym wysokość pierwszej komórki jest parametr y^+ . W zależności od zastosowanego modelu turbulencji, jego pożądana wartość jest inna. Dla zastosowanego modelu k-epsilon zakres ten wynosi 10-100. W tej symulacji przyjęto wartość $y^+=20$.



Rys. 9. Siatka obliczeniowa w programie Ansys.

Tab. 3. Parametry siatki

Element skończony	Ilość elementów	Wysokość pierwszej komórki	Y^+	Skośność siatki	Jakość ortogonalna
sześcian	271920	0,39 mm	20	0,19	0,83

Odpowiednie zadanie warunków brzegowych jest bardzo istotne. Aby móc je zaimplementować do programu, trzeba wyróżnić charakterystyczne powierzchnie badanego obiektu takie jak: wlot, ściana, wylot.

Tab.4. Warunki brzegowe i warunki symulacji.

Wlot	Ściana	Wylot
Strumień objętości $12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Brak poślizgu, prędkość przy ścianie równa 0 m s^{-1}	Ciśnienie całkowite na wylocie 0 Pa
Gęstość powietrza $1,225 \text{ kg m}^{-3}$	Temperatura 15°C	Lepkość dynamiczna $1,7894 * 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Z warunków brzegowych, wiemy, że ciśnienia na wylocie wynosi 0 Pa. Wobec tego, całkowite strata ciśnienia równa jest ciśnieniu na wlocie, które wyniosło 408,183 Pa. Wartość ta odbiega od tej wyliczonej analitycznie o około 40 Pa. Różnica wynika głównie z faktu, że wartości współczynników strat miejscowych w obliczeniach zostały przyjęte z pewnym współczynnikiem bezpieczeństwa. Źródło z którego zostały zaimplementowane dane nie dysponowało współczynnikami dla np. każdego kąta rozwarcia kanału, stosunków przekrojów itd. Ponadto, dane literaturowe nie uwzględniały łagodnej zmiany przekroju konfuzora.

3.5 Dobór wentylatora

Dobór wentylatora jest podyktowany kilkoma kwestiami. Przede wszystkim musi być on zdolny do pracy z wymaganą wydajnością ($12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Ponadto, jego spręż dla tego strumienia musi być większy od strat ciśnienia w kanale. W instalacjach wentylacyjnych przyjmuje się, że spręż powinien być większy od oporów o około 10-15%. Taki nadmiar przyjmuje się głównie ze względu na poprawkę, gdyż straty zazwyczaj są nieco większe. W przypadku tunelu, należy wciąć pod uwagę również fakt, że obiekty badane w sekcji pomiarowej również generują opory. W związku z tym, dobrano wentylator osiowy Fläkt 100JMV/31/4/9/19 (flaktgroup.com)

Tab.5. Dane techniczne wentylatora (flaktgroup.com).

Strumień objętości	$12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Spręż	600 Pa
Moc silnika	13,2 kW
Moc na wale	12,4 kW
Minimalna temperatura pracy	-40°C
Maksymalna temperatura pracy	50°C
Minimalne obroty	292 rpm
Maksymalne obroty	1800 rpm

4. Podsumowanie i wnioski

W wyniku rozwijającej się gałęzi przemysłu jaką jest numeryczna mechanika płynów, która umożliwia badanie opływu badanych obiektów, tunele aerodynamiczne są nadal niezastąpionym narzędziem w aerodynamice doświadczalnej. Zaprojektowany kanał charakteryzuje się małymi stratami ciśnienia i łagodnymi przejściami geometrii kanału. Przeprowadzona symulacja numeryczna potwierdza słuszność obliczeń analitycznych. Tunel aerodynamiczny stwarza ogromny potencjał badawczy jak i dydaktyczny. Na stanowisku takim można przeprowadzić badania efektywności turbiny, czy chociażby charakterystyk aerodynamicznych płata.

5. Bibliografia

Pełech A, 2008, Wentylacja i klimatyzacja- podstawy, 387-407, ISBN 978 83 7493 780 1
www.instalreporter.pl
www.orox.pl
www.wentylatorysklep.pl
www.gunt.de
www.aerolab.com
www.flaktgroup.com

8. Metody usuwania zanieczyszczeń organicznych występujących w wodach

Methods of removing organic pollutants in water

Kucio Karolina

Katedra Chromatografii, Instytut Nauk Chemicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin

Opiekun naukowy: dr hab. Barbara Charmas, prof. UMCS

Kucio Karolina: karolina.kucio@poczta.umcs.lublin.pl

Słowa kluczowe: zaawansowane procesy utleniania, adsorpcja, biodegradacja, koagulacja, barwniki

Streszczenie

Obecnie społeczeństwo boryka się z problemem zanieczyszczeń wód. Do wód trafiają ogromne ilości toksycznych barwników pochodzących z przemysłu. Ilość metod, które są wykorzystywane do jej oczyszczania stale rośnie. Jednym ze sposobów eliminacji barwników jest zastosowanie metod biologicznych, które wykorzystują materiały naturalne, w tym torf oraz odpowiednie szczepy grzybów lub bakterii. Niestety metody te charakteryzują się niską efektywnością. Dodatkowo, zastosowanie ich na skalę masową wymaga wykorzystania ogromnych ilości materiału, co z kolei generuje wysokie nakłady finansowe. Alternatywnymi metodami usuwania barwników z roztworów wodnych są metody fizykochemiczne, w tym koagulacja i adsorpcja na węglu aktywnym. Efektywność tych metod zależy od wielu czynników, dlatego kontrola nad ich przebiegiem może być uporczywa. Obecnie duże znaczenie w procesach oczyszczania wód odgrywają zaawansowane procesy utleniania, do których zaliczana jest fotokatalityczna degradacja barwników. Procesy te umożliwiają skuteczną eliminację szkodliwych związków organicznych.

1. Wstęp

Woda jest najważniejszym surowcem, który jest niezbędnym człowiekowi do życia. Już niewielkie ilości zanieczyszczeń trafiających do wód mogą powodować zagrożenie dla prawidłowego rozwoju fauny i flory oraz zdrowia i życia ludzi. Zanieczyszczenia wód wynikają między innymi z obecności chorobotwórczych bakterii, a także związków nieorganicznych w tym soli, metali ciężkich oraz związków radioaktywnych (Srinivasan 2011). W związku z dynamicznym rozwojem przemysłu do wód trafiają również szkodliwe związki organiczne. Dużą grupę tych związków stanowią barwniki, czyli toksyczne, często kancerogenne związki organiczne, które powodują nieodwracalne zmiany w organizmach żywych. Zanieczyszczenia tego typu najczęściej pochodzą z przemysłu papierniczego, kosmetycznego, spożywczego oraz włókienniczego, w tych obszarach barwniki stosowane są w ogromnych ilościach (Tomczak i Kamiński 2012).

Barwnikami nazywamy związki organiczne, które posiadają zdolność do absorpcji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie widzialnym $\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$ (Lacy i Lindsten 1957). Absorpcja promieniowania jest możliwa dzięki obecności w cząsteczkach barwnika odpowiednich jonów, atomów bądź ugrupowań chemicznych zwanych chromoforami (najczęściej – $\text{N}=\text{N}-$, $-\text{C}=\text{N}-$, $-\text{C}=\text{C}-$, $-\text{C}=\text{O}-$, $-\text{NO}_2$). Kolejne struktury istotne z punktu widzenia „barwy” to ugrupowania auksochromowe i batochromowe. Grupy auksochromowe to elektrodonorowe ugrupowania atomów, które zmieniają zakres absorbowanego promieniowania powodując zmianę intensywności zabarwienia. Do auksochromów zalicza się takie ugrupowania jak: $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ i NH_3 (Góralczyk i in. 2016). Ugrupowania batochromowe charakteryzuje obecność wiązań podwójnych lub wolnych par elektronowych. Powodują one tzw. efekt batochromowy, czyli przesuwanie się maksimum absorpcji światła w kierunku fal o wyższej długości, np. od nadfioletu do światła widzialnego. Przeciwnościem efektu batochromowego jest efekt hipsochromowy. Ze względu na rodzaj chromoforu, ale także strukturę chemiczną cząsteczki wyróżnia się około 30 klas barwników (Sudha i in. 2014). Należą do nich, między innymi, barwniki azowe, nitrowe, nitrozowe,

ftaleinowe, trójfenylometanowe, indygooidowe i antrachinonowe (Góralczyk i in. 2016; Dąbek i in. 2013).

Struktura barwników jest bardzo stabilna, co jest korzystne z praktycznego punktu widzenia. Dzięki temu barwne tkaniny oraz przedmioty użytkowe zachowują swoją barwę podczas użytkowania. Niestety, trwałość tych związków stanowi również istotny problem, ponieważ jako zanieczyszczenia są trudnodegradowalne. Oznacza to ogromny problem z punktu widzenia ekologii i ochrony środowiska (Tomczak i Kamiński 2012). Przykładem barwnika, który wykazuje wyjątkowo toksyczne działanie jest zieleń malachitowa. Barwnik ten powoduje uszkodzenie chromosomów oraz wpływa negatywnie na funkcjonowanie nerek, wątroby i układu rozrodczego. Może powodować również powstawanie nowotworów (Góralczyk i in. 2016). Największe ilości barwników wykorzystuje się w przemyśle włókienniczym. Skład ścieków, które są emitowane z zakładów produkcyjnych jest różnorodny i zależy od wielu czynników. Nawet najmniejsza ilość barwnika, który występuje w ściekach, jest zjawiskiem bardzo niepożądanym. Z uwagi na fakt, że procesy oczyszczania ścieków są często nieskuteczne, barwniki mogą łatwo przedostawać się do środowiska i powodować barwienie wody. Powoduje to ograniczenia w możliwości wnikania światła do zbiorników wodnych, w wyniku czego dochodzi do zjawiska eutrofizacji wód (Tomczak i Kamiński 2012).

Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej społeczeństwa ważnym aspektem stało się poszukiwanie nowych, efektywnych metod usuwania toksycznych związków z wód. Ilość stosowanych procedur jest stosunkowo duża, jednak często są one kosztowne i powodują powstawanie zanieczyszczeń wtórnych. Metody te są także zależne od wielu czynników, które wpływają na przebieg oraz skuteczność procesu oczyszczania.

Celem pracy była analiza doniesień literaturowych dotyczących porównania różnych metod usuwania barwników z roztworów wodnych.

2. Opis zagadnienia

2.1 Biologiczne metody usuwania barwników

Biosorpcja jest jedną z biologicznych metod eliminacji barwników, w której jako sorbenty często stosuje się pozostałości roślinne lub zwierzęce, które finalnie ulegają biodegradacji. Biosorbenty najczęściej pochodzą z produktów oraz odpadów rolnych i leśnych. Swoje zdolności sorpcyjne zawdzięczają obecnym w swojej budowie kompleksom ligandowo-celulozowym. Znajdujące się tam grupy funkcyjne, między innymi aldehydowe, alkoholowe i ketonowe, umożliwiają tworzenie nowych wiązań chemicznych z substancją, która ma zostać zabsorbowana. Najpopularniejszym naturalnym biosorbentem posiadającym kompleks ligandowo-celulozowy jest torf, czyli skała osadowa powstająca w wyniku przemian zachodzących w szczególnych warunkach, polegających na niepełnym rozkładzie obumarłych szczątków roślinnych. Torf wykorzystywany jest najczęściej jako surowiec energetyczny. Dodatkowo charakteryzuje się dobrymi właściwościami jonowymiennymi. Niestety posiada niską wytrzymałość mechaniczną oraz pęcznieje od nadmiaru wody. Aktywacja torfu wymaga poddania go modyfikacji chemicznej z wykorzystaniem kwasów lub procesowi termicznemu (Góralczyk i in. 2016).

Kolejną metodą biologicznego usuwania barwników jest biodegradacja, która polega na rozkładzie cząsteczek barwnika na związki prostsze i charakteryzujące się niższą toksycznością. Proces ten zachodzi w wyniku działania zewnątrzkomórkowych lub wewnątrzkomórkowych enzymów, co prowadzi do dekoloryzacji roztworów oraz przekształcenia barwników do prostszych związków. W niektórych przypadkach w trakcie tego procesu dochodzi do mineralizacji barwników, a powstające produkty reakcji to CO₂, H₂O i inne niskocząsteczkowe związki nieorganiczne. Niestety, proces ten może prowadzić również do powstania związków o prostszej budowie, ale o udokumentowanej toksyczności. Degradacja barwników może zachodzić w obecności enzymów wytwarzanych przez grzyby z rodzaju: *Funalia trogii*, *Phlebia termellosa*, *Phanerochaete chrysosporium* czy *Trametes versicolor*. Zdolność biodegradacji toksycznych barwników posiadają również niektóre szczepy bakterii z rodzaju: *Staphylococcus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Desulf vibrio sp.* lub *Alcaligenes sp.* (Góralczyk i in. 2016).

Do biologicznych metod usuwania barwników zaliczana jest także bioakumulacja. Proces ten polega na wiązaniu barwnika do ściany komórkowej i jego późniejszej akumulacji w obrębie cytoplazmy. Najczęściej stosuje się w tym celu drożdże: *Candida utilis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Rhodotorula glutinis*, *Pichia fermentans*. Proces bioakumulacji powinien być prowadzony w optymalnych warunkach dotyczących: temperatury, pH podłoża oraz obecności odpowiedniej ilości azotu i węgla (Góralczyk i in. 2016).

2.2 Fizykochemiczne metody usuwania barwników

Jedną z fizykochemicznych metod usuwania barwników jest koagulacja. Istotą procesu jest łączenie małych cząstek koagulantu w większe agregaty, na których zachodzi adsorpcja rozpuszczonej materii organicznej. Wynikiem tego jest zmniejszenie mętności oraz intensywności zabarwienia wody. Metoda ta jest znana już od ponad 100 lat. Początkowo jako koagulatory w procesach oczyszczania wody stosowano siarczan glinu i chlorek żelaza (Jiang 2015). Związki te z powodzeniem stosowane są do dnia dzisiejszego. Usuwanie barwników z roztworów wodnych w procesie koagulacji zależy od: pH, dawki koagulantu, czasu i intensywności mieszania. Skuteczność procesu zmniejsza się wraz ze wzrostem pH w kierunku zasadowym oraz wzrasta wraz z ilością usuwanego związku organicznego znajdującego się w roztworze wodnym. Efektywność procesu koagulacji zależy też od rodzaju usuwanych związków, gdyż charakteryzują się one różnymi rozmiarami, kształtami oraz składem chemicznym (Szlachta i Adamski 2008; Jiang 2015).

Dobrze znaną i często stosowaną metodą eliminacji zanieczyszczeń jest adsorpcja na węglu aktywnym. W ostatnich kilkunastu latach węgle aktywne cieszyły się ogromną popularnością w procesach usuwania barwników oraz innych związków organicznych i nieorganicznych zawartych w wodzie. W wyniku adsorpcji dochodzi do wiązania cząsteczek różnych związków na powierzchni adsorbentu. Adsorbenty powinny charakteryzować się dobrze rozwiniętą powierzchnią właściwą. Efektywność procesu uwarunkowana jest masą cząsteczkową, rozpuszczalnością i polarnością zanieczyszczeń, a także rodzajem grup funkcyjnych występujących na powierzchni adsorbentu. Główną wadą stosowania adsorpcji w procesach oczyszczania wody jest wysoka cena komercyjnych węgli aktywnych, które są dostępne na rynku (Bezak-Mazur i Adameczyk 2011; Malik 2004).

Kolejną metodą fizykochemicznego usuwania barwników jest odwrócona osmoza, która należy do ciśnieniowych procesów membranowych. Proces odwróconej osmozy polega na wymuszonej dyfuzji jonów lub cząsteczek przez błonę półprzepuszczalną w kierunku roztworu o niższym stężeniu. W procesie tym niezbędne jest zastosowanie ciśnienia zewnętrznego (1 - 10 MPa), co umożliwia transport przez membranę. Najczęściej, jako membrany stosuje się układy kompozytowe lub polimerowe, w których dwie różne substancje ułożone są warstwowo. Do najczęściej stosowanych polimerów należy: diocetan i trioctan celulozy oraz ester celulozowy (Tałałaj 2013).

Ogromne zainteresowanie związane z procesami oczyszczania wody spowodowało, że wciąż poszukiwane są nowe, bardziej skuteczne metody eliminacji zanieczyszczeń. Dużą uwagę skupia się na zwiększeniu efektywności procesów przy jednoczesnej redukcji kosztów. Zarówno biologiczne jak i fizykochemiczne metody oczyszczania wody są często są pracochłonne i wymagają znacznego nakładu finansowego w związku z koniecznością stosowania wysoko rozwiniętej infrastruktury (Shannon i in. 2009). W ostatnich latach uwagę naukowców zwróciły zaawansowane procesy utleniania (AOP, *Advanced Oxidation Processes*). Umożliwiają one całkowite usunięcie związków organicznych z wody (Chong i in. 2010).

2.3 Zaawansowane procesy utleniania

Zaawansowane procesy utleniania obejmują reakcje, w których wytwarzane są rodniki hydroksylowe (OH^\cdot) w ilości wystarczającej do oczyszczenia wody. Metody zaawansowanego utleniania stosowane są głównie w celu degradacji organicznych lub nieorganicznych zanieczyszczeń znajdujących się w wodzie i ściekach. W trakcie tych procesów powstają rodniki, które są silnymi utleniaczami. W konsekwencji powodują one skuteczną eliminację zanieczyszczeń zawartych w ściekach przekształcając je w nietoksyczne produkty (Deng i Zhao 2015). Zaawansowane procesy utleniania mogą być prowadzone w fazie homogenicznej lub w fazie heterogenicznej. Wspólnym

mianownikiem wszystkich tych procesów jest zastosowanie rodników hydroksylowych stanowiących rolę potencjalnych utleniaczy (Nawrocki 1999).

Jednym z przykładów zaawansowanych procesów utleniania jest fotokataliza heterogeniczna zachodząca na granicy faz (ciało stałe - ciecz lub ciało stałe - gaz). Badania nad zastosowaniem fotokatalizy rozpoczął już w latach 70-tych Fujishima. Dokonał on rozkładu wody przy wykorzystaniu półprzewodnikowych elektrod wykonanych z TiO_2 , które były połączone z platynową przeciw elektrodą wystawioną na działanie promieniowania ultrafioletowego. W momencie, gdy powierzchnia elektrody została naświetlona światłem o długości fali $\lambda < 415 \text{ nm}$, doszło do przepływu fotoprądu od platynowej przeciw elektrody do elektrody zbudowanej z TiO_2 . Kierunek przepływu prądu wskazuje, że reakcja utleniania zachodzi właśnie na elektrodzie wykonanej z tlenku tytanu(IV) natomiast reakcja redukcji na elektrodzie platynowej. Fakt ten wskazuje, że możliwy jest fotorozkład wody na tlen i wodór w obecności światła UV-Vis (Fujishima i in. 2000). Najczęściej jako fotokatalizatory stosuje się półprzewodniki, w tym TiO_2 . Proces fotokatalizy w obecności TiO_2 rozpoczyna się od jego fotowzbudzenia z udziałem kwantu promieniowania. Jeżeli energia kwantu promieniowania jest równa bądź większa niż energii pasma wzbronionego tego półprzewodnika, dochodzi do wybicia elektronu z pasma walencyjnego i przeniesienia go do pasma przewodnictwa. W wyniku tego w paśmie walencyjnym półprzewodnika powstaje dziura elektronowa. Wybicie z pasma walencyjnego elektrony i powstałe w ich miejscach dziury są transportowane na powierzchnię tlenku tytanu. Wybite elektrony mogą zostać przeniesione na powierzchnię zaadsorbowanych przez TiO_2 związków lub na cząsteczki rozpuszczalnika. Elektrony w kontakcie z cząsteczkami tlenu tworzą anionorodnik ponadtlenkowy $\text{O}_2^{\cdot-}$. Dodatkowo naładowana powierzchnia TiO_2 pozyskuje elektrony z wody, w wyniku czego powstają rodniki hydroksylowe OH^{\cdot} . Powstałe reaktywne formy tlenu (OH^{\cdot} , $\text{O}_2^{\cdot-}$) umożliwiają rozkład zanieczyszczeń powodując ich utlenianie do CO_2 i H_2O (Kosmala i Szymańska 2016).

Kolejną metodą degradacji związków organicznych jest sensybilizowane utlenianie. Odbyna się to w wyniku bezpośredniej reakcji utleniania bądź wskutek reakcji z tlenem podczas której dochodzi do wytwarzania reaktywnych form tlenu stanowiących silne utleniacze. Sensybilizatory określane są także mianem barwników lub chromoforów. Sensybilizator w wyniku absorpcji kwantu promieniowania przechodzi we wzbudzony stan singletowy. Następnie osiąga stan trypletowy w wyniku przejścia interkombinacyjnego (Miller 2011). Wyróżnia się dwa mechanizmy fotosensybilizowanego utleniania. W typie pierwszym dochodzi do transportu elektronu od wzbudzonej cząsteczki trypletowego sensybilizatora w kierunku tlenu, który znajduje się w stanie podstawowym. Kolejnym etapem jest bezpośrednia reakcja wzbudzonego sensybilizatora ze związkiem organicznym. Dochodzi do oderwania atomu wodoru lub bezpośredniego przeniesienia elektronu. Sensybilizator będący w formie zredukowanej może również wchodzić w reakcję z tlenem, w wyniku czego powstaje rodniko-anion ponadtlenkowy. Protonowanie rodniko-anionu ponadtlenkowego umożliwia szybką dysmutację, która prowadzi do powstania nadtlenu wodoru. Powstający w ten sposób nadtlenek wodoru umożliwia generowanie rodników hydroksylowych, będących silnymi utleniaczami (Miller 2011). Drugi mechanizm fotosensybilizowanego utleniania polega na transporcie energii od sensybilizatora, który znajduje się w stanie wzbudzonym do cząsteczki tlenu. Tlen w stanie podstawowym jest trypletowy. Oznacza to, że w cząsteczce znajdują się dwa niesparowane elektrony. Przyjęcie przez tlen trypletowy energii umożliwia zmianę konfiguracji elektronowej, wskutek czego tlen osiąga stan singletowy. Tlen singletowy odznacza się dużą reaktywnością i może powodować bezpośrednie utlenianie wielu związków organicznych (Miller 2011).

Z fotosensybilizowanym utlenianiem mamy do czynienia w trakcie fotokatalizy heterogenicznej prowadzonej z wykorzystaniem półprzewodników w obecności światła widzialnego. Fotokataliza sensybilizowana dotyczy degradacji barwników. Pod wpływem światła widzialnego dochodzi do wzbudzenia znajdujących się na powierzchni fotokatalizatora cząsteczek barwnika. Elektron pochodzący od barwnika zostaje przetransportowany do pasma przewodnictwa fotokatalizatora. W tym samym czasie dochodzi do wytworzenia kationorodnika, który w wyniku dalszych reakcji powoduje całkowitą mineralizację barwnika (Konstantinou i Albanis 2004).

3. Podsumowanie

Istnieje wiele procedur stosowanych w aspekcie szeroko pojętej ochrony środowiska i oczyszczania wód. Często metody te charakteryzują się niską efektywnością, a dodatkowo są czasochłonne i kosztowne. Metody biologicznej degradacji takie jak biosorpcja, biodegradacja czy bioakumulacja nie dają pełnej skuteczności, a ich zastosowanie może powodować powstawanie innych toksycznych związków, będących metabolitami barwników organicznych. Fizykochemiczne metody usuwania barwników, w tym adsorpcja na węglu aktywnym czy koagulacja wymagają ścisłej kontroli parametrów procesu, zachowania odpowiedniej temperatury oraz pH. W przypadku fotokatalizy heterogenicznej dochodzi do całkowitej mineralizacji szkodliwych barwników organicznych do prostych związków nieorganicznych. Dodatkowo procesy fotokatalityczne są przyjazne środowisku naturalnemu oraz nie wymagają specjalistycznych warunków prowadzenia reakcji.

4. Literatura

- Srinivasan R (2011) Advances in application of natural clay and its composites in removal of biological, organic, and inorganic contaminants from drinking water. *Advances in Materials Science and Engineering* 1(17).
- Tomczak E, Kamiński W (2012) Zastosowanie roślinnych adsorbentów naturalnych do usuwania barwników. *Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód*: 535-545.
- Lacy W, Lindsten D (1957) Removal of Radioactive Contaminants from Water by Ion Exchange Slurry. *Industrial & Engineering Chemistry* 49(10): 1725-1726.
- Góralczyk A, Jasińska A, Długoński J (2016) Mikroorganizmy w usuwaniu toksycznych barwników przemysłowych. *Postępy Mikrobiologiczne* 55(4): 424-432.
- Sudha M, Saranya A, Selvakumar G i in. (2014) Microbial degradation of Azo dyes: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 3: 670-690.
- Dąbek L, Ozimina E, Picheta-Oleś A (2013) Badania nad usuwaniem barwnych związków organicznych ze ścieków z przemysłu włókienniczego. *Rocznik Ochrona Środowiska* 15(2): 1164-1176.
- Jiang JQ (2015) The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering* 8: 36-44.
- Szlachta M, Adamski W (2008) Ocena skuteczności usuwania naturalnych związków organicznych z wody w procesie koagulacji objętościowej. *Ochrona Środowiska* 30(3): 9-13.
- Bezak-Mazur E, Adamczyk D (2011) Adsorpcja barwników na świeżym i zregenerowanym węglu WD-extra. *Rocznik Ochrona Środowiska* 13: 951-972.
- Malik PK (2004) Dye removal from wastewater using activated carbon developed from sawdust: adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials* 113(1-3): 81-88.
- Tałałaj I (2013) Zastosowanie odwróconej osmozy w procesie oczyszczania odcieków. *Ekonomia i Środowisko* 2(45): 93-106.
- Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M i in. (2009) Science and technology for water purification in the coming decades. *Nanoscience and Technology*: 337-346.
- Chong MN, Jin B, Chow CWK i in. (2010) Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research* 44(10): 2997-3027.
- Deng Y, Zhao R (2015) Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports* 1(3): 167-176.
- Nawrocki J (1999) Zaawansowane procesy utleniania w oczyszczaniu wody. *Ochrona Środowiska* (3)74: 31-36.
- Fujishima A, Rao TN, Tryk DA (2000) Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of photochemistry and photobiology* 1(1): 1-21.
- Kosmala K, Szymańska R (2016) Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie. *Kosmos* 65(2): 235-245.
- Miller JS (2011) Kinetyka degradacji wybranych ksenobiotyków w roztworach wodnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej* 401: 61-68.

Konstantinou IK, Albanis TA (2004) TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations: a review. *Applied Catalysis B: Environmental* 49(1): 1-14.

9. Badanie modułu ściśliwości torfu uwzględniające oddziaływanie nasypu przeciążającego

Analysis of the peat elastisity modulus taking into account the effect of the preload embankment

Olszewska Magdalena

Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Olszewska Magdalena: magdalena.olszewska@zut.edu.pl

Słowa kluczowe: moduł ściśliwości gruntów organicznych, nasyp przeciążający, torf, grunt organiczny, geotechnika

Streszczenie

Moduł ściśliwości gruntu organicznego to ważny parametr, określający wartość ściśliwości. Od ściśliwości zależy odkształcalność podłoża gruntowego. Moduł ściśliwości wpływa bezpośrednio na obliczeniową wartość osiadania. W gruntach organicznych ściśliwość jest bardzo wysoka. Moduły ściśliwości są bardzo niskie, a osiadania sięgają wartości od kilkunastu cm do ponad 0,5m. W pracy opisano autorską metodę określenia modułu ściśliwości gruntów organicznych na podstawie obciążenia ich nasypem. Moduł ściśliwości warstwy torfu określa się w oparciu o wartość osiadania nasypu oraz obliczonej ekwiwalentnej wartości naprężeń pod nasypem J_i . Wartość parametru J_i wyprowadzono na podstawie teorii Boussinesq'a i zasady superpozycji, uwzględniając zmienną wartość naprężeń w warstwie gruntu organicznego. Wykonano symulację numeryczną dla założonego przypadku i przeanalizowano otrzymane wyniki. Na końcu pracy przedstawiono podsumowanie i wnioski z przeprowadzonej analizy.

1. Wstęp

Głównym problemem posadawiania obiektów budowlanych na gruntach organicznych jest ich nadmierne osiadanie. Dlatego jednym z ważniejszych parametrów wytrzymałościowych torfu jest moduł ściśliwości.

Torf jest stała osadowa pochodzenia organicznego. Powstaje z gromadzenia się i rozkładu roślinności bagiennej w wilgotnym środowisku. Torf budują części organiczne. Torf może zawierać części mineralne. W tym rodzaju gruntu wilgotność jest bardzo duża i waha się w granicach od 80% do ponad 1000%. Powstaje on na terenach bagiennych, trwale podmokłych, gdzie utrudniony jest odpływ wód gruntowych i opadowych. Grunt organiczny ma wysoką ściśliwość, silną tendencję do pelzania, bardzo niskich naprężeń efektywnych oraz niskiej wytrzymałości. Duża ściśliwość gruntów organicznych wynika z ich cech fizycznych oraz genezy. Miąższość gruntów organicznych miejscami może dochodzić nawet do kilkudziesięciu metrów. (Lechowicz i Szymański 2002; Myślińska 2001, 2010; Olszewska 2015, 2016; Szymański 1991; Wiłun 2013).

Ściśliwość opisuje możliwość warstwy gruntu do zmniejszania swojej objętości pod wpływem jej obciążenia. Związana jest z takimi cechami gruntu jak porowatość i wilgotność. Własność ta jest odpowiedzialna za odkształcenie podłoża gruntowego. Odkształcenia pojawiają się w wyniku ściskania i wyciskania wody i gazów z porów gruntu, przemieszczaniem się i zginiataniem stałych cząstek gruntu (Lechowicz i Szymański 2002; Myślińska 2010; Szymański 1991; Wiłun 2013).

Moduł ściśliwości wykorzystywany do obliczeń osiadania to najczęściej edometryczny moduł ściśliwości gruntu określany laboratoryjnie. Moduł ściśliwości to jeden z głównych parametrów mechanicznych opisujących ściśliwość gruntu (Wiłun 2013; PN-EN 1997-1; PN-81/B-03020).

Określenie wartości tego parametru jest bardzo istotne. Im mniejszy moduł ściśliwości, tym większe osiadanie warstwy gruntu. W przypadku gruntów mineralnych moduł ściśliwości waha się 7,5 MPa do 200 MPa w zależności od rodzaju gruntu (grunt spoisty, niespoisty). Nie wpływa to na znaczącą różnicę w wartości osiadania obliczonego w stosunku do rzeczywistego. Grunty organiczne mają bardzo niski moduł ściśliwości. Waha się on od około 90 kPa do 2000 kPa. Stanowi to ogromny problem przy posadawianiu obiektów na tego typu podłożu. Nawet niewielkie zawyżenie tego parametru może mieć katastrofalne skutki (Lechowicz i Szymański 2002; Myślińska 2001, 2010; Szymański 1991; Wiłun 2013).

W edometrze próbka gruntu umieszczona jest w metalowym pierścieniu, bez możliwości odkształceń poziomych. Obciążenie przyłożone jest pionowo przy swobodnym odpływie wody. Odkształcenie mierzone jest za pomocą czujnika (Myślińska 2001; 2010; Wiłun 2010).

Edometryczny moduł ściśliwości może mieć w niektórych przypadkach inną wartość niż moduł ściśliwości określony w warunkach terenowych. Wynika to z cech fizycznych gruntu oraz warunków badania. W trakcie badania próbki jej małe wymiary nie umożliwiają pełnego odniesienia się do właściwości, jakie występują w terenie. Badanie gruntu organicznego może być obciążone błędami takimi jak: brak uwzględnienia odkształcalności bocznej gruntu, czy efektem skali (Olszewska 2015, 2016; PKN-CEN ISO/TS 17892-5).

Aby określić moduł ściśliwości gruntu organicznego zaproponowano obciążenie go nasypem. Wiedząc, jakie jest osiadanie tego nasypu, jakie obciążenie jest wywierane na grunt organiczny oraz znając miąższość gruntu organicznego można wyznaczyć moduł ściśliwości podłoża. Moduł ten będzie uwzględniał zachowanie się podłoża w terenie. Szerzej opisano problem w artykułach (Olszewska 2015, 2016, 2018; Coufal i Olszewska 2016a, 2016b).

Metoda określenia modułu ściśliwości gruntu organicznego na podstawie obciążenia go nasypem może być innym rozwiązaniem dla badania w edometrze (Olszewska 2015, 2016, 2018).

2. Materiał i metody

Zaproponowano autorską metodę określenia modułu ściśliwości gruntów organicznych na podstawie przeciążenia ich nasypem. Metoda bazuje na następujących założeniach:

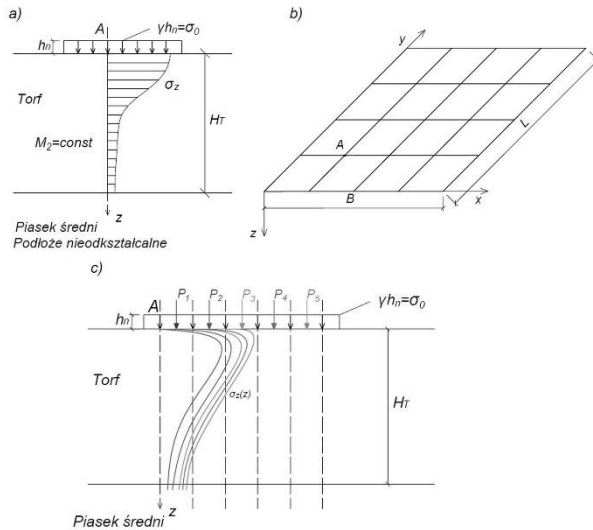
- nasyp jest prostokątny o wymiarach $B \times L$,
- warstwa poniżej gruntów organicznych jest nieodkształcalna,
- nie uwzględnia się do obliczeń skarp nasypu,
- nasyp jest dzielony na mniejsze obszary obliczeniowe, a obliczenia wykonuje się w założonych węzłach,
- osiadania przyjmowane do analiz są całkowite, czyli po zakończeniu procesu konsolidacji podłoża,
- rozkład naprężeń jest określany na podstawie teorii Boussinesq'a (Wiłun 2013);
- rozkład naprężeń nie jest stały w warstwie gruntu organicznego $\sigma_z = f(x, y, z)$ i $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \neq 0$.

Moduł ściśliwości gruntu organicznego określany na podstawie wyżej opisanych naprężeń jest stały tj. $M = const$ oraz $\frac{\partial M}{\partial z} = 0$ w całej warstwie torfu analizowanej kolumny. Moduł analizuje się w dowolnym węźle A o współrzędnych (x_A, y_A) . Przy czym zgodnie z przyjętym układem współrzędnych tj. $x_A \in (0; B)$ oraz $y_A \in (0; L)$.

Do obliczeń konieczny jest podział nasypu na mniejsze prostokątne obszary obliczeniowe. Obliczenia powinny wykonywać się w powstałych na skutek podziału węzłach. Dla każdego wydzielonego obszaru można wyznaczyć siłę skupioną w jego środku (rys.1). Pod każdym obszarem obliczeniowym znajduje się kolumna gruntu organicznego (torfu) od góry obciążona warstwą nasypu, od dołu ograniczona podłożem nieodkształcanym, jak pokazano na rysunku 1. Zgodnie z zasadą superpozycji na jeden analizowany obszar będą oddziaływać wszystkie pozostałe pola obliczeniowe (Bednarek 2014; Olszewska 2018; Szczygielski 2008; Wiłun 2013).

Warstwa nasypu jest fundamentem wiotkim co oznacza, że największe osiadanie można zaobserwować na środku, natomiast najmniejsze w narożach. Naprężenia zależą od wartości obciążenia zewnętrznego, obszaru jego działania oraz miejsca gdzie je wyznaczamy.

Założenia te przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przyjęty w modelu: a) obliczeniowa kolumna gruntu organicznego, b) przyjęty układ współrzędnych do obliczeń, c) wpływ obciążenia z pozostałych obszarów obliczeniowych na rozkład naprężeń w analizowanym punkcie.

Pod warstwą nasypu w wyznaczonych węzłach naprężenia określa się na podstawie teorii Boussinesq'a oraz z zasady superpozycji (Bednarek 2014; Meyer i Chruściewicz 2001; Olszewska 2018; Wiłun 2013) według wzoru (1):

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{Pz^3}{(l^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

gdzie:

- P – siła działająca na podłoże gruntowe w analizowanym obszarze obliczeniowym [kN],
- z – głębokość rozpatrywanego miejsca [m],
- l – odległość siły od analizowanego miejsca w płaszczyźnie nasypu określona wg wzoru (2) [m]:

$$l = \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2} \quad (2)$$

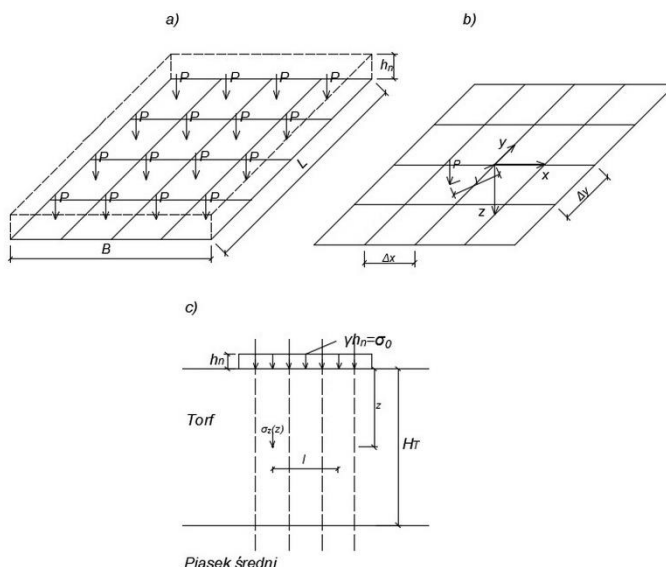
gdzie:

- x, y – współrzędne przyłożenia siły w płaszczyźnie nasypu,
- x_A, y_A – współrzędne analizowanego węzła.

Zgodnie z teorią Boussinesq'a, rozkładem naprężeń od siły skupionej i zasadą superpozycji na naprężenia w analizowanym i -tym węźle/kolumnie gruntu będą wpływać oddziaływania w wszystkich pozostałych obszarów. Naprężenia w kolumnie na dowolnej głębokości z wraz z uwzględnieniem oddziaływania wynikającego z obciążenia pozostałych kolumn można zapisać następująco:

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \int \frac{\sigma_0 dA}{(z^2 + l^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (3)$$

Zgodnie z przyjętymi założeniami w każdym wydzielonym polu obliczeniowym będzie działała siła skupiona, a na jeden analizowany obszar będą wpływać wszystkie pozostałe, jak pokazano na rysunku 2 (Meyer i Chruściewicz 2001, Bednarek 2014).



Rys. 2. Wzajemne oddziaływanie obszarów obliczeniowych, a) podział nasypu na pola obliczeniowe, b) odległość siły od analizowanego punktu, c) widok z boku.

Całkowite osiadanie obliczeniowe warstwy gruntu organicznego (torfu) w modelu określono jako (Meyer 2014; Wiłun 2013):

$$s = \frac{\int_0^B \left(\int_0^L \left(\int_0^{H_T} \sigma_z dz \right) dy \right) dx}{M} \quad (4)$$

Ekwiwalentną wartość naprężeń warstwy gruntu organicznego można określić zależnością (5):

$$J_i = \int_0^B \left(\int_0^L \left(\int_0^{H_T} \sigma_z dz \right) dy \right) dx = \int_0^B \left(\int_0^L \left(\int_0^{H_T} \frac{3\sigma_0 A}{2\pi} \frac{z^3}{(l^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} dz \right) dy \right) dx \quad (5)$$

- gdzie: A – pole obszaru obliczeniowego [m²];
 σ_0 – obciążenie nasypem przeciążającym
 B – szerokość nasypu,
 L – długość nasypu,
 H_T – miąższość gruntu organicznego.

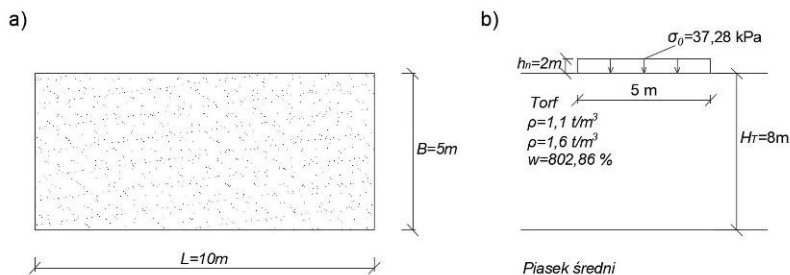
Moduł ściśliwości opisuje ściśliwość gruntu. Znając jego wartość można obliczyć osiadanie (s) na etapie projektowania. Po zakończeniu procesu konsolidacji nasypu, znane jest jego całkowite, rzeczywiste osiadanie. Znając osiadanie oraz wartość ekwiwalentną naprężeń J_i można określić moduł ściśliwości torfu pod nasypem. Jest on stały w całej warstwie gruntu organicznego. Wzorem (6) można wyznaczyć opisany moduł, znając obciążenie nasypem przeciążającym oraz jego osiadanie:

$$M = \frac{J_i}{s} \quad (6)$$

Wyznaczając moduł w każdym węzle możliwe jest stworzenie mapy jego rozkładu w miejscu posadowienia nasypu.

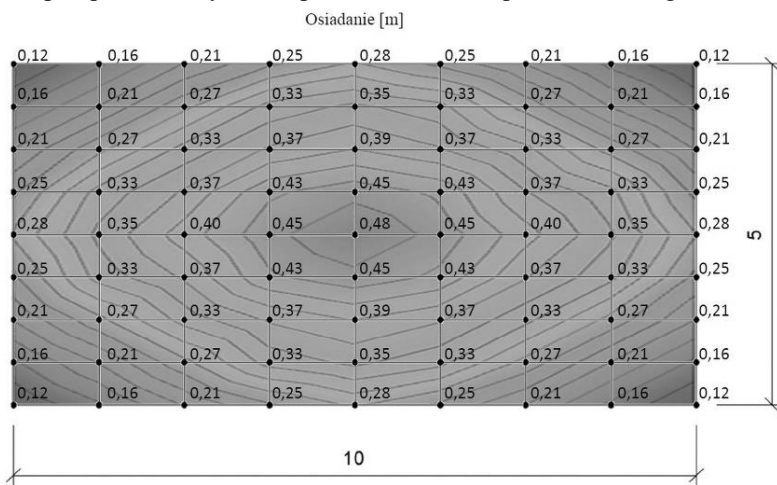
3. Wyniki i dyskusja

Na podstawie opisanego wcześniej modelu wykonano analizę numeryczną założonego nasypu. Nasyp posadowiony jest na 8 metrowej warstwie torfów, o wymiarach $B=5\text{m}$, $L=10\text{m}$ oraz wysokość $h_n=2\text{m}$. Obciążenie wywierane na torf to $\sigma_0=37,28\text{ kPa}$. Dane przyjęte do obliczeń przedstawiono na rysunku 3.



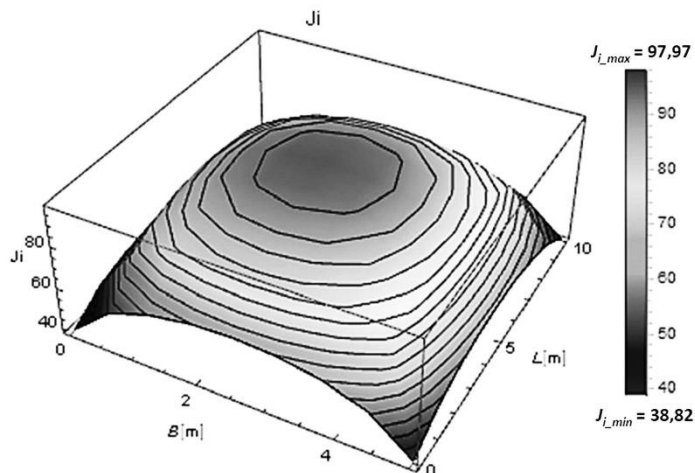
Rys. 3. Warunki przyjęte do badań: a) wymiary nasypu; b) warunki gruntowe.

Nasyp podzielono na 64 obszary obliczeniowe. Przyjęto osiadanie nasypu największe w środku, a najmniejsze w narożach (Rys.4). Maksymalna wartość osiadania to 0,48 m, a minimalna to 0,12 m. Wyniki przeprowadzonych komputerowo obliczeń przedstawiono graficznie na rysunku 4.



Rys. 4. Osiadanie nasypu

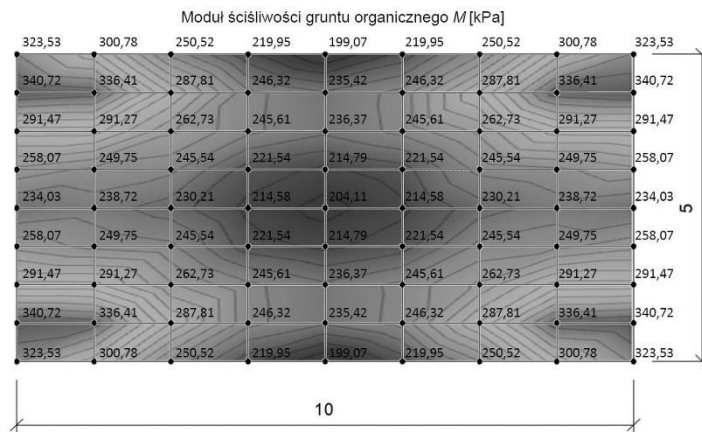
Na Rys. 5 przedstawiono wyznaczoną ekwiwalentną wartość naprężeń J_i .



Rys. 5. Ekwiwalentna wartość naprężeń pod nasypem.

Na podstawie wykonanych obliczeń można zauważyć (Rys. 4), że największe wartości $J_i = \int_0^L \int_0^B \int_0^{H_T} \sigma_z dx dy dz$ ($J_{i,max}=97,97$ kPam) występują pod środkiem nasypu, najmniejsze natomiast w narożach ($J_{i,min}=38,82$ kPam).

Na podstawie wyznaczonej ekwiwalentnej wartości naprężeń pod nasypem J_i obliczono moduły ścisłości torfu w wyznaczonych węzłach. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład modułów ścisłości torfu.

Moduł ścisłości pod nasypem jest zmienny. Jak pokazano na rysunku 5 największe moduły ścisłości M są zbliżone do naroży i wynoszą 340,72 kPa. Najmniejsze wartości modułu ścisłości M znajdują się w środku $M=204,11$ kPa oraz środkowych częściach długości nasypu $M=199,07$ kPa. Różnica między maksymalną, a minimalną wartością modułu wynosi 141,65 kPa.

Najmniejsze wartości modułu ścisłości występują w miejscach, gdzie osiadanie (s) i wartość J_i jest największe, a największa, gdzie s i J_i są najmniejsze.

4. Podsumowanie

Opisano metodę określenia modułu ścisłości gruntów organicznych na podstawie obciążenia ich nasypem. Można go określić na podstawie osiadania nasypu i jego obciążenia na grunt organiczny o znanej miąższości.

Obszar działania oraz grubość warstwy gruntu organicznego znajdująca się bezpośrednio pod nim mają wpływ na określaną wartość modułu ścisłości. Wynika to z rozkładu naprężeń wywieranych na torf.

Największe wartości osiadania znajdują się pod środkiem nasypu, najmniejsze w narożach. Rozkład ekwiwalentnej wartości naprężeń pod nasypem J_i jest taki jak rozkład osiadania. Rozkład J_i potwierdza poprawność rozwiązania.

Rozkład modułów ścisłości pod nasypem jest zmienny. Największe moduły ścisłości M występują w narożach. Najmniejsze wartości modułu ścisłości M znajdują się w środku środkowych częściach długości nasypu. Różnica między maksymalną, a minimalną wartością modułu wynosi 141,65 kPa.

W zaprezentowanym modelu założono zmienne naprężenia pionowe w gruncie, ale uwzględniając wpływ obciążenia całym nasypem oraz przyjęcia modułu ścisłości jako stałej wartości na całej miąższości kolumny gruntu organicznego. Dzięki temu otrzymany wynik jest bardziej prawdopodobny w stosunku do wartości określanych podczas badania w edometrze.

5. Literatura

Bednarek R (2014) Osiadanie powierzchni ograniczonej na podłożu sprężystym. Inżynieria Morska i Geotechnika (3/2014): 221-224.

- Coufal R i Olszewska M (2016) Numeryczne symulacje zmiany wartości modułu ścisłości gruntu organicznego pod nasypem przeciążającym. *Materiały Budowlane* 8/2016: 103-105.
- Coufal R i Olszewska M (2016) Przeciążenie gruntu organicznego nasypem pod składowisko przeznaczone do magazynowania elementów konstrukcyjnych. *ACTA Scientiarum Polonorum- Architectura*: 93-102.
- Lechowicz Z, Szymański L (2002) Odształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych, cz. I Metodyka badań. Warszawa. Wydawnictwo SGGW.
- Meyer Z (2014) Czy możemy posadzić obiekty bezpośrednio na torfach?. XXI Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska: 131-143.
- Meyer Z, Chruściewicz S (2001) Osiedlenie dużych fundamentów sztywnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* (5/2001): 256-259.
- Myślińska E (2001) Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania. PWN: 69-121.
- Myślińska E (2010) Laboratoryjne badania gruntów i gleb, WUW, 130-140.
- Olszewska M (2015) Koncepcja określania modułu ścisłości gruntów organicznych na podstawie badania osiadań nasypu przeciążającego na poletku doświadczalnym. XXII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska: 93-99.
- Olszewska M (2016) Model określania parametrów ścisłości konsolidowanych gruntów organicznych w oparciu o badania in situ. *Monografie 2016 (23): Nauki techniczne i inżynieryjne, część III: Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce*: 82-89.
- Olszewska M (2018) Determination of Peat Elasticity Modulus (Constrained Modulus) Based on Field Measurement using simplified consolidation model. *Civil and Environmental Engineering Reports* 28 (2): 18-30.
- Szczygielski T (2008) Analiza warunków konsolidacji torfów przeciążonych warstwą popiołów. Rozprawa doktorska. Politechnika Szczecińska. Wydział Budownictwa i Architektury: 73-76.
- Szymański A (1991) Czynniki warunkujące odształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW-AR.
- Wiłun Z (2013) Zarys geotechniki. WKŁ:167-473.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-5: Badania geotechniczne: Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badania edometryczne gruntów.
- PN-EN 1997-1 EUROKOD 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-81/B-03020 – Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.

10. Współczesne metody charakterystyki powłok osadzonych na podłożu stałym

Modern characterization methods of coatings deposited on a solid substrate

Kacper Przykaza

Katedra Zjawisk Międzyfazowych, Instytut Nauk Chemicznych, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Plac Marii Curie-Skłodowskiej 3, 20-031 Lublin

Opiekun naukowy: dr hab. Agnieszka Ewa Wiącek, prof. UMCS

Kacper Przykaza: przykaza.kacper@poczta.umcs.lublin.pl

Słowa kluczowe: filmy powierzchniowe, stałe podłoże polimerowe, techniki pomiarowe cienkich warstw

Streszczenie

Szacuje się, że technika pokrywania powierzchni stałych cienkimi warstwami różnych substancji towarzyszy człowiekowi od niemal 5000 lat. Jednak dopiero na początku XIX wieku postęp techniczny pozwolił na zaawansowany proces napyłania szkła w celu uzyskania powłok optycznych o pożądanych właściwościach. Od tamtej pory technologia pozyskiwania oraz badania cienkich powłok drastycznie się rozwinęła, a materiały pokryte filmami o odpowiednich właściwościach obecne są w wielu gałęziach przemysłu, techniki, medycyny, farmacji, czy biotechnologii. Dziedziny wykorzystujące tę technologię wciąż są udoskonalane, dlatego też techniki pozwalające na badania i charakterystykę cienkich powłok muszą wychodzić im naprzeciw, aby zoptymalizować ten ewolucyjny proces. Niniejsza praca przeglądowa przedstawia zarys współczesnych technik pomiarowych znajdujących zastosowanie w szeroko rozumianej charakterystyce fizykochemicznej warstewek osadzonych na podłożach stałych.

1. Wstęp

Wraz ze wzrostem liczby, rodzajów i popularności cienkich warstw (filmów) we współczesnej nauce, pojawiły się nowe sposoby ich charakteryzowania w aspekcie konkretnych zastosowań. Odpowiednia charakterystyka cienkiego filmu lub powłoki zależy od procesu ich tworzenia, planowanego lub potencjalnego zastosowania, czy oczekiwanej trwałości. Badanie powierzchni wymaga zastosowania metod określających ich właściwości w taki sposób, aby podłoże nie zaburzało tego procesu. Jednocześnie rosnące znaczenie mikro- i nanostruktur w filmach wymaga zastosowania metod o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Wiodącym nurtem rozwoju tego typu materiałów i pokryć jest molekularna funkcjonalizacja powierzchni. W większości przypadków właściwa charakterystyka, niekiedy bardzo skomplikowanych układów wymaga użycia kombinacji kilku metod i instrumentów badawczych. Naprzeciw temu wyszły firmy produkujące układy analityczne, a naukowcy mogą obecnie korzystać z technologicznie zaawansowanych metod, nie będąc ekspertami w danej dziedzinie (Brown i in. 2006). Niemniej jednak, dla osób planujących poszczególne etapy badań naukowych, czy chcących pogłębić wiedzę na dany temat bardzo przydatne jest zrozumienie, jaki rodzaj informacji niesie ze sobą dana technika, jak optymalnie dobrać metodykę, aby osiągnąć pełną charakterystykę badanego układu w najlepszy możliwy sposób. W niniejszej pracy przeglądowej opisano najważniejsze współczesne techniki analizy cienkich filmów i pokryć wraz z wyszczególnieniem ich mocnych i słabych stron.

2. Metody badania cienkich filmów osadzonych na stałym podłożu

2.1 Spektroskopia fotoelektronów w zakresie promieniowania X (*X-ray photoelectron spectroscopy – XPS*)

XPS polega na detekcji fotoelektronów emitowanych z próbki w wyniku napromieniowania jej promieniowaniem rentgenowskim o konkretnej energii. Metoda ta stała się stosunkowo prostą i coraz bardziej rutynową techniką analizy składu i stanu chemicznego powierzchni. Podstawową

zasadą XPS jest efekt fotoelektryczny odkryty przez Hertza w 1887 roku (Briggs i in. 1995) i rozszerzony o analizę powierzchniową opracowaną przez Siegbahna (Siegbahn 1965). Metoda XPS jest wykorzystywana do ilościowej analizy składu powierzchni i może wykryć wszystkie pierwiastki z wyjątkiem wodoru i helu poprzez detekcję energii wiązania fotoelektronów. Do identyfikacji stanów chemicznych można wykorzystać niewielkie wahania energii wiązania linii fotoelektronów i linii Augera, szczyty satelitów i wielokrotne rozszczepianie sygnału. Pomiar XPS jest inicjowany przez napromieniowanie próbki monoenergetycznym, miękkim promieniowaniem rentgenowskim, najczęściej magnezu (Mg) K α (1253,6 eV przy szerokości linii $\approx 0,7$ eV) lub glinu (Al) K α (1486,6 eV przy szerokości linii $\approx 0,85$ eV). W wielu nowoczesnych instrumentach linia promieniowania rentgenowskiego Al K α jest dalej zawężana (do $\approx 0,35$ eV) za pomocą monochromatora (Moulder i in. 1995). Profilowanie głębokości jest obecnie możliwe rutynowo przy użyciu nowoczesnych instrumentów wyposażonych w działa jonowe i spektrometry o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Za pomocą pierwiastków, takich jak argon (Ar) i ksenon (Xe) można określić w badanym filmie profil pierwiastkowy i/lub chemiczny. Stosowanie jonów węgla (C₆₀) do napyłania folii polimerowych staje się ostatnio coraz bardziej popularne, ponieważ uszkodzenia wywoływane tymi jonami są mniejsze niż w przypadku pierwiastków gazu obojętnego. Liczba wykrywanych fotoelektronów danego pierwiastka zależy od jego stężenia w próbce. Podczas tego procesu dane są konwertowane na sygnał cyfrowy i analizowane przez programy komputerowe w celu pomiaru wysokości lub powierzchni piku po usunięciu tła widmowego np. metodą Shirley'a (Shirley 1972). W przypadku kwantyfikacji i analizy stanu chemicznego ważne jest, aby uwzględnić lub skorygować satelity rentgenowskie, linie widmowe przesunięte chemicznie, piki dotyczące ewentualnych wstrząsów i strat plazmonów.

Zalety:

- Analiza składu pierwiastkowego powierzchni i uzyskanie informacji o ich stanie chemicznym.
- Niewielkie lub żadne uszkodzenia próbki, z wyjątkiem niektórych związków organicznych i polimerów.
- Identyfikacja wszystkich pierwiastków z wyjątkiem H i He.
- Zastosowanie do szerokiej gamy materiałów, w tym izolatorów.
- Technika niedestrukcyjna dla pomiarów przy głębokości do 10 nm.

Ograniczenia:

- Wymagana bardzo wysoka próżnia.
- Granice wykrywalności zwykle 0,01–0,1 at.%.
- Najmniejszy obszar analityczny 1–10 μm .
- Ograniczone informacje na temat związków organicznych.
- Rozpylanie może generować interferencje podczas analizy ilościowej.

2.2 Rentgenografia strukturalna (X-ray diffraction and reflection – XRD)

XRD jest jedną z najpotężniejszych nieniszczących technik stosowanych do analizy wielu różnych materiałów stałych. Ze względu na postęp w inżynierii i technologii instrumentów badawczych oraz w aspektach obliczeniowych, metody XRD umożliwiają uzyskanie odpowiedzi na wiele pytań związanych z budową i strukturą przestrzenną materii. XRD znajduje zastosowanie w analizie fazowej, do określania struktury krystalicznej i orientacji epitaksjalnej, pomiarów grubości, tekstury i naprężeń szczątkowych w filmach, badania samoorganizacji nanomateriałów oraz ich reaktywności. Ponadto pomiary XRD można wykonywać w warunkach innych niż warunki otoczenia, co pozwala na badanie procesów dynamicznych, takich jak reakcje zachodzące w stanie stałym, przemiany fazowe, wzrost krystalitów, czy rozszerzalność cieplna (Priyantha i in. 2006). Technika XRD jest szczególnie cenna jako narzędzie do badania wzrostu i właściwości warstw epitaksjalnych materiałów cienkowarstwowych. Korzystając z najnowocześniejszych instrumentów do dyfrakcji promieni rentgenowskich charakteryzujących się wysoką rozdzielczością (HRXRD), można określić parametry sieci (zarówno płaszczyznowe, jak i te poza płaszczyzną). Innym interesującym zastosowaniem metody HRXRD dedykowanej dla cienkich warstw jest wyznaczenie rozszerzalności cieplnej poprzez wykreślenie parametrów sieci otrzymanych w funkcji temperatury.

Zależność orientacji między warstwą epitaksjalną a podłożem można przeanalizować za pomocą rentgenowskich wartości biegunowości. Metoda ta jest przydatna także w dokładnych pomiarach niewielkich zmian parametrów sieci krystalicznej, które mogą wynikać z odkształcenia lub domieszkowania elementów sieci macierzystej. Efekt wysokiej rozdzielczości można uzyskać za pomocą laboratoryjnego dyfraktometru trójosiowego. Wymaga to zastosowania szczelnej lampy rentgenowskiej lub obracającej się anody, lustra z monochromatorem o poczwórnym odbiciu (duMond-Hart-Bartels, dHB) do izolowania $K\alpha_1$ na drodze padającej wiązki oraz dwu- lub trójbocznikowego chromatara przed detektorem. Zwykle stosuje się monochromator kryształowy Ge (220). Monochromator kryształowy Ge (440) może być użyty do dalszej poprawy rozdzielczości kosztem intensywności (Li i in. 2008).

Zalety:

- Nieniszcząca technika do analizy cienkich warstw ciał stałych i cieczy.
- Możliwa analiza fazowa, analiza struktury krystalicznej, orientacji epitaksjalnej, oraz analiza naprężeń szczątkowych.
- Możliwość analizy wzrostu krystalitów i współczynnika rozszerzalności cieplnej.
- Możliwość pomiaru grubości warstwy i chropowatości granicy faz.

Ograniczenia:

- Dostarcza informacji ogólnych i wymaga minimum 1–5% ułamka masowego do identyfikacji fazy.
- Grubości nie można zmierzyć dla cienkich warstw o chropowatości powyżej 50 nm.
- Technika odbicia promieniowania rentgenowskiego (XRR) nie działa, jeśli nie ma różnicy w gęstości elektronów między warstwami lub warstwą a podłożem.

2.3 Spektroskopia Ramana i w podczerwieni (Raman spectroscopy – RS, infrared spectroscopy IR)

Spektroskopie Ramana i w podczerwieni (IR) to metody optyczne wykorzystywane do badania drgań, rotacji i innych ruchów o niskiej częstotliwości oraz energii drgań cząsteczek. Umożliwiają one zebranie informacji o wiązaniach molekularnych i trybach ich wibracji. Te dwie metody optyczne są bardzo ważnymi narzędziami, które można wykorzystać do dostarczania informacji o strukturze molekularnej i składzie powierzchni cienkich warstw i powłok. Najważniejszym aspektem praktycznym jest komplementarność widm Ramana i IR. Na przykład, podczas gdy spektroskopia Ramana służy do zrozumienia przestrzennych profili procesu utwardzania w przemyśle farbiarskim, spektroskopia IR pozwala zrozumieć i opisać kinetykę tego procesu. Co więcej, niektóre słabe lub niewykrywalne sygnały w jednej technice wykazują silne cechy charakterystyczne w drugiej.

Metoda RS opiera się na nieelastycznym rozpraszaniu światła monochromatycznego, zwykle z lasera w zakresie widzialnym, bliskiej podczerwieni lub bliskiego ultrafioletu (UV). Światło oddziałuje z fononami lub innymi cząstkami w układzie, powodując przesunięcie energii niektórych fotonów padających w górę lub w dół. Widmo Ramana to wykres intensywności promieniowania w funkcji częstotliwości powyżej i poniżej częstotliwości padającej wiązki. Promieniowanie jest obserwowane jako częstotliwości, w tym częstotliwości przypadkowego fotonu (rozpraszanie Rayleigha), a także częstotliwości odzwierciedlające zmiany energii w wyniku nieelastycznego rozpraszania Ramana. Te ostatnie zależą od struktury molekularnej / elektronowej cząsteczek i reguł wyboru mechaniki kwantowej. Rozdzielenie linii Ramana i linii Rayleigha w widmie jest bezpośrednim wskazaniem częstotliwości drgań cząsteczek lub atomów w sieci krystalicznej. Podczas gdy rozpraszanie z procesu Ramana jest znane jako „rozpraszanie Stokesa”, proces odwrotny, który wynika z wcześniej istniejących wzbudzonych stanów wibracyjnych w próbce jest znany jako „rozpraszanie anty Stokesowskie”.

RS to przede wszystkim nieniszczące narzędzie do analizy strukturalnej. Częstotliwości wibracyjne są wrażliwe na właściwości wiązania atomów, takie jak długość, siła i ich układ. Masa, równowaga, układ przestrzenny, względne przemieszczenie podczas drgań oraz wiązanie dla stałych atomów w cząsteczce lub kryształach może wpływać na częstotliwość piku Ramana (Everall 2005). Z tego względu RS można wykorzystać do zrozumienia struktury defektów i struktury kryształów.

Głównym przedmiotem badań tej techniki są powłoki organiczne, jak i nieorganiczne oraz materiały mono- i polikrystaliczne. RS służy do pobierania tzw. odcisków palców, poznawania i zrozumienia procesów wibracji w cząsteczkach, przemian fazowych, oraz poznania struktur amorficznych. Spektroskopia Ramana jest skutecznie wykorzystywana do badania filmów osadzonych na granicy faz ziaren różnych materiałów, analizy pęknięć i analizy międzyfazowej. Ważną zaletą jest to, że powłoki i warstwy (również wielowarstwy) można analizować unikając efektu rozpraszania od podłoża (Brundle i in. 1992).

Zalety:

- Wysoka wrażliwość na wiązania chemiczne i ich odmiany.
- Oferuje odpowiednią rozdzielczość przestrzenną do mapowania składu powłok i wielowarstwowych heterostruktur (obszary o średnicy zaledwie 1 μm).
- Zapewnia możliwość badania przemian fazowych *in situ* cieczonej, ciał stałych (organicznych i nieorganicznych), cienkich warstw i powłok.
- Sygnały mogą być wzmacniane różnymi metodami, np. rezonansowe wzmocnienie Ramana lub SERS (*surface enhanced Raman spectroscopy*).

Ograniczenia:

- Sygnał o bardzo niskim natężeniu - częściowo rozwiązany za pomocą laserów o dużej intensywności i specjalistycznego sprzętu - jednak niektóre instrumenty i techniki nakładają wiele innych ograniczeń.
- Powszechnym źródłem zakłóceń jest fluorescencja lub inna fotoluminescencja próbki.
- Intensywności i szerokości pasma Ramana zależą od stopnia krystaliczności próbki.
- Pasma pochodzące od materiałów amorficznych mogą być słabe i szerokie. Absolutna ocena ilościowa może nie być możliwa.
- Trudne do wykrycia ewentualne zanieczyszczenia próbki.

2.4 Elipsometria

Elipsometria jest ponad stuletnią metodą optyczną, która przy pomocy nowoczesnej elektroniki, metod przetwarzania danych i systemów sterowania nabiera coraz większego znaczenia w analizie wielu typów cienkich warstw. Technika ta opiera się na badaniu spolaryzowanego światła odbitego od próbki i analizie złożonego współczynnika załamania światła (lub tensora funkcji dielektrycznej), który może być użyty do uzyskania informacji o grubości warstwy, chropowatości, jakości, składzie chemicznym lub przewodności elektrycznej. Materiał sonduje się do głębokości optycznej próbki. Optyka urządzenia jest wystarczająco czuła, aby mierzyć właściwości warstw o grubości kilku dziesiątych nanometra. Część padającej wiązki jest absorbowana przez materiał próbki, a reszta zostaje odbita pod kątem i ulega załamaniu zgodnie z prawem Snella. Pole elektromagnetyczne padającego światła można rozbić na dwie składowe, jedną w płaszczyźnie padania na próbkę (p), a drugą prostopadłą (-e). W zależności od właściwości materiału, stopień tłumienia i fazy przesunięcia tych elementów elektromagnetycznych są różne. Elipsometria zazwyczaj podaje różnice w odblaskowości przy użyciu dwóch parametrów do rejestrowania różnic w amplitudzie i fazie odbijanych fal za pomocą równania: $\rho = R_p / R_s = \tan \psi \exp(i\Delta)$. W tym równaniu delta (Δ) wskazuje różnicę między kątem fazowym składowych równoległych i prostopadłych fali przychodzącej i fali wychodzącej, a psi (ψ) oznacza kąt, którego tangens jest stosunkiem wielkości całkowitych współczynników odbicia (Ohlidal, Franta 2000). Wartości te są związane ze stosunkiem współczynników odbicia amplitudy Fresnela dla światła spolaryzowanego p i s (R_p i R_s). Pomiar jednej długości fali pod danym kątem mogą być wykorzystane do określenia właściwości cienkiego filmu. Dodatkowe informacje na temat właściwości fizycznych mogą być dostępne, jeśli pomiary są dokonywane jako funkcja długości fali (lub kąta), która pozwala na uzyskanie złożonego współczynnika załamania światła próbki (Teboul i in. 2006). Informacje o próbce wymagają zastosowania modeli w celu dopasowania danych elipsometrycznych. Zazwyczaj obejmuje to: (1) tworzenie modelu reprezentującego próbkę, w tym liczbę obecnych warstw; (2) powiązanie zależności dyspersji właściwości optycznych każdej warstwy; (3) dopasowanie danych eksperymentalnych do modelu. Wiele z ostatnich postępów w elipsometrii dotyczy użycia skomplikowanych systemów elektronicznych i powiązania danych doświadczalnych z odpowiednimi

modelami matematycznymi. Pomiary elipsometryczne są szeroko stosowane do określania grubości powłok powierzchniowych i cienkich warstw. Niestety grubość bezwzględna w dużej mierze zależy od założeń i parametrów zastosowanych w modelu obliczeniowym.

Zalety:

- Bardzo czuły, szybki i powtarzalny pomiar porównawczy.
- Pomiar referencyjny nie jest potrzebny (niemniej jednak znajomość niektórych parametrów jest pomocna lub konieczna).
- Można wywnioskować wiele ważnych właściwości materiałów, w tym zarówno rzeczywiste, jak i wirtualne części funkcji dielektrycznej.

Ograniczenia:

- Pomiary zależne od modelu.
- W przypadku grubych warstw i filmów wielowarstwowych potrzebne są specjalne podejścia.

2.5 Spektrometria mas jonów wtórnych (*secondary ion mass spectrometry – SIMS*)

SIMS to bardzo skuteczna technika analizy powierzchni, która jest szeroko stosowana w przemyśle półprzewodników, badaniach materiałowych, środowiskowych, biologicznych i katalitycznych. Do tej pory opublikowano wiele artykułów naukowych, przeglądowych i wydano wiele książek opisujących szczegóły tej techniki i jej zastosowania (Vickerman i in. 1989; Vickerman Briggs 2001; Brunelle and Laprevote 2007). Działanie SIMS opiera się na mechanizmie bombardowania materii energetyzowaną pierwotną wiązką jonów (zwykle 10–30 keV). Większość nowopowstałych cząstek wtórnych i klastrów jest obojętnych, ale około 1–5% z nich to jony naładowane. Te wtórne jony można zbierać uzyskując fragmentacyjne widma masowe. Pierwsza generacja praktycznych przyrządów SIMS została opracowana w latach 50- i 60-tych XX wieku. Zastosowano w nich ciągłą pierwotną wiązkę jonów z sektorem magnetycznym (jako analizator mas). Ten rodzaj instrumentu był używany głównie do głębokiego profilowania zanieczyszczeń w materiałach półprzewodnikowych, takich jak płytki Si i Ga-As. Prąd pierwotnej wiązki jonów jest zwykle w zakresie od nA do A, więc materiały mogą być szybko rozpylane (0,01–1 nm / s). Takie zastosowanie jest znane w literaturze jako „dynamiczne skanowanie SIMS”, a obecnie jest standardową techniką stosowaną do monitorowania zanieczyszczeń materiałów półprzewodzących na skalę przemysłową. Dynamiczna analiza SIMS ma wyjątkowo wysokie granice wykrywalności, od części na bilion (ppb) do części na milion (ppm), w zależności od konkretnego pierwiastka bombardującego i próbki. Jest to bardzo przydatna metoda uzyskiwania informacji o składzie filmów i warstw, profilach implantów oraz strukturze materiałów hybrydowych. W latach 70-tych Benninghoven opracował technikę „statycznej analizy SIMS”. W celu zastąpienia ciągłej wiązki pierwotnej zastosowano wysoce niskoprądową (na poziomie pikoamperów) pulsacyjną wiązkę pierwotną, co spowodowało, że uszkodzenia wywołane jonami były bardzo ograniczone, a powierzchnię można było uznać za znajdującą się w stanie statycznym. Jednocześnie jako analizator zastosowano technikę analizy czasu przelotu (*time of flight-TOF*) i elektronikę zliczającą pojedyncze jony. W ten sposób prawie wszystkie jony wtórne można zebrać i wykryć. Użyteczne analitycznie widmo masowe łatwo uzyskuje się w stosunkowo krótkim czasie, zanim całkowita dawka jonów osiągnie granicę statyczną (około 10¹² jonów / cm²). Od tej pory TOF-SIMS stał się najczęściej dostępną techniką SIMS w laboratoriach analizy powierzchni. Stosując tę metodykę można również wykonywać pomiary profili głębokościowych. Jednakże w tym przypadku, ze względu na to, że prąd pierwotnej wiązki jonów jest bardzo mały, wprowadzana jest druga wiązka rozpylająca, która ma odpowiednio duży prąd (10 nA do 1 A) (Cheng i Winograd 2006). Ta strategia nazywana jest profilowaniem głębokości z podwójną wiązką. W porównaniu z magnetycznym analizatorem mas w dynamicznych SIMS, dwuwiazkowe profilowanie głębokości TOF-SIMS ma stosunkowo niską czułość, zwykle o jeden do dwóch rzędów wielkości, jednak jest ona odpowiednia dla większości wymagań dotyczących profilowania głębokości. Niemniej jednak, funkcja dynamicznych instrumentów SIMS jest tak specyficzna, że korzysta z nich tylko kilka firm i instytutów badawczych. Dlatego profilowanie głębokościowe metodą TOF-SIMS staje się coraz bardziej popularne w wielu obszarach badań naukowych.

Zalety:

- Wysoka czułość izotopowa.
- Dostarcza informacji pierwiastkowych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej.
- Powszechnie stosowana technika mapowania pierwiastków i profilowania głębokości w trybie TOF.

Ograniczenia:

- Destrukcyjna w miejscu pomiaru.
- Wymaga wysokiej próżni.
- Brakuje ilościowych i chemicznych informacji o stanie materii.

2.6 Skaningowa mikroskopia elektronowa (*scanning electron microscope – SEM*)

Skaningowy mikroskop elektronowy obrazuje topografię i strukturę próbki poprzez zbieranie wtórnych lub wstecznie rozproszonych elektronów utworzonych przez skanowanie materiału zogniskowaną wiązką elektronów, których energia waha się od 100 eV do 30 keV. Powstałe w ten sposób obrazy dostarczają wielu informacji o topografii i strukturze powierzchni. Wiązka padająca wzbudza również charakterystyczne promienie rentgenowskie, które można wykorzystać do zbierania podstawowych informacji o próbce za pomocą detektorów promieniowania rentgenowskiego z dyspersją energii lub długości fali. Mianowicie, pobudzone są elektrony wtórne o energii <50 eV, a wytwarzane są elektrony Augera, co wzbudza charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie. Korzystając z różnych detektorów, każdy z tych typów elektronów lub fotonów może być użyty do tworzenia obrazów lub wydobywania istotnych informacji o analizowanych próbkach. Obrazowanie elektronów wtórnych przedstawia topografię powierzchni o średnicy kilku nm. Filmy i pokrycia o grubości zaledwie 2 nm dają obrazy o odpowiednim kontraście. Materiały są oglądane w powiększeniach do 800000 razy bez konieczności obszernego przygotowania próbki i bez obaw o jej uszkodzenie. Grubość cienkich warstw można określić za pomocą mikrografów SEM (De Graef 2003).

Zalety:

- Obrazowanie mikrostruktur i nanostruktur.
- Analiza i mapowanie układów elementarnych.
- Rozpraszanie wsteczne elektronów do analizy pierwiastków ciężkich.

Ograniczenia:

- Wymagana próżnia.
- Wiązka elektronów może uszkodzić próbkę.
- Wysokie tło z powodu napromieniowania Bremsstrahlunga.
- Nie nadaje się do analizy ilościowej.

3. Wnioski

Obecnie wiele dziedzin nauki takich, jak: inżynieria materiałowa, medycyna regeneracyjna, fizykochemia powierzchni, czy elektrotechnika ciągle opracowuje, modyfikuje i wytwarza nowe materiały, powłoki i cienkie warstwy do wielu różnych zastosowań. Charakterystyka tak szerokiej gamy materiałów jest niezwykle ważnym wyzwaniem, biorąc pod uwagę unikalność i osobliwą naturę każdego nowego lub zmodyfikowanego materiału. Celem pozyskania ważnych szczegółów i informacji, często konieczne jest wybranie kombinacji technik badawczych i uzupełniających w oparciu o właściwości danych materiałów, ich potencjalne zastosowanie oraz rozdzielczość i czułość oferowaną przez konkretne techniki. Rosnący nacisk na wykorzystanie materiałów nanostrukturalnych i materiałów zaprojektowanych jako multifunkcjonalne wymusza stosowanie wielu technik analizujących powierzchnię do zrozumienia fizycznych, elektronicznych i chemicznych właściwości tych układów. Naukowcy i branża techniczna pracują nad opracowaniem instrumentów o zwiększonej czułości i zdolności do działania w środowisku rzeczywistym, a także nad umożliwieniem kombinacji wielu technik w pojedynczych instrumentach, które zaspokoją obecne i wciąż rosnące potrzeby badawcze. W raporcie Międzynarodowej Agencji Naukowej wykazano, że wiele narzędzi analitycznych, które wcześniej były wykorzystywane głównie przez ekspertów

w danej dziedzinie, jest obecnie potrzebnych naukowcom pracującym nad wieloma rodzajami cienkich warstw i powłok. Metody te są często dostępne za pośrednictwem naukowych obiektów użytkowych, np. Państwowej Akademii Nauk, a eksperci pracujący na uniwersytetach i w prywatnych korporacjach coraz częściej nawiązują wielowymiarową kooperację. Oczekuje się, że taka interdyscyplinarna współpraca wywrze znaczący wpływ na udoskonalanie metod charakterystyki materiałów i umożliwi dalszy dynamiczny rozwój technik opierających się na technologiach cienkich warstw i powłok.

4. Literatura

- Briggs D, Seah MP (1990) *Practical Surface Analysis*. John Wiley, Chichester 193-205.
- Siegbahn K (1965) *Alpha- Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy*. North-Holland, Amsterdam 1-18.
- Brown GE, Sutton SR, Calas G (2006) User facilities around the world. *Elements* 2: 9-14.
- Brundle CR, Evans CA, Wilson S (1992) *Encyclopedia of Materials Characterization: Surfaces, Interfaces, Thin Films*. Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- Brunelle A, Laprevote O (2007) Recent advances in biological tissue imaging with time-of-flight secondary ion mass spectrometry: polyatomic ion sources, sample preparation, and applications. *Curr. Pharm. Des.* 13: 3335-3343.
- Cheng J, Winograd N (2005) Depth profiling of peptide films with TOF-SIMS and a C-60 probe, *Anal. Chem.* 77: 3651-3659.
- De Graef M (2003) *Introduction to conventional transmission electron microscopy*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Everall NJ (2005) Raman spectroscopy in coatings research and analysis: Part II. Practical applications, *JCT Coat. Tech.* 2: 46-52.
- Li YJ, Kaspar TC, Droubay TC i in. (2005) Electronic properties of H and D doped ZnO epitaxial films. *Appl. Phys. Lett.* 92: 152105.
- Moulder JF, Chastain J, King RC (1995) *Handbook of X-Ray photoelectron spectroscopy: A reference book of standard spectra for identification and interpretation of XPS Data*. Physical Electronics, EdenPrairie, MN.
- Ohlidal I, Franta D (2000) Ellipsometry of thin film systems, *Prog. Opt.* 41: 183-284.
- Priyantha W, Chen H, Kopczyk M i in. (2008) Interface mixing of Al/Fe and Fe/Al bilayer systems and the role of Ti as a stabilizing interlayer using Rutherford backscattering spectrometry and X-ray reflectometry. *J. Appl. Phys.* 103: 014508.
- Shirley DA (1972) High-resolution X-ray photoemission spectrum of valence bands of gold, *Phys. Rev. B* 5: 4709.
- Teboul E, Yan L, Gaillet M (2006) Characterization of TFT-LCD and OLEDs devices by phase modulated spectroscopic ellipsometry for display applications. *Organic Electronics – Materials, Devices and Applications*, MRS Fall Symposium, 0965-S03-07.
- Vickerman JC, Briggs D (2001) *TOF-SIMS: Surface analysis by mass spectrometry*. Surface spectra/IM, Manchester/Chichester.
- Vickerman JC, Brown AA, Reed NM (1989) *Secondary ion mass spectrometry: Principles and applications*. Oxford University Press, Oxford.

11. Zastosowanie wybranych metod symulacyjnych w elektroenergetyce

Application of selected simulation methods in the power industry

Karol Sidor

Katedra Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Miller prof. PL

Sidor Karol: karolsidor11@wp.pl

Słowa kluczowe: symulacje w elektroenergetyce, metoda Monte Carlo, metoda LHS

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposoby modelowania systemów elektroenergetycznych i analizy zjawisk w nich zachodzących. Zaprezentowane i omówione zostały dwa podejścia do modelowania współczesnych systemów elektroenergetycznych. Szczególną uwagę zwrócono na niedeterministyczny charakter pracy systemów elektroenergetycznych i możliwości prowadzenia badań z wykorzystaniem podejścia probabilistycznego. Przedstawiono i scharakteryzowano wybrane metody symulacyjne oraz wskazano możliwości zastosowania tych metod w badaniach i modelowaniu pracy systemu elektroenergetycznego.

1. Wstęp

Współczesne systemy elektroenergetyczne (SEE) są bardzo złożonymi przedsięwzięciami pod względem technicznym, od których wymaga się dużej sprawności, niezawodności i dostarczania energii elektrycznej o najwyższej jakości. Zapewnienie prawidłowego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego wiąże się z koniecznością podejmowania decyzji z zakresu kierowania i planowania pracy systemu elektroenergetycznego. Wymaga to prowadzenia badań i analiz bieżących oraz przyszłych stanów pracy systemu. Przygotowanie analiz wymaga dostępu do informacji charakteryzujących pracę systemu i jego poszczególnych elementów a także danych określających czynniki zewnętrzne oddziałujące na system elektroenergetyczny (Frąckowiak 2013). Niektórych zjawisk podczas analiz pracy systemu elektroenergetycznego z pewnością nie da się przewidzieć pojawiają się w związku z tym pewnego rodzaju niepewności związane między innymi z określeniem przyszłych stanów pracy SEE lub przyjętymi założeniami. Niezależnie od tego czy posiadamy wiarygodne czy niepewne informacje na temat funkcjonowania SEE musimy podejmować decyzje związane z kierowaniem pracą systemu. Dotychczas decyzje podejmowane były na podstawie wielkości zdeterminowanych, co często nie daje pełnego wyobrażenia o funkcjonowaniu SEE. Świadomość braków w analizie wynikających z wykorzystania metod deterministycznych skłoniła do wykorzystania metod uwzględniających elementy niepewności. Obecnie często deterministyczne analizy pracy systemu elektroenergetycznego uzupełnia się o analizy oparte na badaniach statystycznych i probabilistycznych.

2. Modelowanie systemów elektroenergetycznych

Funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego i analiza zjawisk w nim zachodzących jest jednym z zadań elektroenergetyki. Problemy występujące w SEE rozwiązywane są w oparciu o modele elementów systemu, które połączone stanowią spójną sieć. Wszelkiego rodzaju analizy realizuje się z wykorzystaniem modeli matematycznych, które możemy podzielić między innymi na:

- modele deterministyczne
- modele stochastyczne

Powszechnie w analizach systemu elektroenergetycznego wykorzystywano podejście deterministyczne, w którym określönemu zjawisku jednoznacznie przypisuje się określony stan, który jest zależny głównie od parametrów wejściowych. W modelach deterministycznych nie uwzględnia się elementów losowości a ewolucja układu w modelu jest z góry przesądzona.

Zwykle analizy deterministyczne określonego zjawiska opierają się na kilku modelach (Rink 2016). Dla zapotrzebowania na moc i energię wyróżnić możemy zwykle trzy lub cztery modele zapotrzebowania:

- dolina letnia (LD),
- szczyt letni (LS),
- szczyt zimowy (ZS),
- dolina zimowa (ZD).

Alternatywą dla podejścia deterministycznego jest podejście probabilistyczne uwzględniające zmienny charakter pracy systemu elektroenergetycznego. Analizy probabilistyczne prowadzone są w oparciu o zmienne losowe zamiast wielkości zdeterminowanych (Kubek i Przygodzki 2018). Podstawą analizy probabilistycznej jest przygotowanie zestawu modeli odzwierciedlających pracę systemu elektroenergetycznego w równoodległych punktach czasu lub określonym okresie czasu. W przypadku analiz probabilistycznych opracowuje się modele charakterystyczne między innymi:

- stanu pracy źródeł i odbiorów,
- poziomu generacji fotowoltaicznej,
- poziomu generacji wiatrowej,
- salda wymiany międzysystemowej.

Porównanie podstawowych cech modelowanie deterministycznego i probabilistycznego przedstawiono poniżej (Tab.1).

Tab. 1. Porównanie modelowania deterministycznego i probabilistycznego

Modelowanie deterministyczne	Modelowanie probabilistyczne
Obliczenia parametrów sieciowych wykonywane są w oparciu o wielkości ściśle zdeterminowane	Obliczenia parametrów sieciowych prowadzone są w oparciu o zmienne losowe zamiast wielkości zdeterminowanych
Wyniki analizy deterministycznej uzależnione są od ściśle ustalonych parametrów wejściowych	W analizie probabilistycznej stosuje się opis probabilistyczny, który dla każdej analizowanej wielkości wymaga znajomości jej rozkładu prawdopodobieństwa
W modelowaniu deterministycznym często stosuje się założenia upraszczające dla opisu zjawisk o zbyt dużej złożoności	Modelowanie probabilistyczne wymaga odpowiedniej populacji danych dla opisu zjawisk o dużej złożoności

W realiach funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego często ma charakter losowy, przez co odwzorowanie niektórych wielkości z wykorzystaniem podejścia deterministycznego jest niezwykle trudne bądź niemożliwe. Wiele wielkości mających wpływ na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego ma zmienny charakter pracy uzależniony od różnych czynników między innymi: aktualnego stanu sieci, warunków atmosferycznych czy nieprzewidywalnych w normalnych warunkach zdarzeń. Wielkości takie trudno jest opisać za pomocą klasycznych zależności stosowanych w podejściu deterministycznym. Jednakże analizując ich pomiary można przyporządkować im odpowiednie rozkłady prawdopodobieństwa. Znając naturę zjawiska możemy określić charakter jego zmian, co umożliwi wyciąganie odpowiednich wniosków. Takie podejście jest bardziej miarodajne i efektywne niż stosowanie uproszczeń.

W pracy systemu elektroenergetycznego możemy wyróżnić wiele wielkości, których natura ma charakter zmienny (Pijarski i in. 2018), do nich możemy zaliczyć między innymi:

- prędkość wiatru,
- kierunek wiatru,
- temperatura otoczenia,
- nasłonecznienie,
- obciążenie sieci,
- napięcia w węzłach,

- moce zwarciove,
- łączenia synchroniczne,
- dynamiczna obciążalność prądowa.

Pierwsze cztery wielkości (prędkość wiatru, kierunek wiatru, temperatura otoczenia i nasłonecznienie) charakteryzują się dużą dynamiką zmian. Ich wartości zależą od wielu czynników między innymi: pory roku, pory dnia czy położenia geograficznego.

Obciążenie sieci charakteryzuje się również dużą zmiennością i może być zależne od pory roku, pory dnia a także może być związane z aktualnymi warunkami atmosferycznymi.

Dynamiczna obciążalność prądowa posiada zmienny charakter ze względu na zmieniające się warunki atmosferyczne. W praktyce wielkość ta wyznaczana była dotychczas deterministycznie zakładając dwa okresy (letni i zimowy), w których wyznaczana była jej przybliżona wartość.

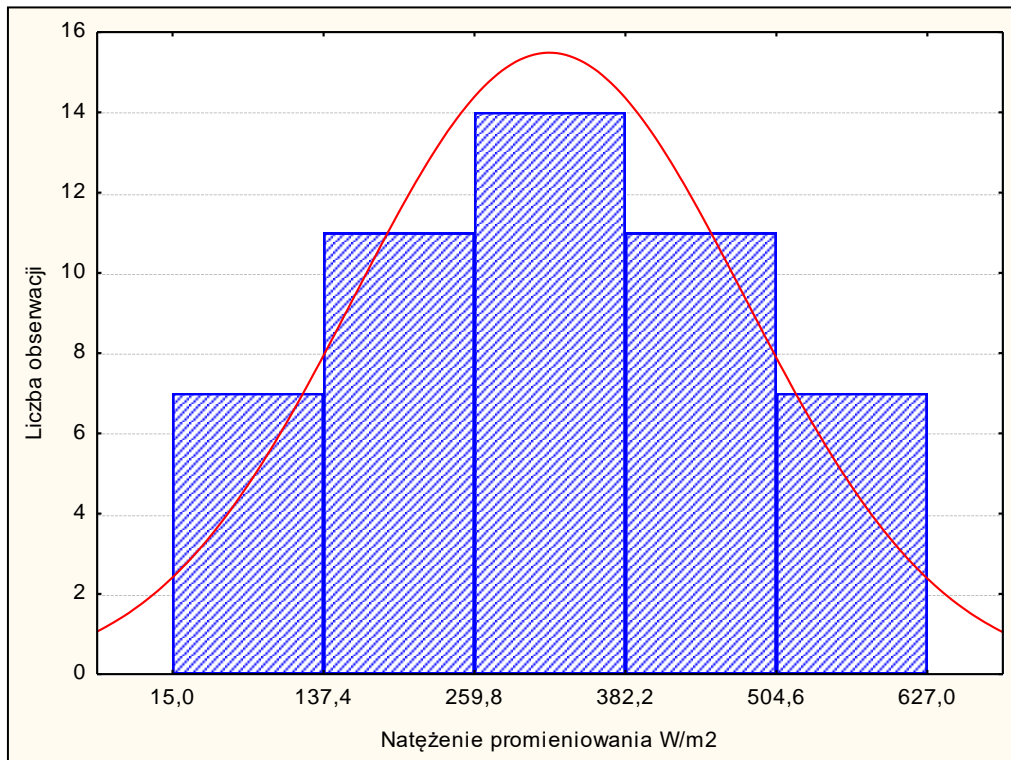
Pozostałe wielkości (napięcia w węzłach, moce zwarciove oraz łączenia synchroniczne) również posiadają charakter zmienny i można je potraktować, jako zmienne losowe analizując je w czasie.

W dalszej części artykułu przedstawiono rozkłady prawdopodobieństwa dla wybranych wielkości elektroenergetycznych charakteryzujących się dużą zmiennością. Przedstawione histogramy zostały przygotowane w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe.

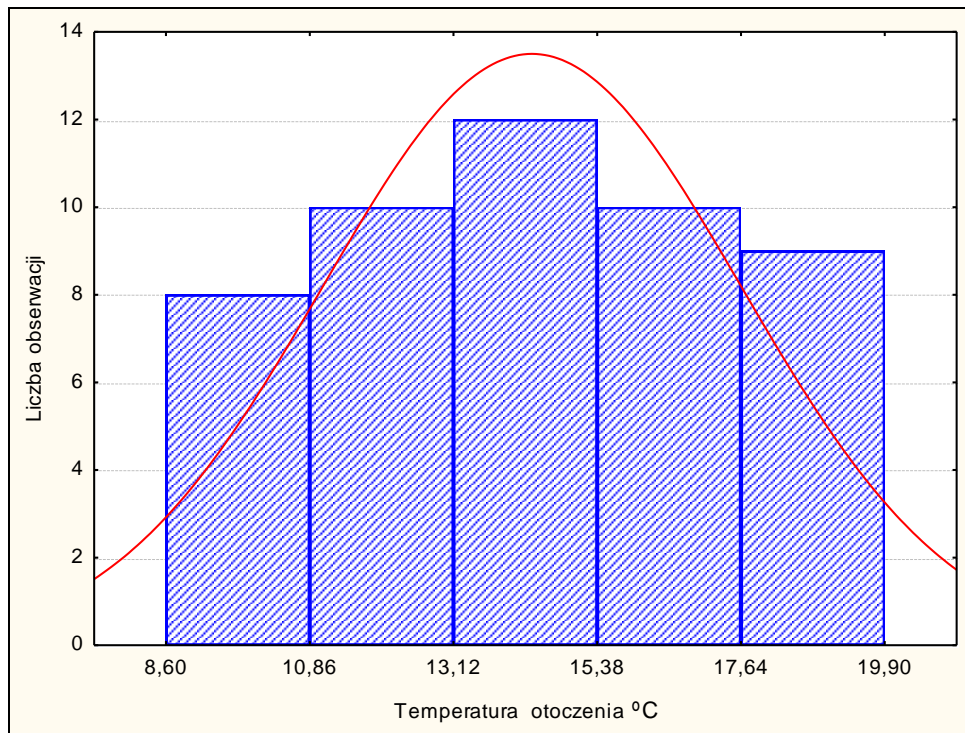
Nasłonecznienie jest wielkością, której przyporządkować możemy normalny rozkład prawdopodobieństwa zgodnie z histogramem przedstawionym na Rys.1.

Temperaturze otoczenia przedstawionej histogramem na Rys. 2 można przyporządkować rozkład prawdopodobieństwa Gaussa.

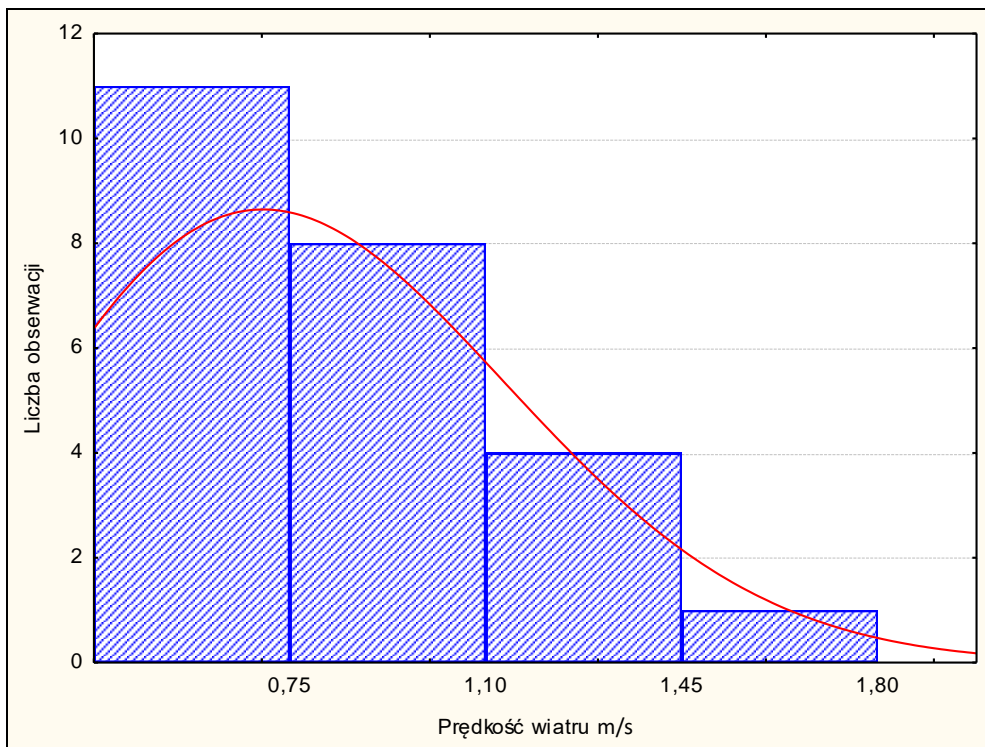
Prędkości wiatru możemy przyporządkować rozkład prawdopodobieństwa Weibulla. Histogram prędkości wiatru przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 1. Histogram natężenia promieniowania słonecznego z rozkładem normalnym



Rys. 2. Histogram temperatury otoczenia z rozkładem Gaussa



Rys. 3. Histogram prędkości wiatru z rozkładem Weibulla

3. Metody symulacyjne w elektroenergetyce

Dynamiczny charakter pracy systemu elektroenergetycznego wymusza zmianę podejścia do prowadzenia badań. Dotychczas stosowane podejście oparte na analizach deterministycznych jest często uzupełniane o wyniki badań statystycznych i probabilistycznych. W praktyce często w badaniach wykorzystuje się metody symulacyjne celem określenia prawdopodobieństwa wystąpienia określonego stanu. Badania takie mogą być realizowane z wykorzystaniem relatywnie dużej liczby metod symulacyjnych (Lubicki 2017). W zależności od analizowanego zagadnienia w elektroenergetyce wykorzystuje się metody takie jak:

- Monte Carlo (MC),
- Latin Hypercube Sampling (LHS),
- Latin Supercube Sampling (LSS),
- Uniform Design Sampling (UDS),
- Adaptive Importance Sampling (AIS),
- Simple Random Sample (SRS).

W praktyce najczęściej wykorzystywana jest metoda Monte Carlo oraz metoda LHS.

Metoda Monte Carlo jest jedną z najczęściej wykorzystywanych metody symulacyjnych i stosowana jest do modelowania bardzo złożonych procesów. Opiera się na numerycznych obliczeniach z wykorzystaniem zmiennych losowych w charakterze próbek opisujących badany proces. Metoda Monte Carlo wykorzystuje prawo liczb wielkich sformułowane przez J. Bernoulliego. Założenia metody Monte Carlo bazują następującym algorytmie:

Krok 1: Definicja przestrzeni danych wejściowych,

Krok 2: Losowe określenie danych wejściowych z wcześniej określonej przestrzeni,

Krok 3: Wykonanie obliczeń probabilistycznych z wykorzystaniem danych wejściowych,

Krok 4: Agregacja uzyskanych wyników w jedno rozwiązanie końcowe.

Zaletą metody Monte Carlo jest jej prostota, ogólność, możliwość rozwiązywania trudnych problemów oraz szerokie zastosowanie natomiast istotną jej wadą jest zbieżność (Przygodzki i Lubicki 2017). Metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki również w elektroenergetyce. W dziedzinie elektroenergetyki metodę tą wykorzystuje się do rozwiązywania wielu zagadnień między innymi:

- planowania rozwoju sieci,
- analiz ekonomicznych,
- obliczeń rozptyłów mocy,
- badaniach niezawodności SEE.

Metoda LHS (Latin Hypercube Sampling) jest alternatywną metodą symulacyjną dla metody Monte Carlo. Należy do grupy metod losowania warstwowego, a jej istotą jest zdeterminowany rozkład prawdopodobieństwa (Przygodzki i Lubicki 2017). Metoda LHS realizowana jest w trzech krokach:

Krok 1: Podział funkcji na P-przedziałów o jednakowym prawdopodobieństwie,

Krok 2: Losowy wybór przedziału i generowanie liczby X z przedziału,

Krok 3: Powtarzanie działań z kroku 2 dla wszystkich wyznaczonych przedziałów.

Metoda LHS jest najczęściej wykorzystywaną metodą z grupy losowania warstwowego ze względu na dobry efekt wypełnienia przestrzeni oraz lepszą zbieżność w porównaniu z innymi metodami z grupy. Lepsze odwzorowanie rozkładu badanej zmiennej X w metodzie LHS uzyskać można poprzez zwiększenie rozdzielczości przedziałów lub wprowadzenie dodatkowych powtórzeń. Metoda LHS podobnie jak Monte Carlo jest często wykorzystywana w rozwiązywaniu różnych problemów z dziedziny elektroenergetyki między innymi:

- obliczeń rozptyłów mocy,
- oceny ekonomicznej stanu sieci,
- badaniach niezawodności sieci,
- prognozowania energii wiatrowej.

W literaturze możemy spotkać wiele odmian metody Monte Carlo i LHS między innymi w pracach (Xu i Yan 2015), (Liu i in. 2020), (Xu i in. 2017). Obie metody możemy wykorzystywać do rozwiązywania problemów podobnej klasy jednakże metody te znacząco się różnią w działaniu. Metoda Monte Carlo dla każdej niepewnej zmiennej w modelu generuje losową próbkę N punktów. Dla każdego punktu generuje N wartości lub scenariuszy dla każdej zmiennej wynikowej w modelu. Na podstawie tej losowej próbki szacuje miary statystyczne takiej jak: średnia, odchylenie standardowe, gęstość prawdopodobieństwa. Metoda Monte Carlo opiera się na czystej losowości, przez co w niektórych może okazać się mniej efektywna. Natomiast metoda LHS ma na celu równomierne rozłożenie punktów próbkowania, dzieląc każdą zmienną wejściową na N przedziałów o jednakowym prawdopodobieństwie. Dla każdego z przedziałów generuje losowe wartości nie uwzględniając korelacji między danymi wejściowymi. Przez co efektywność odwzorowania rozkładu prawdopodobieństwa w metodzie LHS jest zdecydowanie większa niż w metodzie Monte Carlo. Obie metody symulacyjne posiadają szereg zalet i wad, okazuje się, że w niektórych przypadkach metoda LHS może przewyższać metodę Monte Carlo. Jednakże badania (Przygodzki i Lubicki 2017) potwierdzają, że wyniki otrzymane z wykorzystaniem tych metod symulacyjnych nie odbiegają od siebie znacząco. W związku z tym nadal w nowoczesnych narzędziach do symulacji domyślnie wykorzystywana jest metoda symulacyjna Monte Carlo.

4. Podsumowanie i wnioski

Współczesne systemy elektroenergetyczne obecnie często posiadają zmienny charakter pracy, jest to spowodowane głównie wzrostem zapotrzebowania na moc i współpracą z odnawialnymi źródłami energii. Zarządzanie i kierowanie pracą systemu elektroenergetycznego staje się coraz bardziej utrudnione ze względu na dużą dynamikę zmian zachodzących w systemie elektroenergetycznym. Podstawowe narzędzia umożliwiające analizę pracy systemu elektroenergetycznego opierają się głównie o modelowanie deterministyczne, które bazują na ustalonych danych wejściowych. Obecnie modelowanie deterministyczne nie jest wystarczające do pełnego wyznaczenia modelu referencyjnego pracy sieci elektroenergetycznej. Pełne odwzorowanie pracy systemu elektroenergetycznego jest procesem wiążącym w sobie szereg działań takich jak pozyskiwanie i gromadzenie danych pomiarowych oraz prognoza zapotrzebowania i generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł. Wymaga to rozszerzenia dotychczas stosowanych modeli deterministycznych o analizę statystyczną lub probabilistyczną. Połączenie podejścia deterministycznego z probabilistycznym umożliwia pełne wyobrażenie o funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego dostarczając wielu wartościowych informacji o prawdopodobieństwie wystąpienia danego stanu w pracy systemu elektroenergetycznego. Podejście takie pozwala na posługiwanie się rozkładami prawdopodobieństwa każdej rozpatrywanej wielkości zamiast wielkości zdeterminowanych. W praktyce w zależności od analizowanego zagadnienia wykorzystywane są różne metody symulacyjne do odwzorowania wielkości, które posiadają charakter niedeterministyczny. Podejście probabilistyczne można wykorzystać w rozwiązywaniu wielu zagadnień z dziedziny elektroenergetyki i posiada przewagę nad podejściem deterministycznym, ponieważ pozwala uwzględniać niepewność związaną ze zmiennymi czynnikami wpływającymi na pracę systemu elektroenergetycznego.

5. Literatura

- Frąckowiak R (2013) Zagadnienia elektroenergetyki w ujęciu statystycznych i probabilistycznych badań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej: 10-25.
- Kubek P, Przygodzki M (2018) Wybrane aspekty wykorzystania elementów probabilistycznych w planowaniu rozwoju sieci przesyłowej. Przegląd Elektrotechniczny R.94 Nr 12: 108-111.
- Liu J, Dhen H, Yang F (2020) Reliability Evaluation of Distribution Network Power Supply Based on Improved Sampling Monte Carlo Method. 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering: 1725-1729.
- Lubicki W (2017) Analiza wybranych probabilistycznych elementów planowania rozwoju sieci przesyłowej. Praca doktorska Gliwice: 64-67.

- Pijarski P, Miller P, Sidor K (2018) Probabilistic in power engineering. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*: 559-567.
- Przygodzki M, Lubicki W (2017) Wykorzystanie wybranych metod symulacyjnych w obliczeniach probabilistycznego rozptywu mocy. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 53: 61-64.
- Przygodzki M, Lubicki W (2017) Wykorzystanie losowań metodą LHS do obliczeń probabilistycznego rozptywu mocy. *Acta Energetica* 2/31: 189-196.
- Rink R (2016) Metoda statystyczno-stochastyczna analiz rozwoju sieci. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 50: 79-84.
- Xu Q, Yang Y, Liu Y (2017) An Improved Latin Hypercube Sampling Method to Enhance Numerical Stability Considering the Correlation of Input Variables. *IEEE Access* Volume 5: 15197-15205.
- Xu X, Yan Z (2015) Probabilistic load flow evaluation with hybrid Latin Hypercube Sampling and multiple linear regression. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*: 1-5.

12. Mikroskopia sił atomowych (AFM) i jej zastosowanie

Atomic force microscopy (AFM) and its application

Szafran Klaudia

Katedra Zjawisk Międzyfazowych, Instytut Nauk Chemicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin

Opiekun naukowy: dr hab. Małgorzata Jurak

Szafran Klaudia: klaudia.wozniak@poczta.umcs.lublin.pl

Słowa kluczowe: mikroskop sił atomowych, topografia powierzchni

Streszczenie

Mikroskopia sił atomowych (AFM) stała się użytecznym narzędziem do bezpośrednich pomiarów parametrów mikrostrukturalnych i odkrywania sił międzycząsteczkowych w skali nanometrów. Badania prowadzone są zazwyczaj w trzech trybach: bezkontaktowym, kontaktowym i przerywanym. Ostatnie badania z użyciem AFM skupiły się na wielu procesach produkcyjnych i metrologicznych na poziomie molekularnym ze względu na ogromne możliwości AFM w zakresie analizy powierzchni. Dzięki temu AFM umożliwia zbadanie minerałów, ceramiki, materiałów polimerowych, a także materiałów biologicznych.

1. Wstęp

35 lat temu naukowcy Binning, Quate oraz Gerber (Binning i in. 1986) opublikowali artykuł zawierający dane na temat nowo wynalezionnej techniki – mikroskopii sił atomowych (*ang. atomic force microscopy*, AFM), należącej do grupy mikroskopii ze skanującą sondą (*ang. scanning probe microscopy*, SPM). AFM jest techniką szeroko stosowaną do obrazowania topografii powierzchni w wymiarze 3D w różnych ośrodkach. Zasada działania AFM polega na pomiarze siły występującej pomiędzy ostrą igłą, której promień jest mniejszy niż 10 nm, a badaną powierzchnią (w odległości 0,2–10 nm) (De Oliviera i in. 2012; Prado i in 2012). Ostra igła będąca zakończeniem elastycznego wspornika delikatnie dotyka badanej powierzchni. Wytworzona między nimi siła powoduje ugięcie wspornika. Jest ono mierzone najczęściej poprzez zogniskowanie wiązki lasera w tylnej części wspornika i detekcję położenia wiązki odbitej (Butt i in. 2007). Rejestrowana siła opisana jest za pomocą prawa Hooke'a:

$$F=-kx \quad (1)$$

gdzie:

F-siła oddziaływania

k-stała sprężystości

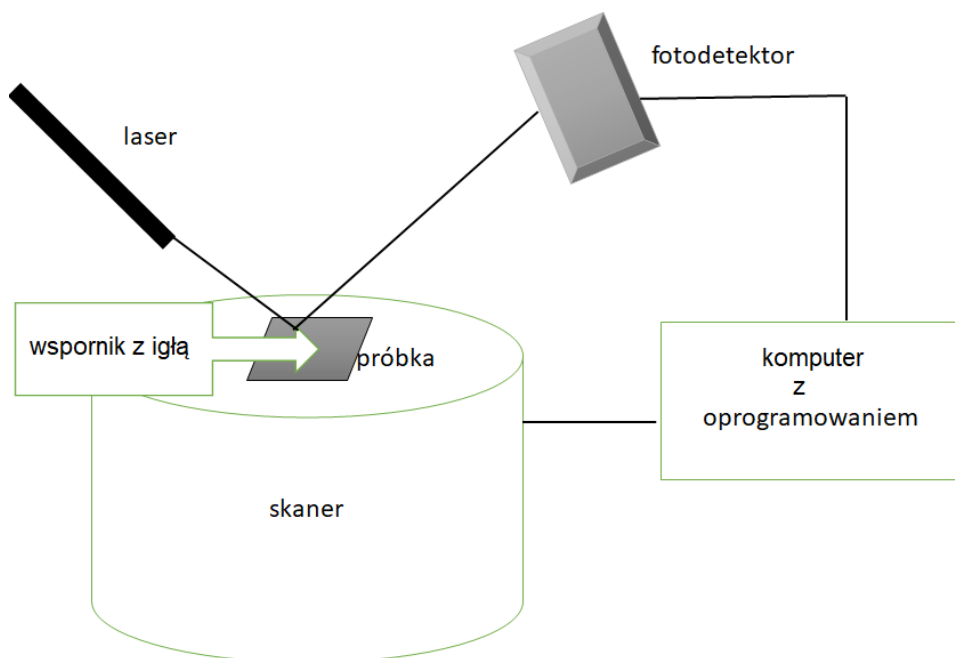
x-odkształcenie wspornika

Rysunek 1 przedstawia schemat budowy mikroskopu sił atomowych, AFM, którego podstawowymi elementami są skaner, wspornik z ostrą igłą, laser, fotodetektor oraz oprogramowanie. Skaner przesuwa się wzdłuż jednej linii do przodu i do tyłu, po czym przesuwa się w kierunku prostopadłym do następnej linii skanowania. Podczas pracy skanera rejestrowany jest obraz, położenie skanera oraz ugięcie wspornika tworzą zbiór danych. Odstęp między punktami, z których zbierane są dane nazywa się krokami. Rozmiar kroku zależy od pełnego skanu oraz liczby zbieranych punktów na linii skanowania. Dzięki wspornikowi możliwe jest zbadanie topografii próbki. Wspornik oraz igła są zbudowane – z krzemu lub azotku krzemu i tworzą zintegrowany układ. Wspornik może mieć różne wymiary, które dobiera się w zależności od charakteru badanej powierzchni.

Istnieje możliwość prowadzenia badań powierzchni w trzech trybach:

- kontaktowym (*contact mode*),
- przerywanym lub przerywanego kontaktu (*intermittent contact mode*),

- bezkontaktowym (*non-contact mode*).



Rys. 3. Schemat budowy AFM.

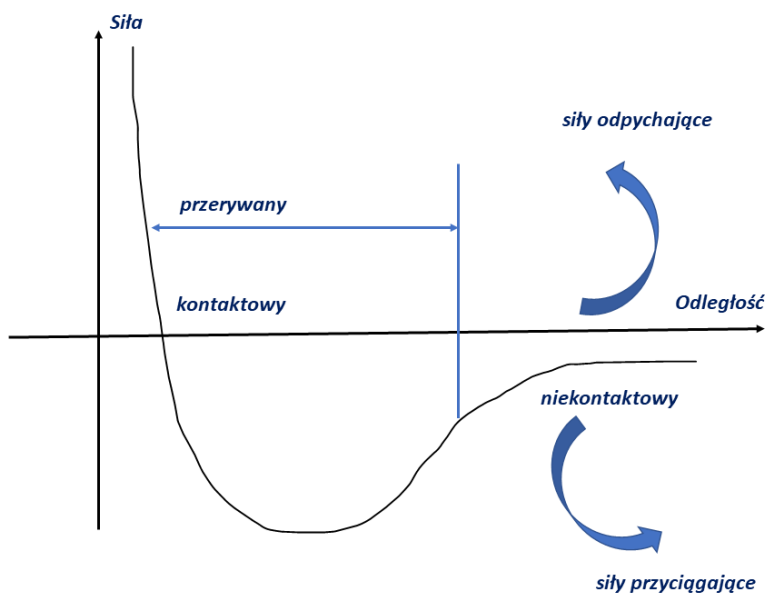
W **trybie kontaktowym** zwanym także jako tryb odpychający końcówka jest w bliskim kontakcie z próbką podczas skanowania powierzchni. Ugięcie wspornika determinuje stała sprężystości i w zależności od jej wielkości, wspornik się ugina. Siła między igłą a próbką jest stała i ma charakter głównie odpychający, dzięki czemu wspornik zachowuje stałe ugięcie podczas rejestrowania obrazu. W trybie kontaktowym można wygenerować profil powierzchni pracując w trybie stałej wysokości lub stałej siły. W pierwszym z powyższych skaner piezoelektryczny trzymający końcówkę AFM skanuje powierzchnię próbki bez przesuwania jej w kierunku Z. Wadą tego trybu jest fakt, że możliwe jest zerwanie igły w wyniku dużych nierówności występujących na powierzchni próbki. Z kolei w trybie stałej siły, siła działająca między końcem igły a próbką jest utrzymywana na stałym poziomie dzięki pętli sprzężenia zwrotnego. Podczas pomiaru ostrze początkowo styka się z próbką w określonym położeniu do momentu uzyskania wymaganego ugięcia wspornika. Zmierzona wartość ugięcia jest porównywana z wartością zadaną i według uzyskanej zależności skaner piezoelektryczny dostosowuje przyłożone napięcie w celu dobrania odpowiedniej wysokości wspornika. Zaletą pracy w trybie kontaktowym jest szybkość skanowania oraz możliwość badania próbek szorstkich. Z drugiej jednak strony należy wziąć pod uwagę fakt, że próbka może zostać uszkodzona lub zdeformowana. Z powyższych względów nie zaleca się stosowania trybu kontaktowego do badania powierzchni próbek biologicznych oraz polimerowych.

Tryb przerywany działa podobnie jak kontaktowy z tą różnicą, że wspornik zbliża się do badanej powierzchni z częstotliwością rezonansową. Igła znajduje się w kontakcie z próbką przez krótki okres, dzięki czemu siły boczne są zminimalizowane. Pracując w trybie przerywanym obrazowanie uzyskuje się na dwa sposoby: poprzez obrazowanie amplitudy lub poprzez obrazowanie fazowe. Tryb przerywany najczęściej stosowany jest do wizualizacji powierzchni próbek miękkich lub słabo związanych z powierzchnią nośnika.

W odróżnieniu do poprzednio omówionych trybów w **trybie bezkontaktowym** igła nie dotyka próbki. Kończówka wspornika unosi się na około 50–150 Å tak, aby wykryć przyciągające siły van der Waalsa. Ze względu na znacznie słabsze przyciąganie próbka-ostrze niż w trybie kontaktowym, końcówkę poddaje się niewielkiej oscylacji. Ma to na celu umożliwienie wykrycia małych sił poprzez

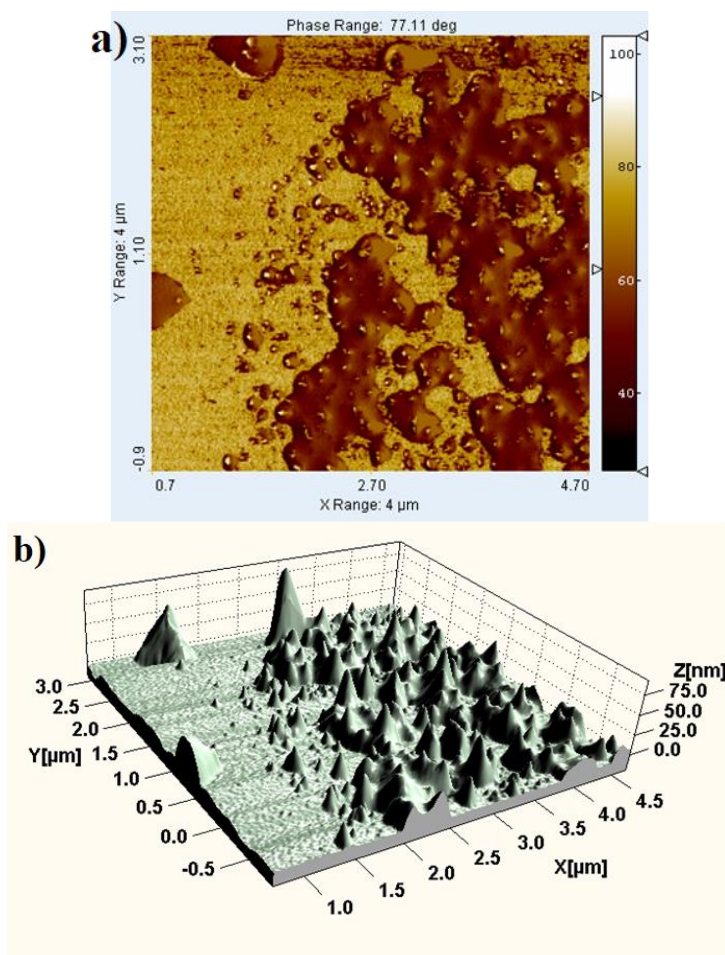
pomiar zmiany amplitudy, fazy lub częstotliwości oscylującego wspornika. Zastosowanie trybu niekontaktowego zapewnia dłuższą żywotność badanej próbki, nie jest destrukcyjne, przy czym obrazy otrzymane w tym trybie posiadają mniejszą rozdzielczość (Dufrière 2002; Dufrière i Lee 2000; Gupta 2012; Jalili i Laxminarayana 2004).

Siły oddziaływań pomiędzy ostrzem a próbką we wszystkich trybach można zidentyfikować na krzywej przedstawiającej zależność siły od odległości (Rys. 2). Gdy odległość międzyatomowa ostrze-próbka jest duża, generowane są słabe siły przyciągania. W miarę zbliżania się do siebie atomów siły przyciągania rosną do momentu, gdy ich chmury elektronowe zaczną się przenikać podczas bardzo bliskiego kontaktu. Wtedy też elektrony zaczynają się odpychać elektrostatycznie. Podczas zmniejszania się odległości międzyatomowej siła odpychania występująca między atomami stopniowo osłabia siły przyciągania. Siła oddziaływania niweluje się (zeruje), gdy odległość między atomami osiąga kilka angstromów i staje się w pełni odpychająca **wtedy, gdy** atomy się kontaktują (Jalili i Laxminarayana 2004).



Rys. 2. Zmiana siły międzyatomowej w funkcji odległości między ostrzem igły a próbką.

Obrazy topograficzne uzyskane za pomocą AFM (Rys. 3) powinny być odtwarzalne oraz przedstawiać rzeczywistą strukturę powierzchni próbki. Artefakty w skali atomowej to cechy topograficzne, do których można zaliczyć brakujące atomy oraz cząsteczki i/lub atomy widma. Jakość surowych danych uzyskanych podczas skanowania ma kluczowe znaczenie w generowaniu wysokorozdzielczych obrazów AFM. Otrzymanie dobrej jakości surowego obrazu umożliwia zastosowanie filtrowania w celu uwidocznienia i odróżnienia artefaktów instrumentalnych od rzeczywistych. Pierwszą z opcji filtrowania może być **splaszczanie**. Obejmuje ono średnią wartość wysokości każdej linii skanowania do każdego punktu na linii skanowania oraz redukcję efektu wgięcia obrazu, a także wibracji w kierunku Y. Powyższe filtrowanie można zastosować automatycznie w rzeczywistym czasie pomiaru lub ręcznie po wykonanym pomiarze. Kolejnym filtrem może być **dolno-** lub **górnoprzepustowy**, który eliminuje szумы o niskiej lub wysokiej częstotliwości jednocześnie zmniejszając rozdzielczość obrazu. Filtry te stosuje się najczęściej w celu uwydatnienia na obrazie różnic w wysokości. Podgrupą powyższego typu filtru są dwuwymiarowe szybkie transformacje Fouriera. Naukowcy sądzą, że jest to najbardziej przydatna procedura, która poprzez wprowadzone zmiany znacznie poprawia jakość obrazów AFM (Gupta 2012). Rysunek 3 przedstawia przykładowe obrazy uzyskane przy pomocy AFM.



Rys. 3 Przykładowe obrazy uzyskane przy pomocy AFM: a) obraz fazowy, b) obraz topograficzny 3D

2. Zastosowania AFM

Mikroskopia sił atomowych ma bardzo szerokie zastosowanie w badaniu różnorodnych powierzchni. Zróżnicowanie zakresu użycia AFM można podzielić na dwie główne kategorie, w skład których wchodzi nauki techniczno-inżynieryjne oraz nauki biologiczne.

Wiarygodne pomiary parametrów mikrostrukturalnych w skali nano mają ogromne znaczenie przy opracowywaniu nowych stopów i kontroli jakości w procesach produkcyjnych. AFM to sprawdzone narzędzie do obrazowania i pomiarów, które uzupełnia inne techniki mikroskopowe do takich zastosowań. AFM zapewnia również dodatkowe możliwości i zalety w porównaniu z innymi mikroskopami, w tym wyższą rozdzielczość, pomiary 3D, niewielkie wymagania co do przygotowania próbki oraz działanie w otaczającym powietrzu lub płynie. Na przykład, do wizualizacji mikrostruktur metalicznych zróżnicowanych pod względem wielkości zazwyczaj stosuje się różne techniki mikroskopowe, takie jak mikroskopia optyczna czy skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM). AFM jest bardzo przydatnym uzupełnieniem tych technik.

Mikroskopia z modulacją siły rozszerza obrazowanie AFM, w zakresie charakteryzowania właściwości mechanicznych próbki oraz określania zmian składu w materiale kompozytowym, analizowania jednorodności polimeru i wykrywania zanieczyszczeń w procesach produkcyjnych.

Zdolność AFM do pomiaru sił w zakresie nN w warunkach fizjologicznych sprawia, że jest to bardzo atrakcyjne narzędzie do badania wielu biologicznych układów oraz oddziaływań, takich jak

interakcje lek/białko, białko/białko, komórka/komórka lub komórka/białko oraz wiele innych, w dużej mierze zjawisk napędzanych przez siły międzycząsteczkowe. W szczególności kwantyfikacja (ilościowe określenie) tych interakcji molekularnych w układach biologicznych jest przedmiotem zainteresowania wielu badaczy i inżynierów. Zrozumienie adhezji międzyfazowej na poziomie molekularnym jest niezbędną częścią zgłębiania mechanizmu tych zjawisk i może przynieść ogromne potencjalne korzyści w powiązanych obszarach nauki, takich jak racjonalne projektowanie leków, elektronika molekularna, rozwój biomateriałów lub projektowanie biosensorów. Opierając się na zdolności do generowania obrazów topograficznych, AFM stał się użytecznym narzędziem do badania pojedynczych cząsteczek. Wysoka rozdzielczość boczna i zdolność wykrywania bardzo małych sił wraz z możliwością pracy w środowisku wodnym lub płynów fizjologicznych sprawia, że jest to dobra technika do badania układów biologicznych (Jalili i Laxminarayana 2004). Poniżej przedstawione zostały praktyczne zastosowania techniki mikroskopii sił atomowych, które zostały opublikowane w wysokiej rangi czasopismach naukowych.

Dufrene i współprac. wykorzystali AFM do scharakteryzowania filmów organicznych 1,2-bis(dimetylofosfino)etanu oraz 1,2-dimyristoilo-*sn*-glicero-3-fogoglicerolu osadzonych na mice. W swoich badaniach charakteryzowali biwarstwy w środowisku wodnym oraz mono- i biwarstwy w atmosferze powietrza. Ponadto, badali wpływ czynników zewnętrznych na strukturę filmu oraz tworzenie się defektów strukturalnych. Możliwość pomiaru sił powierzchniowych pozwoliła określić fizyczne i chemiczne właściwości warstw organicznych oraz ich składników, a także umożliwiła zrozumienie natury oddziaływań pomiędzy sondą a próbką (Dufrene i Lee 2000). Z kolei zespół Berquanda zastosował AFM do wyznaczenia w czasie rzeczywistym oddziaływań występujących pomiędzy domenami biwarstw lipidowych 1,2-dipalmitoilo-*sn*-glicero-3-fosfocholiny (DPPC) i 1,2-dioleoil-*sn*-glicero-3-fosfocholiny (DOPC) z antybiotykiem. Naukowcy prowadzili skanowanie w trybie kontaktowym, dzięki czemu dowiedli, że dwuwarstwy były stabilne w czasie (Berquand i in. 2004). Demchenkov i współprac. przy użyciu AFM analizowali szkodliwy wpływ soli kadmu na strukturę błony krwinek czerwonych stosując tryb półkontaktowy. Stwierdzili, że kształt błony krwinek czerwonych jest zależny od stężenia chlorku kadmu. Im większa była zawartość soli kadmu tym w większym stopniu uszkadzała błony krwinek. Przeprowadzone badania pozwoliły lepiej zrozumieć mechanizm wpływu kadmu na zmianę struktury błony krwinek czerwonych, dając podstawę do przewidywania szkodliwych skutków obecności metalu przejściowego, co może doprowadzić do opracowania nowych metod przeciwdziałania i ochrony (Demchenkov i in. 2021). Kotsakisa zastosowała AFM do zbadania zmian powierzchni zębów spowodowanych obecnością implantów tytanowych (Kotsakis i in. 2021). Z kolei Talha i współprac. wykorzystali technikę AFM do wyznaczenia morfologii i składu chemicznego filmów, którymi pokryte były metalowe stenty wieńcowe (Talha i in. 2021).

3. Podsumowanie

Mikroskopia obrazowania AFM może znacząco wpływać na opracowanie wielu procesów produkcyjnych na poziomie molekularnym oraz w nanoskali ze względu na jej ogromne możliwości badania i analizy powierzchni, na przykład określanie topografii 3D, metrologii wytwarzania nanocząstek, analiza mikroskopowego rozkładu faz w polimerach, charakterystyka mechanicznych i fizycznych właściwości cienkich warstw, uzupełnienie obrazowania domen magnetycznych na cyfrowych nośnikach pamięci, obrazowanie faz submikronowych w metalach i obrazowanie defektów w analizie uszkodzeń. Pomiaru te można wykorzystać do ilościowego określenia jednorodności tekstury i względnej chropowatości. Ponadto, skanowanie bezkontaktowe przy niskich amplitudach drgań ostrza igły umożliwia uzyskanie obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości bez uszkodzenia sondy. Niezliczone procesy biologiczne w dużej mierze zależne od sił międzycząsteczkowych, takie jak replikacja DNA, synteza białek, interakcje leków i wiele innych, mogą być efektywnie analizowane za pomocą mikroskopii AFM, która służy do pomiaru siły w zakresie nN. Chociaż inne techniki są w stanie wykryć siły tej wielkości, AFM jest wyjątkowy w tym sensie, że pozwala użytkownikowi modyfikować i manipulować obiektami w nanoskali. Oprócz kwantyfikacji siły, AFM posiłkuje ilościowe określenie elektrycznego ładunku powierzchniowego.

Ponadto AFM umożliwia obserwowanie zmian elastyczności, a właściwie lepkości próbek, od żywych komórek i błon po kości i chrząstki.

4. Literatura

- Binning G, Quate F, Gerber Ch (1986) Atomic force microscopy. *Physical Review Letters* 56 (9): 930–933.
- De Olivieria RRL, Albuquerque DAC, Cruz TGS, Yamaji FM, Leite FL (2012) Measurement of the nanoscale roughness by atomic force microscopy: basic principles and applications w *Atomic Force Microscopy. Imaging, measuring and manipulating Surface at the atomic scale*, Ed. Vitor Bellisto. IntechOpen.
- Prado M, Lima LC, Simão RA (2012) Scale laws for AFM image evaluation: potentialities and applications w *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, ed. A. Méndez-Vilas, Badajoz, Hiszpania.
- Butt HJ, Berger R, Bonaccorso E, Chen Y, Wang J (2007) Impact of atomic force microscopy on interface and colloid science. *Advances in Colloid and Interface Science*, 133: 91–104.
- Dufrêne, YF (2002) Atomic force microscopy, a powerful tool in microbiology. *Journal of bacteriology*, 184(19), 5205–5213.
- Dufrêne YF, Lee GU (2000) Advances in the characterization of supported lipid films with the atomic force microscope. *Biochimica et Biophysica Acta* 1509: 14–41.
- Gupta V (2012) Crystal lattice imaging using atomic force microscopy w *Atomic force microscopy – imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale*, ed. Bellitto V, Rijeka, Chorwacja.
- Jalili N, Laxminarayana K (2004) A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics* 14: 907–945.
- Berquand A, Mingeot-Leclerq MP, Dufrêne YF (2004) Real-time imaging of drug-membrane interactions by atomic force microscopy. *Biochimica et Biophysica Acta* 1664: 198–205.
- Demchenkov EL, Nagdalian AA, Budkevich RO, Oboturova NP, Okolelova AI (2021) Usage of atomic force microscopy for detection of the damaging effect of CdCl₂ on red blood cells membrane. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 208: 111683.
- Kotsakis GA, Black R, Kum J, Berbel L, Sadr A, Karoussis I, Simopoulou M, Daubert D (2021) Effect of implant cleaning on titanium particle dissolution and cytocompatibility. *Journal of Periodontology* 92(4): 1–20.
- Talha M, Ma Y, Lin Y, Mandal AK, Sinha OP, Kong X (2021) Corrosion performance of various deformed surfaces of implant steel for coronary stent applications: Effect of protein concentration. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 197: 111407.

13. Modelowanie obróbki czopów wałów korbowych samochodowych silników spalinowych

Modelling of machining the crankshaft pins for automotive combustion engines

Śliwka Mateusz⁽¹⁾, Cieślak Kacper⁽²⁾

⁽¹⁾ Katedra Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Budowy Maszyn

i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

⁽²⁾ Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, Wydział Budowy Maszyn

i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Śliwka Mateusz: msliwka@ath.bielsko.pl

Słowa kluczowe: czop korbowy, czop główny, frezowanie planetarne, modelowanie.

Streszczenie

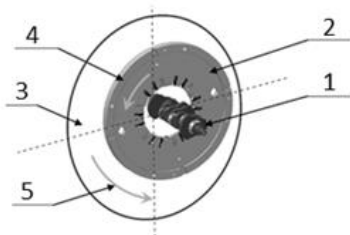
W niniejszej pracy przedstawiono sposoby modelowania kształtu czopów wałów korbowych. Wał korbowy musi charakteryzować się wysokimi właściwościami mechanicznymi zapewnionymi przez odpowiednią obróbkę oraz dobór materiału. Analizując wytwarzanie wałów korbowych, można stwierdzić, że procesy technologiczne ich obróbki są bardzo złożone, a o zastosowaniu danej metody obróbki decydują przede wszystkim: wielkość produkcji, wymagania odnośnie dokładności wykonania, możliwości produkcyjne danego przedsiębiorstwa. W przypadku produkcji jednostkowej i małoseryjnej wałów korbowych wykorzystuje się mało wydajne sposoby obróbki, jak np. toczenie. Z kolei w produkcji wielkoseryjnej i masowej stosuje się wysoko wydajne sposoby obróbki, jak frezowanie obrotowe wewnętrzne i zewnętrzne specjalnymi głowicami tarczowymi z ostrzami mocowanymi w kasetach oraz frezowanie obrotowe z użyciem zespołu frezów zewnętrznych (tj. zastosowanie koncentracji technologicznej). Przeprowadzenie symulacji obróbki czopa korbowego wału korbowego 4C90 metodą frezowania planetarnego głowicą frezową z płytkami skierowanymi do wewnątrz pozwoliło zauważyć pewne tendencje wpływające na wysokość teoretycznej nierówności powierzchni czopa korbowego.

1. Wstęp

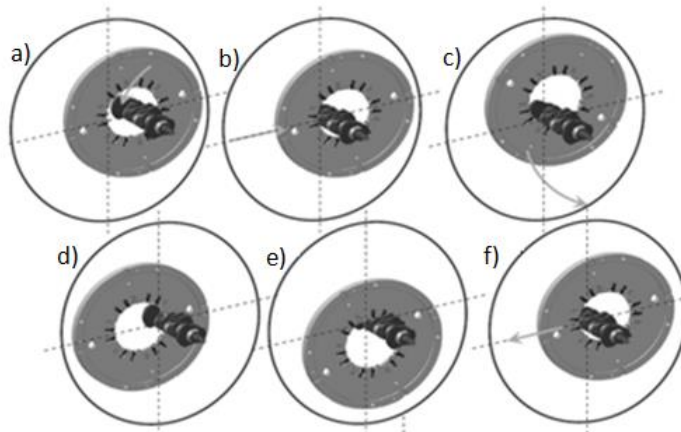
Wał korbowy jest elementem układu korbowego przejmującym poprzez tłok i korbowód oddziaływanie sił gazowych, powstałych w wyniku spalania paliwa w cylindrze i dokonującym zamiany tych sił na moment obrotowy, który to jest przekazywany dalej poprzez zespół napędowy (Wajand 2005). Zatem wał korbowy zamienia ruch posuwisto – zwrotny tłoków na swój ruch obrotowy. Dodatkowo wał korbowy napędza pomocnicze mechanizmy silnika, takie jak wentylator, pompa wody czy układ rozrządu (Zajac 2009). W niniejszym artykule przedstawiono proces modelowania wału korbowego silnika 4C90 obrabianego metodą frezowania planetarnego. Podczas frezowania planetarnego (Rys.1) wał korbowy jest nieruchomy. Ruch planetarny czyli ruch obrotowy głowicy i ruch obiegowy środka głowicy frezowej wokół osi obrabianego czopa korbowego wykonuje głowica frezowa. Czop zostaje obrobiony w ciągu obiegu głowicy o kąt 360° (Feld 1994; Turek 2003).

Podczas obróbki wał korbowy jest ustawiony tak, że czop główny i korbowy znajdują się w jednej płaszczyźnie. Głowica jest odsunięta od czopa korbowego (Rys.2a). Kolejno następuje załączenie obrotów głowicy i dosuw poprzeczny głowicy (Rys.2b) i zagłębienie w obrabiany materiał na zadaną głębokość, po czym blokują się sanie ruchu poprzecznego głowicy. Następnie włączony zostaje posuw obwodowy zabudowy mimośrodowej głowicy frezowej (Rys.2c). Posuw obwodowy (planetarny) realizowany jest przez obrót obudowy po torze kołowym wokół osi czopa korbowego. Czop zostaje obrobiony po jednym pełnym obrocie głowicy frezowej (obudowy mimośrodowej). Kolejne rysunki (Rys.2d-f) pokazują kolejne położenia głowicy frezowej po obrocie o kąt 90°, 180°, 270° i 360°, aż do pozycji początkowej.

Frezowanie planetarne zapewnia dobrą dokładność kształtu, wymiarów oraz mniejszą chropowatość powierzchni niż w przypadku toczenia. Możliwe jest to dzięki dużej sztywności układu narzędzie - przedmiot obrabiany (Płonka i in. 2013).



Rys. 1. Ogólny schemat frezowania planetarnego czopów wału korbowego: 1 – obrabiany wał korbowy, 2 – pierścieniowa głowica frezowa, 3 – mimośród, 4 – kierunek obrotu głowicy frezowej, 5 – kierunek posuwu głowicy frezowej (Zawadzki 2016).



Rys. 2. Różne położenia głowicy frezowej podczas frezowania planetarnego czopa korbowego (Zawadzki 2016).

W celu zrozumienia zagadnienia modelowania wymagana jest definicja pojęcia modelowania i symulacji.

Symulacja – to przeprowadzenie na przygotowanym uprzednio modelu geometrycznym zagadnienia lub zjawiska eksperymentu przy użyciu komputera. Przykładowo mogą to być: teoretyczna przepustowość dróg, prognozowanie kursów giełdowych, prognozy demograficzne. Symulacje przeprowadza się głównie ze względów ekonomicznych, gdyż pozwalają zaoszczędzić znaczne kwoty potrzebne do zbadania danego zagadnienia z wykorzystaniem rzeczywistego sprzętu i urządzeń technicznych (Krupa 2008).

Model – przeprowadzenie symulacji wymaga wykorzystania modelu, który definiuje się jako uproszczony i łatwiej dostępny badaniom schemat przedmiotu materialnego, zjawiska lub działania, ułatwiający jego implementację lub symulację komputerową (Krupa 2008). Model jest to opis myślowy (wewnętrzny) lub postaciowy (diagramy, wzory matematyczne itp.) na ogół zredukowany do najistotniejszych cech, o charakterze symbolicznym. Jest on dla danego zakresu problemowego reprezentacją pewnej klasy zjawisk mniej lub bardziej zwięźle wyodrębnionych z kontekstu przez obserwatora, w celu stworzenia podstawy do badań i (lub) komunikacji (Krupa 2008).

2. Materiały i Metody

Metody modelowania można podzielić na dwie zasadnicze grupy – modelowanie analityczne oraz modelowanie geometryczne. Modelowanie geometryczne przeprowadzane jest w oparciu

o model 3D obiektu, korzystając z operacji Boolowskich w programach CAD. Modelowanie analityczne stanowi swojego rodzaju uproszczenie modelowania geometrycznego, wykorzystujące zależności geometryczne występujące podczas obróbki i pozwalające w uproszczony sposób wnioskować o efektach przyjętych parametrów obróbki (Placuch 2009).

2.1 Modelowanie analityczne

Cykl obróbki składa się z trzech faz:

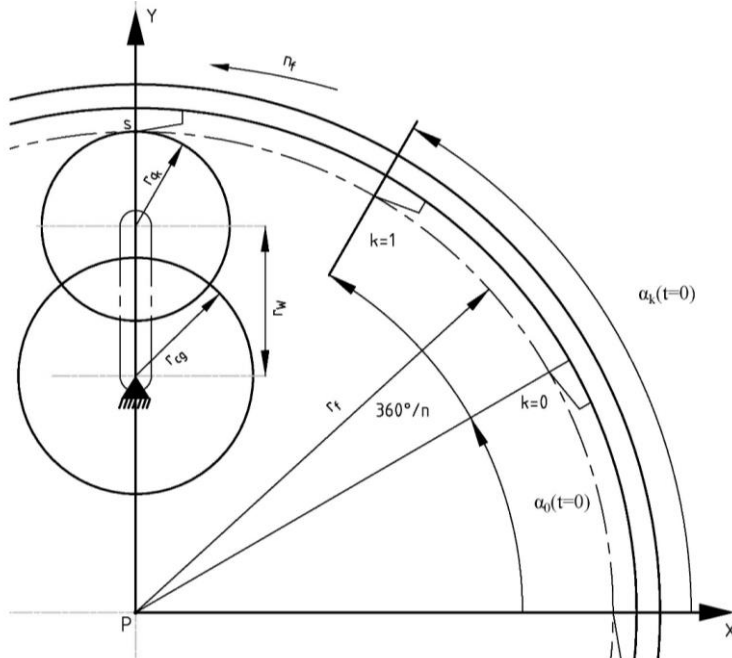
- I. dosunięcia środka mimośrodowo obudowy z osadzoną w niej głowicą frezową ruchem prostoliniowym, przy nieruchomym wale korbowym do pozycji początkowej (zagłębienie się płytek skrawających na żądaną głębokość),
- II. właściwego cyklu obróbki składającego się z jednego pełnego obrotu środka głowicy frezowej wokół wału,
- III. odsunięcia głowicy frezowej od czopa ruchem prostoliniowym i ustawieniu do obróbki kolejnego czopa.

Modelowanie ograniczono do fazy I i II. Na początku fazy II ($t=0$) położenie segmentów płytek zdefiniowano kątem $\alpha_o(t)=0^\circ$ segmentu o numerze $k=0$. Dla pozostałych płytek kąt wynosi:

$$\alpha = \alpha_o(t) + k \cdot \frac{360^\circ}{n}$$

$k=1, 2, \dots, n-1$

Modelowanie procesu obróbki ogranicza się do obliczania kolejnych położenia ostrzy skrawających w dowolnej chwili czasu t . Prędkość obrotowa głowicy wynosi n_f . Wał nie obraca się. Zmienną decyzyjną jest położenie kątowe głowicy frezowej, a ściślej rzecz biorąc położenie kątowe φ_r segmentu $k=0$. Położenie kątowe wału wynosi $\alpha_o(t)=0^\circ$.



Rys. 3. Schemat obróbki wewnętrzną głowicą frezową.

Przyjęto prostokątny układ współrzędnych XY przechodzący przez środek symetrii obrabianego czopa korbowego oraz oś czopów głównych. Punkt początkowy układu współrzędnych to punkt P środka głowicy frezowej dla czasu $t=0$ w przypadku drugiej fazy obróbki (Rys.3).

Położenie punktów ostrzy segmentów głowicy w układzie XY przyjętego układu współrzędnych zależne jest od położenia punktu P – środka głowicy (Rys.4).

$$P=[X_p; Y_p]^T$$

$$X_p = W = \sin \varphi_{(t)} \cdot (r_f - r)$$

$$Y_p = V = r_f - r_{ck} - [(r_f - r_{ck}) \cdot \cos \varphi_{(t)}]$$

gdzie:

r_f – promień okręgu głowicy frezowej, na którym rozmieszczone są krawędzie (ostrza) skrawające,

r_{ck} – promień czopa korbowego z uwzględnieniem nadatku na potrzebę obróbki wykończeniowej (szlifowanie),

r_{cg} – promień czopa głównego,

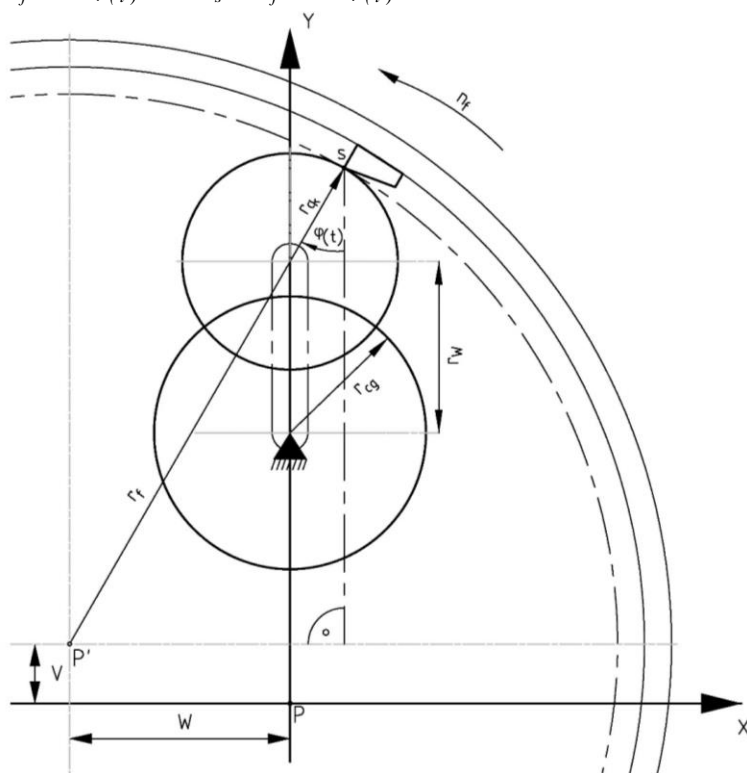
r_w – odległość czopa korbowego od osi czopa głównego (wykorbienie- mimośród),

w – zmiana położenia środka P w osi X,

v – zmiana położenia środka P w osi Y.

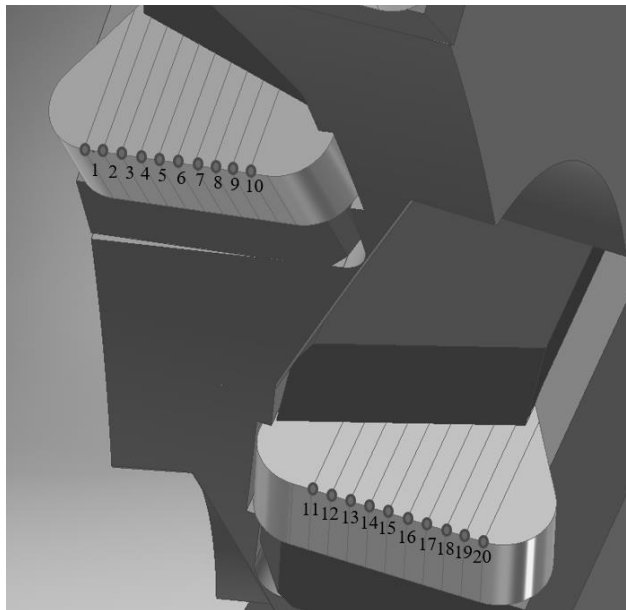
Współrzędne punktu styczności $S=[X_s; Y_s]^T$:

$$X_s = r_f \cdot \sin \varphi_{(t)} - w \quad Y_s = r_f \cdot \cos \varphi_{(t)} + v$$

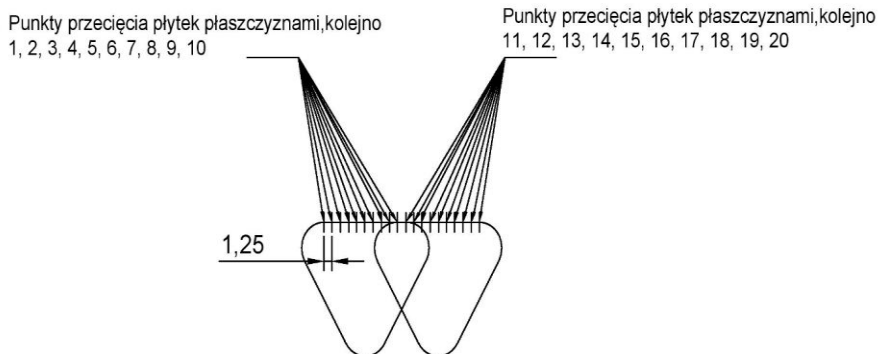


Rys. 4. Schemat do obliczeń położenia środka P głowicy frezowej.

Obliczenia współrzędnych punktów skrawających S na powierzchni walca, w wyniku ruchów narzędzia, przeprowadzono dla wybranych przekrojów wzdłużnych głowicy frezowej. Szerokość głowicy B została podzielona na m równoległych przekrojów. Pracę całej krawędzi skrawającej przedstawia się jako zbiór punktów T_{kj} ($k=0, 1, \dots, n-1$; $j=1, 2, \dots, p$) w miejscu przecięcia płaszczyzn z krawędzią skrawającą, gdzie k to liczba segmentów a p to liczba analizowanych punktów jednego segmentu głowicy frezowej. Poniżej przedstawiono płaszczyzny przekroju poprzecznego głowicy frezowej oddalone od siebie o 1,25 mm (Rys.5 i Rys.6). Model powierzchni walcowej wynika z położenia zbioru punktów na krawędziach skrawających względem czopa korbowego.



Rys. 5. Analizowane płaszczyzny przekroju poprzecznego głowicy frezowej widoczne na modelu 3D głowicy.



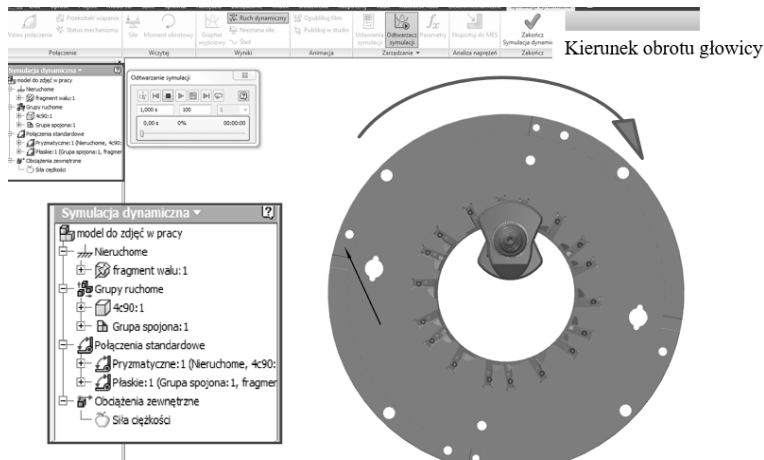
Rys. 6. Punkty na płytkach skrawających, które wykreślają tory ruchu punktów znajdujących się na krawędzi skrawającej płytki podczas obróbki frezowaniem planetarnym – widok przekroju.

2.2 Modelowanie geometryczne

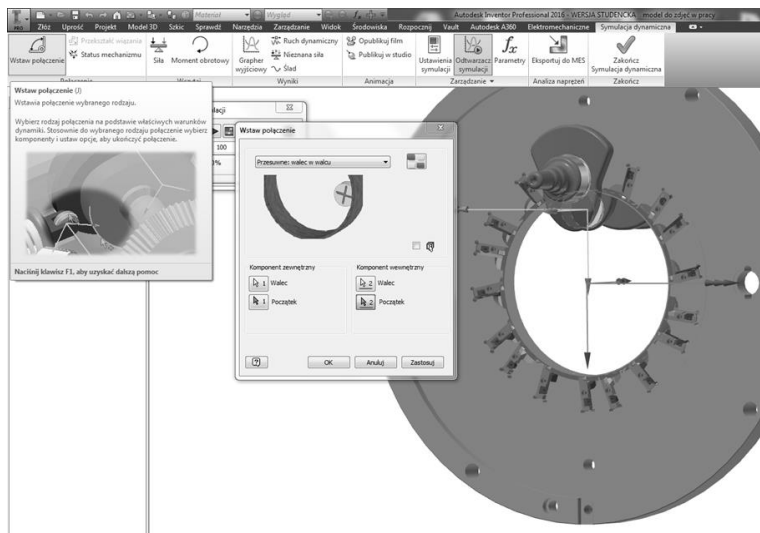
Modelowanie geometryczne przeprowadzono w oparciu o moduły 3D systemu CAD. Korzystają one z operacji Boolowskich wykonywanych na modelach obiektów będących przedmiotem analizy. W artykule zamieszczono przykład modelowania obróbki skrawaniem czopa korbowego wału 4C90 przy pomocy głowicy frezowej metodą frezowania planetarnego. Analiza wymaga odpowiednich więzów geometrycznych między modelem głowicy i wału korbowego, tak aby zachowane zostały warunki obróbki tj.:

- ruch obrotowy głowicy wokół własnej osi,
- ruch środka głowicy po okręgu wokół obrabianego czopa korbowego,
- odpowiedniego ustawienia wału korbowego, który podczas obróbki jest nieruchomy (Rys.7).

W celu odwzorowania kinematyki obróbki model został uzupełniony o dodatkowe bryły. Wprowadzenie brył pozwoliło zdefiniować niezbędne więzy między czopem korbowym i głowicą frezową (Rys.8). Bryły te są uproszczonymi geometrycznie odpowiednikami czopa korbowego („nibyczop”) i głowicy frezowej („nibyfrez”).



Rys. 7. Prawidłowe ustawienie wału korbowego i głowicy frezowej oraz kierunek jej obrotu.



Rys. 8. Dodatkowe połączenie przesuwne.

Wiązania dla „nibyczop”:

1. Kątowe – kąt zorientowany – 0° zestawienie osi YZ „nibyczopu „z osią YZ układu współrzędnych,
2. zastawiający – wiązanie zestawiające oś z nibyczopu z osią z układu współrzędnych.

Wiązanie „nibyczop - nibyfrez”:

1. Styczny wewnętrznie,
2. równoległy – ustawienie „nibyferezu” względem „nibyczopu”, po 1.3 mm na stronę.

Wiązanie „nibyczop” – wał korbowy:

1. Zestawiający – równoległość (pokrycie się) osi „nibyczopu ”i wału korbowego,
2. zestawiający – wiązanie zestawiające (odległość powierzchni czołowych wału oraz „nibyczopu”).

Wiązanie – wał korbowy:

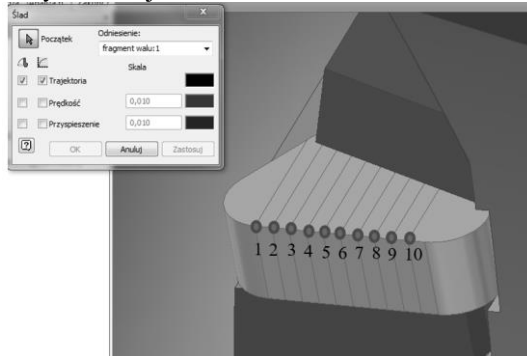
1. Kątowe – kąt zorientowany - 180° .

Wiązanie „nibyfrez” - głowica frezowa:

1. Zestawiający – równoległość (pokrycie się) osi,

Równoległy – równoległość powierzchni „nibyfrezu” z powierzchnią głowicy.

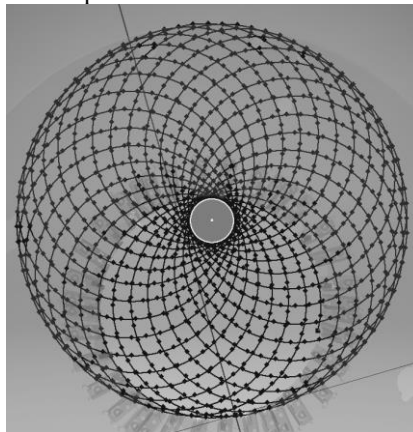
Podczas symulacji obróbki śledzone są punkty leżące na głównej krawędzi płytek skrawających (Rys.9) głowicy frezowej.



Rys. 9. Generowanie śladu obróbki powierzchni walcowej czopa za pomocą punktu 1 głównej krawędzi płytki skrawającej.

3. Wyniki i dyskusja

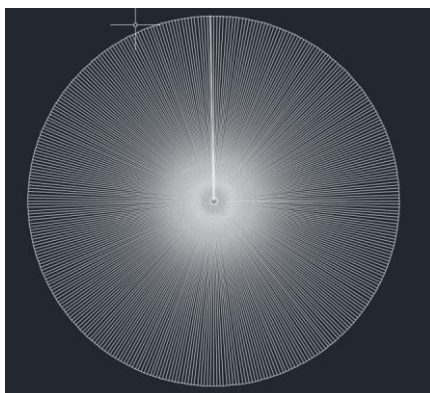
W drodze symulacji z ruchu każdego punktu otrzymuje się krzywą typu spline (Rys.10). Krzywe te reprezentują model kształtu czopa.



Rys. 10. Zbiór krzywych typu spline jako wynik przeprowadzonej symulacji.

Spline eksportowany jest w formacie natywnym do programu 2D AUTOCAD MECHANICAL (Rys.10), gdzie korzystając z funkcji tworzenia obwiedni generuje się dla analizowanych płaszczyzn przekrojów czopa korbowego.

Otrzymane przekroje ponownie są importowane do programu CAD 3D, gdzie łącząc otrzymane przekroje poprzez wyciągnięcie złożone otrzymujemy powierzchnię walcową dla danych parametrów symulacji. Kolejnym etapem jest otrzymanie danych do pomiaru okrągłości i walcowości czopa korbowego po symulacji. W tym celu na obwodzie czopa korbowego wygenerowano 360 punktów. Następnie każdy punkt został połączony odcinkiem z geometrycznym środkiem przekroju czopa (odległość kątowa 1 stopień) (Rys.11).



Rys. 11. Przekrój poprzeczny czopa z widocznymi odcinkami łączącymi punkty na obwodzie z punktem środkowym.

Wyniki symulacji w postaci odchyłki okrągłości i walcowości przedstawione zostały poniżej.

Odchyłki okrągłości:

- od 0,9 do 3,1 μm dla posuwu obwodowego wynoszącego 20 mm/s,
- od 4,1 do 24,9 μm dla posuwu obwodowego wynoszącego 35 mm/s,
- od 8,1 do 75,9 μm dla posuwu obwodowego wynoszącego 50 mm/s.

Odchyłki walcowości wyniosły:

- dla posuwu obwodowego równe 20 mm/s wynosi 227,2 μm ,
- dla posuwu obwodowego równe 35 mm/s wynosi 240,6 μm ,
- dla posuwu obwodowego równe 50 mm/s wynosi 292,9 μm .

Wysokość teoretycznej nierówności powierzchni zależy zatem od:

- obrotów głowicy frezowej,
- liczby płytek skrawających w jakie wyposażona jest pierścieniowa głowica frezowa,
- prędkości posuwu obwodowego głowicy frezowej wokół obrabianego czopa korbowego.

4. Wnioski

Przeprowadzenie symulacji obróbki czopa korbowego wału korbowego 4C90 metodą frezowania planetarnego głowicą frezową z płytkami skierowanymi do wewnątrz pozwoliło stwierdzić, że wysokość teoretycznej nierówności powierzchni zależy od prędkości posuwu obwodowego głowicy frezowej wokół obrabianego czopa korbowego (im większy posuw obwodowy głowicy tym nierówność większa).

Natomiast na podstawie modelowania analitycznego zauważono, że wysokość teoretycznej nierówności powierzchni zależy od:

- prędkości obrotowej głowicy frezowej,
- liczby ostrzy skrawających głowicy.

Otrzymane wyniki należy traktować jak wskazanie pewnych tendencji. Rzeczywiste nierówności otrzymane w wyniku obróbki skrawaniem będą wielokrotnie większe, gdyż na samą obróbkę ma wpływ wiele dodatkowych czynników jak choćby sztywność układu obrabiarka-uchwyty-przedmiot-narzędzie (o-u-p-n). Tych czynników proces modelowania nie uwzględnia.

5. Literatura

Feld M, Kaczmarski A, Szadkowski J (1994) Poradnik inżyniera. Obróbka skrawaniem. T.3, Półfabrykaty, automatyzacja procesów technologicznych, projektowanie procesów

- technologicznych poszczególnych elementów maszyn, automatyzacja projektowania, wybór ekonomicznego wariantu procesu technologicznego. WNT, Warszawa.
- Krupa K (2008) Modelowanie, symulacja i prognozowanie. WNT, Warszawa.
- Placuch K (2009) Modelowanie śladów obróbki czopa korbowego wału silnika 4C90 głowicą frezową na obrabiarce firmy Heller. Praca dyplomowa magisterska, ATH, Bielsko-Biała.
- Płonka S, Pytlak B, Placuch K (2013) Modelowanie zgrubnego frezowania obrotowego czopów wałów korbowych. *Mechanik* 86(12): 1021-1025.
- Płonka S, Pytlak B, Placuch K (2013) Geometrical Modeling Rough Rotary Milling of Crankshaft Pins. *Archives of Mechanical Technology and Automation* 33(3): 62 -68.
- Turek M (2003) Technologia obróbki wałów korbowych na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Praca dyplomowa magisterska, ATH, Bielsko-Biała.
- Wajand JA (2005) Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe. WNT, Warszawa.
- Zajac P (2009) Silniki pojazdów samochodowych. Podstawy budowy oraz główne zespoły i układy mechaniczne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Zawadzki S (2016) Modelowanie kształtu czopa korbowego wału silnika 4C90 frezowanego planetarnie na obrabiarce firmy Steyr. Praca dyplomowa inżynierska, ATH, Bielsko-Biała.