

Kamil MICHALSKI, Daniel DĘBSKI, Krzysztof GOŁOŚ, Jarosław MAŃKOWSKI

KONCEPCJA I WSTĘPNA ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KOMPOZYTOWEJ KONSTRUKCJI GEODETYCZNEJ Poddanej ŚCISKANIU

W artykule przedstawiono oryginalną propozycję wykorzystania gotowych elementów wykonanych z materiałów kompozytowych w projektowaniu konstrukcji geodetycznych. Dzięki przeprowadzonej analizie otrzymano podstawowe informacje na temat wytrzymałości w warunkach ściskania kompozytowej konstrukcji geodetycznej.

WSTĘP

Od wielu lat sztuczne kompozyty są podstawowymi materiałami konstrukcyjnymi, stosowanymi tak samo często jak stal bądź duraluminium [1–3]. Kompozyty mają szczególnie korzystną relację parametrów mechanicznych i wytrzymałościowych do masy. Technologie budowy elementów kompozytowych pozwalają na wytworzenie struktury nośnej o bardzo skomplikowanym kształcie, co bywa niemożliwe bądź trudne i drogie do osiągnięcia poprzez zastosowanie np. duraluminium. Materiały kompozytowe pozwalają konstruktorowi na projektowanie elementów struktur nośnych tak, aby w sposób optymalny przenosiły one obciążenia eksploatacyjne. Taki efekt uzyskuje się na drodze odpowiedniego układania zbrojenia [4–6].

Ciągły, dynamiczny rozwój materiałów stosowanych na zbrojenie i osnowę powoduje, że materiały kompozytowe znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko w przemyśle lotniczym i morskim, ale także w inżynierii lądowej. Coraz bardziej popularne stają się także materiały pochodzenia naturalnego. W następnych kilku latach masowo zaczną się używać włókien bazaltowych, które przechodzą odwrotną drogę niż zbrojenie z włókien szklanych i węglowych – od budownictwa do lotnictwa, przemysłu stoczniowego i samochodowego. Problemem pozostaje opracowanie żywic i utwardzaczy, które zapewniłyby pożądane parametry mechaniczne kompozytów, a jednocześnie byłyby nieszkodliwe dla środowiska naturalnego w trakcie produkcji, przetwórstwa i recyklingu.

W pracy przedstawiono propozycję wykorzystania i badań gotowych, prefabrykowanych materiałów kompozytowych w budowie konstrukcji nośnej w formie tzw. konstrukcji geodetycznej. Praca pokazuje analizę numeryczną konstrukcji geodetycznej obciążanej poosiowymi siłami ściskającymi. W trakcie prac porównywano konstrukcje geodetyczne wykonane z różnych, powszechnie stosowanych materiałów (stali, duraluminium) z konstrukcją wykonaną z materiałów kompozytowych. Dzięki przeprowadzonym analizom otrzymano podstawowe informacje na temat pracy kompozytowych konstrukcji geodetycznych w warunkach ściskania.

1. KONSTRUKCJE GEODETYCZNE

Konstrukcja geodetyczna to rodzaj ustroju nośnego, który pomimo tego, że został wynaleziony w latach czterdziestych XIX wieku, dopiero współcześnie znajduje coraz większe zastosowanie w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym oraz budownictwie lądowym.

Problemem do tej pory była poprawna analiza wytrzymałościowa konstrukcji geodetycznych o skomplikowanych kształtach.

W literaturze do dzisiaj nie podano jednoznacznej definicji konstrukcji geodetycznej. W słowniku wyrazów obcych można znaleźć natomiast definicję linii geodetycznej: jest to najkrótsza linia na powierzchni, łącząca dwa niezbyt odległe jej punkty.

Podczas skręcania powłoki cylindrycznej prostokątny element leżący na jej powierzchni pod wpływem naprężeń stycznych zostanie odkształcony tak, że jedna przekątna ulegnie wydłużeniu, a druga skróceniu. Taki element należy wzmocnić konstrukcyjnie na kierunkach przekątnych. Wówczas jeden pręt przekątnej będzie pracował na rozciąganie, a drugi na ściskanie. Dzieliąc daną powłokę cylindryczną na elementy prostokątne, których naroża (będące węzłami konstrukcji) połączy się prętami leżącymi na powierzchni powłoki i biegnącymi wzdłuż obu przekątnych elementu prostokątnego, powstanie szkielet siatkowy konstrukcji geodetycznej. Linia geodetyczna w takiej konstrukcji jest linią, która leży na danej powierzchni i łączy dwa jej punkty po najkrótszej drodze. Przenoszenie obciążeń pomiędzy węzłami konstrukcji odbywa się poprzez pręty biegnące wzdłuż linii geodetycznych na powierzchni konstrukcji.

1.1. Pręty kompozytowe jako elementy nośne konstrukcji geodetycznej z węzłami kompozytowymi

W trakcie prac konstrukcyjnych zespół projektujący bierze pod uwagę zapewnienie właściwej nośności i tym samym bezpieczeństwo eksploatacji konstrukcji oraz dostępne technologie i materiały – wszystko to wpływa na cenę wyrobu. Poziomą jakość konstrukcji nośnych zależy od doświadczenia zespołu projektującego i odpowiedniego doboru oraz wykorzystania właściwości zastosowanych materiałów konstrukcyjnych. W większości przypadków konstrukcje nośne pracują w warunkach złożonego stanu obciążenia.

Obecnie stosowanych jest wiele rozwiązań węzłów w konstrukcjach geodetycznych. Większość oparta jest na podobnej metodzie, która polega na zastosowaniu centralnego elementu, w którym będą się schodziły poszczególne pręty konstrukcji geodetycznej. Technologie łączenia elementów prętowych bazują na spawaniu, nitowaniu, skręcaniu bądź klejeniu. W przypadku technologii spawanej mamy do czynienia z mikropęknięciami po procesie spawania i kłopotami przy łączeniu wielu prętów bądź rur leżących w różnych płaszczyznach. Technologia nitowania lub skręcania jest stosunkowo prosta, ale tylko w zastosowaniu do ram płaskich. Dodatkowo pojawia się poważny problem – w prętach konstrukcji geodetycznej konieczne jest wykonanie otworów pod śruby lub nity. Z wykonaniem otworów wiąże się z kolei niepożądany efekt – zjawisko koncentracji naprężeń.

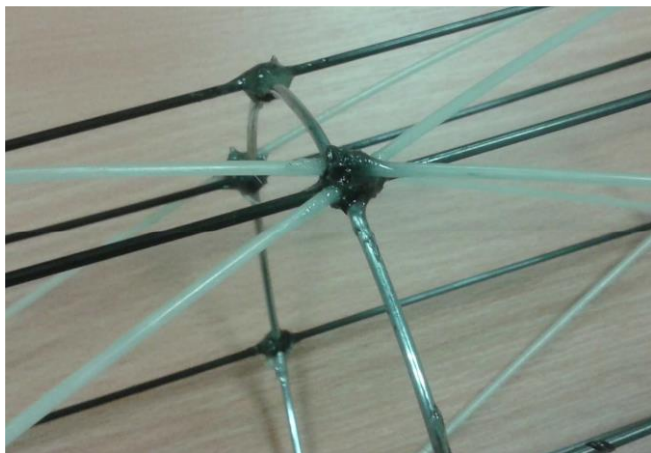
Technologia węzłów kompozytowych [8, 9] rozwiązuje problem łączenia prętów konstrukcji w węzłach konstrukcji geodetycznych. Najważniejsze zalety zastosowania technologii węzłów kompozytowych to [6–9]:

- możliwość uzyskania najlepszego stosunku wytrzymałości połączenia do jego masy,
- możliwość łączenia elementów konstrukcyjnych wykonanych z różnych materiałów,
- fakt, że proces niszczenia węzła kompozytowego nie ma charakteru procesu gwałtownego i jest sygnalizowany dużymi odkształceniami połączenia,
- możliwość łączenia prętów/rur leżących w wielu płaszczyznach,
- wysoka wytrzymałość statyczna i zmęczeniowa połączenia.

Prekursorem zastosowania koncepcji węzłów kompozytowych jest Krzysztof Kotliński, absolwent wydziału SiMR PW, który czas rozwija tę ideę łączenia elementów konstrukcyjnych.

W pracy przedstawiono nową propozycję konstrukcji geodetycznej, będącą rozszerzeniem idei omówionej w pracy [7], do zbudowania której wykorzystano gotowe pręty kompozytowe połączone węzłami kompozytowymi. Zastosowanie gotowych elementów kompozytowych w postaci prętów pozwala na zmniejszenie masy konstrukcji nośnej oraz znaczące uproszczenie jej budowy. Gotowe elementy kompozytowe mają powtarzalne właściwości mechaniczne.

Na rys. 1 przedstawiono przykład proponowanego węzła kompozytowego łączącego pręty kompozytowe z duralową wręgą. Dzięki takiemu rozwiązaniu otrzymano wytrzymałe i sztywne połączenie bez konieczności zakupu lub produkcji specjalnych, dodatkowych elementów łączących.



Rys. 1. Węzeł kompozytowej konstrukcji geodetycznej; widoczne pręty ze zbrojeniem węglowym i szklanym

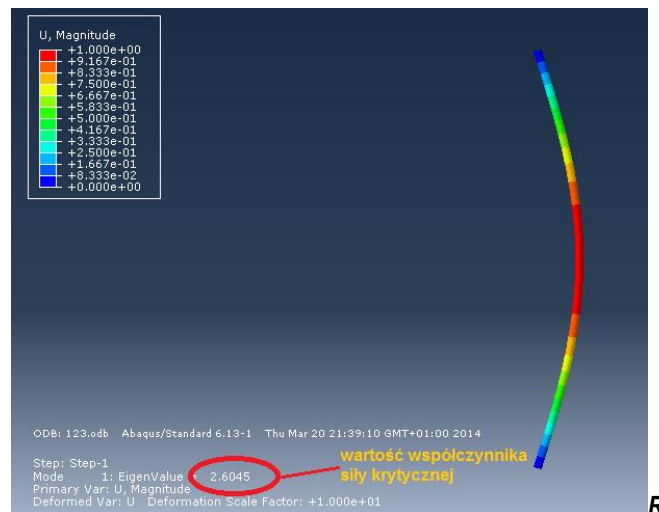
1.2. Analiza numeryczna konstrukcji geodetycznej

Analizę przeprowadzono z zastosowaniem programu Abaqus. Wyniki prób numerycznych porównano z wynikami analitycznymi w celu weryfikacji poprawności modelu dyskretnego, w tym oceny bezbłędności zdefiniowania warunków brzegowych oraz siatki elementów skończonych.

Pierwszą z analiz, jaką przeprowadzono w programie Abaqus, była próba wytrzymałościowa wyoboczenia pręta ściskanego. Do analizy przyjęto pręt kompozytowy o długości 100 mm i średnicy $\varnothing 4$ mm. Długość analizowanego pręta odpowiada odległości pomiędzy dwiema wręgami konstrukcji geodetycznej, których zadaniem było łączenie elementów prętowych, a jego średnica odpowiadała średnicy prętów wykorzystanych do prototypowej, kompozytowej kon-

strukcji geodetycznej. Jeden koniec badanego pręta miał zablokowane obie składowe przemieszczenia (podpora przegubowa nieprzesuwana), a drugi mógł się poruszać jedynie w kierunku równoległym do osi pręta (podpora przegubowo przesuwana).

Siła krytyczna podczas wyoboczenia pręta w wyniku działania siły ściskającej, uzyskana metodą numeryczną, wyniosła po przeliczeniu 2604,5 N (przyłożona siła wyniosła 1000 N).

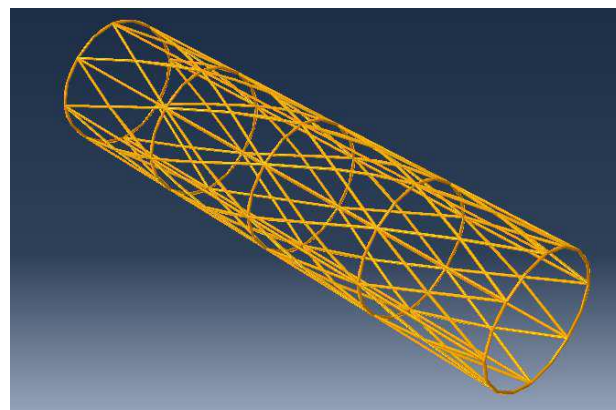


ys. 2. Analiza wyoboczenia

W celu weryfikacji otrzymanych wyników i oceny poprawności przeprowadzonej analizy numerycznej dokonano jej walidacji. Polegała ona na wyznaczeniu siły krytycznej metodą analityczną [9, 10] i porównaniu wyników otrzymanych dwiema metodami. Wartości siły krytycznej uzyskanej metodą numeryczną (2604,5 N) i metodą analityczną (2605 N) były zbliżone.

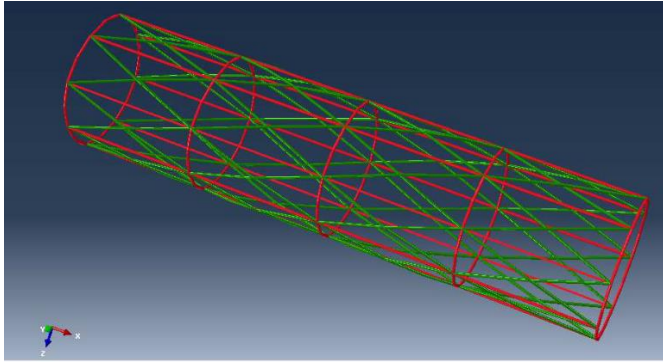
1.3. Przygotowanie konstrukcji do analizy numerycznej

Szkielet konstrukcji geodetycznej analizowanej w programie Abaqus przedstawiono na rys. 3. Składał się on z pięciu wręg oddalonych od siebie o 100 mm, ośmiu węglowych prętów głównych, biegnących równolegle do osi konstrukcji, oraz siatki prętów ze zbrojeniem szklanym, oplatających konstrukcję. Kąt pomiędzy prętami głównymi i oplatającymi był jednakowy w rejonie węzłów dla wszystkich prętów. Długość całkowita konstrukcji wynosiła 400 mm, a średnica rury geodetycznej – $\varnothing 100$ mm. Początek każdego pręta był przymocowany do jednego z węzłów skrajnej wręgi. Następnym punktem mocowania pręta ze zbrojeniem szklanym był najbliższy punkt styku kolejnego pręta głównego z następną wręgą (po przekątnej pola prostokątnego). Pręty oplatające tworzące siatkę rozchodziły się z ośmiu węzłów pierwszej wręgi w dwóch kierunkach.

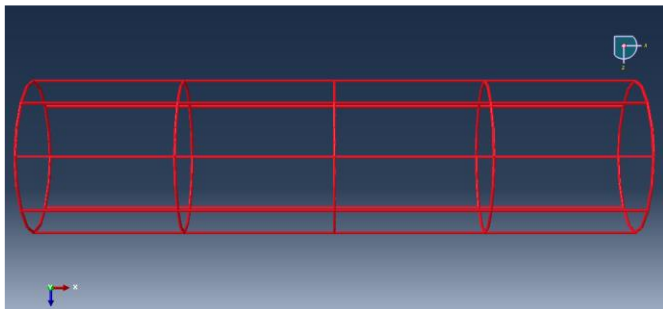


Rys. 3. Szkielet konstrukcji geodetycznej stworzony w programie Abaqus

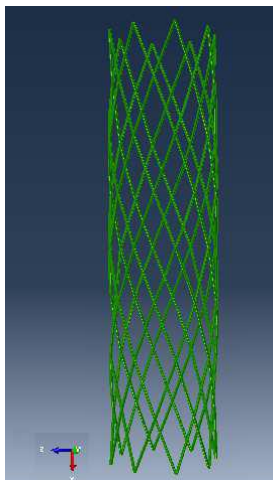
Na rys. 4 przedstawiono geometrię badanej konstrukcji geodezyjnej. Widać na nim, które z elementów odgrywały rolę prętów zbrojonych włóknami szklanymi, a które prętów zbrojonych włóknami węglowymi. Kompozytowe pręty oplatające wzmocnione włóknem szklanym zaznaczono kolorem zielonym, a pręty główne wzmocnione włóknem węglowym – kolorem czerwonym. Na rys. 5 i 6 pokazano osobno każdą z grup prętów kompozytowej konstrukcji geodezyjnej.



Rys. 4. Geometria konstrukcji geodezyjnej z prętami ze zbrojeniem węglowym i szklanym



Rys. 5. Pręty wzmocnione włóknami węglowymi

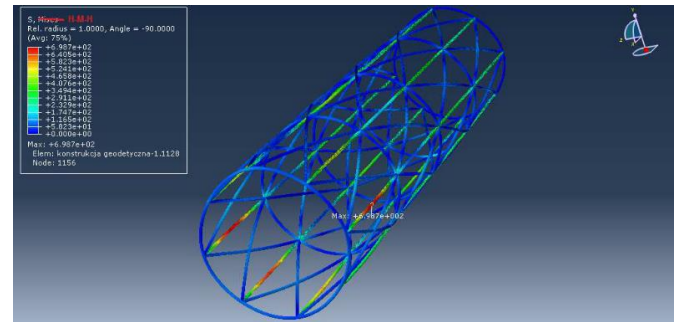


Rys. 6. Grupa prętów wzmocnionych włóknami szklanymi

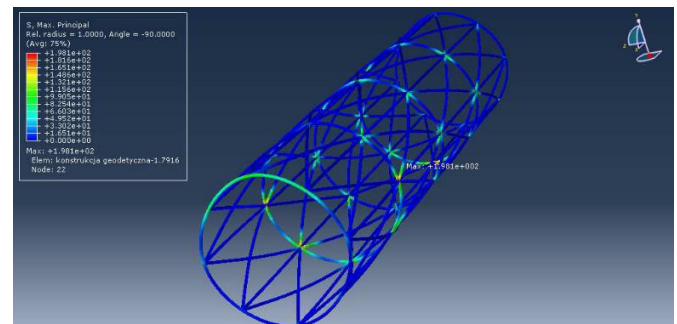
W trakcie próby ściskania utwierdzony był jeden koniec konstrukcji geodezyjnej.

Analizie numerycznej dotyczącej próby ściskania poddano opracowaną, kompozytową konstrukcję geodezyjną oraz konstrukcję o tej samej geometrii, ale wykonaną ze stali oraz z duraluminium.

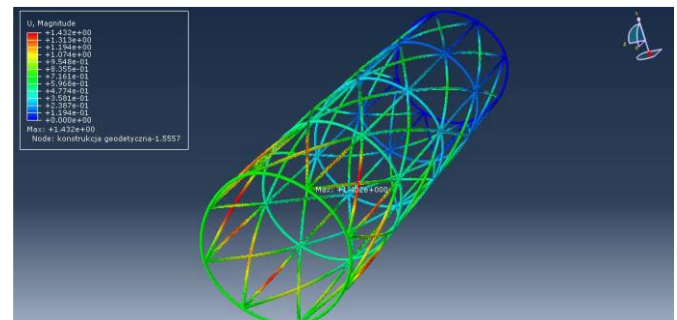
1.4. Uzyskane wyniki



Rys. 7. Naprężenia zredukowane (wg hipotezy HMM) podczas ściskania – konstrukcja geodezyjna wykonana z prętów kompozytowych



Rys. 8. Naprężenia główne podczas ściskania – konstrukcja geodezyjna wykonana z prętów kompozytowych



Rys. 9. Przemieszczenia wypadkowe podczas ściskania – konstrukcja geodezyjna wykonana z prętów kompozytowych

Na rys. 7 i 8 przedstawiono przykładowe rozkłady naprężeń w analizowanej konstrukcji geodezyjnej. Na rys. 9 przedstawiono rozkłady przemieszczeń w analizowanej konstrukcji.

Wstępna analiza uzyskanych wyników wypadła pozytywnie. Suma reakcji w węzłach była bardzo zbliżona do wartości oczekiwanych w odniesieniu do siły obciążającej. Wartość reakcji podłoża była identyczna jak siła obciążająca całą konstrukcją.

Obliczenia wytrzymałościowe umożliwiły również wstępne oszacowanie masy konstrukcji w zależności od zastosowanych materiałów. Oszacowanie wykonano poprzez porównanie masy konstrukcji kompozytowej i aluminiowej lub stalowej, o tych samej geometrii zewnętrznej i jednakowych maksymalnych naprężeń zredukowanych w warunkach ściskania. Według tej procedury porównawczej masa konstrukcji geodezyjnej wykonanej z kompozytowych prętów węglowych i szklanych była niższa o ponad 30% od masy konstrukcji wykonanej z prętów duraluminiowych i ponad czterokrotnie niższa od masy konstrukcji geodezyjnej wykonanej z prętów stalowych. Oczywiście porównując masowo konstrukcje nośne wykonane z różnych materiałów należy wziąć pod uwagę zastosowane węzły konstrukcyjne, które w przypadku konstrukcji

stalowych i wykonanych ze stopu aluminium mogą znacząco podnieść ich masę (węzły nitowane, połączenia sworzniowe, śrubowe). Zastosowanie elementów nośnych w postaci rur kompozytowych – przy konstrukcjach o większych gabarytach – byłoby według autorów jeszcze bardziej korzystnym rozwiązaniem. Pozwoli ono znacząco zwiększyć wartość moment bezwładności przekroju poprzecznego elementu konstrukcyjnego. Kratownica z wykorzystaniem rur kompozytowych w formie konstrukcji geodetycznej mogłaby być rozwinięciem tego kierunku prac i analiz dotyczących lekkich konstrukcji nośnych.

W przyszłości planowane jest wykonanie gotowych fragmentów analizowanych konstrukcji geodetycznych – kompozytowych i aluminiowych lub stalowych - w celu przeprowadzenia walidacji uzyskanych wyników numerycznych.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono oryginalną propozycję wykorzystania materiałów kompozytowych w budowie konstrukcji geodetycznych. Dzięki przeprowadzonej analizie otrzymano podstawowe informacje na temat wyężenia w warunkach ściskania kompozytowej konstrukcji geodetycznej. Analiza wytrzymałościowa wykazała dobrą zgodność wyników teoretycznych i numerycznych otrzymanych dla zaproponowanych nowych rozwiązań konstrukcji geodetycznych. Zastosowane gotowe pręty kompozytowe łączone węzłami kompozytowymi pozwalają na zbudowanie bardzo lekkiej i wytrzymałej konstrukcji nośnej.

Badana struktura geodetyczna jest próbą oceny przydatności gotowych elementów nośnych w postaci prętów kompozytowych na potrzeby koncepcji konstrukcji geodetycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Tucker N., Lindsey K.: „An Introduction to Automotive Composites”, Smithers Rapra Press, 2002
2. Allison J., Cole G.S.: „Metal Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges”, Springer – Verlag, 1993

3. Sobczak J., Wojciechowski S.: „Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2002
4. Miracle D.B., Donaldson S.L.: „ASM Handbook Volume 21: Composites”, ASM International, 2001
5. Wilczyński A.P.: „Polimerowe kompozyty włókniste”, Warszawa, WNT, 1996
6. PN-ISO 1268-2 „Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem – Metody wytwarzania płytek do badań – Część 2: Formowanie ręczne i natryskowe”.
7. Dębski M., Gołoś K., Dębski D.: „Węzły kompozytowe ustrojów nośnych – badania wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej”, Prace Instytutu Lotnictwa, 158/1999
8. Dębski M., Dębski D.: „Wybrane zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji lotniczych”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, 36/2014
9. Timoszenko S. P., Gere J. M.: Teoria stateczności sprężystej, Arkady, 1963.
10. Brzoska Z.: Statyka i stateczność konstrukcji prętowych i cienkościennych, PWN, 1961

Concept and preliminary strength analysis of composite geodetic structure under compression

Paper discussed the strength properties of a new composite geodetic structure under compression. In this analysis basic information about the effort of the conditions of compression of the composite geodetic structure were obtained.

Autorzy:

mgr inż. **Kamil Michalski** – Politechnika Warszawska
dr inż. **Daniel Dębski** – Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. **Krzysztof Gołoś** – Politechnika Warszawska i Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego
dr inż. **Jarosław Mańkowski** – Politechnika Warszawska