

Hubert Dębski
Grzegorz Koszałka
Mirosław Ferdynus

WYKORZYSTANIE MES W ANALIZIE STRUKTURY NOŚNEJ RAMY NACZEPY O ZMIENNYCH PARAMETRACH EKSPLOATACYJNYCH

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych, rama nośna, obliczenia wytrzymałościowe, naczepa, transport nienormatywny

Streszczenie

W pracy zaprezentowano numeryczną analizę konstrukcji ramy naczepy o zmiennej długości i podwyższonej nośności przeznaczonej do transportu ładunków ponadnormatywnych. Prowadzone badania miały na celu opracowanie adekwatnych modeli numerycznych MES umożliwiających identyfikację wyężenia konstrukcji oraz stanu odkształcenia w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Zastosowanym do analizy narzędziem numerycznym był program Abaqus/Standard, umożliwiający prowadzenie obliczeń w zakresie geometrycznie nieliniowym z wykorzystaniem przyrostowo-iteracyjnej metody Newtona-Raphsona. W wyniku przeprowadzonych prac ustalono newralgiczne obszary ramy w których występowały niebezpieczne naprężenia. Umożliwiło to modyfikację konstrukcji pozwalającą na zmniejszenie naprężeń do bezpiecznego poziomu.

1. Wprowadzenie

Projektowanie nowoczesnych konstrukcji jest zadaniem złożonym, wymagającym uwzględnienia wielu cech materiałowych i mechanicznych przy optymalizacji geometrii projektowanej struktury. Dotyczy to zwłaszcza elementów konstrukcyjnych o znaczeniu krytycznym, których nośność determinuje wytrzymałość całego ustroju nośnego. Proces projektowania takich elementów wymaga wykorzystania nowoczesnych narzędzi, umożliwiających poszukiwanie najlepszych rozwiązań konstrukcyjnych [10-12]. Współczesnym narzędziem dającym szerokie możliwości analizy parametrów wytrzymałościowych projektowanych konstrukcji jest oprogramowanie numeryczne z grupy CAE wykorzystujące metodę elementów skończonych [3, 4, 6, 7, 8]. Oprogramowanie takie znajduje obecnie szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, a w szczególności w przemyśle kosmonautycznym, lotniczym i motoryzacyjnym.

Grupę konstrukcji nośnych wobec których stawiane są wysokie wymagania wytrzymałościowe i sztywnościowe stanowią ramy współczesnych środków transportu. W szczególności do rozwiązań konstrukcyjnych poddanych działaniu wysokich obciążeń eksploatacyjnych można zaliczyć ramy naczep przeznaczonych do transportu ładunków o ponadnormatywnych masach i wymiarach. Projektowanie tego typu konstrukcji wymaga uwzględnienia różnych konfiguracji eksploatacyjnych naczepy, umożliwiających w razie potrzeby zwiększenie długości i szerokości platformy przewozowej [5, 9, 10]. Zmiana konfiguracji konstrukcji podczas jej eksploatacji wpływa w znaczący sposób na zmianę

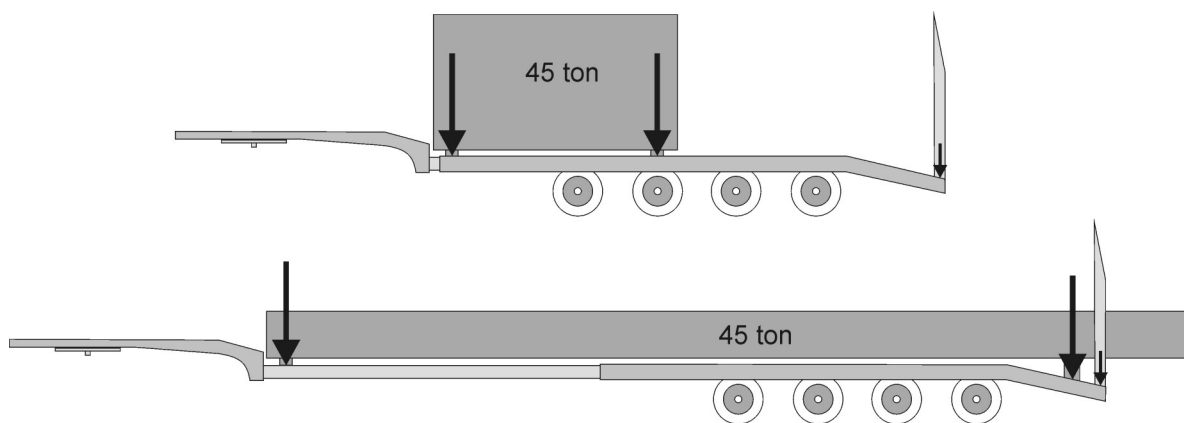
charakteru jej obciążenia, co wymaga dodatkowego uwzględnienia w procesie projektowo-konstrukcyjnym struktury.

W pracy zaprezentowano koncepcję ramy centralnej z możliwością szerokiego zakresu zmiany jej długości w zależności od potrzeb eksploatacyjnych. Przyjęto rozwiązanie bazujące na dwóch współpracujących belkach o strukturze cienkościennej konstrukcji skrzyniowej, z regulacją długości ramy realizowaną poprzez wzajemne wysuwanie i wsuwanie elementów nośnych względem siebie. W obliczeniach uwzględniono szczegóły konstrukcyjne, takie jak otwory technologiczne, mogące mieć istotny wpływ na ocenę stanu wyężenia konstrukcji ramy. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Abaqus/Standard, stanowiącego nowoczesne narzędzie numeryczne wykorzystujące metodę elementów skończonych w zakresie geometrycznie i fizycznie nieliniowym [1, 2, 6, 9].

2. Cel i zakres badań

Celem prowadzonych badań była ocena wytrzymałości i sztywności opracowywanego rozwiązania konstrukcyjnego ramy nośnej naczepy, przeznaczonej do transportu ładunków długich o ciężarze do 45 ton. W przyjętej koncepcji ramy, składającej się z dwóch niezależnych części: przedniej i tylnej, możliwa była łatwa zmiana jej długości dzięki możliwości wysuwania części przedniej z części tylnej ramy. Umożliwiało to dopasowanie długości naczepy do przewożonego ładunku. Opracowane nowe rozwiązanie konstrukcyjne wymagało dokładnej analizy stanu odkształcenia i wyężenia, którą przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych.

Przed przystąpieniem do obliczeń MES, analitycznie wyznaczono momenty zginające działające na ramę naczepy dla różnych kombinacji jej długości oraz rozmieszczenia przewożonego ładunku. W rozważaniach tych uwzględniano tylko takie przypadki, które uznano za prawdopodobne i dopuszczalne (np. obciążenie maksymalnie wydłużonej ramy punktową siłą, o wartości odpowiadającej maksymalnej dopuszczalnej masie ładunku, przyłożoną w środku jej długości uznano za przypadek mało prawdopodobny i wymieniony w instrukcji do naczepy jako niedopuszczalny). Na podstawie powyższych rozważań wybrano przypadki do analiz numerycznych MES (rys. 1).

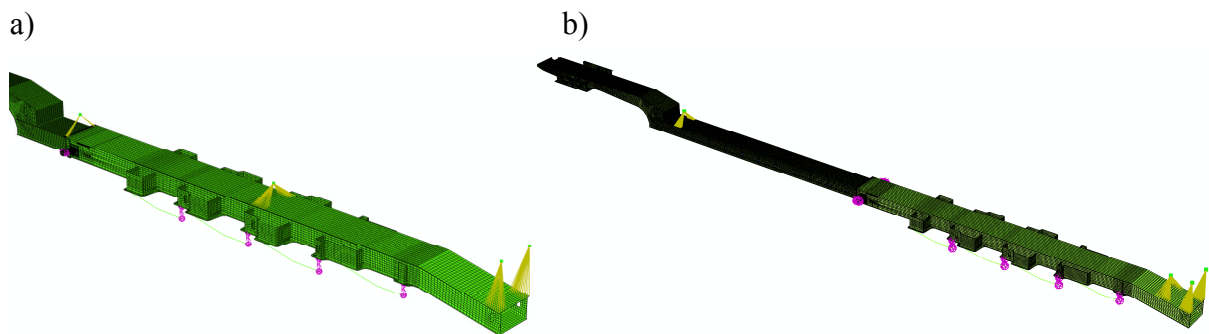


Rys. 1. Schematy obciążenia ramy zsuniętej (a) i rozsuniętej (b) ładunkiem

Ze względu na analizę konstrukcji w zakresie obciążeń eksploatacyjnych, nie dopuszczając tym samym możliwości wystąpienia odkształceń trwałych w elementach konstrukcji, zdecydowano się na przyjęcie modelu materiału liniowo-sprężystego. Uwzględniając zastosowane w modelu numerycznym interakcje kontaktowe oraz możliwość wystąpienia dużych odkształceń zdecydowano się na przeprowadzenie obliczeń w zakresie geometrycznie nieliniowym z wykorzystaniem przyrostowo-iteracyjnej metody Newtona-Raphsona [2, 6, 9].

3. Budowa modelu numerycznego MES

Zdecydowano się na rozważenie dwóch konfiguracji pracy ramy: ramy zsuniętej oraz ramy maksymalnie rozsunętej. W obydwu wariantach zastosowano te same parametry konstrukcyjne oraz materiałowe. Konstrukcję ramy zaprojektowano w taki sposób, aby część tylna będąca podstawowym elementem konstrukcji, dla której warunki brzegowe stanowi układ zawieszenia pojazdu, zapewniała jednocześnie warunki podparcia dla części przedniej, będącej ruchomym elementem ramy. Możliwość zmiany długości ramy następuje w wyniku wsuwania i wysuwania części przedniej z konstrukcji części tylnej ramy. Widok ogólny modelu numerycznego ramy przedstawia rys. 2.



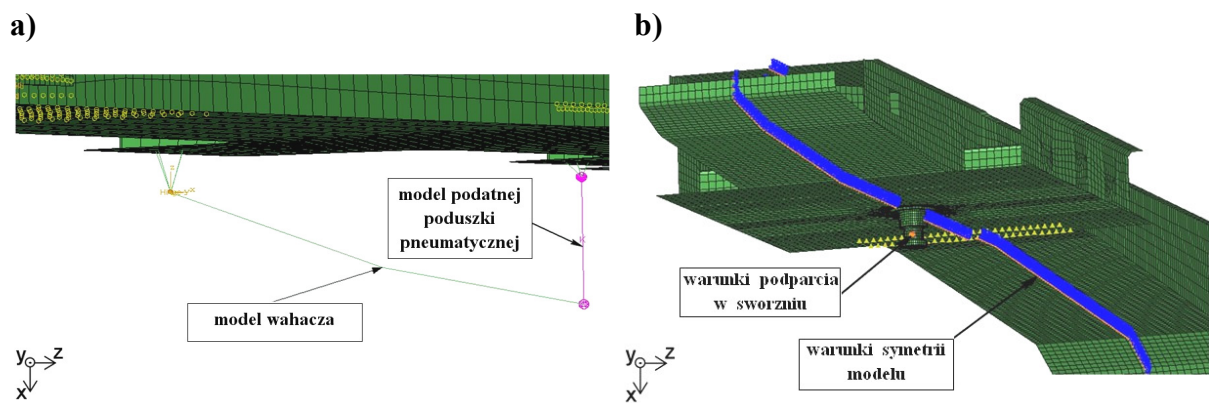
Rys. 2. Modele dyskretnie ramy z zaznaczonym sposobem modelowania obciążenia zewnętrznego: a) konfiguracja zsunięta, b) konfiguracja rozsunięta

Obciążenie modelu numerycznego stanowił ciężar własny konstrukcji jak również obciążenie masami skupionymi pochodzącymi od ciężaru ładunku wynoszącego 45 ton, uwzględniając dodatkowo 20% nadwyżek dynamicznych. Schemat rozłożenia ładunku zewnętrznego w postaci mas skupionych dla obydwu rozważanych konfiguracji ramy przedstawiają rys. 1 i 2.

Budowę przestrzennego modelu dyskretnego konstrukcji oparto na elementach typu powłokowego, posiadających po 6 stopni swobody w węźle elementu [1]. W obszarze połączenia przedniej i tylnej części ramy przyjęto rozwiązanie polegające na zastosowaniu podatnych poduszek, powodujących zwiększenie powierzchni współpracy, a tym samym wyeliminowanie niekorzystnych lokalnych nacisków krawędziowych w strefie połączenia. Wzajemne interakcje pomiędzy przednią i tylną częścią ramy odwzorowano poprzez zdefiniowanie oddziaływań kontaktowych pomiędzy współpracującymi elementami.

4. Warunki brzegowe modelu dyskretnego

Zasadniczym zagadnieniem w opracowaniu modelu dyskretnego konstrukcji ramy było odwzorowanie warunków pracy zawieszenia pneumatycznego, zapewniającego w trakcie eksploatacji jednakowe reakcje dla każdej osi kół naczepy. Zdecydowano się na odwzorowanie wahacza za pomocą elementów belkowych o określonej sztywności, dla których zdefiniowano zróżnicowane warunki podparcia w węźle przednim i tylnym modelu wahacza. Połączenie wahacza z ramą w węźle przednim zapewnia sztywne przenoszenie obciążenia z zawieszenia na konstrukcję ramy, dopuszczając jedynie jego obrót względem osi kół. Węzeł tylny wahacza połączony jest z ramą za pośrednictwem elementu sprężystego odwzorowującego poduszkę zawieszenia pneumatycznego. Sztywność elementu modelującego poduszkę została dobrana w sposób zapewniający zbliżone reakcje w osiach wszystkich kół naczepy. Podparcie pojedynczego koła zrealizowane zostało poprzez odebranie środkowemu węzłowi wahacza (w węźle połączenia elementów belkowych) możliwości przemieszczania w kierunku osi X – rys. 3a.



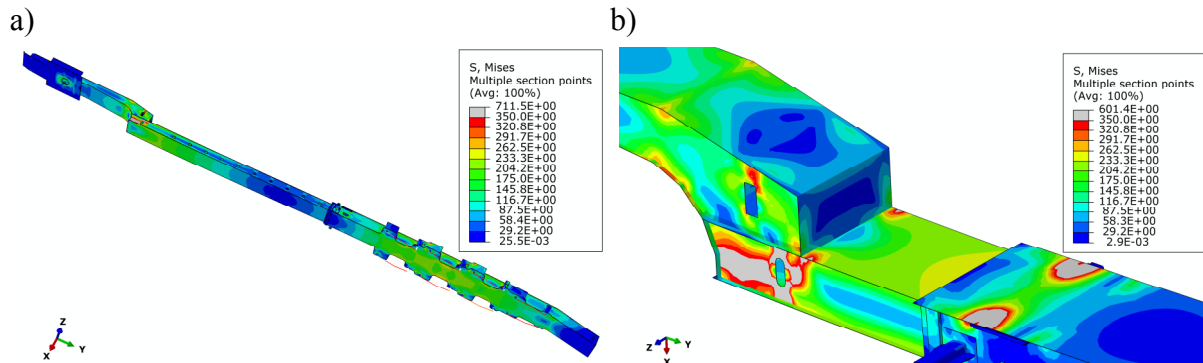
Rys. 3. Warunki brzegowe modelu MES: a) model zawieszenia koła, b) podparcie sworznia ramy oraz warunki symetrii osiowej modelu

Dla przedniej część ramy zdefiniowano podparcie sworznia poprzez odebranie możliwości przemieszczeń węzłów sworznia w kierunkach osi Y i Z – rys. 3b. Ponadto w kierunku osi X (ruchy sworznia w pionie) wprowadzono podparcie węzłów w postaci reakcji sprężystej o odpowiednio określonej sztywności. Dodatkowo dla całego modelu zdefiniowano warunki symetrii osiowej (wzdłuż osi ramy – oś Y), poprzez odebranie węzłom znajdującym się w osi symetrii modelu możliwości przemieszczania w kierunku osi Z oraz obrotu względem osi X i Y. Wyeliminowanie tych stopni swobody zapewniło stabilną pracę modelu, bez powstawania niepożądanych przemieszczeń konstrukcji w kierunku poprzecznym do jej osi (na boki) – rys. 3b.

5. Wyniki analizy numerycznej

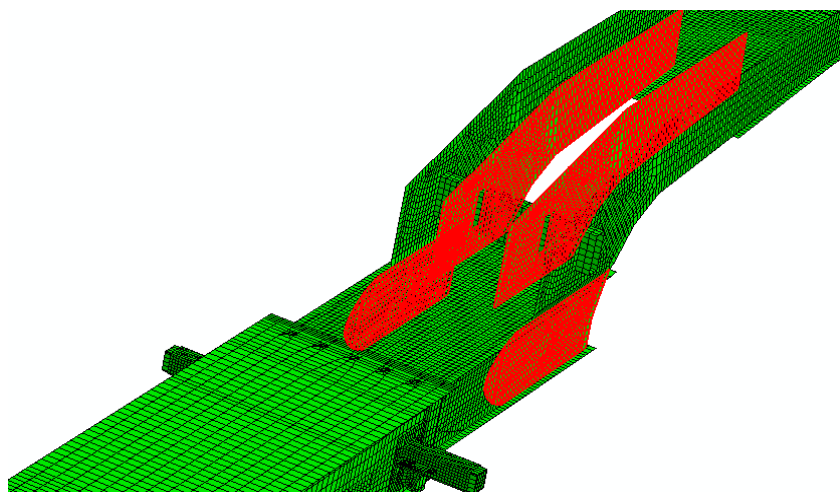
Przeprowadzone obliczenia numeryczne umożliwiły ocenę i porównanie stanu odkształcenia i wyężenia konstrukcji ramy dla obydwu rozważanych wariantów eksploatacyjnych – ramy zsuniętej oraz maksymalnie rozsuniętej. Otrzymane mapy rozkładów naprężenia zredukowanego H-M-H w elementach konstrukcji wskazywały

obszary, w których naprężenia zredukowane znacznie przekraczały przyjętą granicę plastyczności materiału $R_e = 360$ MPa. Najbardziej niekorzystne gradienty naprężenia występowały w części wysuwanej ramy oraz w strefie połączenia obydwu elementów nośnych, zarówno w przypadku konfiguracji zsuniętej, jak i rozsuniętej ramy – rys. 4.

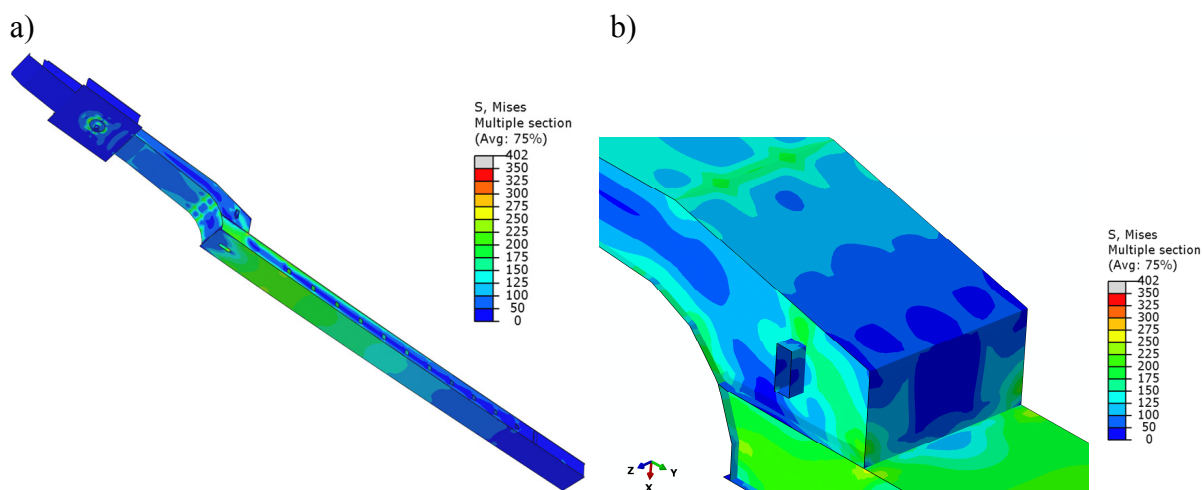


Rys. 4. Rozkład naprężenia H-M-H w modelu ramy: a) rama rozsunięta – widok ogólny, b) rama zsunięta – zbliżenie strefy połączenia

Występowanie w pewnych obszarach bardzo wysokich poziomów naprężenia zredukowanego wymagało podjęcia działań zmierzających do ich eliminacji, a tym samym poszukiwania lepszego rozwiązania konstrukcyjnego. W związku z tym wprowadzono modyfikacje szczegółów konstrukcyjnych bieżącego rozwiązania. Dotyczyło to przede wszystkim zmiany usytuowania otworów technologicznych wykonanych w bocznych ściankach ramy, stanowiących źródło niebezpiecznych gradientów naprężenia. Otwory te usunięto i zastąpiono je jednym otworem w dolnej ściance belki. Ponadto dodano płaskowniki wzmacniające boczne ścianki ramy w obszarze zagrożonym oraz dodano żebra wzmacniające (rys. 5). W wyniku takich działań opracowywano kolejne warianty konstrukcji, które poddawano analizie MES. Wprowadzone modyfikacje pozwoliły na eliminację stref newralgicznych ustroju nośnego. Na rys. 6 przedstawiono wyniki obliczeń MES dla ostatecznego wariantu konstrukcji.



Rys. 5. Nakładki i żebra wzmacniające przednią część ramy



Rys. 6. Rozkład naprężenia H-M-H w zmodyfikowanym modelu ramy: a) widok ogólny, b) zbliżenie części przedniej ramy

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza numeryczna konstrukcji nośnej ramy naczepy umożliwiła ocenę poprawności opracowanego rozwiązania konstrukcyjnego, pozwalając zidentyfikować obszary newralgiczne, determinujące wytrzymałość całej konstrukcji. Jest to niezwykle istotne w przypadku poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, gdzie na etapie projektowania skomplikowanych elementów nośnych występuje zbyt wiele nieznanymi parametrów konstrukcyjnych. Znajomość rozkładów naprężenia w elementach krytycznych stanowi zatem zagadnienie o pierwszorzędym znaczeniu, a zastosowanie metody elementów skończonych pozwala analizować wyężenie konstrukcji jeszcze na etapie jej projektowania [6, 9, 10].

Wykorzystanie obliczeń numerycznych MES w procesie projektowania umożliwia szybkie i skuteczne wprowadzanie niezbędnych modyfikacji szczegółów konstrukcyjnych, prowadzące do powstawania kolejnych, coraz korzystniejszych wariantów konstrukcyjnych umożliwiających w efekcie opracowanie rozwiązania optymalnego.

Literatura

1. Abaqus HTML Documentation, 2010.
2. Bathe K J. Finite element procedures. Prentice Hall, 1996.
3. Dacko M, Borkowski W, Dobrociński S, Niezgoda T, Wieczorek M. Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Arkady, Warszawa 1994.
4. Grądzki R. Wprowadzenie do metody elementów skończonych. Politechnika Łódzka, Łódź 2002.
5. Koszałka G., Niewczas A., Dębski H., Golec M., Kaczor M., Taratuta L.: FEM analysis in design of extendable central beam for a semi-trailer. Machine Design, Vol. 3(2011), No.1, pp. 47-50.

6. Osiński J. Obliczenia wytrzymałościowe elementów maszyn z zastosowaniem metody elementów skończonych. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997.
7. Rakowski G, Kacprzyk Z. Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
8. Rudawska A., Dębski H. Experimental and numerical analysis of adhesively bonded aluminum alloy sheets joints. Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and Reliability, 2011, Vol. 49, No. 1, pp. 4-10.
9. Rusiński E, Czmochoński J, Smolnicki T. Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
10. Rusiński E, Kowalczyk M. Zasady przedłużania ram samochodów ciężarowych. Samochody Specjalne, 6/2003, t.7.
11. Rusiński E, Porada D. Komputerowe wspomaganie projektowania ram samochodów ciężarowych. Samochody Specjalne, 6/2000, t. 4.
12. Tarnowski W. Podstawy projektowania technicznego. WNT, Warszawa 1997.

Dr inż. Hubert Dębski

Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
E-mail: h.debski@pollub.pl

Dr inż. Grzegorz Koszałka

Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
E-mail: g.koszalka@pollub.pl

Dr inż. Mirosław Ferdynus

Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
E-mail: m.ferdynus@pollub.pl