

OLSZEWSKI Zbigniew, WALUŚ Konrad J., BERDYCHOWSKI Maciej

MODELOWANIE CECH GEOMETRYCZNYCH OBSZARU KONTAKTU OPONA – NA WIERZCHNIA Z ZASTOSOWANIEM FEM

Streszczenie

Opona pneumatyczna jako element kompozytowy jest wykonana z wielu materiałów o różnorodnej strukturze i właściwościach materiałowych. Jest ona obiektem, którego modelowanie z zastosowaniem technik numerycznych jest szczególnie trudne i kłopotliwe, a uzyskane wyniki badań symulacyjnych wymagają weryfikacji doświadczalnej. W artykule przedstawiono metodykę budowy modelu numerycznego opony, który wykorzystano w statycznej analizie geometrycznych cech obszaru kontaktu opony z nawierzchnią wraz z jego weryfikacją doświadczalną.

WSTĘP

Wzrastające natężenie ruchu na europejskich i światowych szlakach komunikacyjnych prowadzi do wzrastającej liczby wypadków i zdarzeń drogowych. Wymusza to prowadzenie licznych badań doświadczalnych i symulacyjnych związanych z bezpieczeństwem ruchu pojazdów. Szczególnie istotne w tym obszarze są działania mające na celu coraz lepsze poznanie procesów i zjawisk zachodzących w obszarze styku pomiędzy oponą a nawierzchnią drogi. Interakcja opona – nawierzchnia jest bezpośrednio odpowiedzialna za zdolność do przenoszenia sił napędowych oraz zachowania stabilnego, bezpiecznego i zgodnego z intencjami kierowcy toru ruchu pojazdu. Przebieg tych zjawisk i procesów zależy od wielu czynników, takich jak: kondycja psychofizyczna kierowcy [3, 12, 13], wyposażenie pojazdu w układy wspomagające takie jak ABS czy ESP, warunków atmosferycznych [14-20], stanu technicznego pojazdu oraz nawierzchni. Związane jest to w szczególności z cechami geometrycznymi strefy kontaktu pomiędzy oponą a nawierzchnią, które są zdeterminowane przez wymiary opony, ciśnienie w ogumieniu oraz jednostkowe obciążenie przypadające na każde koło [5, 7, 21]. W artykule przedstawione zostały wyniki badań doświadczalnych cech geometrycznych obszaru styku koła z nawierzchnią w warunkach statycznych oraz badania symulacyjne pola kontaktu z zastosowaniem FEM.

1. BUDOWA MODELU NUMERYCZNEGO OPONY

Opona jest elementem kompozytowym zbudowanym z kilku różnych materiałów o różnych właściwościach mechanicznych. Podstawowym materiałem z którego wykonywane są opony jest guma o właściwościach lepko i hipersprężystych [6, 8, 9, 11]. W gumie zatopione są nitki kordu wykonanego z cienkich stalowych drutów pełniących rolę osnowy lub opasania. Osnowa pełni rolę elementu nośnego w oponie i zbudowana jest z nitek kordu ułożonych promieniowo na całej długości przekroju poprzecznego opony [4]. Opasanie zbudowane z kilku warstw krzyżującego się kordu stanowi element wzmacniający

o szerokości równej szerokości bieżnika i znajdującego się bezpośrednio pod nim [1]. Ogólna budowa pneumatycznej została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Ogólna budowa opony pneumatycznej – [www.felgi-opony.com]

Badaniom doświadczalnym oraz symulacyjnym poddana została opona o rozmiarze 165/80 R14, której cechy geometryczne zostały przełożone na model numeryczny. Cechy geometryczne opony zaczerpnięto z katalogu ETRTO (The European Tyre and Rim Technical Organisation) oraz dokonano niezbędnych pomiarów rzeczywistej opony. Uwzględnione zostały wszystkie znaczące elementy opony za wyjątkiem drutówki, która została zastąpiona poprzez odpowiedni dobór warunków brzegowych. Pominięto również geometryczne odwzorowanie bieżnika ze względu na konieczne uproszczenia modelu i niewielki spodziewany wpływ na uzyskane wyniki. W celu dalszego uproszczenia powierzchnię wchodzącą w kontakt z oponą potraktowano jako ciało sztywne. Następnie zdefiniowano obciążenia zewnętrzne, określając ciśnienie działające na wewnętrzną powierzchnię opony, oraz obciążenie przypisane do punktu referencyjnego stanowiącego geometryczny środek opony.

Zastosowany model materiałowy gumy uwzględnia jej właściwości lepkosprężyste (viscoelastic) oraz hipersprężyste. Zastosowane oprogramowanie do analizy FEM pozwala ocenić hipersprężyste zachowanie materiału poprzez automatyczne tworzenie krzywych reakcji za pomocą wybranych funkcji potencjałów energii odkształcenia, które w tym przypadku przyjmuje postać funkcji wielomianowej:

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

Gdzie U jest ilością energii przypadającej na jednostkę odniesienia, N – stałą materiałową, gdzie: U jest energią na jednostkę odniesienia; N jest parametrem materiału; C_{ij} i D_i są parametrami materiału zależnymi od temperatury; \bar{I}_1 oraz \bar{I}_2 są pierwszym i drugim dwiatorem niezmienników naprężeń zdefiniowanych jako [2]:

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \text{ i } \bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2} \quad (2)$$

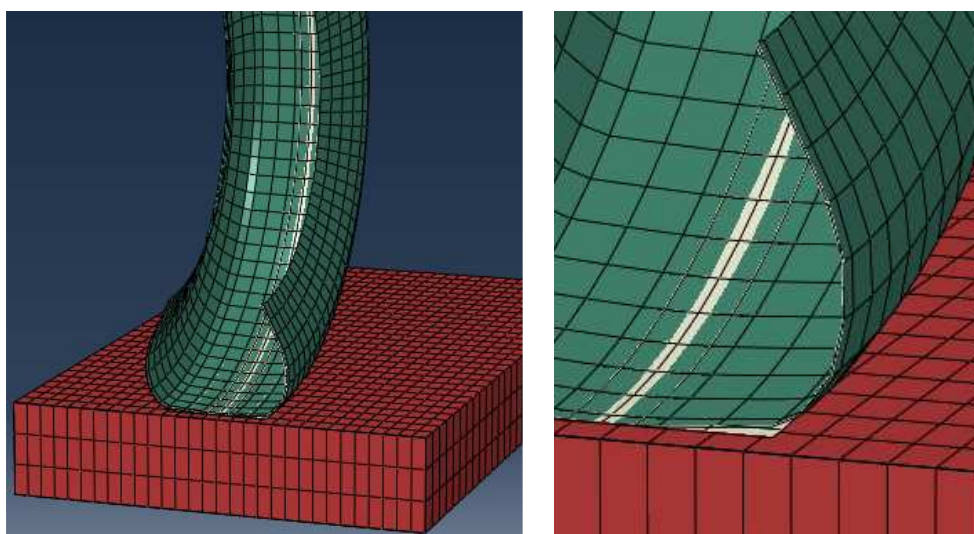
gdzie dwiator naprężeń rozciągających ma postać $\bar{\lambda}_i = J^{\frac{1}{3}} \lambda_i$; J wyraża całkowitą objętość; J^{el} elastyczność całkowitej objętości w kierunkach głównych. Początkowy moduł ścinający μ_o i moduł masowy K_o określono zależnością (3) [2]:

$$\mu_o = 2(C_{10} + C_{01}); K_o = \frac{2}{D_1} \quad (3)$$

W pracy przyjęto następujące wartości parametrów: $C_{10}=1000000$; $C_{01}=0$; $D_1=0$.

W celu zdefiniowania charakteru kontaktu pomiędzy stykającymi się częściami modelu, określono jego właściwości w kierunku normalnym z wykorzystaniem funkcji „hard contact”, oraz w kierunku stycznym z wykorzystaniem algorytmu kary ze zdefiniowanym

współczynnikiem tarcia. Gotowy model wraz z nałożoną siatką elementów skończonych został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Model opony i podłoża z nałożoną siatką elementów skończonych

W celu lepszego oddania rzeczywistej budowy analizowanej opony wykorzystano wbudowaną w oprogramowanie funkcję rebar layers umożliwiającą symulowanie zjawisk zachodzących w kordzie i opasaniu poprzez dodanie właściwości charakteryzujących przestrzenny układ ich nici, oraz właściwości materiałowe. Przyjęte wartości poszczególnych właściwości kordu przedstawione zostały w tab.1

Tab. 1. Właściwości materiałowe opasania i osnowy

Materiał	Moduł Younga [Pa]	Współczynnik Poissona	Area per bar [m]	Spacing [m]
Carcass	1*109	0,3	1,96E-6	0.002
Belts	1*109	0,3	7E-8	0.00015

Modelując kord dokonano niezbędnego nadania odpowiednich wiązań pomiędzy jego elementami skończonymi, a siatką MES definiującą gumę z której zbudowana jest opona. Aby zdefiniować te zależności wykorzystano wiązanie embedded, stosowane w celu określenia elementów osadzonych w innych elementach skończonych.

Dla uproszczenia przyjęto jednolity (uśredniony) skład i właściwości materiałowe gumy tworzącej poszczególne elementy opony, zakładając znikomy ich wpływ w przypadku symulacji w warunkach statycznych.

2. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzono obliczenia dla pięciu przypadków napompowania opony ciśnieniami od 0,1 MPa do 0,3 MPa z rozdzielczością 0,05 MPa. Dla każdego z przypadków przeprowadzono analizę wielkości pola powierzchni obszaru kontaktu dla wartości obciążenia od 50 do 500 kg z rozdzielczością 50kg. Odstępstwo od tych założeń wystąpiło tylko dla ciśnienia wewnętrznego 0,1 MPa, dla którego zmiana obciążenia występowała co 100 kg.

W celu weryfikacji modelu przeprowadzone zostały badania doświadczalne polegające na poddaniu analizowanej opony działaniu siły w kierunku promieniowym. Bieżnik opony pokryty został pigmentem dzięki czemu możliwe stało się uzyskanie obrazów odpowiadających geometrii obszaru kontaktu pomiędzy oponą a podłożem (Rys. 3). Testy

przeprowadzono dla różnych wartości ciśnienia i obciążenia odpowiadających przypadkom poddawanych modelowaniu. Wartości doświadczalne uzyskane zostały poprzez pomiar wielkości pola powierzchni za pomocą odpowiedniego oprogramowania, zliczając ilość pixeli na zeskanowanym obrazie odcisku opony. W tym celu przyjęto, iż każdy pixel obrazu jest kwadratem o boku 0,085mm.

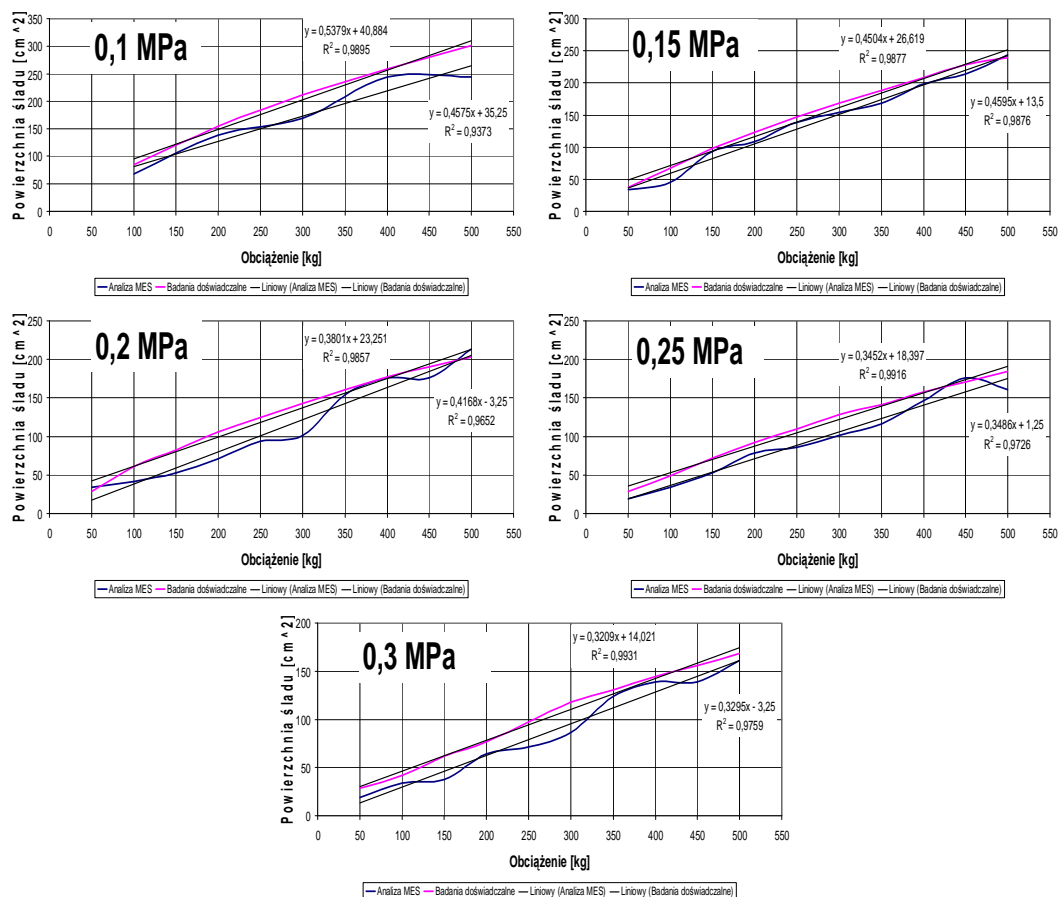


Rys. 3. Widok przykładowych obszarów kontaktu opony z nawierzchnią dla ciśnień od 0,1 do 0,3 MPa i obciążenia promieniowego 300 kg

Uzyskane wartości pola powierzchni obszaru kontaktu przedstawiono w tabeli 2, oraz na wykresach (rys. 4).

Tab. 2. Wartości pola powierzchni obszaru kontaktu uzyskane na drodze doświadczalnej i symulacyjnej

P [MPa]	Obciążenie [kg]	Analiza MES A_s [cm ²]	Wartość zmierzona doświadczalnie A_m [cm ²]	Błąd względny
0,1	100	67,5	84,71	20%
	200	138,75	154,39	10%
	300	168,75	211,85	20%
	400	243,75	258,93	6%
	500	243,75	301,39	19%
0,15	50	33,75	36,90	9%
	100	45	66,92	33%
	150	93,75	98,26	5%
	200	108,75	123,30	12%
	250	138,75	147,11	6%
	300	153,75	168,21	9%
	350	168,75	188,57	11%
	400	198,75	208,12	5%
	450	213,75	228,50	6%
500	243,75	238,99	2%	
0,2	50	33,75	29,00	16%
	100	41,25	60,81	32%
	150	52,5	82,64	36%
	200	71,25	105,69	33%
	250	93,75	124,64	25%
	300	101,25	142,59	29%
	350	153,75	160,94	4%
	400	176,25	177,76	1%
	450	176,25	190,47	7%
500	213,75	203,36	5%	
0,25	50	18,75	29,05	35%
	100	33,75	48,78	31%
	150	52,5	71,51	27%
	200	78,75	92,23	15%
	250	86,25	109,27	21%
	300	101,25	128,52	21%
	350	116,25	141,10	18%
	400	146,25	157,91	7%
	450	176,25	170,39	3%
500	161,25	184,45	13%	
0,3	50	18,75	28,57	34%
	100	33,75	41,90	19%
	150	37,5	61,83	39%
	200	63,75	76,96	17%
	250	71,25	97,09	27%
	300	86,25	117,55	27%
	350	123,75	130,56	5%
	400	138,75	144,14	4%
	450	138,75	155,72	11%
500	161,25	168,32	4%	



Rys. 4. Zależności wielkości pola powierzchni obszaru kontaktu od obciążenia oraz ciśnienia w oponie dla badań doświadczalnych i symulacyjnych

Porównując wyniki doświadczalne i uzyskane z symulacji numerycznej widać, że otrzymane z symulacji wartości pola powierzchni kontaktu opony z nawierzchnią drogi są mniejsze. Jednakże po wprowadzeniu linii trendu okazało się, iż współczynnik kierunkowy dla wyników z badań doświadczalnych i numerycznych dla ciśnień 0,15; 0,25 i 0,3 MPa różni się nieznacznie (na trzecim miejscu po przecinku). Zatem wydaje się, że opracowany model numeryczny prawidłowo reaguje na zadane wymuszenia w postaci ciśnienia i obciążenia promieniowego, jednakże jest zbyt „sztywny”, co powoduje, iż wartości numeryczne i doświadczalne nie pokrywają się. Po wyznaczeniu różnic obliczono błąd procentowy dla poszczególnych testów. Błąd ten w większości przypadków zawierał się w przedziale od 15 do 30 %. Świadczy to o konieczności dalszych poszukiwań cech materiałowych w celu udoskonalenia opracowanego modelu numerycznego.

PODSUMOWANIE

Modelowanie zachowania opony z zastosowaniem metody FEM jest szczególnie utrudnione ze względu na ograniczoną dostępność danych materiałowych umożliwiających precyzyjny opis poszczególnych składników kompozytu. Przedstawiony w artykule model zastosowany został wcześniej do estymacji wartości ugięcia opony w zależności od obciążenia [opracowanie zgłoszone do druku], gdzie poszczególne wartości stałych materiałowych określone zostały poprzez potraktowanie modelu jako „czarnej skrzynki”, a następnie dopasowanie ich wartości do uzyskanych wcześniej danych doświadczalnych. Uzyskane podczas tej analizy wyniki pozwoliły wnioskować o przydatności modelu do dalszych prac symulacyjnych w tym do modelowania cech geometrycznych obszaru

kontakty opony z podłożem. Uzyskane wartości błędów względnych szczególnie w zakresie typowych spotykanych w eksploatacji wartości ciśnień i obciążeń pozwalają wnioskować o wysokiej wiarygodności modelu. W toku dalszych analiz okazało się, że możliwa jest dalsza redukcja wartości błędów poprzez manipulację wartością współczynnika tarcia pomiędzy oponą a podłożem. Podczas przeprowadzonych analizy statycznych zauważono brak istotnego wpływu właściwości lepkosprężystych gumy na wartości błędów względnych, a wyeliminowanie ich z definicji materiału pozwoliło istotnie skrócić czas niezbędny na wykonanie obliczeń

"Projekt nr N N509 544540 został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki".

BIBLIOGRAFIA

1. ABAQUS Technology Brief: An Integrated Approach for Transient Rolling of Tires TB-03-TRT-1, January 2011
2. ABAQUS 6.12-1 Documentation, 2012
3. Bojar Piotr, Matuszewski Maciej, Woropay Maciej, Szubartowski Mirosław, Muślewski Łukasz, Model oceny bezpieczeństwa realizowanego procesu transportowego z punktu widzenia oddziaływań czynników antropotechnicznych, Technika Transportu Szynowego 9/2012, s.2257-2269, CD-ROM, ISSN 1232-3829
4. Jurkowska Barbara, Jurkowski Bolesław, "Produkcja opon i dętek", WNT Warszawa 1975r
5. Drożyński Michał, Waluś Konrad Jan, Olszewski Zbigniew, "Wykorzystanie hipotez tarcia suchego do charakteryzowania zużycia ciernego sprzęgieł tarczowych - analiza teoretyczna", VI International conference "Friction 2010", Politechnika Warszawska 2010r.
6. Bohdana Marvalova, Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling, Engineering MECHANICS, Vol. 14, 2007, No 1/2, p. 81-89
7. Olszewski Z., Waluś K. J., *Effects of Atmospheric Conditions on The Mechanical Properties of Tires*, Applied Mechanics and Materials Vol. 232 (2012) pp 14-18, © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.232.14, EBook version ISBN: 978-3-03813-434-3
8. Parsons W., *Hysteresis and adhesion of a semicrystalline polymer*, Polymer, Volume 28, Issue 7, June 1987, Pages 1133-1138.
9. Persson B.N.J., *On theory of rubber friction*, Surface Science 401, 445-454, 1998.
10. Talaśka Krzysztof, Waluś Konrad J., Berdychowski Maciej, "Modelowanie opon samochodowych z wykorzystaniem oprogramowania MES (badania pilotażowe); Technika Transportu Szynowego 9/2012, s.3487-3494, CD-ROM, ISSN 1232-3829
11. Tarasiuk Piotr, "Obliczanie MES kół pojazdów wolnobieżnych - model opony a dokładność rozwiązania numerycznego", Acta mechanica et automatica, vol. 2 no. 4, 2008r.
12. Tokarczyk Ewa, Ucińska Monika, Zachowania asertywne a bezpieczeństwo ruchu drogowego, Technika Transportu Szynowego 9/2012, s.901-911, CD-ROM, ISSN 1232-3829
13. Ucińska Monika, Niezgoda Michał, Karaś Dominika, Tokarczyk Ewa, Odachowska Ewa, Starszy kierowca w ruchu drogowym, Technika Transportu Szynowego 9/2012, s.889-900, CD-ROM, ISSN 1232-3829
14. Unarski J., W. Wach, Jakub Zębała, *Przyjmowanie wartości współczynnika tarcia w różnych szczególnych okolicznościach*, Instytut ekspertyz sądowych, Kraków 2000.

15. Waluś K. J., *Badania doświadczalne intensywnego przyspieszania ciągnika siodłowego w ujemnych temperaturach otoczenia (badania rozpoznawcze)*, Autobusy 3/2013, s. 2089-2096, CD-ROM, ISSN 1509-5878
16. Waluś K. J., *Badania doświadczalne intensywnego hamowania ciągnika siodłowego w ujemnych temperaturach otoczenia (badania rozpoznawcze)*, Autobusy 3/2013, s. 2097-2102, CD-ROM, ISSN 1509-5878
17. Waluś K. J., *Comparing the intensity of the acceleration of a passenger car equipped with summer and winter tires in sub-zero road surface temperatures*, Technológ. - 2013, nr 4, s. 262-264, ISSN 1337-8996
18. Waluś K. J., *Comparing the intensity of the braking car equipped with summer and winter tires in sub-zero road surface temperatures*, Technológ. - 2013, nr 4, s. 265-267, ISSN 1337-8996
19. Waluś K. J., *Comparison of the Maximum Acceleration of a Passenger Car on Selected Pavements in Wintertime*, abstract, proceedings of XX Ukrainian-Polish Conference on "CAD in Machinery Design. Implementation on Educational Issues." CADMD'2012, October 11-13, 2012, Lviv, UKRAINE, p. 24-30, ISBN 978-617-607-332-1,
20. Waluś K. J., Olszewski Z., *Analysis of Tire-road contact under Winter conditions*, Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Volume 2192, proceedings World Congress on Engineering 2011, Volume III, London, U.K. 6-8 July, 2011, p. 2381-2384, ISBN 978-988-19251-5-2, ISSN 2078-0958
21. Waluś K. J., Wolniewicz R. M., Olszewski Z., Drożyński M., *Analysis of pressure and load influence on geometric parameters of tire under static conditions*, 17th French-Polish Seminar of Mechanics, 15.05.2009, Lille, Francja, p. 31-36,

CHARACTERISTICS OF GEOMETRIC MODELING OF CONTACT AREA TIRE - SURFACE WITH THE APPLICATION FEM

Abstract

Tyre as a composite element is made of a variety of materials of various structure and material properties. It is the object which modeling using numerical techniques is particularly difficult and cumbersome, and the results of simulations need to be verified experimentally. A method of construction of a numerical model of the tire, which was used in the static analysis of the geometrical characteristics of the area of contact with the ground and its experimental verification.

Autorzy:

mgr inż. **Zbigniew Olszewski** – Politechnika Poznańska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, zbigniew.olszewski@put.poznan.pl

dr inż. **Konrad J. Waluś** – Politechnika Poznańska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, konrad.walus@put.poznan.pl

mgr inż. **Maciej Berdychowski** – Politechnika Poznańska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,