

Symulacje MES w projektowaniu układów chłodzenia form

Mateusz Dobroczyński, Katarzyna Trąbka-Więctaw, Piotr Wolszczak

W artykule przedstawiono proces projektowania układów chłodzenia form do wytłaczania z rodmuchiwaniami. Bazując na modelu otrzymanym z zakładu produkującego formy, opracowano trzy konstrukcje układów chłodzenia. W kolejnych układach chłodzenia zmodyfikowano przebieg kanałów chłodzących, ich przekroje oraz prędkość przepływu chłodziwa w kanale chłodzącym. Metodą elementów skończonych przeprowadzono symulacje działania układów chłodzenia. Na podstawie wyników symulacji porównano czas chłodzenia powierzchni gniazd formujących w zaprojektowanych formach. W pracy omówiono również istotne dla projektantów elementy rachunku różniczkowego stosowane w opisie przewodnictwa ciepła w MES.

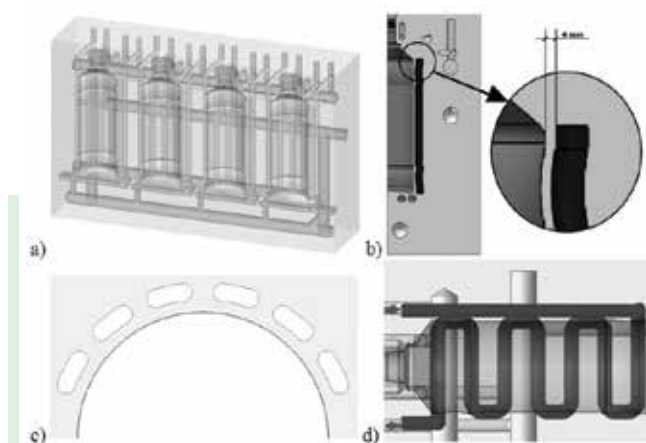
Przetwórstwo tworzyw sztucznych jest jedną z najszybciej rozwijających się branż. Zapotrzebowanie na produkty wykonane z tworzyw sztucznych obejmuje wszystkie branże. Przykładem są opakowania stosowane w branży spożywczej i chemicznej. Najczęściej stosowaną metodą wytwarzania takich opakowań jest wytłaczanie oraz rodmuchiwanie. W produkcji butelek wykorzystywane są półprodukty w formie preform lub rękawów. Jednym z istotnych elementów form do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych, w tym butelek, jest konstrukcja układu chłodzenia. Etap chłodzenia produktu w formie jest najdłuższą częścią cyklu produkcji butelki [1].

Rosnące oczekiwania dotyczące wydajności produkcji oraz jakości wyrobów wiążą się z koniecznością poszukiwania nowych sposobów ich poprawienia. Jednocześnie na rynku pojawiają się nowe technologie. Przykładem jest bezpośrednie spajanie proszków metali przy pomocy lasera. Metoda ta może być wykorzystana do wykonywania form z kanałami chłodzącymi o dowolnych kształtach i przekrojach niemożliwych do uzyskania metodami obróbki skrawaniem [2, 3].

Celem pracy było zaprojektowanie kształtu kanałów chłodzących formy do wytłaczania z rodmuchiwaniami produkowanej obecnie w przedsiębiorstwie zajmującym się produkcją form do wytwarzania butelek. Wykonano projekty konstrukcji kanałów chłodzących formy oraz przeprowadzono symulacje wydajności kanałów chłodzących. Porównano efekty zaproponowanych zmian konstrukcyjnych i wybrano rozwiązanie, które zapewni skrócenie czasu chłodzenia gniazd formy oraz obniżenie temperatury w gniazdach formy w porównaniu do rozwiązania stosowanego obecnie.

METODYKA

Przedmiotem badań były cztery modele bryłowe formy. Model 1 stanowił uproszczony model formy obecnie produkowanej w przedsiębiorstwie. Uproszczenie polegało na usunięciu elementów, które nie miały wpływu na chłodzenie formy, a ich obecność powodowałaby zagęszczenie węzłów siatki MES i niepotrzebnie komplikowałyby obliczenia. Były to elementy służące do mocowania form, takie jak: otwory na śruby, kołki ustalające, korki i wpusty. Pozostałe części formy połączono w jednym bloku, aby w programie do symulacji MES tworzyły element homogeniczny. Oddzielnie analizowano układy kanałów chłodzenia



Rys. 1. Modele konstrukcji formy wykorzystane w badaniu (opracowanie własne): a) model 1 - uproszczona konstrukcja formy produkowanej przez przedsiębiorstwo; b) model 2 - zbliżenie przebiegu kanału chłodzącego do profilu gniazda formującego butelki; c) model 3 - zmiana przekroju poprzecznego kanałów układu chłodzenia; d) model 4 - zmiana długości kanałów oraz kierunku przepływu chłodziwa

korpusu i dna butelki. Widok modelu uproszczonego 1 przedstawia rys. 1 a. Na rysunku wyróżniono gniazda butelek oraz przebieg kanałów chłodzących.

Bazując na wymiarach gabarytowych i kształcie gniazda formy obecnie stosowanej przygotowano kolejne modele, w których zaproponowano następujące modyfikacje układów chłodzenia:

- model 2 – modyfikacja polegająca na zaprojektowaniu kanałów chłodzących o stałej odległości od powierzchni gniazda formującego (rys. 1 b);
- model 3 – modyfikacja polegająca na zmianie kształtu przekroju poprzecznego kanałów chłodzących (rys. 1 c);
- model 4 – modyfikacja polegająca na zmianie kierunku przepływu chłodziwa (rys. 1 d).

Celem modyfikacji zawartej w modelu nr 2 było zbliżenie przebiegu kanału chłodzącego do profilu gniazda formującego butelki [4–6]. Pierwotna odległość powierzchni kanału od powierzchni gniazda wynosi przeciętnie 10,26 mm, natomiast po wprowadzeniu zmiany jest stała w i wynosi 4 mm. Przekrój poprzeczny formy z zaznaczeniem tej odległości przedstawia rys. 1 b.

Tab. 1. Powierzchnie oraz objętość kanałów chłodzących modelu 1-4.

Nr modelu	Powierzchnia [mm ²]	Objętość [mm ³]
1	627 325	2 481 336
2	618 644	2 446 373
3	613 806	2 274 284
4	583 187	2 387 102

Tabela 2. Właściwości materiałowe zastosowane w symulacjach [7, 8].

Właściwość	Jednostki	EN AW-7075	Glikol
Gęstość	[kg/m ³]	2812,6	1122,7
Przewodność cieplna	[W/mK]	130	0,24621
Ciepło właściwe	[J/kgK]	960	2342,2
Lepkość kinematyczna	[m ² /s]	-	3,1192 e-5

Tabela 3. Zakresy temperatur oraz czasy trwania pierwszego etapu symulacji (opracowanie własne)

Nr modelu	Temperatura minimalna	Czas trwania
	[K]	[s]
1	291,75	4,5
2	291,73	4,1
3	291,75	3,4
4	291,74	4,6

Model 3 charakteryzowała zmiana przekroju poprzecznego kanałów przebiegających wzdłuż powierzchni formującej korpus butelki. Przyjęto kształt wycinka pierścienia koncentrycznie otaczającego kształt przekroju butelki o zaokrąglonych ścianach promieniowych. Obwód przekroju poprzecznego kanału modelu nr 3 odpowiadał obwodowi przekroju kołowego kanału pierwotnego o promieniu 6 mm. Przykładowy widok kształtu kanałów w sąsiedztwie gniazda formującego przedstawia rys. 1 c.

W modelu nr 4 wprowadzono zmianę kierunku przepływu chłodziwa oraz zmianę długości kanałów doprowadzających i odprowadzających. Celem wprowadzenia tych zmian było

skrócenie czasu odprowadzania ogrzanej cieczy z formy. W zaprojektowanym modelu układu chłodzenia kanał doprowadzający ma przekrój kołowy o średnicy 13 mm oraz długość 215 mm. Kanał odprowadzający skrócono z 231 mm do 32 mm. Kanał chłodzący umieszczono na płaszczyźnie odsuniętej od płaszczyzny butelki o 16 mm. Przebieg kanału chłodzącego prezentuje rys. 1 d.

Podobne zmiany wprowadzono w sekcji dna. Wprowadzone zmiany wpłynęły na sumaryczne objętości i powierzchnie kanałów chłodzących, które wymieniono w tab. 1.

Podczas generowania węzłów siatki elementów skończonych przyjęto kształt czworoboku o wymiarach 0,005 dla modelu formy oraz 0,003 dla modelu płynu. Dla materiału formy (EN AW-7075) oraz płynu chłodzącego (glikol) przyjęto właściwości wymienione w tab. 2.

Scenariusz symulacji obejmował dwa etapy. W pierwszym etapie określano czas, po jakim układ osiąga stan ustalony, w drugim analizowano rozkład temperatur na powierzchniach gniazd.

Jako początkową temperaturę wszystkich węzłów siatki formy przyjęto temperaturę 293,15 K (20°C). Natomiast w węzłach na powierzchni gniazd formujących określono temperaturę 468,15 K (195°C) i był to warunek brzegowy. Symulowano w ten sposób obciążenie cieplne wynikające z zetknięcia powierzchni gniazda z rękawem z materiału HDPE. Początkową temperaturę płynu przyjęto o wartości 283,15 K (10°C).

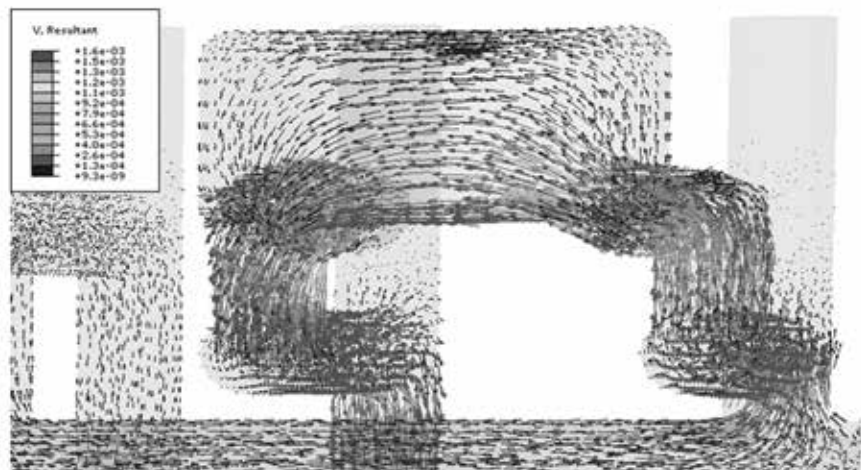
Jednym z warunków brzegowych było określenie sposobu wymiany ciepła między materiałem formy, a płynem chłodzącym, który zdefiniowano na powierzchniach kanałów chłodzących formy.

Przyjęto maksymalny czas trwania symulacji równy 10e+7 sekund oraz zdefiniowano warunek zakończenia symulacji, kiedy zmiana temperatury w czasie będzie niższa niż 13. Oprócz czasu wykonywania symulacji uzyskano wartości temperatur w węzłach siatki formy. W tab. 3 przedstawiono zakresy uzyskane na tym etapie symulacji temperatur oraz czasy stabilizacji według opisanego warunku.

Wartości uzyskanych temperatur minimalnych mieszczą się w zakresie 0,02 K. Potwierdza to poprawność przyjętego modelu symulacji oraz zadanego warunku zakończenia obliczeń. Uzyskane w wyniku symulacji rozkłady temperatur są bardzo zbliżone, a jednocześnie zróżnicowane są czasy ich osiągnięcia dla różnych modeli konstrukcyjnych kanałów chłodzących.

Rozkład temperatury w materiale formy był warunkiem początkowym drugiego etapu symulacji. Na podstawie danych pochodzących z rzeczywistego procesu technologicznego określono czas trwania symulacji na 12,5 s. W tym etapie symulacji jedyną

Rys. 2. Przepływ płynu w kanałach chłodzących w sekcji szyjki w trzeciej sekundzie symulacji modelu nr 1 formy obecnie produkowanej w przedsiębiorstwie (opracowanie własne)



Rys. 3.
Rozkład temperatury w gniazdach formy modelu nr 1 w 10 sekundzie symulacji (opracowanie własne)



interakcją w modelu była wymiana ciepła między powierzchniami kanałów chłodzących a płynem chłodzącym. Nie obowiązywał w nim warunek brzegowy związany z temperaturą powierzchni gniazd formy.

Zdefiniowano również warunek brzegowy dotyczący sposobu przepływu płynu w kanałach chłodzących. Na podstawie informacji o miejscu wlotu i wylotu chłodziwa do formy oraz dokumentacji oprogramowania Abaqus [9] przyjęto, że w przekroju wlotu cieczy chłodzącej przepływ miał prędkość 0,01 m/s. Przykład symulacji przepływu w sekcji szyjki, w trzeciej sekundzie symulacji przedstawia rys. 2.

W wyniku symulacji uzyskano przebiegi zmian temperatury powierzchni gniazd formy w funkcji czasu. Rozkład temperatury nie był równomierny, co nie jest korzystne, gdyż powoduje powstawanie zniekształceń butelek [10]. W początkowej fazie cyklu najwyższe temperatury występowały na wysokości szyjki. Na rys. 3 przedstawiono rozkład temperatury w 10 s symulacji. Widoczne są rejony, które nagrzewały się w końcowej fazie cyklu. Były to powierzchnie cylindryczne korpusów, z wyjątkiem rejonów bocznych, leżących przy krawędziach formy. Uzyskany rozkład był zgodny z obserwacjami rzeczywistych form, przeprowadzonymi przez przedsiębiorstwo.

METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda elementów skończonych jest metodą aproksymacji (otrzymania rozwiązań przybliżonych) równań różniczkowych cząstkowych, opisujących przebieg procesu. Polega ona na dyskretyzacji, tzn. podziale modelu bryłowego na małe obszary zwane elementami skończonymi, charakteryzujące się prostą budową geometryczną. W przypadku powierzchni dyskretyzacja polega zazwyczaj na podziale obszaru na trójkąty, zaś w przestrzeni trójwymiarowej na czworościany. Dla elementów skończonych definiuje się proste funkcje, najczęściej funkcje liniowe lub wielomiany niskiego stopnia. Rozwiązania opisują zachowanie analizowanego zjawiska w węzłach siatki utworzonej przez

elementy skończone. W wyniku rozwiązywania tych równań otrzymuje się rozwiązanie przybliżone [11].

W pierwszym etapie symulacji przygotowanych modeli analizowano zjawisko przewodnictwa ciepła opisywane przez równanie różniczkowe cząstkowe zwane równaniem przewodnictwa ciepła o następującej postaci [12, 13]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k\Delta T + \phi \text{ lub } \frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T + \frac{\phi}{c\rho} \quad (1)$$

gdzie: $T(x, y, z, t)$ – temperatura ośrodka przewodzącego w punkcie $M(x, y, z)$ oraz chwili t ; ρ – gęstość; c – ciepło właściwe; k – współczynnik przewodnictwa; ϕ – wskaźnik ubytku energii na jednostkę objętości.

$$\Delta T = \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, a = \frac{k}{c\rho} \quad (2)$$

Analitycznie rozwiązywane jest równanie uproszczone (3) przy zadanych warunkach początkowych i brzegowych.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T \quad (3)$$

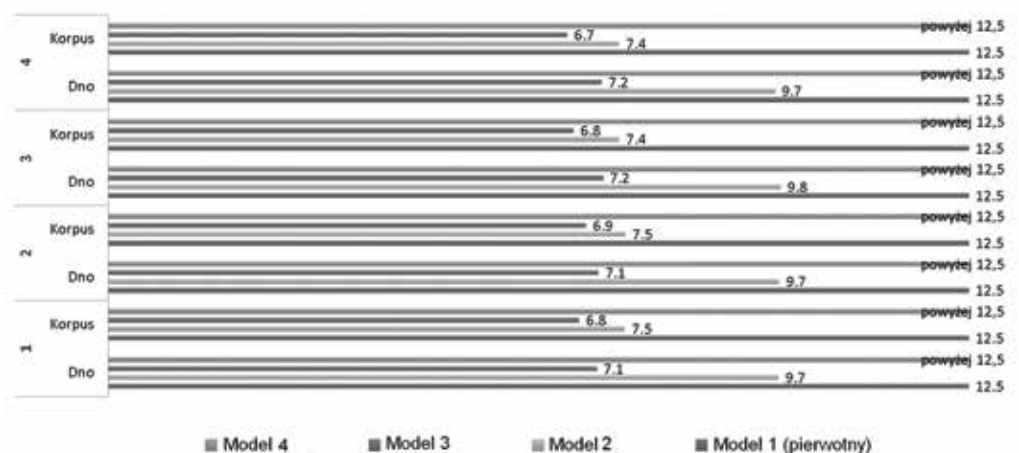
Do rozwiązywania bardziej skomplikowanych równań, które dają możliwość obliczania zagadnień w przestrzeni trójwymiarowej stosowane jest oprogramowanie symulacyjne, takie jak ABAQUS.

W drugim etapie symulacji uwzględniono ruch płynu w przewodach chłodzących. Zjawisko przepływu turbulentnego modelowane jest za pomocą równań Spalarta-Allmarasa [14, 15].

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} (1 - f_{\epsilon 2}) \tilde{S} \tilde{v} - \left(C_{\epsilon 2} f_{\epsilon 1} - \frac{C_{\epsilon 3}}{k^2} f_{\epsilon 2} \right) \left(\frac{\tilde{v}}{l} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right) + C_{\epsilon 2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

gdzie: \tilde{v} – zmienna turbulencji; U_j – prędkość; \tilde{S} – zmienna opisująca wirowość; d – odległość elementu do najbliższej ściany

Rys. 4.
Czas chłodzenia [s] w sekcjach korpusu i dna w modelach 1-4 (opracowanie własne)



oraz stałe C_{b1} , C_{b2} współczynnik σ i funkcje f_{i2} , f_w modelu Spalarta-Allmarasa.

WYNIKI

Dokonano porównania czasów chłodzenia powierzchni gniazd form w sekcjach korpus i dno według czterech przygotowanych modeli bryłowych. Jako stan końcowy zdefiniowano rozkład temperatury uzyskany w symulacji modelu nr 1 formy obecnie produkowanej w przedsiębiorstwie w czasie 12,5 s. Na rys. 4 przedstawiono zestawienie graficzne czasów, po których gniazda modeli 2, 3 i 4, w których wprowadzono zmiany konstrukcyjne osiągały temperatury odpowiadające modelowi nr 1 w czasie 12,5 s.

Zamiana zaproponowana w modelu 4 wpływa niekorzystnie na czas chłodzenia powierzchni gniazda. Czas osiągnięcia temperatur porównywalnych do czasu uzyskiwanego z zastosowaniem obecnej konstrukcji był dłuższy.

Natomiast zmiany zaproponowane w konstrukcjach modelu nr 2 i modelu nr 3 wpływają korzystnie na czas trwania cyklu.

W przypadku modelu 2 czasy chłodzenia sekcji dna i sekcji korpusu różnią się maksymalnie o 2,4 sekundy w gnieździe 3, minimalnie 2,2 sekundy w gnieździe 1 oraz 2. Najwydajniejsze chłodzenie zapewnia konstrukcja według modelu nr 3. W modelu tym temperatury zdefiniowane dla porównania jako końcowe uzyskuje się po około 7 sekundach. Jednocześnie konstrukcję tę charakteryzują najniższe różnice temperatur w sekcjach korpus i dno, które wynoszą maksymalnie 0,5 sekundy dla gniazda 4 oraz minimalnie 0,2 sekundy dla gniazda nr 2.

PODSUMOWANIE

Na podstawie symulacji metodą elementów skończonych czterech modeli konstrukcyjnych układów chłodzenia form stosowanych w technologii wytłaczania z rodmuchiowaniem kanałów przeprowadzono ocenę ich wydajności. Wyniki symulacji wykorzystano do porównania konstrukcji pod względem równomierności rozkładów temperatur na powierzchniach gniazd, czasu osiągnięcia stanu ustalonego oraz czasu chłodzenia formy do temperatury osiągniętej w obecnie prowadzonym procesie produkcyjnym. Poprawność zastosowanej metodyki potwierdzono przez weryfikację wyników symulacji modelu formy rzeczywistej. Uzyskane rozkłady temperatur były zgodne z wynikami pomiarów, wykonywanymi w procesach technologicznych w zakładach klientów stosujących formy wytwarzane w przedsiębiorstwie.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz możliwe jest podjęcie przez Przedsiębiorstwo decyzji o budowie i testach prototypów form. Zastosowanie nowoczesnych technologii szybkiego prototypowania, w szczególności technologii bezpośredniego spajania proszków metali (DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*) umożliwi wdrożenie nowatorskich konstrukcji kanałów chłodzących [2–4].

Dzięki wprowadzeniu zmiany konstrukcji formy polegającej na zmianie kształtu przekrojów poprzecznych kanałów chłodzących skrócenie czasu chłodzenia gniazda formy wyniesie szacunkowo 46%. Skrócony przez to zostanie całkowity czas cyklu wytłaczania z rodmuchiowaniem w procesie technologicznym wytwarzania butelek w zakładzie klienta.

LITERATURA

[1] L.C. Norman: Understanding Blow Molding. Monachium, Hanser, 2007.

[2] M. Chuchro, J. Czekaj, A. Ruszaj: Wytwarzanie modeli funkcjonalnych i narzędzi metodą selektywnego spiekania laserowego (SLS, DMLS), *Mechanik.* 12, 2008.

[3] H. Petzoldt i inni. DMLS gest an expert once-over. *Metal Powder Report.* 61, kwiecień 2006.

[4] P. Postawa: Chłodzenie konformalne form wtryskowych. *Teka Kom. Bud. Ekspl. Masz. Elektrotech. Bud. – OL PAN,* 2008, 129-132.

[5] L. Nickels: Channelling quality for moulded parts using fast manufacturing. *Metal Powder Report.* 64, 18 wrzesień 2009.

[6] J. Meckley, R.A Edwards: Study on the Design and Effectiveness of Conformal Cooling Channels in Rapid Tooling Inserts. *Technology Interface Journal.* Fall, 2009.

[7] University of Waterloo, Microelectronics Heat Transfer Laboratory. Fluid Properties Calculator. <http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>. 1997.

[8] ASM Aerospace Specification Metals Inc. Aluminum 7075-T6. Pompano Beach, USA, <http://www.aerospacemetals.com>.

[9] Dassault Systèmes: Abaqus 6.12 Documentation. Appendix E: Flow through a bent tube. 2012.

[10] A. Bendada, F. Erchiqui, A. Kipping: Understanding heat transfer mechanism during the cooling phase of blow molding using infrared thermography. *NDT&E International.* 38, 24 luty 2005.

[11] G. Rakowski, Z. Kacprzyk: Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1993.

[12] I. Martínez: Termodinámica básica y aplicada, Ed. Dosat, Madryt, 1992.

[13] B.Q. Li: Discontinuous Finite Elements in Fluid Dynamics and Heat Transfer. Springer. Waszyngton, USA, 2006

[14] B. Aupoix, P.R. Spalart: Extensions of the Spalart-Allmaras Turbulence Model to Account for Wall Roughness, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* 24, 2003, 454-462.

[15] C.L. Rumsey: Apparent Transition Behavior of Widely-Used Turbulence Models, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 28, 2007, pp. 1460-1471.

Artykuł został opublikowany w:
„Systemach technologicznych w inżynierii produkcji”,
[red:] Jerzy Lipski, Antoni Świć – Lublin: Politechnika Lubelska.

inż. Mateusz Dobroczyński
mgr Katarzyna Trąbka-Więclaw
dr inż. Piotr Wolszczak

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel./fax: 81 538 42 67