

dr hab. inż. Jarosław Bartnicki, prof. PL  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska

## RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Malinowskiego**  
**pt.: „Modelowanie numeryczne procesu tłoczenia na półgorąco elementu**  
**owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH”**  
**wykonana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa**  
**Politechniki Rzeszowskiej**

### Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Malinowskiego pt.: „*Modelowanie numeryczne procesu tłoczenia na półgorąco elementu owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH*” dotyczy interesującego i ciągle zyskującego na aktualności problemu doskonalenia technologii kształtowania plastycznego wyrobów wytwarzanych blach o coraz bardziej złożonej geometrii. Dzięki wprowadzaniu nowych rozwiązań w dziedzinie tłocznictwa możliwe jest wytwarzanie wyrobów o kształtach niedostępnych do niedawna za pomocą tradycyjnych rozwiązań. W konsekwencji elementy tłoczone na półgorąco, czy też za pomocą stempli elastomerowych znajdują coraz szersze zastosowanie w motoryzacji, lotnictwie i kosmonautyce. Obok możliwości technicznych bardzo ważnym aspektem jest w tym przypadku także ekonomika produkcji oraz problematyka niezawodności wytwarzanych części.

Podany w temacie pracy obszar aplikacyjny analizowanego rozwiązania wskazuje na ścisłe związki z przemysłem lotniczym, gdzie kształtowanie wyrobów z blach stalowych nierdzewnych, obok blach ze stopów tytanu, stanowi duże wyzwanie technologiczne. Kryteria dotyczące spełnienia wymagań norm lotniczych są bardzo restrykcyjne i tym bardziej wskazuje to na podjęcie przez Doktoranta znaczącego wyzwania, jakim jest analiza procesu tłoczenia na półgorąco wyrobu do zastosowań lotniczych. Poruszana w pracy problematyka znajduje odzwierciedlenie w bardzo dużej ilości projektów badawczych o tej tematyce, realizowanych w kraju i za granicą. Niewielka ilość dostępnej literatury poruszającej problematykę kształtowania blach stalowych na półgorąco wskazuje na celowość podjęcia poruszanej tematyki.

Cele (naukowy użyteczny) i teza pracy zostały sformułowane w sposób poprawny i jednoznaczny. Istotą rozprawy jest wykazanie, że określenie wpływu podstawowych parametrów procesu wytwarzania owiewki kadłuba pośredniego silnika turbowentylatorowego ze stali 17-4PH na jego przebieg umożliwi prawidłowe projektowanie i realizację nowego procesu wytwarzania podanego typoszeregu wy-

robów. Dla weryfikacji postawionej tezy wykonano szeroko zakrojone badania materiałowe wybranego gatunku stali oraz badania warunków termoemisyjności, które następnie wykorzystano w szeregu symulacji numerycznych procesu kształtowania, bazujących na metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki obliczeń numerycznych skonfrontowano z rezultatami szeroko zakrojonych badań doświadczalnych, zrealizowanych w oparciu o stanowisko badawcze wyposażone m.in. w prasę hydrauliczną potrójnego działania SMG-260 oraz robota przemysłowego do przenoszenia półwyrobu. Wyroby otrzymane w warunkach laboratoryjnych poddano badaniom jakościowym, w zakresie mikrostruktury oraz własności wytrzymałościowych.

Teza przedstawiona w pracy jest oryginalna i nie znajduje podobieństwa do znanych mi rozwiązań przedstawionych w literaturze specjalistycznej. Uzyskane rezultaty są użyteczne i mogą posłużyć do uruchomienia nowych procesów kształtowania plastycznego wyrobów z blach nierdzewnych. Ważne jest przy tym, że Doktorant wraz z promotorem zadbał o kompleksowe przebadania próbek w szerokim zakresie parametrów, co pozwoliło na sformułowanie nie tylko wniosków naukowych, ale i zaleceń technologicznych do wdrożenia produkcji.

Rozprawa doktorska została zredagowana na 166 stronach. Jest ona bardzo bogato ilustrowana rysunkami oraz tabelami. Praca została podzielona na dziesięć części, oprócz których wyróżniono streszczenia w językach polskim i angielskim oraz wprowadzenie (zawierające krótkie uzasadnienie podjęcia tematu).

Część pierwsza (26 stron) zawiera analizę literaturową stanu zagadnienia poruszanego w pracy doktorskiej. Omówiono w niej obszary zastosowań przemysłowych wyrobów tłoczonych oraz podano metody ich wytwarzania. Ponadto, szczegółowo scharakteryzowano analizowane materiały w zakresie ich własności, zastosowań oraz stosowanych obecnie metod kształtowania plastycznego.

W części drugiej (10 stron) skupiono się na modelowaniu numerycznym procesów na półgorąco, gdzie bliżej opisano model materiałowy, zjawiska kontaktowe oraz uwarunkowania związane z prowadzeniem obliczeń numerycznych z pełnym uwzględnieniem zjawisk cieplnych.

W części trzeciej (8 stron) sformułowano cele (naukowy i użyteczny) oraz tezę pracy. Wcześniej podano tutaj również zakres prac, które przedsięwzięto dla wykazania słuszności przyjętej tezy, co stanowi uzasadnienie podjęcia tematu.

Część czwarta (12 stron) poświęcona jest badaniom własności wybranej stali w warunkach kształtowania w różnych temperaturach. Przedstawiono tutaj wyniki badań z prób jednoosiowego rozciągania, chropowatości powierzchni oraz własności termofizycznych i współczynnika emisyjności. Należy podkreślić tutaj owocną współpracę z Wydziałem Blacharni Pratt & Whitney w Rzeszowie oraz Instytutem Metalurgii Żelaza w Gliwicach, gdzie korzystano z infrastruktury badawczej tych jednostek.

W części piątej (14 stron) przedstawiono rezultaty symulacji termicznej odbioru ciepła przez narzędzie oraz strat do otoczenia, w której zastosowano komercyjny pakiet oprogramowania eta/DynaForm 5.9.3. bazujący na metodzie

elementów skończonych (MES). Dalej przedstawiono rozkłady temperatur w wytłoczce, zmiany naprężeń zredukowanych oraz, co bardzo istotne, prognozowane pocienienie ścianki powstającego wyrobu. Modelując elementami także narzędzia biorące udział w procesie przedstawiono również zakładane zmiany temperatury ich powierzchni roboczych w wariantach z wymuszonym chłodzeniem oraz bez jego udziału. Ostatecznym efektem wykonanej analizy numerycznej było ustalenie zakresu parametrów procesu tłoczenia, przy których przebiegał on bez zakłóceń.

Część szósta (21 stron) poświęcona została weryfikacji doświadczalnej rozwiązań uzyskanych z symulacji numerycznych. Opisano tutaj sposób przygotowania próbek do badań oraz użyte stanowisko badawcze, w skład którego wchodziła prasa hydrauliczna, robot, zestawy narzędzi gwarantujące realizację opracowanych innowacyjnych procesów tłoczenia z blachy stalowej w gatunku 17-4PH oraz system grzewczy. W efekcie wykonanych prób doświadczalnych potwierdzono zarówno możliwość kształtowania opracowanym sposobem owiewki, jak i możliwość wystąpienia ograniczeń (zauważonych w symulacjach numerycznych). Dodatkowo, w części tej przedstawiono wyniki optycznej analizy wymiarowej niezbędnych do weryfikacji poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych i technologicznych. Raportowane w tej części pracy badania, podobnie jak wykonane symulacje numeryczne procesów tłoczenia blach stanowią znaczące osiągnięcia naukowe Doktoranta.

Część siódma (9 stron) dotyczy badań materiałowych uzyskanych wyrobów. W trakcie badań mikrostruktury stwierdzono, że jest ona bardzo niejednorodna, co należy wiązać ze zróżnicowanym przerobem plastycznym materiału oraz zmianami temperatury procesie, co wpłynęło na stany naprężeń i wydzielenia strukturalne. Bliższa analiza tych zjawisk jest istotna ze względu na przewidywane spektrum potencjalnych zastosowań proponowanej technologii w branży lotniczej i kosmicznej.

Część ósma (20 stron) zawiera analizę procesu kształtowania elementu obudowy łożyska torbowentylatorowego. Jest to szczególnie cenne, bo modyfikacja odbywa się w oparciu o nabytą wiedzę i doświadczenie Doktoranta.

W części dziewiątej (3 strony) zawarto podsumowanie pracy oraz zredagowano wnioski końcowe, które podzielono na poznawcze oraz praktyczne.

Bibliografia rozprawy zawiera 209 pozycji. Literatura cytowana w pracy jest aktualna, tylko 54 pozycje były opublikowane przed rokiem 2000. Na uwagę zasługuje także fakt, iż współautorem 16 publikacji cytowanych w rozprawie jest Doktorant.

### **Uwagi do pracy**

Rozprawa doktorska napisana jest językiem komunikatywnym oraz pozbawiona jest często występujących w pracach tego typu błędów o charakterze gramatycznym i interpunkcyjnym. Jednakże Autor nie ustrzegł się szeregu nieścisłości. Uwagi i zapytania, które nasunęły mi się w trakcie lektury rozprawy wyspecyfikowano poniżej.

- Pomimo doskonale przygotowanej strony edycyjnej rozprawy do niektórych jej elementów można zgłosić zastrzeżenia. Są to:
  - brak wykazu ważniejszych oznaczeń;
  - błędna numeracja spisu treści w części 8;
  - błędne stosowanie kropek zamiast przecinków oddzielających miejsca dziesiętne w wielu miejscach np. str. 19 w tekście 0.2, we wzorze na tej stronie 0,2, podobnie np. tabele 4.1 i 4.2;
  - pozostawianie opisów angielskich na rysunkach np. na rysunku 6.40;
  - jeśli analiza odbywa się na półgorąco (str. 81) to dlaczego później mamy zakresy analizowanych temperatur wyrobu 25-900°C – rys. 5.12-5.14;
  - stosowanie uproszczeń np. słowo „nominał” na str. 83
  - wprowadzenie w rozkładach temperatur dokładności do 4 miejsc po przecinku jest dyskusyjne
- W pracy w części 4.2 przedstawiono analizę chropowatości badanej blachy, której wyniki podano w tabeli 4.3 na str. 69. Czy uzyskane wyniki wykorzystano jakoś w prowadzonych badaniach, czy dane te mają tylko charakter informacyjny?
- Na str 83 podano, że w obliczeniach symulacyjnych stosowano współczynnik tarcia  $\mu=0,46$ . Jaki model tarcia stosowano w obliczeniach, jak przyjęto podaną wartość i czy zmiany temperatury nie mają wpływu na te parametry? Jak podana wartość ma się do informacji przedstawionej na str. 115 o stosowaniu smaru grafitowego Multigraph? W mojej ocenie przyjmowane wartości współczynnika tarcia powinny być znacznie mniejsze.

### Wniosek końcowy

Pomimo wyszczególnionych uprzednio, zresztą bardzo nielicznych uwag, biorąc pod uwagę prawidłowość wykonanych rozważań teoretycznych oraz badań eksperymentalnych uważam, że przedstawiona do recenzji praca stanowi wartościowy wkład do teorii i technologii procesów obróbki plastycznej metali.

Doktorant wykazał się dobrą orientacją w tematyce będącej przedmiotem dysertacji, przeanalizował problematykę procesu tłoczenia na półgorąco wyrobów z blach stalowych nierdzewnych, potrafił wyodrębnić istotne problemy naukowe oraz zastosować nowoczesne metody badawcze do ich rozwiązania. Stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Tomasza Malinowskiego pt.: *„Modelowanie numeryczne procesu tłoczenia na półgorąco elementu owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH”* spełnia wymogi określone w **Ustawie o stopniach i tytule naukowym** oraz wnioskuję o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

