

Dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 7 grudnia 2018

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sandry Puchlerskiej pt.: „Analiza procesu kształtowania obrotowego z nagrzewaniem blach ze stopów niklu typu Inconel”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą niniejszego opracowania jest pismo Pana prof. dr hab. inż. Tadeusza Knycha, Dziekana Wydziału Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, z dnia 13 listopada 2018 roku o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Puchlerskiej pt. „Analiza procesu kształtowania obrotowego z nagrzewaniem blach ze stopów niklu typu Inconel”. Recenzję wykonałem na podstawie otrzymanego egzemplarza pracy doktorskiej.

2. Przedmiot recenzji

Praca doktorska, napisana pod opieką naukową dr. hab. inż. Krzysztofa Żaby, prof. AGH, liczy 169 stron i obejmuje stronę tytułową, podziękowania, spis treści, streszczenie w językach polskim oraz angielskim, wprowadzenie oraz część zasadniczą, podsumowanie zawierające również wnioski końcowe oraz bibliografię. Część zasadniczą rozprawy podzielono na pięć głównych rozdziałów. Bibliografia obejmuje 145 pozycji, w tym 8 pozycji w języku polskim. Zdecydowana większość obcojęzycznych pozycji literaturowych napisana została w języku angielskim. Spośród zamieszczonych źródeł 50% z nich zostało opublikowanych po roku 2000. Kolejność rozdziałów pracy jest podporządkowana chronologii wykonywanych badań i nasuwających się problemów.

3. Ocena aktualności podjętej tematyki

Wzrost zapotrzebowania przemysłu lotniczego na elementy wykonane z żaroodpornych oraz żarowytrzymałych stopów trudnoodkształcalnych, których wytworzenie za pomocą klasycznych metod obróbki plastycznej na zimno jest ograniczone lub niekiedy niemożliwe, sprawił, że konieczne jest rozwijanie alternatywnych metod kształtowania w warunkach podwyższonej temperatury. W związku z rosnącymi wymaganiami jakościowymi elementów stosowanych w konstrukcjach nowoczesnych statków powietrznych konieczne jest stosowanie materiałów o coraz większej wytrzymałości cieplno-mechanicznej. Podstawowym materiałem stosowanym na elementy silników lotniczych, obok stali odpornej na korozję i stopów tytanu są stopy niklu, charakteryzujące się wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz żaroodpornością i żarowytrzymałością. Prawidłowy dobór parametrów procesu kształtowania stopów niklu decyduje o możliwości otrzymania wyrobu o żądanej dokładności wymiarowo-kształtowej. Problem ustalenia odpowiednich warunków procesu wytwarzania nabiera szczególnego znaczenia w przypadku formowania stopów niklu, które znajdują zastosowanie w odpowiedzialnych elementach silników lotniczych pracujących w skrajnie trudnych warunkach pracy. Na procesy tribologiczne zachodzące w strefie kontaktu materiału obrabianego z narzędziem wpływa wartość nacisków normalnych, gatunek formowanego materiału, topografia powierzchni blachy oraz narzędzia a także rodzaj środka smarującego.

Kształtowanie obrotowe jest jedną z podstawowych metod kształtowania elementów ze stopów niklu stosowanych w przemyśle lotniczym. O ile proces kształtowania obrotowego jest znany od wielu lat, o tyle ustalenie warunków realizacji tego procesu do kształtowania blach ze stopu niklu jest wyzwaniem dla technologa. Do typowych wad wytłoczek kształtowanych obrotowo w warunkach podwyższonej temperatury zalicza się fałdowanie kołnierza i części obwodowej, pęknięcia kołnierza oraz niekorzystne zmiany topografii powierzchni wytłoczki spowodowane nalepianiem się materiału obrabianego na powierzchni narzędzi. Jak trafnie spostrzegła Autorka brak jest w literaturze wytycznych do określenia optymalnych warunków procesu kształtowania obrotowego stopów niklu. W recenzowanej pracy Autorka wychodzi naprzeciw problemowi ustalenia optymalnych warunków kształtowania obrotowego stopu niklu Inconel 625 przedstawiając metodykę badawczą, opartą na metodologii planowania eksperymentu z wykorzystaniem narzędzi statystycznych, która może zostać uogólniona na analizę podobnych procesów kształtowania stopów niklu. **Uważam, że tematyka pracy jest wyjątkowo aktualna, a uzyskane wyniki charakteryzują się dużym znaczeniem naukowym i poznawczym. Problematykę badawczą podjętą przez Doktorantkę można uznać za wyjątkowo ważną i interesującą również z praktycznego punktu widzenia. Oryginalne badania zostały przeprowadzone w rzeczywistych warunkach przemysłowych, co potwierdza efekt aplikacyjny uzyskanych wyników badań.**

4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zaproponowanej w pracy tematyki badawczej. W rozdziale drugim przedstawiono wyniki analizy literaturowej zagadnienia

kształtowania obrotowego stopów niklu obejmującej charakterystykę procesu kształtowania obrotowego, mechanikę tego procesu, metody oceny jakości wyrobów a także zwiążą charakterystykę stopów niklu z uwzględnieniem ich obróbki cieplnej i zastosowania.

W rozdziale trzecim oraz czwartym przedstawiono odpowiednio tezę oraz zakres badań konieczny do weryfikacji postawionej tezy. Celem pracy, wynikającym z postawionej tezy, jest dobór warunków kształtowania osiowosymetrycznego wyrobu ze stopu Inconel 625 o zróżnicowanej grubości ścianki. Metodyka badań i analizy wyników przedstawiona w rozdziale piątym nie budzi moich zastrzeżeń. Do analizy wielkości ziaren w wybranych obszarach wylóczki Doktorantka opracowała autorski program do komputerowej analizy fotografii mikrostruktury stopu Inconel 625. Segmentację obrazu przeprowadzono za pomocą algorytmu detekcji działów wodnych. Badania eksperymentalne, których wyniki przedstawiono w rozdziale piątym, zrealizowano na urządzeniu Leifeld znajdującym się na wyposażeniu Pratt & Whitney Rzeszów. Podjęte próby kształtowania wylóczki na zimno nie zakończyły się powodzeniem, dlatego po ustaleniu optymalnej temperatury nagrzewania wsadu, Doktorantka przeprowadziła prawidłowo zaplanowane badania eksperymentalne z laserowym oraz indukcyjnym nagrzewaniem materiału blachy. Do kontroli kształtowo-wymiarowej wylóczek za pomocą zbioru wskaźników geometrycznych wykorzystano skaner optyczny Atos Core. Drugim etapem analizy wylóczek była analiza wzrokowa ich jakości według zaproponowanego systemu kategoryzowanych indykatorów jakości.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań materiałowych oraz badań mikrostruktury stopu Inconel 625. Zawarto w nim również wiele wniosków o charakterze poznawczym, związanych z przebiegiem procesu kształtowania składających się z trzech operacji: zgniatania obrotowego, wyoblania oraz wygładzania, a także występujących defektów. Wykorzystane metody statystycznej analizy i optymalizacji wielowymiarowej danych na podstawie warunkowych funkcji preferencji okazały się skutecznym narzędziem przy ocenie i weryfikacji jakości wylóczek kształtowanych obrotowo. Zawartość rozdziału szóstego pod względem użytej metodyki oceniam bardzo wysoko. Założenia do tworzenia modelu estymacyjnego zostały właściwie zdefiniowane, a sama aplikacja modeli świadczy o dużej wiedzy doktorantki w zakresie przeprowadzania analiz optymalizacyjnych.

Przedstawione w rozdziale siódmym podsumowanie oraz wnioski końcowe płynące z analizy opracowanej metodyki wielowariantowej optymalizacji procesu kształtowania obrotowego wylóczki ze stopu Inconel 625, **dowodzą słuszności postawionej tezy oraz osiągnięcia celów rozprawy.**

5. Uwagi merytoryczne

Generalnie praca napisana jest starannie, z małą ilością błędów. Szczegółowa analiza treści rozprawy ujawniła kilka niedociągnięć merytorycznych, z których najważniejsze to:

1. Str. 23. Określenie „[...] wytworzenie idealnego pola temperatury dla materiału” wymaga zdefiniowania.
2. Str. 23. Określenie „Sterowanie [...] temperatury w obiegu zamkniętym [...]” wymaga wyjaśnienia.

3. Dobór geometrii półwyrobu oraz parametrów tłoczenia jest krytycznym zadaniem w projektowaniu procesu formowania blach. Tymczasem Doktorantka lakonicznie stwierdza na stronie 84, że „Na podstawie symulacji numerycznych [...], określono geometrię półproduktu i wytypowano parametry tłoczenia”. Ze względu na wagę tych wyników należało w rozprawie, chociaż w ogólny sposób, zdefiniować model numeryczny (warunki brzegowe, geometria, model materiału, rodzaj elementów, itp.). Tym bardziej, że na tej samej stronie Doktorantka stwierdza, że również strategia formowania obrotowego została wyznaczona na podstawie „matematycznego modelowania z wykorzystaniem oprogramowania Impetus”. W końcu również „optymalny materiał i kształt rolki formującej” zostały, między innymi, określone za pomocą symulacji numerycznych (str. 107).
4. Str. 101. Zgodnie z informacją na stronie 77 statyczną próbę jednoosiowego rozciągania przeprowadzono według normy PN-EN ISO 6892-1. Parametr R_m będący naprężeniem odpowiadającym sile maksymalnej (według PN-EN ISO 6892-1) jest wytrzymałością na rozciąganie a nie "*granica wytrzymałości na rozciąganie*". Podobny problem występuje na stronie 81 oraz 151.
5. Rys. 6.2. Nie określono w jaki sposób rozciągano próbki pod różnymi kierunkami. Może chodzi o „Kierunek wycięcia próbek”? Formalna informacja o ilości powtórzeń pozwoliła by na określenie statystycznej istotności wyników prezentowanych na rysunkach 6.2 oraz 6.6. Jest to o tyle istotne, że wyniki zmian wartości wytrzymałości na rozciąganie R_m oraz wydłużenia A są praktycznie takie same dla wszystkich „kierunków rozciągania próbek”.
6. W rozdziale 6.2.2 szczegółowo określono cząstkowe znaczenie poszczególnych indyktorów w optymalizacji parametrów procesu kształtowania obrotowego, natomiast brak jest zestawienia optymalnych parametrów procesu kształtowania obrotowego badanego w pracy doktorskiej. Takie zestawienie pod zdaniem w Podsumowaniu: „*Rozległe badania [...] skutkowały wytypowaniem optymalnego sposobu wykonania elementów osiowosymetrycznych*” (str. 157) wpłynęło by na lepszą czytelność prezentowanych wyników.

Należy podkreślić, że wymienione uwagi merytoryczne nie podważają głównych osiągnięć Doktorantki oraz nie wpływają na moją wysoką ocenę recenzowanej rozprawy.

6. Uwagi redakcyjne

1. Str. 10. Nie jest czytelnie określone w jaki sposób „*zwiększona temperatura pracy przekłada się na zwiększenie ładowności, wzrost prędkości oraz większy zasięg*”. Wzrost temperatury prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa, ale na przykład zwiększając ładowność i jednocześnie prędkość niekoniecznie zwiększeniu ulegnie zasięg lotu.
2. Str. 14. Zdanie: „*Sprzęt do formowania obrotowego oparty jest na technologii tokarki [...]*” brzmi żargonowo.
3. Rozdział 2. Określenie „*siła narzędzia*” (np. str. 25, 26, 27) powinno być moim zdaniem zastąpione przez „*siła działająca na narzędzie*” lub „*siła oddziaływania narzędzia*”.
4. Str. 26. Co to jest „*związek drugiego rzędu*”?

5. Str. 28. W zdaniu "[...] styczna składowa siły [...] spada wraz ze wzrostem promienia rolki" powinno być „zmniejsza się ze wzrostem promienia rolki”.
6. Str. 29. „Współczynnik kształtowania obrotowego” wymaga zdefiniowania przy pierwszym wywołaniu w treści pracy. To samo dotyczy „współczynnika posuwu” na stronie 32.
7. Co to są „ujemne grubości” (str. 35)?
8. Str. 35. Określenie „[...] maksymalne naprężenie zredukowane w blasze, ma ten sam promień co rolka, [...]” jest niejasne,
9. Str. 38. Sformułowanie „[...] stężenie naprężeń rozciągających” jest niezręczne.
10. Str. 81. Sformułowanie „płaskich krążków” jest niefortunne. Czy krążek może nie być płaski?
11. Czy określenie „kategoryczne indykatory jakości” stosowane przez Autorkę w treści rozprawy nie powinno zostać zastąpione przez „kategoryzowane indykatory jakości”?
12. Rys. 6.6(b). Czy na osi rzędnych nie powinno być „Średnie pole powierzchni ziarna”? Uwaga ta dotyczy również opisu wyników badań zawartych w treści rozdziału 6.
13. Str. 105. Brak rysunku 16.4b.
14. Str. 154. Brak korelacji między danymi prezentowanymi na rysunku 6.28 oraz podpisem tego rysunku.

Inne zauważone drobne usterki o charakterze redakcyjnym nie mają istotnego wpływu na ocenę końcową rozprawy, dlatego też zostaną w recenzji pominięte.

7. Podsumowanie

Rozprawa doktorska jest napisana, poza kilkoma nielicznymi wyjątkami, bardzo poprawnym językiem. Sposób prezentowania wyników badań i ich omówienie świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu naukowym Doktorantki oraz bardzo dobrej znajomości zagadnień związanych z plastycznym kształtowaniem stopów niklu. **Za najważniejsze, oryginalne, osiągnięcia Doktorantki o charakterze poznawczym, naukowym oraz implementacyjnym należy uznać:**

- opracowanie założeń oraz przygotowanie modelu estymacyjnego parametrów kształtowania z wykorzystaniem metod statystycznych,
- analiza i optymalizacja wielowymiarowa danych eksperymentalnych na podstawie warunkowych funkcji preferencji,
- opracowanie oryginalnej autorskiej aplikacji do komputerowej analizy zdjęć mikrostruktury badanego stopu Inconel 625.

Pewne niedociągnięcia redakcyjne zawarte w treści pracy doktorskiej oraz przedstawione w recenzji zarzuty merytoryczne nie umniejszają istotnie wartości otrzymanych wyników i uważam, że wyniki badań będące przyczynkiem do napisania rozprawy charakteryzują się wysoką jakością naukową.

W związku z tym stwierdzam, że moim zdaniem praca doktorska Pani mgr inż. Sandry Puchlerskiej spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Prezident Tomasz

