

Warszawa, 15.12.2018

Dr hab. inż. Zbigniew Pakieła, prof. nzw. PW  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
ul. Wołoska 141  
02-507 Warszawa

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

**Tematyka pracy**

Tematyka recenzowanej pracy mieści się w obszarze zagadnień związanych z przeróbką plastyczną materiałów metalicznych metodami kształtowania obrotowego. Metody kształtowania obrotowego są stosowane w praktyce przemysłowej od wielu lat. W ostatnich latach obserwuje się tendencję rozszerzania zakresu zastosowania tych technik na materiały trudnoodkształcalne, do których należą m.in. nadstopy niklu. Wynika to głównie z uwarunkowań ekonomicznych, gdyż wdrożona z sukcesem technologia kształtowania obrotowego pozwala na uzyskanie znacznych oszczędności w porównaniu z tradycyjnie stosowanymi technikami wytwarzania, jak obróbka skrawaniem i łączenie części poprzez spawanie.

Geneza pracy jest związana prawdopodobnie z potrzebą techniczną przedsiębiorstwa Pratt & Whitney Rzeszów, zmodyfikowania technologii wytwarzania jednej z części silnika lotniczego. Autorka rozprawy wprawdzie nie artykułuje tego wprost, jednak takie przypuszczenie można wysnuć na podstawie faktu, że próby technologiczne były prowadzone w tym przedsiębiorstwie, a wybrany do badań wyrób nie jest modelową próbką badawczą, lecz elementem komory spalania silnika lotniczego, produkowanego przez to przedsiębiorstwo.

Oprócz walorów praktycznych, wyniki pracy mogą też mieć aspekty poznawcze, gdyż procesy formowania plastycznego stopów trudnoodkształcalnych są ciągle mało rozpoznane, a doniesienia literaturowe na ten temat są nieliczne. Dlatego podsumowując tę część recenzji, należy stwierdzić, że tematyka pracy została wybrana właściwie, a zagadnienia w niej poruszane mają aspekt praktyczny, a także wpisują się w nurt badań rozwijanych na świecie.

## **Ogólna charakterystyka i ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana praca została podzielona na 7 rozdziałów. W pierwszym rozdziale, zatytułowanym „Wprowadzenie”, Autorka wprowadza czytelnika w tematykę pracy oraz krótko uzasadnia podjęcie tej tematyki.

W drugim rozdziale, liczącym 60 stron, zatytułowanym „Analiza stanu zagadnienia”, przedstawiono przegląd zagadnień dotyczących charakterystyki i klasyfikacji procesów kształtowania obrotowego. Opisano tu również przykładowe, wybrane z literatury przedmiotu, próby kształtowania z nagrzewaniem blach. Wybrane do opisu przykłady dotyczyły stopu tytanu TiAl6V4, stali nierdzewnej, stali o wysokiej wytrzymałości oraz aluminium. Autorka nie precyzuje, jakich konkretnie stali dotyczyły omawiane prace. Szkoda, że w tej części pracy Autorka nie odniosła się do dostępnych w literaturze wyników badań nadstopów niklu, w tym stopu Inconel 625. Badania takie, z zastosowaniem nagrzewania laserowego, prowadzono np. w Instytucie Obróbki Plastycznej w Poznaniu, a ich wyniki są dostępne w literaturze.

W dalszej części analizy stanu zagadnienia przedstawiono wybrane wyniki badań opisanych w literaturze przedmiotu, dotyczące mechaniki procesu kształtowania obrotowego. Autorka cytuje tu wybranych autorów, którzy analizowali wpływ różnych parametrów procesu kształtowania obrotowego, takich jak średnica rolki formującej, prędkość posuwu rolki, prędkość obrotowa wzornika czy kształt ścieżki narzędzia, na przebieg procesu kształtowania, w tym na siły formujące. Przedstawione wyniki wskazują na to, że w cytowanych pracach uzyskiwano często sprzeczne wyniki, co potwierdza postawioną na wstępie tezę, że chociaż procesy formowania obrotowego są znane i stosowane w praktyce od lat, to ciągle wpływ różnych parametrów na ich przebieg jest słabo poznany.

W kolejnej części analizy stanu zagadnienia przedstawiono charakterystykę nadstopów niklu. Opisano skład chemiczny i fazowy wybranych gatunków tych stopów, zarówno przeznaczonych do przeróbki plastycznej jak i odlewniczych. Omówiono najważniejsze zagadnienia związane z obróbką cieplną wybranych stopów z tej grupy, a także wybrane zastosowania. W tej części pracy zabrakło natomiast choćby skrótowego omówienia problemów występujących przy przeróbce plastycznej nadstopów niklu, w świetle aktualnego stanu wiedzy. To omówienie byłoby znacznie bardziej przydatne dla celów pracy niż omówienie obróbek cieplnych, gdyż to zagadnienia przeróbki plastycznej a nie obróbki cieplnej stanowią temat rozprawy.

Kolejną część analizy stanu zagadnienia stanowi podrozdział zatytułowany: „Charakterystyka wybranych metod planowania eksperymentów, statystycznej analizy danych i optymalizacji. Autorka omawia w tej części wybrane metody planowania eksperymentów oraz

statystycznej analizie danych, argumentując to tym, że metody te szeroko wykorzystano w analizie uzyskanych wyników badań.

Ostatnią część analizy stanu zagadnienia stanowi jego podsumowanie. W tej części pracy Autorka dokonuje krytycznej analizy cytowanych wcześniej wyników badań różnych autorów. Stwierdza, że przeprowadzona analiza wykazała wiele luk w stanie wiedzy na temat mechaniki kształtowania obrotowego. Stwierdza też, że w przypadkach formowania elementów grubych oraz materiałów ulegających silnemu umocnieniu odkształceniowemu, konieczne jest formowanie na gorąco. Wskazuje też na braki w istniejących modelach teoretycznych procesu a także na niewystarczający opis zmian zachodzących w strukturze materiałów poddawanych kształtowaniu obrotowemu. Stwierdza również, że istnieje duży potencjał w statystycznych metodach analizy danych i potencjał może być wykorzystany do opisu procesu kształtowania obrotowego.

Słabością podsumowania analizy stanu zagadnienia jest brak odnośników do źródeł literaturowych, z których pochodzą dyskutowane zagadnienia. Źródła te są cytowane we wcześniejszych częściach analizy. Jednak taki układ pracy powoduje, że jest ona trudna w odbiorze dla czytelnika, gdyż przy lekturze podsumowania konieczne jest wracanie do wcześniejszych części pracy i odszukiwanie źródeł, z których mogą pochodzić dyskutowane wyniki.

W rozdziale trzecim Autorka przedstawiła tezę pracy. Tezę tę zdefiniowano następująco: „realizacja procesu kształtowania obrotowego, wspomaganego strefowym nagrzewaniem, umożliwi wytworzenie osiowosymetrycznego wyrobu o zróżnicowanej grubości ścianki z superstopu niklu Inconel 625, przeznaczonego na elementy komory spalania silnika odrzutowego”.

Rozdział czwarty zatytułowano „Cel i zakres pracy”. Stwierdzono w nim, że „celem pracy jest opracowanie technologii wytwarzania osiowosymetrycznych wyrobów, przeznaczonych dla przemysłu lotniczego, o zróżnicowanej grubości ścianki, z trudnoodkształcalnego superstopu niklu typu Inconel 625, z zastosowaniem kształtowania obrotowego, wspomaganego nagrzewaniem laserowym”. Cel pracy jest właściwie nieco innym sformułowaniem tezy pracy. Z tym, że doprecyzowano w nim, że nagrzewanie strefowe będzie realizowane za pomocą lasera. Mimo, że w tytule rozdziału czwartego znalazł się również zakres pracy, to zakres ten określono dopiero w rozdziale następnym, zatytułowanym „Metodyka badań i analizy wyników”. Zakres pracy obejmował następujące etapy:

- badania materiału wsadowego,
- dobór metody nagrzewania,
- dobór geometrii materiału wsadowego,

- projekt prób technologicznych,
- próby technologiczne,
- badania wyrobów po procesie kształtowania obrotowego,
- analiza wyników,
- walidacja wyników.

W dalszej części rozdziału 5 opisano metodykę badań. W przypadku badań materiału wsadowego były to badania składu chemicznego, próby rozciągania oraz badania rozkładu wielkości ziaren. W przypadku doboru metody nagrzewania analizowano dwie metody: nagrzewanie laserowe oraz nagrzewanie indukcyjne. Jednak po wstępnych próbach zrezygnowano z nagrzewania indukcyjnego, ze względu na trudności techniczne, jakie pojawiły się przy tych próbach. W ramach doboru temperatury formowania wybrano temperaturę 600 °C. Zdaniem recenzenta uzasadnienie doboru temperatury, która jest bardzo istotnym parametrem, jest zbyt zdawkowe. Autorka wyjaśnia, że nie wybrano wyższej temperatury, ze względu na ryzyko nadtapiania materiału. W dalszej części pracy okazało się, że przeprowadzono wstępne próby w dwóch temperaturach: 600 i 1000 °C. W temperaturze 1000 °C stwierdzono nadtapianie materiału. Ponieważ temperatura topnienia Inconelu 625 jest znacznie wyższa niż 1000 °C, należy wnioskować, że nieprawidłowo mierzono temperaturę procesu. Autorka stwierdza, że wybrana temperatura 600 °C jest optymalna. Stwierdzenie to jest jednak słabo uzasadnione, gdyż nie przeprowadzono procesu optymalizacji. W przypadku materiałów trudnoodkształcalnych konieczne jest nagrzewanie materiału, ze względu na jego silne umacnianie się w wyniku odkształcenia i sprężynowanie wyrobów. Temperatura musi być na tyle wysoka, aby pozwalała na wystarczające ograniczenie tego zjawiska, dzięki procesom zdrowienia i ew. rekrytalizacji dynamicznej. Z drugiej strony nie może być zbyt wysoka, gdyż powstające gradienty temperatury mogą prowadzić do powstawania naprężeń własnych i wypaczania się kształtowanego elementu, a w skrajnym przypadku do jego nadtapiania. Tak więc dobór temperatury powinien być poprzedzony głębszą analizą. Przykładowo w pracy Drengera i wsp. [T. Drenger i wsp., *Obróbka Plastyczna Metali* t. XXI nr 2 (2010), s.87-104] stwierdzono, na podstawie badań doświadczalnych, że optymalna temperatura dla kształtowania obrotowego Inconelu 625 z nagrzewaniem laserowym wynosi 950°C, a więc znacznie więcej niż 600 °C.

W ramach doboru geometrii materiału wsadowego, pierwsze próby podjęto dla krążka materiału. Jednak w wybranej temperaturze formowania (600 °C), proces formowania się nie powiódł. Zamiast podniesienia temperatury procesu, zrezygnowano z materiału wsadowego w formie krążka i zastosowano wstępnie uformowaną wytłoczkę, wykonaną na prasie hydraulicznej

o maksymalnej sile docisku ok. 980 kN (w pracy podano 100T) . Na etapie projektowania prób technologicznych wybrano 3 parametry, których wpływ na jakość wyrobów będzie analizowana. Są to: prędkość obrotowa wzornika, prędkość posuwu rolki oraz nagrzewanie lub brak nagrzewania materiału. Wybrano 5 prędkości obrotowych (w zakresie od 220 do 330 obr./min.) i 5 prędkości posuwu (w zakresie od 30 do 45 mm/min.) oraz jedną temperaturę nagrzewania (600°C).

Na etapie prób technologicznych, przeprowadzono 7 prób formowania wyrobu, z czego 5 w temperaturze pokojowej i 2 w temperaturze 600°C. Autorka pracy nie wyjaśnia dlaczego większość prób przeprowadzono w temperaturze pokojowej, chociaż w tezie i celu pracy stwierdzono, że zostanie zastosowany proces formowania wspomagany nagrzewaniem.

Na etapie badania wyrobów po próbach technologicznych badano precyzyjnie kształt i wymiary wyrobów, w tym odchyłki od kształtu wymaganego, oraz defekty wyrobów, takie jak pęknięcia i fałdowanie. Zbadano także gładkość powierzchni wyrobów oraz mikrostrukturę i właściwości mechaniczne materiału w różnych strefach wyrobu. Uzyskane wyniki poddano analizie, w tym z zastosowaniem zaawansowanych metod statystycznych.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań i ich analizę. Po przeprowadzonej analizie stwierdzono, że najlepszą jakość wyrobów, pod względem obecności defektów oraz jakości powierzchni uzyskano dla próby P3 (prędkość posuwu 45 mm/min., prędkość obrotowa 253 obr./min., nagrzewanie) oraz dla próby P6 (prędkość posuwu 20 mm/min., prędkość obrotowa 253 obr./min., brak nagrzewania). Z kolei analiza odchyłek kształtu wykazała, że najmniejsze odchyłki uzyskano dla próby P2 (prędkość posuwu 36 mm/min., prędkość obrotowa 330 obr./min., nagrzewanie) i ponownie P3 (prędkość posuwu 45 mm/min., prędkość obrotowa 253 obr./min., nagrzewanie). Pogłębione analizy statystyczne wpływu różnych czynników na jakość wyrobów oraz ich dokładność wymiarową pozwoliły Autorce na zbadanie wzajemnych relacji pomiędzy parametrami formowania. Pozwoliło to też na opracowanie zależności, umożliwiających prognozowanie wpływu poszczególnych parametrów na jakość wyrobów. Jednak dokładność tego prognozowania jest ograniczona, ze względu na małą liczbę przeprowadzonych prób technologicznych. Wraz ze zwiększeniem liczby prób będzie wzrastała dokładność opracowanych zależności. Ponieważ jednak próby technologiczne są kosztowne i długotrwałe, to zwiększenie liczby tych prób wykraczało poza zakres recenzowanej rozprawy.

Uzupełnieniem wyników badań były wyniki badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych materiału po formowaniu. Stwierdzono, że występuje zróżnicowanie mikrostruktury i właściwości materiału w różnych strefach wyrobu.

Rozdział 7 zatytułowano „podsumowanie i wnioski”.

W rozdziale tym Autorka podsumowała przeprowadzony program badawczy. Jako swoje główne osiągnięcie uznała wykorzystanie metody statystycznej analizy danych do projektowania, oceny i weryfikacji procesu kształtowania obrotowego. W tej części pracy nie wyodrębniono wniosków szczegółowych, co zwykle ma miejsce w rozprawach doktorskich. Takie wnioski można wprawdzie odszukać w przedstawionym podsumowaniu, jednak z punktu widzenia czytelnika pracy, korzystniejsze byłoby wyszczególnienie tych wniosków przez Autorkę.

Podsumowując tę część recenzji, recenzent zgadza się z Autorką, że w pracy przeprowadzono bardzo szerokie badania procesu kształtowania obrotowego nadstopu niklu Inconel 625 oraz uzyskano oryginalne i ciekawe wyniki badań. Przeprowadzone badania pozwoliły na udowodnienie tezy pracy i zrealizowanie celu pracy.

### **Ocena formalna pracy**

Praca liczy 168 stron. Jest podzielona na 7 rozdziałów. Ponadto w pracy zamieszczono spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury zawierający 145 pozycji. Praca jest napisana na ogół poprawnym i zrozumiałym językiem. Układ pracy jest jasny i przejrzysty. Wyniki badań są zilustrowane rysunkami i tabelami, które na ogół są jasno i zrozumiale opisane oraz konsekwentnie ponumerowane.

Mimo na ogół starannej redakcji pracy, doktorantka nie ustrzegła się pewnych niedociągnięć i nieścisłości. Niektóre sformułowania są użyte w pracy niezręcznie lub niewłaściwie, np.: nieprawidłowy jest termin „granica wytrzymałości na rozciąganie”, stosowany zamiast terminu „wytrzymałość na rozciąganie”. Niezręczne jest sformułowanie, że „sprzęt do formowania obrotowego oparty jest na technologii tokarki”. Niepoprawne jest sformułowanie „stężenie naprężeń” zamiast „koncentracja naprężeń” a także „naprężenia wewnętrzne”, zamiast „naprężenia własne” bądź „naprężenia szczątkowe”, gdyż wszystkie naprężenia są naprężeniami wewnętrznymi. Niepoprawne jest określenie „sieć o małej energii błędu ułożenia” zamiast „materiał o małej energii błędu ułożenia”, gdyż dla materiałów o tej samej strukturze krystalicznej (sieci), obserwuje się bardzo różne wartości energii błędu ułożenia. Stosowane w pracy określenie „indykatory” zamiast „wskaźniki”, a zwłaszcza „indykować” zamiast „wskazywać” jest kalką z języka angielskiego. O ile określenie „indykator” jest już dość często stosowane w języku polskim i można je zaakceptować, to określenie „indykować” jest niepoprawne. Określenia under-spinninig i over-spinning pojawiają się już na stronie 20 rozprawy, podczas gdy ich definicja została umieszczona dopiero na stronie 33. Tytuł podrozdziału 2.1.1.3 „Alternatywne konfiguracje procesu kształtowania obrotowego” nie oddaje właściwie jego zawartości, gdyż podrozdział ten dotyczy zagadnień formowania z nagrzewaniem formowanego elementu. Nagrzewanie

formowanych elementów, w przypadku materiałów trudnooodkształcalnych, stosuje się nie jako alternatywę dla procesów formowania na zimno, lecz z powodu braku możliwości formowania takich materiałów bez podgrzewania. Nie jest jasne, co Autorka ma na myśli pisząc „celem jest wytworzenie idealnego pola temperatury”, na stronie 23. Niejasne są również określenia „półfabrykat pozostaje praktycznie wolny od obciążenia termicznego” oraz „sterowanie generowanej przez laser temperatury w obiegu zamkniętym” na stronie 23. W podrozdziale 2.1.2 „Mechanika procesu kształtowania obrotowego” i podrozdziale 2.1.3 „Metody oceny jakości procesu kształtowania obrotowego i wyrobów” Autorka na ogół nie podaje jakich materiałów dotyczą przedstawiane przykłady. Nie jest jasne jakie ścieżki narzędzia minimalizują ryzyko fałdowania (str. 30). Nie wiadomo co Autorka ma na myśli pisząc „ujemne grubości” a także „maksymalne naprężenie zredukowane w blasze ma ten sam promień co rolka”, na str. 35. Niezręczne, choć zrozumiałe, są sformułowania „warunek niepowodzenia procesu” (str. 43), „zdolność modelu do przewidywania przyrostu materiału przed rolką” (str. 44) oraz „zdolność do pęknięcia ścianek półproduktu” (str. 47). Nie jest jasne, co Autorka ma na myśli pisząc o „związках chemicznych” w kontekście omawiania faz międzymetalicznych (str. 48). Niezręczne jest sformułowanie „superstopy niklu zawierają nawet 12 składników o priorytetowym znaczeniu dla ich struktury” (str. 50). Nie można się zgodzić ze stwierdzeniem, że „maksymalna szybkość korozji superstopów niklu przypada na stężenie chromu równe 40%” (str. 51). Nie jest jasne co Autorka ma na myśli pisząc, że Zr ma udział w tworzeniu granic ziaren (rys. 2.9 na str. 52). Na rys. 5.4 oraz w jego opisie w tekście (str. 80), odwrotnie oznaczono obszary wyoblania i zgniatania obrotowego. Nieprecyzyjne jest określenie, że „Inconel 625 jest stopem o układzie krystalograficznym RSC”. Określenia „indykatory kategorięczne” oraz „indykatory ciągle” (str. 92) nie zostały zdefiniowane. Skale na rysunkach umieszczonych w tabelach 6.6, 6.8, 6.10, 6.20, 6.22 i 6.24 są nieczytelne.

Spis literatury zawiera 145 pozycji. Z tego tylko 13 (nie licząc stron www), to pozycje z ostatnich 10 lat. Natomiast 41 prac to prace 40-letnie i starsze. Taki dobór cytowanych prac może wskazywać, że z jednej strony, tematyka pracy nie leży obecnie w centrum zainteresowania zbyt wielu ośrodków badawczych na świecie, a z drugiej na niezbyt wnikliwą analizę najnowszej literatury, przeprowadzoną przez Autorkę. W przypadku kilku prac nie podano daty wydania.

Wymienione potknięcia redakcyjne i błędy nomenklaturowe utrudniają lekturę pracy, nie mają jednak kluczowego wpływu na wartość merytoryczną pracy, która w ocenie recenzenta jest wysoka. Prawdopodobnie praca nie została poddana autokorekcie, co może wskazywać na pośpiech przy redagowaniu końcowej wersji pracy.

### **Wniosek końcowy**

Pani mgr inż. Sandra Puchlerska w przedłożonej rozprawie doktorskiej zrealizowała obszerny i ciekawy program badawczy. Uzyskane wyniki są oryginalne i zawierają elementy nowości.

Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych prac oraz to, że doktorantka wykazała się umiejętnością oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Sandry Puchlerskiej spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

*Ukradaw PolweR*