

## Wydział Metali Nieżelaznych

Dr hab. inż. **Wacław Muzykiewicz**  
Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa  
Metali Nieżelaznych

Kraków, 25. listopada 2016 r.

### RECENZJA

#### rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Dynera

pod tytułem „*Plastyczne kształtowanie tytanowych paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi*”

(wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 30. września 2016 r. – pismo: RM-530-05-03-2015)

#### 1. Odniesienie do tematyki rozprawy

Pan mgr inż. Marcin Dyer podjął w swojej pracy doktorskiej problem z obszaru przeróbki plastycznej blach tytanowych – szczególnie tym, że skoncentrowany na lokalnym kształtowaniu przetłoczeń usztywniających cienkościennych paneli. Ze względu na cechy badanego materiału i sam proces, jest to zagadnienie interesujące poznawczo, wykraczające poza standardową wiedzę z zakresu technologii tłoczenia blach.

Podstawą zainteresowania tytanem i jego zastosowaniami w nowoczesnej technice są jego właściwości fizykochemiczne. Tytan charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na korozję, względnie dobrą wytrzymałością i plastycznością oraz dobrą wytrzymałością w wysokich temperaturach. Tworząca się na powierzchni tytanu warstwa  $TiO_2$  powoduje bardzo dobrą odporność na korozję w temperaturze poniżej  $535^{\circ}C$ . Odporność korozyjna, a przede wszystkim wyjątkowa odporność na działanie wody morskiej, przesądziła o pierwszych technicznych zastosowaniach tytanu i jego stopów na dużą skalę w przemyśle chemicznym i stoczniowym, a odporność na działanie płynów ustrojowych i biogodność – w inżynierii biomedycznej. Znakomita wytrzymałość właściwa ( $R_m/\rho$ ) tytanu i jego stopów (znacznie wyższa niż w przypadku aluminium i jego stopów) czyni ten materiał szczególnie atrakcyjnym dla przemysłu lotniczego. Pozwala na stosowanie w konstrukcji samolotu elementów o mniejszych przekrojach, co pozwala na radykalne obniżenie całkowitej masy samolotu.

Kształtowanie wyrobów metalowych metodami przeróbki plastycznej na zimno skutkuje z reguły niższym kosztem wytwarzania i lepszymi ich właściwościami

użytkowymi (w szczególności wytrzymałościowymi), jest bardziej przyjazne dla środowiska w stosunku do odlewania, obróbki skrawaniem czy przeróbki plastycznej na gorąco.

Z tak nakreślonej perspektywy, recenzowana praca dobrze wpisuje się w interesujące i bardzo aktualne obszary badań poznawczych i aplikacyjnych nauk technicznych, tak pod względem doboru materiału do badań jak i zastosowanej technologii jego przetwarzania. Podjęta tematyka ma znamiona oryginalności, jest odpowiednia do przeprowadzenia badań na poziomie rozprawy doktorskiej. Praca została zrealizowana w ramach projektu pn. „*Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym*” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego).

## **2. Analiza i ocena pracy**

Przedłożona do oceny dysertacja została przygotowana w formie oprawionego dwustronnego wydruku komputerowego formatu A4 o objętości 150 stron. Struktura pracy nie odbiega od przyjętych standardów dla tego rodzaju opracowań. „Przegląd literatury” (rozdz. 1) obejmuje 20 stron (s. 8-27), zaś „Badania własne” (rozdz. 3) rozciągają się na 103 stronach (s. 32-134), co łącznie z „Tezą badawczą i celem rozprawy. Zakresem badań” (rozdz. 2, s. 28-31) stanowi ponad 70% objętości pracy. Część merytoryczną rozprawy otwiera krótki „Wstęp” (s. 6-7), kończy zaś „Podsumowanie pracy” (rozdz. 4, s. 135-136). Całość opracowania dopełnia „Literatura” (rozdz. 5, s. 137-146), „Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie” (s. 147-148) oraz jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim (s. 149 i 150). Autor nie zapomniał też o stosownych podziękowaniach i dedykacji pracy, poprzedzających „Spis treści”, którego to nagłówek zabrakło na str. 5.

Literatura źródłowa obejmuje 113 spisanych alfabetycznie pozycji, w tym 4 normy (poz. [85-88]) i materiały reklamowe (poz. [94]). Jest dość jednorodna, dobrze powiązana z tematyką pracy. *Na marginesie*, w poz. [7] i [8] jest podane to samo źródło, a w poz. [107] brakuje danych bibliograficznych, zaś alfabetyczne uporządkowanie spisu literatury prawdopodobnie Doktorantowi przysporzyło pracy, a czytającemu nie ułatwia bynajmniej śledzenia odniesień literaturowych.

Autor zamieścił w pracy 91 rysunków i 38 tabel, dokumentujących przeprowadzone badania i analizy, nie zamieszczając ich odrębnych wykazów. Cennym elementem pracy, ułatwiającym jej studiowanie, są odrębne podsumowania cząstkowe, zarówno przeglądu literatury jak i badań własnych (w formie wniosków z nich wynikających).

Przegląd literatury (rozd. 1) składa się z dwóch podrozdziałów tematycznych i podsumowania. W rozdz. 1.1, zatytułowanym „Materiały tytanowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Doktorant zamieścił na początku podstawowe informacje na temat metalurgii tytanu, w kontekście opisu poszukiwań metod generujących niższe koszty pozyskiwania technicznie czystego tytanu (*na marginesie*, niezbyt fortunne jest odniesienie określenia „pozyskiwanie” również do stopów). Scharakteryzował właściwości fizyczne i mechaniczne tytanu, opisał wpływ pierwiastków stopowych na mikrostrukturę i właściwości stopów tytanu, podał przykłady stopów tytanu, sklasyfikowanych w pięciu grupach w zależności od struktury fazowej, omówił wpływ pierwiastków stopowych na zmianę właściwości stopów tytanu oraz możliwości ich stosowania. W rozdz. 1.2 pt. „Technologiczne problemy kształtowania blach tytanowych” Doktorant odniósł się zarówno do problemów przeróbki plastycznej w podwyższonych temperaturach jak i do kształtowania blach na zimno w procesach cięcia i wykrawania, gięcia oraz tłoczenia. Czynniki wpływające na przebieg procesu kształtowania blach zostały szeroko omówione i przejrzysto zilustrowane na rys. 1.3, przy czym lepszy byłby w tym przypadku podpis: „Wybrane (lub ważniejsze) czynniki ...”, bowiem nie jest to zestawienie kompletne. Nie precyzyjne są też określenia niektórych parametrów. Przykładowo, jeśli nawet w intencji Autora, pominięta wśród parametrów materiałowych, mocno dostrzeżona w innych miejscach rozważań, anizotropia płaska (ze wskaźnikiem  $\Delta r$ ) jest reprezentowana przez wymieniony współczynnik anizotropii normalnej  $r$ , to wśród parametrów geometrycznych narzędzi (konieczna liczba mnoga) brakuje choćby ukształtowania i jakości powierzchni roboczych (kształtujących), zaś w zestawie parametrów technologicznych (brakujące określenie) procesu współczynnik tarcia  $\mu$  nie jest wystarczającym reprezentantem warunków kształtowania blachy, które mogą być na wiele sposobów i bardzo zróżnicowane. Właściwsze i bardziej reprezentatywne / uniwersalne jest też posługiwanie się naciskiem jednostkowym dociskacza niż siłą docisku. Pewno przez niedopatrzenie jest „luz pomiędzy matrycą a narzędziem”, zamiast stemplem (wszak matryca to też narzędzie). Brakuje w tym zestawieniu tak ważnych parametrów jak stopień odkształcenia materiału w procesie (np. współczynnik lub stopień wytłaczania) czy względna grubość wsadu (cienkościenność wyrobu). Na str. 23 Autor, rozważając wybrane problemy gięcia, stwierdza, iż wynikają one „z występowania naprężeń własnych, będących wynikiem niejednorodnego stanu odkształcenia (ściskanie i rozciąganie) w poszczególnych warstwach giętego elementu”, myśląc chyba – i słusznie – o stanie naprężenia, na co wskazują również określenia w nawiasie (w przypadku odkształcenia musiałyby być odpowiednio: skrócenie i wydłużenie). Podsumowanie przeglądu literatury (rozd. 1.3) Autor zamyka konkluzją, iż „w literaturze technicznej brak jest szczegółowych danych i wskazówek dotyczących

tłoczenia cienkich blach tytanowych, dlatego celowym wydaje się podjęcie badań, mających na celu wykazanie możliwości wytwarzania tytanowych paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi w procesie tłoczenia na zimno do zastosowań w przemyśle lotniczym” (jest to punkt piąty, z pomyłkowo powtórzonym numerem 4). W nawiązaniu zaś do p. 4, w części mówiącej o możliwości zwiększenia tłoczności blach tytanowych poprzez wykorzystanie niekonwencjonalnych technik tłoczenia, jak np. kształtowanie elementem sprężystym, pozwolę sobie polecić uwadze również własne artykuły (Muzykiewicz W., Rękas A., Major R., Major B., Kustosz R.: *Tłoczenie elementów komory sztucznego serca z blachy tytanowej*. Rudy Metale, R 51, nr 4, 2006, 212–218 i tych samych autorów: *Technology of the titanium deep drawing process of the semiproduct elements with complex shape for the heart support chamber*. Inżynieria Biomateriałów, R. VII, Nr 38-42, 2004, 71–73).

Konsekwencją takiej oceny stanu wiedzy na podjęty temat, opartej o dokonany przegląd literatury, jest sformułowanie tezy i celu pracy w rozdz. 2. Doktorant postawił następującą tezę: *„Zastosowanie odpowiednio zróżnicowanych warunków tarcia i smarowania na powierzchniach kontaktu między odkształcaną blachą i roboczymi powierzchniami narzędzi kształtujących oraz możliwie największej siły docisku pozwala na zminimalizowanie, a nawet całkowite wyeliminowanie deformacji blachy w płaskiej części cienkościennego panelu z przetłoczeniami usztywniającymi.”*. Jako główny cel pracy przyjęto *„analizę kształtowania paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi pod kątem uzyskania optymalnych parametrów kształtowania”*. Celem utylitarnym rozprawy było *„opracowanie wytycznych dla projektantów i technologów, dotyczących kształtowania paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi”*.

Nie wiem, czy Doktorant miał możliwość ingerencji w usytuowanie przetłoczeń (żeber) usztywniających w stosunku do krawędzi elementu osłonowego, przedstawionego na rys. 2.1 i w konsekwencji czy miał wpływ na wymiar badanej próbki blachy (panelu) oraz położenie przetłoczeń w próbce. Jeśli tak, to teza mogłaby być zmodyfikowana o poszukiwanie rozwiązania eliminującego (a przynajmniej minimalizującego) udział ciągnięcia w procesie kształtowania przetłoczenia jego odległością od krawędzi panelu (a docelowo: elementu osłonowego). Zgodne ze sztuką, kształtowanie przetłoczeń wyłącznie rozciąganiem (a przynajmniej z jak największym jego udziałem, wynikającym z samego rozmieszczenia żeber w panelu) dałoby szansę uzyskania pożądanego efektu przy niższej sile docisku (nacisku dociskacza). Wtedy optymalizacja tego parametru sprowadziłaby się, tak jak jest to w procesie wytłaczania czy przetłaczania, do poszukiwania wartości najniższej, zabezpieczającej przed wystąpieniem zjawisk niepożądanych (w tym przypadku: wyłącznie deformacji blachy w płaskiej części cienkościennego panelu, bo problem zmiany jego szerokości w wyniku ciągnięcia przestałby istnieć).

Przeprowadzone przez Pana mgra inż. Marcina Dynera w ramach dysertacji doktorskiej badania mają charakter analityczno-doświadczalny. Dla dowiedzenia tezy pracy i realizacji postawionego celu, Doktorant wykonał szeroki program analiz numerycznych i badań doświadczalnych. Czytelny schemat planu pracy przedstawił na rys. 2.3 (s. 31) w rozdz. 2, obejmującym również zakres badań. Ze schematu wynika jednakże, jakoby nie było sprzężenia zwrotnego pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i analiz numerycznych. Schemat nie wskazuje na doświadczalną weryfikację wyników obliczeń numerycznych, co faktycznie – przynajmniej w części – miało miejsce. Jest jedynie ich porównanie. I jest to być może bardziej schemat planu (jak w odwołaniu) niż realizacji pracy (jak w podpisie rysunku), bo wśród badań eksperymentalnych podano tłoczenie paneli z przetłoczeniami typu „krzyżak” (podobnie jak w opisie na str. 29), których w pracy nie ma (zgodnie z zapowiedzią ze str. 30), brakuje zaś informacji o wyznaczaniu modułu Younga, wskaźnika anizotropii płaskiej  $\Delta r$  i zmiany szerokości panelu w wyniku tłoczenia, które wyznaczano. Brakuje też badania odporności na działanie wysokich temperatur, choć – jak się domyślam – były to badania raczej o charakterze uzupełniającym, potwierdzającym przydatność badanych blach tytanowych po uformowaniu z nich paneli, do zastosowań na elementy osłonowe typu „firewall”.

Szerokie i bogato udokumentowane badania własne (rozdz. 3) obejmują wyznaczanie właściwości mechanicznych i technologicznych wybranych blach tytanowych (rozdz. 3.1), analizę numeryczną procesu tłoczenia paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi (rozdz. 3.2), częściową weryfikację doświadczalną wyników analizy numerycznej (rozdz. 3.3), badanie odporności ukształtowanych paneli na działanie wysokich temperatur (rozdz. 3.4), a zamykają je wnioski wynikające z badań własnych (rozdz. 3.5).

Do badań wybrano blachy z trzech gatunków tytanu technicznego: Grade 1, Grade 2 i Grade 3 o grubości 0,4 mm, trafnie z punktu widzenia ich potencjalnego przeznaczenia. Właściwości sprężyste i mechaniczne (moduł Younga, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie procentowe po rozerwaniu) oraz część technologicznych (współczynniki anizotropii plastycznej, parametry krzywej umocnienia) wyznaczono w statycznej próbie rozciągania, którą przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z050, w części badań z użyciem ekstensometru z bazą pomiarową 50 mm. Gięcie jednokątowe dla wyznaczenia kąta sprężynowania prawdopodobnie też prowadzono na maszynie wytrzymałościowej, zaś próby tłoczności blach przeprowadzono na aparacie Erichsena. Krzywe odkształceń granicznych wyznaczono metodą wytłaczania próbek o zróżnicowanej geometrii stemplem o stałym kształcie, przy wykorzystaniu systemu cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS (jest to system bezkontaktowego pomiaru odkształceń). Wyznaczone charakterystyki

mechaniczne i częściowo technologiczne wykorzystano w analizach numerycznych procesu kształtowania paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi – dwoma równoległymi i typu „krzyżak”. Do symulacji numerycznych wykorzystano specjalistyczny program PAM-STAMP 2G. Narzędzia zamodelowano w programie Catia v5. Wyznaczono rozkłady grubości ścianki panelu, rozkłady odkształceń plastycznych w wytłoczkach, zmniejszenie szerokości panelu, a także określono numerycznie wartość sprężynowania dla różnych warunków smarowania i różnych sił docisku. W przypadku paneli z dwoma przetłoczeniami zastosowano trzy konfiguracje współczynników tarcia:  $\mu=0,1$  lub  $\mu=0,4$  (tarcie technicznie suche) na wszystkich powierzchniach kontaktu oraz zróżnicowane tarcie blachy o narzędzia (smarowanie tylko na powierzchni kontaktu ze stemplem / $\mu=0,1$ /), przy czterech wartościach siły docisku: 100, 200, 400 i 600 kN. Symulacje tłoczenia paneli z przetłoczeniami typu „krzyżak” przeprowadzono tylko w warunkach tarcia technicznie suchego ( $\mu=0,4$ ) dla czterech sił docisku: 600, 800, 1000 i 1200 kN. Próby tłoczenia paneli cienkościennych z dwoma żebrami usztywniającymi przeprowadzono na narzędziach zaprojektowanych w oparciu o wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych. Tłoczenie przeprowadzono dla wszystkich gatunków blach – w warunkach tarcia technicznie suchego, z największą siłą docisku 600 kN (tej informacji wprost brakuje w opisie eksperymentu), a sprężynowanie paneli po tłoczeniu oszacowano pośrednio przy pomocy systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS. W próbie ogniowej wytłoczonych paneli poddano je oddziaływaniu otwartego ognia z palnika acetylenowo-tlenowego przez 15 i 30 minut. Pomiar temperatury kamerą termowizyjną umożliwił określenie jej rozkładu na powierzchni całego panelu. Dokonano też bezpośredniego pomiaru temperatury w wybranych punktach panelu za pomocą termopar.

Syntetyczne podsumowanie badań własnych zawarto we „Wnioskach wynikających z badań własnych” (rozdz. 3.5). Najważniejsze z nich sprowadzają się do oceny badanych materiałów (rozwinęty p. 1), interpretacji wyników symulacji numerycznych, które w wymiarze jakościowym należy traktować jako potwierdzenie zjawisk i rezultatów spodziewanych – tak w odniesieniu do roli w procesie tłoczenia nacisku dociskacza jak i warunków tarcia na powierzchniach kontaktu narzędzi kształtujących z odkształcaną blachą (rozwinęty p. 2) i – co ważne – wskazują na dużą zbieżność wartości sprężynowania określonych doświadczalnie z wynikami symulacji numerycznych (p. 3). Zinterpretowano też różnice w rozkładzie sprężynowania paneli z symulacji i badań doświadczalnych (p. 4) oraz potwierdzono przydatność badanych blach (wytworzonych paneli) na elementy osłonowe typu „firewall” (p. 5).

Wyniki badań materiałowych i eksperymenty tłoczenia wskazują na blachę Grade 1 jako materiał cechujący się najlepszym zestawem właściwości z punktu widzenia prowadzonych badań, zdecydowanie najmniej przydatna z tej perspektywy jest

blacha Grade 3, choć Doktorant tak jednoznacznej oceny badanych materiałów nie dokonał. Rozbudowane badania materiałowe (w ślad za tym i omawiane wnioski) miejscami wykraczają poza konieczny z punktu widzenia tematu pracy zakres. Dotyczy to zwłaszcza rozbudowanej interpretacji (nie tylko we wnioskach) wpływu wartości wskaźnika anizotropii płaskiej  $\Delta_r$ , która jest poprawna, ale odnosi się w zasadzie do głębokiego ciągnięcia blach (wytlaczania, przetłaczania), które w tym przypadku nie ma miejsca. Wniosek odnoszący się do wartości współczynnika anizotropii normalnej należy z kolei uzupełnić uwagą, że jego wysoka wartość powoduje też wzrost siły kształtowania blachy w stanie dwuosiowego rozciągania, który powinien być dominujący w procesie kształtowania przetłoczeń usztywniających.

W odniesieniu do „Podsumowania pracy” (rozdz. 4), po wcześniejszym skomentowaniu odrębnych podsumowań przeglądu literatury i wniosków z badań własnych, wystarczającym będzie zgodzenie się ze stwierdzeniem Doktoranta, iż postawiona teza naukowa pracy została potwierdzona wynikami badań, a założony cel pracy został osiągnięty. Cel użyteczny rozprawy: opracowanie wytycznych dla projektantów i technologów, dotyczących kształtowania paneli cienkościennych z przetłoczeniami usztywniającymi – w wymiarze wskazań kierunkowych – też można uznać za osiągnięty. Rozwiązania szczegółowe wymagałyby konkretyzacji zaleceń technologicznych, wiążącej się z koniecznością dalszych analiz i badań, wykraczających poza obszar ocenianej rozprawy doktorskiej.

W wyniku przeprowadzonej analizy części badawczej pracy rodzą się następujące uwagi i komentarze, w kilku kwestiach pytania.

W oparciu o statyczną próbę rozciągania wyznaczono szeroki zestaw parametrów, umożliwiających kompleksową ocenę podstawowych właściwości badanych blach (rozdz. 3.1.1 i 3.1.2). Niestety, w opisie wyników pomyłono numery tabel (przesunięcie o jeden w odwołaniach – błąd ten ciągnie się aż do tab. 3.15, przedstawiającej wyniki próby Erichsena) i gatunki materiału (podano Grade 2-4 zamiast Grade 1-3). Sam opis wyników, zamieszczonych w tabelach 3.2 - 3.4, też jest obciążony błędami i niekonsekwencjami (podano w tekście złe wartości wykładników umocnienia, analizy poszczególnych parametrów są niejednorodne – porównywane są wartości średnie dla kierunków, w innym przypadku wartości z pojedynczych pomiarów, niektóre wielkości z tabel zostały pominięte w omówieniu). Analiza właściwości blach byłaby o wiele bardziej czytelna, gdyby sporządzono wykresy biegunowe rozkładów dyskutowanych wielkości w płaszczyźnie blachy, tak jak to uczyniono w przypadku współczynników anizotropii. Dane w tab. 3.14 i wykresy z rys. 3.6 bardzo czytelnie przedstawiają końcowe wyniki badania anizotropii właściwości plastycznych blach. W tablicach 3.2 - 3.4 brakuje wartości średnich dla blachy parametrów, branych do obliczeń

numerycznych. Z kolei, w tablicach cząstkowych z wynikami pomiarów anizotropii (tab. 3.5 - 3.13) nie zamieszczono wartości średnich ze średnich (tak jak to zrobiono w przypadku kąta sprężynowania), które znalazły się w tab. 3.14 i na podstawie których wyliczono wartości współczynników anizotropii normalnej i wskaźników anizotropii płaskiej dla poszczególnych blach. W miejsce nadmiernie rozbudowanych informacji ogólnych lub nie związanych wprost z badaną problematyką (jak wpływ wartości  $\Delta r$  na jakość wytłoczki przy ciągnięciu), pożądane byłoby zamieszczenie podstawowych informacji na temat procedury wyznaczania wartości  $r$ , zastosowanej w pracy.

Próbę tłochności Erichsena (rozdz. 3.1.3) bardzo trafnie wytypowano do określenia właściwości technologicznych blach, przeznaczonych do kształtowania przez rozciąganie dwuosiowe. Próba ta dobrze symuluje procesy wybrzuszenia, obciągania na sztywnym stemplu. Potwierdzają to wyniki, zamieszczone w tab. 3.15, w zderzeniu z końcową oceną podatności badanych blach do kształtowania paneli z przetłoczeniami (z wynikami symulacji numerycznych i rzeczywistego procesu tłoczenia). Jak wynika z opisu tego badania, próby przeprowadzono z wykorzystaniem stempla o średnicy kulistego czoła (pomyłkowo podano: promienia) 20 mm. W przypadku blach o grubości 0,4 mm i próbek o boku kwadratu 55 mm właściwsze byłoby użycie zestawu narzędzi ze stemplem o średnicy 15 lub 8 mm (i określenie wskaźnika Erichsena  $IE_{21}$  lub  $IE_{11}$ ). Przypuszczam jednak, że uzyskano by jakościowo podobne wyniki.

Przy wyznaczaniu krzywych odkształceń granicznych (KOG) Doktorant bardzo dobrze poradził sobie z trudnościami, związanymi z badaniem cienkich blach tytanowych, stosując bardzo interesujące rozwiązanie – odpowiednio modyfikując kształt i wymiar próbek, odkształcając je na odpowiednio dobranym tłoczniku, odpowiednio modyfikując warunki tarcia pomiędzy stemplem i odkształcaną blachą i stosując nowoczesny system bezkontaktowego pomiaru odkształceń. Pytanie z tym związane: jakiej wartości nacisk pierścienia dociskowego zabezpieczał próbki przed wysuwaniem się części kołnierzowej spod dociskacza, wszak odkształcano je ze współczynnikiem wytłaczania niewiele niższym od 0,5, przy braku progu ciągowego? Na marginesie, rys. 3.11 nie przedstawia „widoku tłoczника”, tylko same narzędzia kształtujące (matrycę, pierścień dociskowy i stempel). Wyniki pomiarów / wyznaczania KOG zostały bardzo ładnie udokumentowane i czytelnie przedstawione. Należało też zamieścić fotografię przykładowej próbki (lub zestawu próbek) przed i po badaniu. Na wykresach (nieco spłaszczonych wzdłuż osi rzędnych) brakuje trochę punktów pomiarowych (zwłaszcza w przypadku blach Grade 1 i Grade 2) w obszarze płaskiego stanu odkształcenia (dla  $\epsilon_2 \cong 0$ ), ale to nie rzutuje, jak się wydaje, w sposób istotny na miarodajność prognozowanych odkształceń granicznych w tym obszarze. Pytanie z tym związane: czy celowe byłoby wprowadzenie dodatkowej próbki(-ek) z wycięciem o promieniu  $R$  poniżej 5 mm (czy brano to pod uwagę)?



Określenie kąta sprężynowania na etapie projektowania procesu gięcia, czy innego procesu tłoczenia z dużym prawdopodobieństwem wystąpienia tego zjawiska w wyrobie, jest bardzo ważne z punktu widzenia jakości wyrobu (dokładności kształtu). Szczególnie w odniesieniu do materiałów z wysoką skłonnością do sprężynowania, jak w przypadku badanych blach tytanowych. Skłaniają do głębszej interpretacji uzyskane wartości dla blachy Grade 2 na tle wyników innych badań (rys. 3.25). Mały wpływ siły gięcia (w badanym zakresie) świadczyć może o zaawansowanej fazie dotłaczania już przy sile o najniższej wartości (10 kN). W tym kontekście, interesujący byłby komentarz na temat przesłanek doboru wartości sił gięcia w tym badaniu.

Kluczowa część badań z perspektywy tematu pracy zaczyna się od rozdz. 3.2. Wydaje się, iż największą wartością przeprowadzonych analiz numerycznych jest to, że – w wymiarze jakościowym – potwierdziły dające się przewidzieć w oparciu o znajomość mechaniki procesu prawidłowości ogólne, z drugiej zaś strony – co bardzo ważne – pokazały wpływ gatunku materiału na przebieg procesu i uzyskiwane rezultaty (już nie zawsze dające się przewidzieć). Najważniejszy wniosek z symulacji tłoczenia paneli z dwoma przetłoczeniami zawarto w zdaniu końcowym rozdz. 3.2.1 (s. 110) stwierdzając, iż z uwagi na fakt, że w praktyce trudno jest zapewnić smarowanie w małych obszarach przetłoczeń usztywniających można przyjąć, że wystarczające dla analizowanych paneli będzie zapewnienie tarcia technicznie suchego na wszystkich powierzchniach kontaktu – tak, by kształtowanie przetłoczeń usztywniających odbywało się tylko poprzez rozciąganie, co w konsekwencji będzie zapobiegało odkształcaniu się i wyginaniu paneli, ułatwi ich montaż i ograniczy efekty dźwiękowe towarzyszące deformacjom paneli cienkościennych. Potwierdzają to wyniki, zestawione w tab. 3.33, będącej podsumowaniem analiz numerycznych dla tego wariantu procesu oraz na ważnych, podsumowujących wykresach na rys. 3.58 i 3.59. Na rys. 3.58, ilustrującym wartości zmniejszenia szerokości paneli powstających w wyniku procesu kształtowania przetłoczeń usztywniających ze skrajnymi siłami docisku (100 i 600 kN), w podpisie wkraść się błąd w podane wartości siły (jest 400 zamiast 600 kN). Na rys. 3.59 z kolei, ilustrującym sprężynowanie po odciążeniu paneli, błędny jest opis osi rzędnych (powtórzony jest opis z poprzedniego rysunku). *Pytanie:* dlaczego dla przypadku smarowania na wszystkich powierzchniach kontaktu większe sprężynowanie jest przy wyższej sile docisku, zaś rosnący docisk przy tarcu dużo wyższym spowodował spadek sprężynowania, jak należy interpretować tę prawidłowość? Interesująca jest też rosnąca symetria obszarów sprężynowania w miarę eliminacji ciągnięcia przy kształtowaniu przetłoczeń (tłoczenie tytanu Grade 1 według konfiguracji 2 i 3 – rys. 3.36 i 3.39). Brak tak wyraźnej zależności w przypadku pozostałych blach silnie świadczy o wpływie gatunku materiału na proces.

Słusznie w oparciu o wyniki symulacji kształtowania panelu z dwoma przetłoczeniami zdecydowano o przeprowadzeniu analiz numerycznych panelu z przetłoczeniami usztywniającymi typu „krzyżak” tylko w warunkach tarcia technicznie suchego. Rodzi się jednak *pytanie*: co zdecydowało o wyborze zakresu (wartości) sił docisku w tym przypadku (600, 800, 1000 i 1200 kN)? Wyniki dla blach z tytanu Grade 1 i Grade 2 (tab. 3.34 i 3.35) wskazują na bardzo mały wpływ tego parametru (przy dwukrotnym jego wzroście z 600 do 1200 kN) na sprężynowanie wyrobu (dla Grade 3 /tab. 3.36/ wyniki są w tym przypadku wyjątkowo zaskakujące). Pytanie, w zasadzie retoryczne, o to, czy w praktyce wzrost siły docisku może być kierunkiem poszukiwań optymalizacji tego procesu?

Uwaga na koniec: właściwsze, o wiele bardziej uniwersalne jest posługiwanie się wartościami nacisków jednostkowych dociskacza.

Obowiązkiem recenzenta jest też zwrócenie uwagi na kwestie szczegółowe, wymagające uwzględnienia choćby przy publikacji wyników pracy, czy też w dalszej działalności naukowo-badawczej Doktoranta. Pominę przy tym niedociągnięcia na poziomie subtelności redakcyjnych czy edytorskich (niepoprawności interpunkcyjne, tzw. literówki, sporadyczne odstępstwa od formy bezosobowej redakcji pracy czy powtórzenia wyrazów, nieprzestrzeganie poprawnego zapisu indeksów w symbolu umownej granicy plastyczności itp.), nie będę przytaczał przykładów. Zwrócenia uwagi wymagają jednak ważniejsze niepoprawności bądź nieścisłości terminologiczne w zakresie używanych w pracy pojęć z zakresu przeróbki plastycznej metali, niekiedy tylko brak konsekwencji w ich używaniu:

1.  $R_m$  to wytrzymałość na rozciąganie (nie: „granica wytrzymałości na rozciąganie”)
2. Stała materiałowa  $K$  we wzorze opisującym krzywą umocnienia zgodnie z prawem Hollomona ( $\sigma=Ke^n$ ) ma, według normy, swoją nazwę: współczynnik wytrzymałości.
3. Niekonsekwencja w nazewnictwie współczynnika Lankforda – współczynnika anizotropii normalnej (dla kierunku, zgodnie z normą, plastycznej); w pracy pojawia się określenie „współczynnik anizotropii właściwości plastycznych”.  
*Przy okazji*: w recenzji świadomie używam dla wielkości  $\Delta r$  określenia wskaźnik anizotropii płaskiej (nie współczynnik, jak podaje norma); współczynnikiem jest wielkość pierwotna  $r$ , na podstawie której (z wartości wyznaczonych dla różnych kierunków w płaszczyźnie blachy) wyliczana jest wartość  $\Delta r$ .
4. „Sprężynowanie powrotne” (w konsekwencji też „kął sprężynowania powrotnego”) – jest czymś w rodzaju tzw. kalki językowej angielskiego „spring-back”. W polskiej terminologii technicznej jest po prostu sprężynowanie, albo sprężyste odkształcenie powrotne (i konsekwentnie: kął

- sprężynowania). Sugeruję też (w ewentualnych publikacjach) kątowni sprężynowania przypisać określony symbol, np.  $\beta$  ( $\Delta\alpha$  oznacza różnicę kątów).
5. Określenie „gięcie na V” (nawiązujące, co prawda, do określenia z normy pt. „Metale - Próba zginania”: urządzenie do zginania w matrycy-V; używane jest też określenie dla tłoczników do gięcia na prasach: wyginaki typu V) sugerowałbym zastąpić określeniem: gięcie jednokątowe lub wyginanie.
  6. Sugeruję też zwracanie większej uwagi na poprawność używanych określeń: ciężar – masa (np. konstrukcji), wielkość – wartość (np. siły), mniejsze/większe – niższe/wyższe (np. wartości jakiejś wielkości) itp.; nie należy też nadużywać pojęcia „geometria”.

Pragnę jednak wyraźnie podkreślić, że wymienione wyżej niedoskonałości nie rzutują w sposób znaczący na wartość merytoryczną ocenianej pracy. Proszę te uwagi, niektóre może polemiczne, przyjąć jako życzliwe sugestie do uwzględnienia w przyszłości.

Podsumowując, przedłożoną do recenzji pracę oceniam pozytywnie. Zadania badawcze, konieczne dla udowodnienia postawionej tezy, Doktorant zrealizował, a wyniki badań zostały obszernie zilustrowane. Są interesujące poznawczo i mają wartość aplikacyjną. Stanowią cenną bazę informacji zarówno dla lepszego zrozumienia procesu kształtowania tego typu paneli jak i dla dalszych, celowych badań aplikacyjnych technologii ich wytwarzania.

### 3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Marcina Dynera stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej opracowanie wymagało od Kandydata do stopnia doktora ogólnej wiedzy teoretycznej w zakresie specjalności przeróbka plastyczna, sytuującej się w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, a także umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności badań z wykorzystaniem zaawansowanej aparatury badawczo-pomiarowej i narzędzi obliczeniowych. Uważam w związku z powyższym, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595). **Wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie mgra inż. Marcina Dynera do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.**

*Wacław Muzykiewicz*