

Wydział Metali Nieżelaznych

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

Kraków, 17. lipca 2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Tomasza Malinowskiego**

pod tytułem „*Modelowanie numeryczne procesu tłoczenia na półgorąco elementu
owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH*”

(wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej
z dnia 18. maja 2018 r. – pismo: RM-530-02-03-2018)

1. Odniesienie do tematyki rozprawy

Pan mgr inż. Tomasz Malinowski podjął w swojej pracy doktorskiej problem z obszaru przeróbki plastycznej metali – zajął się technologią kształtowania elementu owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH. Użyty do badań materiał (blacha z wysokowytrzymałej, umacnianej wydzieleniowo, trudnoodkształcalnej stali, odpornej na korozję w wysokich temperaturach) jak również zastosowana technologia kształtowania (tłoczenie na półgorąco) wynika ze współczesnego synergicznego rozwoju konstrukcji nowoczesnych turbowentylatorowych silników lotniczych, nakierowanego na poprawę osiągnięć i rozwiązania proekologiczne (obniżenie poziomu emisji zanieczyszczeń i hałasu oraz zmniejszenie zużycia paliwa, warunkowane obniżeniem masy konstrukcji), przy zachowaniu wymaganych standardów bezpieczeństwa i redukcji kosztów wytwarzania. Owiewka kadłuba pośredniego silnika jest silnie obciążonym elementem nośnym konstrukcji, a ze względu na późniejszy zautomatyzowany montaż i spawanie, podlega wysokim wymaganiom tolerancji wymiarowo-kształtowej. Zadaniem owiewek jest ukierunkowanie strugi powietrza na turbinę wysokiego ciśnienia oraz zapewnienie odpowiedniego przepływu powietrza chłodzącego zespoły silnika. Jest to więc dobrze wybrany obiekt badań, reprezentatywny dla rozwiązania problemów, towarzyszących procesowi wytwarzania wytłoczek z blachy 17-4PH na odpowiedzialne elementy konstrukcji silnika lotniczego.

Stosowanie tego rodzaju materiałów generuje wiele problemów technologicznych w procesie wytwarzania z nich wyrobów o złożonych kształtach drogą przeróbki plastycznej, stanowiących najczęściej – tak jak i w tym przypadku – podzespoły większych konstrukcji o wysokiej tolerancji wykonania. Należą do nich trudności w uzyskaniu wymaganych kształtów i wymiarów, brak ich powtarzalności w wąskim polu tolerancji, występujące z nasileniem ograniczenia typowe dla procesów tłoczenia cienkościennych półwyrobów z blach w postaci pęknięć i faldowania, a w procesach



kształtowania na gorąco – możliwe utlenienie warstwy wierzchniej oraz jej zubożenie w pierwiastki stopowe.

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza ma zatem, obok podstawowego w tym przypadku dużego znaczenia aplikacyjnego, znaczący walor poznawczy, mieści się w nurcie współcześnie ważnych zagadnień praktyki produkcyjnej z obszaru zaawansowanych materiałów i technologii. Można powiedzieć, że praca ma charakter doktoratu wdrożeniowego. Została zrealizowana w ramach projektu badawczego REFOR pt. „*Opracowanie i wdrożenie technologii kształtowania plastycznego z nagrzewaniem oporowym elementów silników lotniczych z trudnoodkształcalnych nadstopów niklu i żelaza*”, realizowanego przez Pratt & Whitney Rzeszów, gdzie Doktorant jest zatrudniony, we współpracy z wieloma ośrodkami badawczymi.

2. Analiza i ocena pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska została przygotowana w formie zwartego wydruku komputerowego formatu A4 o objętości 166 stron. Struktura pracy nie odbiega od przyjętych standardów dla tego rodzaju opracowań. Po krótkim „Wprowadzeniu” (s. 5-6), następują rozdziały merytoryczne pracy (rozd. 1-8), zwieńczone „Podsumowaniem i wnioskami” (rozd. 9, s. 153-155). Całość opracowania dopełnia „Literatura” (rozd. 10, s. 156-164) – 209 pozycji, dobrze powiązanych z tematyką rozprawy (obok bardzo aktualnych publikacji, wiele pozycji źródłowych dla poszczególnych zagadnień) oraz streszczenia – w języku polskim (s. 165) i angielskim (s. 166). Doktorant jest współautorem 16 cytowanych publikacji, w tym w 8 przypadkach pierwszym. Autor zamieścił w pracy 182 rysunki, obszernie dokumentujące przeprowadzone badania i analizy oraz 13 tabel, przy czym rys. 2.1 ma omyłkowo numer 2.21 (s. 46), w rozdziale 8 pominięto dwa kolejne numery rysunków (8.10 i 8.11), zaś w rozdziale 4 dwie pierwsze tabele mają ten sam numer (4.1). Autor nie zamieścił spisów rysunków i tabel oraz wykazu oznaczeń, co bywa przydatne podczas analizy pracy.

Dwa pierwsze rozdziały to studia literaturowe. W rozdziale 1 (s. 7-42) Doktorant omówił wybrane zagadnienia z obszaru kształtowania blach, dobrze korespondujące z problematyką badań, podjętych w pracy – w tym: zjawiska towarzyszące przeróbce plastycznej na półgorąco, metody nagrzewania wsadu, zjawisko sprężynowania, problematykę odkształcalności granicznej blach oraz wpływu tarcia na przebieg procesu wytłaczania i zużycie narzędzi. Wykazał przy tym umiejętność selekcji zagadnień i przedstawiania ich w sposób syntetyczny. Mimo, iż spektrum podjętych zagadnień jest dość szerokie, to tytuł rozdziału wydaje się jednak zbyt ogólny (wszak omówiono jedynie wybrane zagadnienia). Niefortunne jest też zatytułowanie jednego z sześciu podrozdziałów (rozd. 1.2) tytułem rozdziału. Procesów kształtowania blach jest o wiele więcej niż omówione w tym rozdziale (1.2) wytłaczanie, z niewielkim nawiązaniem w ostatnim akapicie do przetłaczania. Ważniejsze uwagi i pytania, wynikające z lektury tej części pracy:

- jak Autor interpretuje zaproponowany podział metod kształtowania wylotek o powierzchni nierozwijalnej (s. 12) na dwie grupy (przez *ciągnięcie* i przez *rozciąganie*), sytuując wytłaczanie i przetłaczanie (podstawowe procesy ciągnięcia blach!), ale również przewijanie i wyciąganie, w grupie procesów kształtowania przez rozciąganie?
- stosunek średnicy krążka do średnicy wylotki (~ średnicy stempla) to *stopień wytłaczania*; pojęcie *współczynnika wytłaczania* (użyte w podpisie rys. 1.10) jest zarezerwowane dla wskaźnika odkształcenia, który jest jego odwrotnością (już w propozycji K. Musiola z 1900 roku pojawił się: *graniczny współczynnik tłoczenia*); wyjaśnieniem może być tutaj dość powszechna niekonsekwencja (dowolność) w literaturze przedmiotu na ten temat
- błędny opis *Zakresu II* na rys. 1.11 (opis w tekście jest poprawny)
- czy w ostatnim akapicie rozdz. 1.2, dotyczącym procesu przetłaczania, pisząc: „*Liczba operacji przetłaczania jest ograniczona stopniem redukcji grubości ścianki w kolejnych operacjach...*”, Autor miał na myśli rzeczywiście redukcję grubości ścianki, czy jest to pomyłka? (*przy okazji*: w kolejnym zdaniu dwukrotnie powtórzona jest informacja o zwiększaniu się wysokości wylotki); błędnie zostało podane kryterium przetłaczania z dociskaczem – tak co do znaku jak i wartości (w kontekście informacji zawartej w dalszej części zdania), bardziej poprawny byłby też inny zapis indeksu przy średnicy wylotki, określającego operację tłoczenia: „i-1”, z objaśnieniem: dla i od 2 do n // taka analiza obszarów tłoczenia swobodnego i z dociskaczem – konsekwentnie (w pierwszej kolejności, biorąc pod uwagę treść rozdz. 1.2) – powinna być też podana dla wytłaczania, w oparciu o stosowne kryterium
- korekty wymaga wzór (1.7), określający krzywiznę giętego pasa
- promień krzywizny ρ należy odnosić do warstwy środkowej giętego pasa, do powierzchni wewnętrznej odnoszony jest wewnętrzny promień gięcia (rys. 1.19)

ponadto:

- rodzi pytanie rząd wielkości naprężeń na osi rzędnych (R_m, σ_p) wykresu z rys. 1.4
- pisząc o wartości maksymalnej naprężeń „*na krawędzi materiału*” miał Autor na myśli, z pewnością, powierzchnię giętego płaskownika (s. 22)
- rys. 1.5 – prędkość odkształcenia oznaczona jest symbolem odkształcenia (ε); rys. 1.30 – inny winien być zapis sumowania cząstkowych obszarów rzeczywistej powierzchni kontaktu (ΣA_i , dla $i=1 \div n$); rys. 1.32 – w opisie wykresu Stribeck’a nie zdefiniowano parametru R , na którym oparto kategoryzację tarcia według grubości filmu smarowego
- „*sprężynowanie powrotne*” – jest czymś w rodzaju tzw. kalki językowej angielskiego „*spring-back*”; w polskiej terminologii technicznej jest po prostu sprężynowanie, albo sprężyste odkształcenie powrotne – pojęcia, których Doktorant poprawnie używa choćby w późniejszym opisie badań (w tym przypadku również ma miejsce duża dowolność w literaturze przedmiotu)

Autor nie zawsze odwołuje się do pierwotnych źródeł literaturowych, mimo iż znajdują się one wśród cytowanych pozycji, jak choćby w przypadku rys. 1.11, dla którego źródłem jest monografia prof. Marciniaka (poz. [109]) czy przy okazji definiowania

odkształceń granicznych (odwołanie do pracy doktorskiej z 2009 r., s. 30). Źródło literaturowe jest niekiedy przywoływane z nadmierną częstotliwością, niekiedy zbyt oszczędnie, brakuje ich choćby przy niektórych wzorach.

W rozdziale 2 (s. 43-53) Doktorant omówił zagadnienia związane z modelowaniem numerycznym procesów przeróbki plastycznej na półgorąco, w szczególności – modele materiałowe oraz zjawiska / procedury kontaktowe, stosowane w symulacji metodą elementów skończonych procesów przeróbki plastycznej. W rozdziale tym zdublowana została numeracja wzorów 2.10÷2.19, a pod numerem wzoru (powt. 2.15 ze s. 51) na współczynnik emisyjności wsadu ε_m skopiowany został wzór (2.14), określający współczynnik wymiany ciepła α .

Przeprowadzony przegląd literatury w zakresie technologii i modelowania numerycznego przeróbki plastycznej na półgorąco stał się dla Doktoranta przyczynkiem do podjęcia badań, zmierzających do określenia parametrów procesu kształtowania trudnoodkształcalnej, odpornej na korozję blachy stalowej. Odwołując się do swojego wieloletniego doświadczenia przemysłowego w zakresie opracowywania konstrukcji oraz technologii elementów silników lotniczych postawił tezę, że: „*Dobór odpowiednich parametrów technologicznych wytwarzania owiewki kadłuba pośredniego silnika turbowentylatorowego z trudnoodkształcalnej stali odpornej na korozję 17-4PH na zrobotyzowanym stanowisku badawczym umożliwi otrzymanie wyrobu spełniającego wymagania konstrukcyjne, o wysokiej powtarzalności kształtu i wymiarów, przy znacznym zwiększeniu wydajności wytwarzania w stosunku do stosowanego do tej pory procesu kształtowania z transportem ręcznym wsadu.*” (rozdz. 3: Cel, teza i zakres pracy, s. 54-62). Jako cel zadań badawczych przedkładanej pracy, realizowanej w ramach wspomnianego szerszego projektu, wskazał *opracowanie wytycznych dla technologii precyzyjnego kształtowania ustalonego elementu. Zaś zastąpienie dotychczasowego procesu technologicznego z użyciem konwencjonalnego nagrzewania blach przed tłoczeniem w piecu komorowym z ogrzewaniem promiennikowym, nowym zrobotyzowanym procesem kształtowania z nagrzewaniem indukcyjnym* wskazał jako istotę pracy. Wcześniej, odwołując się do wyzwań stawianych nowoczesnym konstrukcjom lotniczym i wskazując jednocześnie na trudności technologiczne w aplikacji materiałów, spełniających wymagania jakościowe techniki lotniczej, uzasadnił podjęte badania. Scharakteryzował zrobotyzowane stanowisko badawcze do kształtowania blach na półgorąco, wytworzone w ramach wspomnianego projektu. Jako dodatkowe korzyści wdrożenia, w oparciu o opracowane wytyczne, nowej technologii kształtowania wytłoczek owiewki kadłuba, Doktorant wymienił możliwą w efekcie końcowym automatyzację ich montażu i spawania oraz poprawę bezpieczeństwa pracy.

Wymienione w 10 punktach prace badawcze, określające zakres badań (s. 61), w przewadze mają charakter eksperymentalny. Doktorant wielokrotnie też wskazuje, m.in. we wprowadzeniu (s. 6) i w podsumowaniu pracy (wprowadzenie do wniosków, s. 153), na udział badań eksperymentalnych, składających się na przedmiot pracy. Rodzi się więc zasadnicze pytanie: **dlaczego temat pracy zawężono do modelowania numerycznego procesu kształtowania elementu owiewki?**

Właściwym miejscem dla ostatniego akapitu rozdziału 3, przedstawiającego strukturę rozprawy (zawartość poszczególnych rozdziałów), byłoby wprowadzenie. Zaś używany przez Doktoranta do opisu badań i pracy czas przyszły (przemienne z formą dokonaną) jest niepoprawny, a niekiedy wręcz mylący (w początkowym odbiorze przekazywanej treści).

Część badawcza pracy na temat procesu tłoczenia elementu owiewki silnika jest zawarta w rozdziałach 4÷7. Obejmuje ona wyniki badań właściwości mechanicznych oraz termicznych blachy 17-4PH, stanowiące bazę materiałową do symulacji procesu kształtowania owiewki, a także wyniki badań eksperymentalnych procesu kształtowania owiewki oraz przemysłowego procesu nagrzewania blachy w piecu indukcyjnym. W analizach mikrostrukturalnych został też określony wpływ temperatury formowania na zmianę mikrostruktury stali oraz utlenienie i zubożenie powierzchni blachy w pierwiastki stopowe.

Wyniki badań właściwości mechanicznych oraz termofizycznych blachy 17-4PH zostały przedstawione w rozdziale 4 (s. 63-76). Podrozdział 4.1, wzorem kolejnych trzech, należało zatytułować problemowo, wszak nie o próbie rozciągania w nim mowa, a o wyznaczanych właściwościach mechanicznych blachy. Z lektury tego rozdziału wynikają następujące komentarze i uwagi:

- przedstawienie właściwości mechanicznych dla różnych temperatur w formie wykresów zwiększyłoby czytelność bezpośredniej ich oceny porównawczej, zaś stwierdzenie, iż wykazują one „*różny charakter płynięcia materiału w zależności od temperatury badania*” (s. 65) nie jest właściwe, wyniki te wskazują na różną podatność do plastycznego płynięcia badanego materiału w tak zróżnicowanych warunkach; *przy okazji – uwaga formalna*: wydłużenie procentowe po rozerwaniu, według aktualnie obowiązującej normy, ma oznaczenie $A_{50\text{ mm}}$
- w pracy bardzo akcentowane jest znaczenie współczynnika tzw. zapasu plastyczności w ocenie podatności blachy do głębokiego tłoczenia, warto byłoby zamieścić w tab. 4.1 *bis* wartości tego wskaźnika dla poszczególnych temperatur – on maleje od wartości ok. 0,90 dla 20°C do 0,74 dla 700°C
- na s. 67 Autor napisał: „*Po dokonaniu pomiarów grubości i wydłużenia próbek w strefie bazy pomiarowej wyznaczono współczynniki normalnej anizotropii materiału.*” – informacja jest o tyle niepoprawna, że zgodnie z procedurą (ze względu na dokładność wyników) pomiar grubości się pomija (wzór 4.4), a wydłużenie zaś można wyznaczyć nie zmierzyc (w tym przypadku dokonuje się odpowiednich pomiarów szerokości i długości próbki); przywołanej w następnym zdaniu „*tablicy 1*” nie ma – chodzi prawdopodobnie o tabelę 4.2, w której są wyniki obliczeń (bez wyników pomiaru próbki po odkształceniu)
- brak komentarza do ujemnej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej CTE dla temperatur 600-700°C (tab. 4.5)

W rozdziale 5 (s. 77-90) Autor zamieścił charakterystykę oraz wyniki symulacji termomechanicznej kształtowania elementu owiewki za pomocą metody elementów skończonych. Stanowiły one podstawę realizacji zadania Doktoranta, którym było opracowanie technologii kształtowania elementu owiewki silnika lotniczego. Symulacje

numeryczne zostały przeprowadzone w programie eta/DynaForm 5.9.3, z wykorzystaniem modułu *Hot Forming*. Uwzględniały nagrzewanie wsadu w piecu indukcyjnym, odbiór ciepła przez chwytak robota, straty ciepła do otoczenia podczas transportu blachy z pieca do tłoczniaka, odbiór ciepła przez pozycjonery, proces kształtowania wytłoczki na półgorąco oraz wytrzymanie wyrobu w tłoczniaku, mające na celu uzyskanie wymaganego kształtu wyrobu. Doktorant przeprowadził również symulacje rozkładu temperatury w narzędziach. Wyniki symulacji numerycznych pozwoliły Doktorantowi na dokonanie odpowiedniej korekty kształtu narzędzi, aby skompensować sprężyste odkształcenia powrotne blachy i uzyskać elementy zgodne z rysunkiem wykonawczym. Błędy kształtu owiewki z symulacji numerycznych zostały zweryfikowane eksperymentalnie za pomocą systemu optycznego GOM Inspect do pomiaru kształtu wytłoczek oraz za pomocą specjalnego przyrządu do sprawdzania zarysu blachy w charakterystycznych przekrojach. Rozdział 5, z punktu widzenia tematu pracy, ma znaczenie fundamentalne. Celowe w związku z tym wydawałoby się zestawienie i, na ile to możliwe, wskazanie explicite kluczowych wytycznych z modelowania numerycznego procesu kształtowania owiewki dla technologii jej wytwarzania, one są trochę rozproszone. Pozostałe pytania i uwagi do tej części pracy:

- jakie było uzasadnienie przyjęcia do analiz numerycznych referencyjnej liczby 10 cykli, jako reprezentatywnej dla rzeczywistych warunków produkcyjnych?
- co wniosły poznawczo termomechaniczne badania symulacyjne procesu w zakresie temperatur poniżej 500°C, podczas gdy z wstępnych badań przemysłowych wiadomo było, że „*optymalny zakres temperatur obróbki powinien zawierać się w przedziale 650-750°C*” (s. 111), co – biorąc pod uwagę stygnięcie półwyrobu w czasie transportu z nagrzewnicy do tłoczniaka – wyznaczało też górną granicę nagrzewania na poziomie (800-900)°C
- dlaczego na użytek modelowania numerycznego (rozd. 5) wyznaczano niezależnie właściwości mechaniczne blachy 17-4PH (Table 5.1, *sic!*) – jak się to ma do treści i celu rozdziału 4.1?
- pisząc „*Następuje to podczas kontaktu kształtowanego materiału ze ściankami wykroju matrycy.*” w kontekście zmniejszania się temperatury półwyrobu w procesie kształtowania (s. 80), z pewnością Autor miał na myśli wszystkie narzędzia robocze, również stempel i dociskacze (?)
- na ss. 82/83, w pierwszym przypadku, chodzi prawdopodobnie o współczynnik przejmowania ciepła (h), zaś na s. 87 korekty wymaga jednostka w odniesieniu do współczynnika przewodzenia ciepła (k)
- s. 83: „*Przyjęta wartość sily docisku wynosi 250 bar, sila działania wypychaczy 10 bar.*” (też w tab. 6.1) – [bar] jest jednostką miary ciśnienia (w układzie CGS)
- z obserwacji rozkładów naprężeń w wytłoczce (rys. 5.13) można sądzić, że największe naprężenia w badanym elemencie owiewki są zlokalizowane w rozciąganej bocznej ściance wytłoczki, nie „*na*” a pomiędzy krawędziami (odniesienie do treści ostatniego zdania ze s. 85)
- rys. 5.12 – prośba o komentarz do rozkładu temperatury dla 25°C (celowości jego zamieszczenia) przy tak zdefiniowanej skali

- czy dopuszczalne pocienienie owiewki wynosi 10% nominalnej grubości blachy (s. 86), czy zawiera się w polu tolerancji $\pm 0,063$ mm (s. 83)?
- kilkakrotnie pojawia się drobna nieścisłość w określeniu najniższej temperatury badania / analizy (m.in. na ss. 85, 86 – rys. 5.13 i 5.14)
- model blachy chyba zdyskretyzowano, nie „zdiskredytowano”? (ss. 82, 87) :)

Wyniki symulacji numerycznych, przeprowadzonych z uwzględnieniem złożonych zjawisk termomechanicznych, zostały zweryfikowane doświadczalnie. Stanowiły podstawę modyfikacji technologii produkcji owiewek. W rozdziale 6 (s. 91-122) przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych procesu kształtowania owiewki oraz przemysłowego procesu nagrzewania blachy. Badania te zostały przeprowadzone na zrobotyzowanym stanowisku badawczym do kształtowania elementów z blachy stalowej nierdzewnej 17-4PH w firmie Pratt & Whitney Rzeszów. Autor zamieścił bardzo szczegółowy, momentami wręcz detaliczny, opis stanowiska badawczego, oceny stanu technicznego prasy i jej adaptacji oraz procesu nagrzewania i przebiegu kształtowania blachy. W trzech kolejnych podrozdziałach opisał badania dotyczące dokładności wymiarowo-kształtowej wytłoczek owiewki, w pierwszym z nich opisując wyłącznie samą technikę skanowania optycznego 3D z jej parametrami. Dbalność Autora dysertacji o szczegóły w opisie istotnych elementów środowiska i procedur badawczych zasługuje na bardzo pozytywną ocenę. Sprawozdawczy po części charakter tych opisów spowodował jednak, że Doktorant nie uniknął przy tym powtórzeń niektórych informacji, pozostawiając też u czytającego pewien niedosyt wyeksponowania tego co najważniejsze, informacji i wniosków kluczowych – nawet jakiejś formy zestawienia zweryfikowanych eksperymentalnie istotnych parametrów tłoczenia elementu owiewki silnika, takich jak: warunki temperaturowe kształtowania, smarowanie (warunki tarcia), nacisk dociskacza, prędkość tłoczenia czy etapy procesu kształtowania (tłoczenie, wytrzymanie w narzędziu). Te informacje są rozproszone w długim rozdziale, według logiki ich badania i analizy. Opracowane wytyczne do procesu kształtowania plastycznego elementów podzespołów kadłuba pozwoliły, w efekcie końcowym, na zwiększenie powtarzalności ich produkcji oraz poprawę jakości kształtowo-wymiarowej, warunkujących wdrożenie pełnej automatyzacji procesów ich spawania i montażu. W tym kontekście rodzi się też pytanie, czy wszystkie i na jakim etapie badań, zamieszczone w końcowym fragmencie rozdziału 6.3 (ss. 108/109), postulatywne w przewadze, ważne spostrzeżenia i wnioski z badań nagrzewania i stygnięcia wsadu zostały zrealizowane? Ponadto:

- proces nagrzewania blachy bywa wielokrotnie nazywany „ogrzewaniem”, też „podgrzewaniem”, zaś określenia „ochładzanie” użyto prawdopodobnie w rozumieniu stygnięcia wsadu – to nie są synonimy w tym obszarze dość precyzyjnej terminologii technicznej; podobnie pojęcie „przegrzanie” ma swoje autonomiczne technologiczne znaczenie i nie powinno być używane w rozumieniu zaprogramowanego nagrzewania blachy wsadowej do założonej wyższej temperatury (s. 115)
- błędny jest opis osi odciętych na rys. 6.29-6.31 (nie czas, a odległość od ustalonej krawędzi wykroju)

- przykłady potknięć redakcyjnych: s. 111 – rozdz. 5.5 zamiast 6.5; w podpisie rys. 6.24 odwołanie do rys. 5.23 (zamiast 6.23); pomiary przedstawione na rys. 6.36 dotyczą prawdopodobnie weryfikacji grubości ścianki wytłoczek, a nie ich kształtu; na s. 115 odwołanie do rys. 5.42, którego nie ma (chodzi prawdopodobnie o rys. 6.39); rys. 6.45 – winno być: albo porównanie błędu zarysu albo porównanie dokładności zarysu (jest: „*Porównanie dokładności błędu zarysu...*”)

Rozdział 7 rozprawy (s. 123-131) zawiera wyniki analizy mikrostrukturalnej blachy – na próbkach blachy wsadowej oraz wyciętych z charakterystycznych miejsc elementu owiewki, kształtowanego w różnych temperaturach. Badania te przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego z odpowiednim wyposażeniem do rejestracji i analizy obrazu oraz elektronowego mikroskopu skaningowego, z detektorem EDS do analizy składu chemicznego. Ze względu na zastosowanie wyrobu w lotnictwie, znajomość ewolucji mikrostruktury badanego materiału (zimnowalcowanej blachy ze stali 17-4PH) w podwyższonej temperaturze jest szczególnie ważna. Badaniami mikrostruktury objęto próbki blachy po odkształceniu w próbie jednoosiowego rozciągania w różnych temperaturach (20 do 800°C), z różnymi prędkościami odkształcenia (0,033 do 0,5 s⁻¹). Autor, w opisie tych badań, podając wartość prędkości odkształcenia, obok właściwego, używa zamiennie, dość dowolnie określeń: „*rozciąganie przy szybkościach*”, „*szybkość odkształcania*”, „*rozciąganie z prędkościami*”, podając wymiar tego parametru [mm·s⁻¹] (rys. 7.2, 7.3 i w tekście). Wymaga to skorygowania! Uwaga do strony redakcyjnej tej części pracy:

- błędne numery rysunków (6.7 zamiast 7.6, odpowiednio b i c) w odwołaniach w podpisach rysunków 7.7 i 7.8; ponadto, w podpisie rys. 7.8 chodzi z pewnością o obszar EDS 2 (jest EDS 1)

Rozumiejąc intencje Doktoranta, chęć wykorzystania zdobytego doświadczenia podczas opracowywania technologii wytwarzania owiewki silnika, mało uzasadnione – w kontekście tematu rozprawy – wydaje się zamieszczenie w pracy rozdziału 8 (s. 132-152), dotyczącego modyfikacji istniejącego procesu technologicznego wytwarzania obudowy łożyska silnika turbowentylatorowego. Jest to niewątpliwie zagadnienie ważne z punktu widzenia procesu produkcyjnego, ale stanowiące jednak odrębny problem – to przede wszystkim, z drugiej zaś strony, i tak dość obszerna praca byłaby ...o 21 stron krótsza, na pewno – bardziej jednorodna. Docenić należy jednak w tym kontekście umiejętność dostrzegania przez Doktoranta zbieżności problemów technologicznych i ich kompleksowego rozwiązywania. Przykład wykorzystania zdobytej wiedzy jest bardzo dobry, interesujący. W rozdziale tym, na podstawie eksperymentalnych wyników badań kształtowania owiewki kadłuba pośredniego, w szczególności parametrów nagrzewania wsadu, zostały wykonane badania eksperymentalne oraz numeryczne kształtowania na półgorąco osłony łożyska silnika turbowentylatorowego. Zasadne zamieszczenie tego rozdziału w pracy wymagałoby takiego sformułowania tematu dysertacji, by obejmował on obydwa elementy konstrukcji silnika.

Przy okazji przeglądania omawianego rozdziału zauważono, iż w opisie właściwości mechanicznych blachy na osłonę łożyska (s. 138) Autor odwołuje się do

tabeli 5.1, dotyczącej blachy na owiewkę (o innej grubości). W definiowaniu współczynnika anizotropii normalnej Lankforda (s. 138) należałoby posługiwać się raczej pojęciami odkształceń w płaszczyźnie i na grubości blachy („próbka” z określonego kierunku jest jedynie narzędziem do jego wyznaczenia), zaś celem zamiany stosunku grubości odpowiednim stosunkiem iloczynów długości i szerokości próbki przy wyznaczaniu odkształcenia na grubości blachy ε_3 jest minimalizacja błędu pomiaru współczynnika r (oczywiście, z „łatwością pomiarów” związana). Odważne było przyjęcie 30% pocienienia blachy jako dopuszczalnego przy wyznaczaniu wykresu odkształceń granicznych (s. 139). Wśród niedopatrzeń redakcyjnych zwraca uwagę:

- błędne odwołanie do tabeli 8.1 w kontekście parametrów funkcji umocnienia (s. 138); i brak konsekwencji – współczynnik umocnienia: K czy C ?
- rys. 8.9 – pomyłka w opisie osi wartości modułu Younga (rząd wielkości)
- w tytułach tabel 8.1-8.3 – błędne odwołania do rysunków (złe numery)

Sformułowane w podsumowaniu pracy (rozd. 9) wnioski, Autor oparł na wynikach przeprowadzonych laboratoryjnych badań eksperymentalnych, badań materiałowych, symulacji numerycznych oraz badań przemysłowych procesu kształtowania owiewki z blachy 17-4PH. Stwierdza w nich między innymi, iż *numeryczne badanie wartości kąta sprężynowania pozwoliło na zaprojektowanie narzędzi formujących z odpowiednią kompensacją kształtowo-wymiarową i uzyskanie zgodnych z rysunkiem konstrukcyjnym części* (ostatnie zdanie wniosku 3). Można to uznać za jedno z głównych osiągnięć w ramach pracy. W ostatnim siódmym wniosku Doktorant zauważa, że *mikrostruktura badanej stali jest drobnoziarnista i stabilna aż do temperatury około 600°C*. Rodzi się więc pytanie, czym skutkować może kształtowanie plastyczne blachy w, uznanej za optymalną, temperaturze obróbki około 680°C, możliwej do zrealizowania pod warunkiem nagrzania wstępniaka do ponad 800°C?

W podsumowaniu Autor zauważa też, że *opracowany proces technologiczny kształtowania owiewki zespołu napędu silnika turbowentylatorowego zapewnia warunki do wytworzenia innych podobnych elementów podzespołów silników lotniczych o jakości pozwalającej na automatyzację ich montażu i spawania*. Odwołując się do rozdziału 8 rozprawy stwierdza na koniec, że *opracowana technologia z powodzeniem może być adoptowana do wytwarzania kolejnych elementów silnika lotniczego ze stali 17-4PH*.

Powinnością recenzenta jest również odniesienie się do strony redakcyjnej, edytorskiej pracy. Pomijając zupełnie, stosunkowo nieliczne, drobne błędy interpunkcyjne czy tzw. literówki, obok wskazanych „na bieżąco” błędów w numeracji rysunków czy tabel, błędnych odwołań, nieprecyzyjności terminologicznych, należy zwrócić uwagę na powtarzające się obok siebie zdania, w całości lub w części (ss. 44, 51, 67/68, 116), na nieuporządkowane zdania, błędy składniowe (ss. 23, 87, 116), niekompletną myśl w zdaniu zawartą, niekompletne zdanie (ss. 26, 30, 34) czy pojawiającą się formę osobową redakcji pracy. Zwraca też uwagę niekonsekwencja w postaci różnych oznaczeń (symboli) tej samej wielkości fizycznej czy parametru. Obok wcześniej już zauważonej, ma ona miejsce w następujących przypadkach:

- w odniesieniu do współczynników Lankforda anizotropii normalnej: r – we wzorach definicyjnych 4.4 i 8.1, R – we wzorach na wartość średnią 1.15 i 4.5;

w odniesieniu do odkształceń rzeczywistych we wzorze definicyjnym r :

φ – wzór 4.4, ε – wzór 8.1; dwukrotne podawanie (i numerowanie) identycznego wzoru na wartość średnią tego parametru dla blachy – wzory: 1.15 i 4.5

- dwukrotnie podany i numerowany wzór, definiujący ten sam współczynnik tzw. zapasu plastyczności, za każdym razem oznaczony innym symbolem:

δ_p – we wzorze 1.6, γ_p – we wzorze 4.3

W spojrzeniu i ocenie generalnej, praca jest dobrze zredagowana, napisana poprawnym językiem, czyta się ją dobrze. Wskazane niedociągnięcia nie przytłaczają, nie rzutują na jej pozytywną ocenę merytoryczną. Należałoby się ich wystrzec w przypadku wykorzystywania i przetwarzania treści pracy w przyszłości. Szczególnej uwadze Doktoranta polecam, z życzliwością, wskazówki i komentarze merytoryczne.

Podsumowując można stwierdzić, że Pan Tomasz Malinowski zrealizował zdefiniowany w pracy cel zadań badawczych, umożliwiając tym samym materializację istoty pracy, dowiódł postawionej tezy (rozdz. 3.3, s. 58). Analiza numeryczna i określenie podstawowych parametrów zmodyfikowanego procesu tłoczenia elementu owiewki silnika lotniczego ze stali 17-4PH wydaje się też być istotną składową innowacyjnych działań macierzystej firmy Doktoranta Pratt & Whitney Rzeszów, prowadzonych na przestrzeni lat w odpowiedzi na rosnące wymagania jakościowe wyrobów przemysłu lotniczego. Opracowanie i praktyczna weryfikacja danych procesowych, umożliwiających uruchomienie produkcji dobrych jakościowo ważnych elementów konstrukcji silnika turbowentylatorowego na zrobotyzowanym stanowisku do kształtowania na półgorąco oraz wdrożenie pełnej automatyzacji procesów ich spawania i montażu jest oryginalnym merytorycznym wkładem Autora w rozwój zaawansowanych technologii w przemyśle lotniczym.

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Tomasza Malinowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w zakresie specjalności przeróbka plastyczna metali, sytuującej się w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności krytycznej analizy i syntetyzowania dostępnej wiedzy oraz 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. 2003 nr 65 poz. 595 (adres publikacyjny – tekst jednolity z późniejszymi zmianami)). **Wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie mgra inż. Tomasza Malinowskiego do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.**


W. Muzykiewicz