

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Szpunara pt.: „Analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego” opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta z dnia 27 listopada 2024 roku.

1. Zakres rozprawy, tytuł, układ oraz piśmiennictwo.

Rozwój współczesnego przemysłu powiązany jest ściśle z wytwarzaniem odpowiednich materiałów konstrukcyjnych. Od wielu lat konstruktorzy poszukują materiałów charakteryzujących się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi i plastycznymi przy jednoczesnej niskiej gęstości, umożliwiającej redukcję wagi konstrukcji. Jednym z takich materiałów są stopy tytanu, które jednak ze względu na strukturę należą do grupy materiałów trudnoodkształcalnych. Tym samym prowadzone są szeroko rozwinięte badania, których celem jest opracowanie różnych technologii i warunków obróbki plastycznej takich stopów. Jednym ze sposobów formowania wyrobów gotowych z blachy jest klasyczny proces tłoczenia, wymagający jednak poprawnego doboru parametrów odkształcenia, między innymi temperatury i poprawnie przygotowanych narzędzi, często unikatowych, dedykowanych do danego kształtu wyłoczki. Alternatywnym rozwiązaniem jest stosowanie formowania przyrostowego (ISF), podczas którego na odkształcaną blachę oddziałuje miejscowo narzędzie formujące, wykonujące określony ruch, nadający w kolejnych etapach ostateczny kształt wyrobu gotowego. Zastosowanie tej metody umożliwia zmniejszenie całkowitej siły potrzebnej do kształtowania wyrobu, wykorzystanie jednego narzędzia do wytwarzania różnych kształtów tłoczonej blachy, czy też ułatwia zwiększanie temperatury odkształcanego materiału w miejscu oddziaływania narzędzia. Metoda pomimo niewątpliwych zalet posiada również wady, do których należą przede wszystkim intensywne zużycie narzędzia, występowanie znacznych sił tarcia, szczególnie przy zastosowaniu narzędzia kształtującego wykonującego ruch wokół własnej osi oraz niedokładności w kształcie wyłoczki spowodowane sprężystością blachy i pogorszenie jakości powierzchni spowodowane oddziaływaniem narzędzia kształtującego. Istotną jest zatem, dla prawidłowego prowadzenia procesu, znajomość interakcji pomiędzy jego parametrami dobieranymi dla danego materiału, a uzyskanymi wynikami kształtowania – zgodnością wymiarową, wielkością sił występujących w procesie, jakością powierzchni itp. W związku z powyższym podjęta tematyka rozprawy obejmująca, zgodnie z tytułem, analizę wpływu strategii obróbki oraz rodzaju narzędzi na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych jest uzasadniona i bez wątpienia nadaje się do opracowania w formie rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Szpunara napisana została w klasycznym układzie, przyjętym dla tego typu prac. Łącznie zajmuje 232 strony, na których zawarto: spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów, wprowadzenie do tematyki pracy, analizę literaturową podzieloną

na cztery podrozdziały, zdefiniowany cel i tezę pracy oraz zakres badań, opis materiału badawczego, opis metodyki badawczej, wyniki badań podzielone na pięć podrozdziałów, podsumowanie i wnioski, bibliografię, załącznik zawierający dokumentację konstrukcji tłoczni oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Tym samym praca zawiera wszystkie wymagane dla rozprawy doktorskiej elementy. W rozprawie zamieszczono 118 rysunków oraz 43 tabele, numerowane w obrębie głównych rozdziałów pracy. Wykaz oznaczeń zawiera opis większości symboli wykorzystanych w pracy ułożonych alfabetycznie według porządku liter alfabetu łacińskiego (bez podziału na wielkie i małe litery), a następnie według porządku liter alfabetu greckiego. Bardzo dobrym zwyczajem (czasami zapomnianym w rozprawach naukowych) jest zamieszczenie wykazu skrótów, który ułatwia czytanie i rozumienie treści pracy. Analizę literaturową tematu podzielono na 4 podrozdziały, w których zamieszczono: ogólne informacje dotyczące właściwości fizycznych i mechanicznych tytanu i jego stopów; opis techniki kształtowania przyrostowego z podziałem na metody kształtowania, problematykę tarcia i zmniejszania sił tarcia oraz kształtowanie w podwyższonej temperaturze; ogólne zagadnienia dotyczące modelowania numerycznego procesu kształtowania obejmujące analizę cieplno-mechaniczną w MES oraz rodzaje modeli materiałowych; wnioski z analizy literaturowej. Przeprowadzona analiza poparta została przywołaniem 205 pozycji literaturowych, co świadczy o wnikliwym przygotowaniu się Autora do prowadzonych badań własnych, ale też o wielu badaniach prowadzonych w tym zakresie przez innych badaczy. Moją uwagę krytyczną do podsumowania i wniosków z przeprowadzonej analizy literaturowej jest brak zapowiadanego we wprowadzeniu, literalnego, przedstawienia luk badawczych, które Doktorant zamierzał wypełnić swoimi badaniami. Głównym celem pracy nakreślonym w rozdziale trzecim jest identyfikacja zależności pomiędzy parametrami procesu, a jakością powierzchni wytłoczek oraz odkształcalnością materiału, uzyskana na podstawie analizy procesu kształtowania przyrostowego blach o grubości 0,4 mm wykonanych z technicznie czystego tytanu klasy 2 oraz stopu tytanu Ti-6Al-4V. W rozdziale 4 przedstawiono charakterystykę wybranych właściwości mechanicznych badanych materiałów oraz chropowatości blach i narzędzi zastosowanych do kształtowania. Rozdział 5 poświęcono metodyce badań. Stanowi on rzetelnie opracowany opis zastosowanych metod badawczych, którymi posłużono się do osiągnięcia celu pracy. W rozdziale 6 zaprezentowano uzyskane wyniki badań w podziale na 5 podrozdziałów. Pierwszy z nich dotyczył badania współczynnika tarcia przy zastosowaniu różnych środków smarujących, drugi i trzeci poświęcono opisowi wyników badania procesu kształtowania wytłoczek odpowiednio z tytanu Grade 2 i stopu Ti-6Al-4V. Podrozdział czwarty i piąty zawierał wyniki analizy numerycznej MES również w podziale na analizowany materiał. Natomiast w rozdziale 7 zamieszczono ogólne podsumowanie badań zawierające szereg stwierdzeń i wniosków. Nienumerowaną częścią rozprawy jest bibliografia zawierająca 300 pozycji, spośród których (jak wspomniano wcześniej) 205 zostało przywołanych podczas dokonywania przeglądu literaturowego, a pozostałe jako uzupełniające metodykę i wyniki badań. Spośród 300 pozycji literaturowych około 2/3 stanowią publikacje wydane w przeciągu ostatnich 10 lat, co świadczy, że Doktorant podpierał swoje badania najnowszą dostępną wiedzą. należy również zaznaczyć, że 13 cytowanych publikacji to prace współautorskie Doktoranta. W spisie literatury znalazłem 7 pozycji odwołujących się do źródeł internetowych, dla których podano adres strony, ale nie podano daty dostępu, co w takich przypadkach czynić się powinno.

W świetle materiału zamieszczonego w pracy doktorskiej uważam, że tytuł rozprawy jest adekwatny do treści w niej zawartych, choć mimo silnie wyartykułowanej w nim frazy dotyczącej „analizy wpływu rodzaju powłoki narzędzia”, badania w tym zakresie stanowią w odniesieniu do całości pracy niewielki ułamek. Nadmienić należy również, że rozprawa napisana jest poprawnym językiem polskim z dbałością o terminy techniczne, bez

nadużywania określeń potocznych. Oczywiście jest, że przy tak rozbudowanym opracowaniu zdarzają się błędy literowe oraz edytorskie, ale występowały one tak rzadko, że nie widzę potrzeby przywoływania ich w ocenie pracy. Doceniając umiejętności językowe i edytorskie Autora jestem przekonany, że w przypadku publikacji pracy w całości lub częściach zostaną one dostrzeżone i poprawione.

2. Ocena celu rozprawy doktorskiej

Cel pracy, teza oraz zakres badań nakreślono w rozdziale 3 pracy. Niestety opisany w pierwszym zdaniu rozdziału cel pracy zdefiniowany jako: „**analiza procesu kształtowania przyrostowego cienkich blach wykonanych z tytanu technicznie czystego klasy 2 oraz stopu tytanu klasy 5 – Ti-6Al-4V**” nie odzwierciedla rzeczywistych celów naukowych pracy, którymi była przede wszystkim identyfikacja wpływu parametrów procesu kształtowania na uzyskane rezultaty, a głównie odkształcalność (możliwość uzyskania założonego kształtu wytlóczki po procesie formowania) oraz jakość powierzchni wytlóczki. Tej informacji brakuje w podanym celu pracy, pomimo tego, że Autor sygnalizował to we wstępie do rozprawy. Tym niemniej pełny cel pracy jest poprawny, a jego osiągnięcie stanowi również użyteczny aspekt rozprawy.

Do badań wybrano dwa materiały, jednofazowy tytan klasy 2 i dwufazowy stop klasy 5, kształtowane w różnych warunkach nagrzewania i wykorzystując różne strategie ruchu narzędzia formującego wytlóczkę. Natomiast tezę pracy ukierunkowano zdecydowanie na analizę stopu tytanu klasy 5 i podano ją w następującym brzmieniu: „**Zastosowanie hybrydowego nagrzewania wsadu, za pomocą cieczy pod adaptacyjnym ciśnieniem oraz za pomocą nagrzewania tarcowego o odpowiedniej strategii kierunku prędkości obrotowej narzędzia w stosunku do kierunku jego posuwu, a także dobór odpowiedniego materiału narzędziowego umożliwią w procesie kształtowania przyrostowego dwufazowego stopu tytanu Ti-6Al-4V uzyskanie wytlóczek ze zmiennym nachyleniem ścianki bocznej, poprzez zwiększenie stopnia odkształcenia materiału blachy, przy jednoczesnym zmniejszeniu odkształceń sprężystych wytlóczek po odciążeniu**”. Postawiona teza bez wątplenia stanowi problem badawczy wymagający udowodnienia, ale nie jest dla mnie zrozumiałe, dlaczego Doktorant ograniczył ją jedynie do stopu klasy 5. Z przedstawionych w dalszej części rozprawy badań wynika, że wspomniane w tezie parametry procesu, jak również narzędzia mają istotny wpływ na rezultaty kształtowania wytlóczek z tytanu klasy 2.

Aby zrealizować postawiony cel pracy Doktorant przewidział szeroki zakres prac badawczych, obejmujących analizę odkształcanego materiału, analizę tarcia występującego w procesie przy zastosowaniu różnych środków smarujących, opracowanie stanowiska badawczego, analizę wpływu powłok na narzędziach kształtujących, analizę modyfikacji kształtu tych narzędzi w celu poprawy smarowania, dobór parametrów kinematycznych procesu, analizę fraktograficzną uszkodzonych podczas kształtowania wytlóczek, analizę dokładności wykonania zaplanowanych wytlóczek oraz modelowanie procesu przy użyciu MES. Plan badań przedstawiono na rysunku 3.1.

Zasadniczo uważam, że badania zaplanowano poprawnie, aby zrealizować postawiony cel pracy i udowodnić postawioną tezę pracy. Dyskusyjnym jest, czy rzeczywiście wszystkie z nich były niezbędne do zrealizowania celu pracy, na co postaram się zwrócić uwagę w dalszej części recenzji.

3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej

Doktorant do realizacji swoich badań wybrał blachy tytanowe o grubości 0,4 mm w gatunkach CP-Ti Gr 2 (czysty technicznie tytan klasy 2, jednofazowy) oraz Ti-6Al-4V, stop tytanu klasy 5 o strukturze dwufazowej. W rozdziale 4 przedstawił charakterystykę tych materiałów obejmującą jakość powierzchni blach opisaną wskaźnikami chropowatości oraz właściwości mechaniczne, wyznaczone w próbach statycznego rozciągania przy temperaturach dobranych do warunków procesu. W rozdziale tym zawarł również podstawowe parametry narzędzi roboczych zastosowanych w próbach formowania przyrostowego. Jako narzędzie podstawowe wybrał trzpień wykonany z węgliku wolframu z dodatkiem kobaltu, ponadto analizował zastosowanie końcówek trzpieni powlekanych powłokami AlCrN, TiSiXN oraz ZrN, a także z lutowaną końcówką ceramiczną Al_2O_3 wzmocnioną whiskersami SiC.

Doktorant w rozdziale 5 obejmującym 26 stron w wyczerpujący sposób omówił zastosowaną metodykę badań. W pierwszej kolejności przedstawiono metodykę badania wpływu zastosowanych środków smarujących o zróżnicowanej gęstości i lepkości kinetycznej oraz zastosowanego nacisku na wartość współczynnika tarcia dla badanych blach. Testy przeprowadzono w warunkach przeciągania pasa blachy o szerokości 18 mm i analizowano 9 różnych smarów. Pięć z nich stanowiły oleje roślinne, a pozostałe 4 oleje syntetyczne. Uzyskane wyniki wartości współczynnika tarcia opracowano statystycznie przyjmując jako zmienne gęstość i lepkość kinetyczną oleju oraz siłę nacisku. Ponadto dla stopu klasy 5 wykorzystano sztuczną sieć neuronową do prognozowania wartości współczynnika tarcia w zależności od podanych wyżej parametrów.

Następnie opisano opracowane i zbudowane stanowisko badawcze do przeprowadzenia prób kształtowania przyrostowego. Stanowisko dostosowano do pomiarów sił działających w procesie, jak również do pracy w podwyższonej temperaturze, gdzie czynnikiem grzewczym jest olej znajdujący się pod kształtowaną wytłoczką, którego ciśnienie można utrzymywać na stałym poziomie. Opracowanie stanowiska badawczego dostosowanego do zaplanowanych prób kształtowania oceniam bardzo dobrze.

W kolejnej części rozdziału omówiono badania kształtowania przyrostowego blach z tytanu klasy 2. Do odkształcania przyjęto krążki blachy o średnicy 100 mm, z których kształtowano wytłoczki stożkowe o kącie nachylenia tworzącej 45° , średnicy podstawy 60 mm i głębokości 28,3 mm. Narzędzie kształtujące posiadało końcówkę kulistą o promieniu 4 mm i wykonane było z węgliku wolframu. Badania prowadzono stosując różne strategie kształtowania w następującym zakresie zmienności parametrów kinematycznych procesu: posuw narzędzia 500÷2000 mm/min, podziałka ścieżki 0,1÷0,5 mm, prędkość obrotowa -600÷600 obr/min (wartość ujemna oznacza obróbkę przeciwbieżną, dodatnia współbieżną). Plan eksperymentu oparto o centralny plan kompozycyjny, zgodnie z którym wykonano 16 prób z parametrami podanymi w tabeli 5.8 i rysunku 5.8. Parametrami badanymi w procesie kształtowania były: siły pionowa oraz poziome, chropowatość powierzchni wytłoczek oraz sukces formowania (głębokość względna wytłoczki, jaką udało się uzyskać bez utraty spójności materiału odniesiona do jej wartości maksymalnej założonej w eksperymencie). W oparciu o wyniki uzyskane z prób kształtowania dokonano wielokryterialnej optymalizacji procesu w celu wyznaczenia najlepszych parametrów kinematycznych. Ponadto w próbach wyznaczono współczynnik tarcia pomiędzy narzędziem kształtującym i odkształcanym materiałem.

Dla wyznaczonych optymalnych parametrów procesu wykonano dodatkowe badania obejmujące analizę wpływu innych środków smarujących, różnych materiałów zastosowanych w narzędziu kształtującym i rowków smarujących naciętych na narzędziu oraz warunków nagrzewania (przyjmując dwa warianty: nagrzewanie tarciove oraz olej grzewczy znajdujący się pod dolną powierzchnią kształtowanej wytłoczki).

Należy podkreślić, że przyjęty przez Doktoranta plan badań obejmujących kształtowanie blach z tytanu klasy 2 jest przemyślany i opracowany w poprawny sposób. Zastosowanie centralnego planu kompozycyjnego w znacznym stopniu obniża liczbę prób koniecznych do przeprowadzenia w celu uzyskania istotnych statystycznie zależności pomiędzy parametrami i rezultatami procesu kształtowania.

W przypadku analizy procesu kształtowania wytłoczki ze stopu tytanu klasy 5 Doktorant przyjął inną strategię badań. Podstawowa różnica polega na kształcie formowanej wytłoczki, która charakteryzuje się zmiennym kątem nachylenia ścianki oraz warunkach formowania, przy których zastosowano hybrydowe nagrzewanie materiału – olejem grzewczym o temperaturze 200°C z miejscowym nagrzewaniem tarciovym. Do formowania wykorzystano narzędzie z pręta wykonanego z węgla wolframu o średnicy 8 mm, zakończonego kuliście promieniem 4 mm. Maksymalny uzyskany kąt nachylenia ścianki wyznaczano w oparciu o zależność 5.9 na podstawie pomiaru głębokości wytłoczki. Jako środek smarujący zastosowano beztluszczowy spray przeciwwzarciowy MoS₂. W badaniach wstępnych wyznaczono graniczne parametry pracy stanowiska w zakresie prędkości obrotowej narzędzia i posuwu. Następnie wykorzystując plan czynnikowy dokonano doboru narzędzia kształtującego badając przy dwóch prędkościach obrotowych 100 i 1000 obr/min kształtowanie za pomocą narzędzi wykonanych z 5 różnych materiałów. Wielkością wynikową w tych badaniach był uzyskany kąt nachylenia ścianki, a ponadto dokonano oceny zużycia zastosowanych narzędzi.

W kolejnym etapie opracowano I-optymalny plan badań w układzie blokowym o jednostkach rozszczepionych, w którym jako wielkości wejściowe wybrano: ciśnienie oleju, prędkość obrotową narzędzia, posuw narzędzia, podziałkę ścieżki oraz strategię kształtowania. Cztery pierwsze wielkości przyjęto jako numeryczne, zmieniające się w zakresach odpowiednio: 1÷4 bar, 100÷1000 obr/min, 500÷2000 mm/min, 0,1÷0,5 mm, natomiast piątą jako kategorię: przeciwbieżna albo współbieżna. Jako czynnik trudny do zmiany w planie wybrano ciśnienie oleju grzewczego. Wielkościami analizowanymi przy danych warunkach wejściowych był: uzyskany kąt nachylenia ścianki wytłoczki, siły poziome i pionowa. Ponadto podobnie jak w przypadku analizy dla tytanu klasy 2 dokonano wyznaczenia współczynnika tarcia występującego w procesie. Opracowany plan składał się z 25-ciu eksperymentów, realizowanych z parametrami przedstawionymi w tabeli 5.12 i na rysunku 5.16. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów i analizy statystycznej dokonano wielokryterialnej optymalizacji poszukując najlepszych parametrów procesu, umożliwiających uzyskanie największej wartości nachylenia ścianki wytłoczki.

Opracowany plan badań oraz przyjętą metodykę badawczą uważam za przemyślane i umożliwiające realizację postawionych celów pracy oraz udowodnienie sformułowanej tezy pracy.

4. Ocena omówienia wyników badań i potencjału utylitarnej pracy

Omówienie wyników badań eksperymentalnych zamieszczono w pracy w rozdziale 6 obejmującym 115 stron, podzielonym na 5 podrozdziałów, w którym zawarto analizy:

- wpływu różnych środków smarujących na współczynnik tarcia dla blach z tytanu klasy 2 i stopu tytanu klasy 5 w oparciu o testy przeciągania pasa blachy;
- parametrów procesu na przebieg i efekty kształtowania wytłoczek z blachy w gatunku CP-Ti Gr 2 wraz z analizą wpływu zmiany materiału i geometrii narzędzia kształtującego;
- parametrów procesu na przebieg i efekty kształtowania wytłoczek z blachy w gatunku Ti-6Al-4V wraz z analizą wpływu materiału narzędzia na przebieg procesu oraz analizą zużycia narzędzia;

- numerycznego modelowania procesu kształtowania wytłoczek z blachy w gatunku CP-Ti Gr 2;
- numerycznego modelowania procesu kształtowania wytłoczek z blachy w gatunku Ti-6Al-4V.

W pierwszym podrozdziale przedstawiono wyniki wpływu rodzaju środka smarującego na wartość współczynnika tarcia przy zmieniającej się sile nacisku w zakresie 50÷200 N. Wyniki przedstawiono w formie wykresów zależności współczynnika tarcia od obciążenia dla pięciu olei naturalnych i czterech syntetycznych. Ponadto dla blachy ze stopu tytanu klasy 5 opracowano statystyczny model zależności współczynnika tarcia od gęstości i lepkości kinematycznej oleju oraz siły nacisku, wykorzystując regresję kwadratową. Dodatkowo do przewidywania wartości współczynnika tarcia dla tego samego stopu zaproponowano zastosowanie sztucznych sieci neuronowych, analizując jednocześnie trzy różne algorytmy uczenia. Wyniki badań przedstawiono w czytelny sposób oraz podsumowano je wnioskami. Stwierdzono, że zwiększenie obciążenia przy próbie wpływa na zmniejszenie współczynnika tarcia we wszystkich badanych grupach olei i blach. Określono, że dla blach z tytanu klasy 2 największy współczynnik tarcia wykazał olej przekładniowy SAE 75W-85, natomiast najlepszym środkiem smarującym okazał się olej słonecznikowy. W przypadku blach ze stopu tytanu klasy 5 najlepsze właściwości smarujące wykazała oliwa z oliwek i porównywalne olej półsyntetyczny SAE 10W-40, natomiast najgorsze olej hydrauliczny L-HL 46. Istotną wartość poznawczą ma również analiza statystyczna wpływu gęstości i lepkości kinetycznej oleju na wartość współczynnika tarcia, przeprowadzona dla blach ze stopu klasy 5 przy różnych obciążeniach.

Jednak całość pierwszego podrozdziału wydaje się w pewien sposób oderwana od głównego wątku rozprawy. Zastosowane wartości obciążenia w próbie przeciągania pasa blachy są zdecydowanie niższe, niż naciski występujące podczas formowania przyrostowego, zatem uzyskane wyniki nie mogą być wykorzystane na przykład w analizie MES. Badane oleje roślinne charakteryzują się relatywnie niską temperaturą zapłonu, co również uniemożliwia ich stosowanie, szczególnie podczas kształtowania blach ze stopu tytanu klasy 5, podczas których jako środek smarujący zastosowano beztluszczowy spray na bazie siarczku molibdenu. Natomiast analiza z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej nie wnosi do pracy wartości dodanej, gdyż celem pracy nie było analizowanie sprawności i dokładności algorytmów uczenia sieci.

W drugim podrozdziale omówiono wyniki badań procesu kształtowania wytłoczki z blachy tytanowej klasy 2. Na podstawie wyników prób eksperymentalnych opracowano statystyczne zależności siły osiowej narzędzia, sił poziomych, najwyższej wysokości profilu chropowatości oraz sukcesu kształtowania w zależności od prędkości obrotowej narzędzia, prędkości posuwu narzędzia oraz podziałki ścieżki kształtowania. Do oceny wpływu parametrów na sukces kształtowania zastosowano model zredukowany do jednej zmiennej, którą była prędkość obrotowa narzędzia. Doktorant wykazał, że główne parametry wpływające na siły w procesie kształtowania to prędkość obrotowa narzędzia oraz podziałka ścieżki. Wzrost obrotów narzędzia skutkuje zwiększoną temperaturą materiału, co wpływa na obniżenie sił kształtowania, natomiast zwiększenie podziałki ścieżki, pomimo skrócenia czasu obróbki powoduje zrozumiały wzrost sił, związany z konieczną do ukształtowania wytłoczki pracą. Ocenę jakości powierzchni wewnętrznej wytłoczki przeprowadzono na podstawie pomiarów najwyższej wysokości profilu chropowatości Rz, co Doktorant uzasadnił w opisie metodyki badawczej i jest to poprawne założenie. Zgodnie z opracowanym modelem regresji kwadratowej parametr Rz jest istotnie zależny od wszystkich trzech zmiennych procesowych. Z wyników przedstawionych na rysunku 6.13 wynika, że zwiększanie prędkości posuwu narzędzia wpływa na zmianę dynamiki zależności jakości powierzchni od pozostałych dwóch parametrów. Najgorszą jakość powierzchni ($R_z = 16,22$ mikrona) zaobserwowano dla posuwu

2000 mm/min przy prędkości obrotowej narzędzia wynoszącej -600 obr/min i najmniejszej wartości podziałki ścieżki 0,1 mm. Jednocześnie przy tej samej prędkości posuwu zaobserwowano spadek wartości parametru Rz do 7,735 mikrona przy zastosowaniu współbieżnej strategii kształtowania z prędkością nieznacznie niższą niż 600 obr/min i podziałką ścieżki około 0,5 mm. Uzyskane wyniki stanowią niewątpliwie wartość poznawczą i mogą być wykorzystywane w projektowaniu technologii kształtowania przyrostowego. Przeprowadzone badania wykazały również, że sukces kształtowania zależy jedynie od prędkości obrotowej narzędzia, co Doktorant tłumaczy wpływem tej prędkości na zmianę temperatury blachy w strefie odkształcenia. W kolejnym etapie opracowania wyników badań przeprowadzono wielokryterialną optymalizację parametrów procesu i wybrano najlepsze z nich: kształtowanie przy posuwie narzędzia 2000 mm/min, prędkości obrotowej -580 obr/min oraz podziałce ścieżki 0,5 mm.

Zastanawiający jest dla mnie dobór optymalnej prędkości obrotowej narzędzia, a bardziej przyjęcie strategii kształtowania, ponieważ analizując wcześniej pokazane wyniki badań, a w szczególności rys. 6.13c spodziewałem się zastosowania dodatniej wartości prędkości obrotowej narzędzia, dla której odnotowano mniejszą wartość parametru Rz.

W dalszej części podrozdziału przedstawiono wyniki analizy wartości współczynnika tarcia, oceny uszkodzeń wytłoczek, dla których nie uzyskano 100% sukcesu kształtowania, wyniki analizy topografii powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej wytłoczek oraz uzyskanych wymiarów wytłoczek. Analiza warunków tarcia wykazała, że w badanych zakresach zmienności parametrów procesowych można przyjąć stałą wartość współczynnika tarcia wynoszącą 0,4. Wyznaczona wartość ma znaczenie dla poprawnego przyjęcia warunków brzegowych przy modelowaniu numerycznym procesu. Analizę fraktograficzną uszkodzonej wytłoczki przeprowadzono dla jedynego przypadku, gdy nie osiągnięto pełnego sukcesu kształtowania przy niezerowej prędkości obrotowej narzędzia. Analiza ta sprowadziła się do wizualnej oceny przełomu obserwowanego z wykorzystaniem SEM.

Wyniki tej analizy nasuwają pytanie, czy rzeczywiście pęknięcie wytłoczki związane było z przyjętymi parametrami kształtowania, czy też nastąpiło na skutek nieciągłości wewnętrznych występujących pierwotnie w odkształcanej blasze? Wskazany byłoby powtórzyć eksperyment przy zadanych parametrach w celu zweryfikowania, czy pęknięcie wytłoczki pojawi się powtórnie przy osiągnięciu porównywalnej głębokości kształtowania.

Przedstawione dalej wyniki rozbudowanej analizy chropowatości powierzchni dostarczają informacji o znacznym wzroście parametrów chropowatości Sa i Sz w odniesieniu do ich poziomu przed kształtowaniem. Większy wzrost parametrów chropowatości zaobserwowano dla zewnętrznej powierzchni wytłoczki, która nie miała kontaktu z narzędziem. Analiza geometrii wytłoczki wykazała zgodność z przyjętymi założeniami i dopuszczalnymi odchyłkami kształtu.

Ostatnim elementem opisanym w podrozdziale była analiza wyników wpływu materiału i geometrii narzędzia kształtującego, środka smarującego oraz sposobu nagrzewania materiału na wielkość siły osiowej i parametry chropowatości powierzchni wytłoczki. Stwierdzono, że wprowadzenie zmian w geometrii narzędzia w postaci rowków, których celem było dostarczanie środka smarującego praktycznie uniemożliwia prowadzenie skutecznego formowania wytłoczki, natomiast korzystne oddziaływanie stwierdzono zastępując węglík spiekany ceramiką Al_2O_3 oraz spray molibdenowy olejem rzepakowym.

Zastanawiające jest, dlaczego w badaniach tych Doktorant zastosował olej rzepakowy, jako środek smarujący, podczas gdy z wyników badań przedstawionych w podrozdziale 6.1 wynikało, że spośród olejów roślinnych w najniższym stopniu obniża tarcie.

W podrozdziale 6.3 przedstawiono wyniki analizy kształtowania wytłoczek o zmiennym kącie nachylenia ścianki z blachy ze stopu tytanu Ti-6Al-4V, który jest materiałem trudno-odkształcalnym i wymaga do kształtowania podwyższonej temperatury. Badania prowadzono

zatem w warunkach nagrzewania hybrydowego. Na początku podrozdziału omówiono wyniki analizy możliwości zastosowania alternatywnych tworzyw na narzędzie kształtujące, jednak w przypadku stopu tytanu klasy 5 stwierdzono, że najlepsze efekty formowania uzyskać można dla końcówki narzędzia kształtującego wykonanej z węgliku wolframu. Zastosowanie narzędzi powlekanych spowodowało intensyfikację narostu materiału odkształcanego na ich powierzchni, natomiast narzędzie ceramiczne uległo zniszczeniu katastroficznemu. Wyniki tych badań mają w mojej ocenie dużą wartość i stanowią istotne wskazania praktyczne.

Kolejnym etapem prezentacji wyników badań było przedstawienie analizy wpływu ciśnienia oleju grzewczego, prędkości obrotowej narzędzia, posuwu narzędzia, podziałki ścieżki i strategii kształtowania na maksymalny kąt nachylenia ścianki, siłę osiową, siły poziome oraz współczynnik tarcia. Analiza statystyczna wpływu parametrów procesu na kąt nachylenia ścianki wykazała, że ciśnienie oleju grzewczego jest czynnikiem statystycznie nieistotnym, jednak ujęcie go w kompleksowym modelu wykazało, że wpływ ciśnienia uwidacznia się w warunkach wysokich prędkości obrotowych i jego wyższa wartość sprzyja uzyskaniu wyższych wartości kąta nachylenia ścianki. Głównymi czynnikami wpływającymi na uzyskiwaną wielkość kąta nachylenia ścianki są: prędkość obrotowa narzędzia, posuw narzędzia, strategia kształtowania i podziałka ścieżki. Analiza statystyczna parametrów siłowych procesu pokazała, że największy wpływ na wartość siły pionowej i sił poziomych ma podziałka ścieżki narzędzia. Przy wzroście jej wartości odnotowuje się wzrost sił, natomiast wzrost prędkości obrotowej narzędzia powoduje obniżenie sił, co jest uzasadnione podwyższeniem temperatury materiału w strefie odkształcenia. Podobnie współbieżna strategia kształtowania sprzyja obniżeniu sił występujących w procesie. W oparciu o modele statystyczne dokonano wielokryterialnej optymalizacji parametrów procesu i określono najbardziej korzystne parametry kształtowania: ciśnienie oleju grzewczego 4 bary, prędkość obrotowa narzędzia 1000 obr/min, posuw narzędzia 2000 mm/min, podziałka ścieżki 0,38 mm oraz przeciwbieżna strategia kształtowania.

Ciekawe wyniki uzyskano na podstawie analizy statystycznej wpływu parametrów procesowych na wartość współczynnika tarcia. W badanym zakresie parametrów procesowych wartość współczynnika tarcia zmienia się w zakresie $0,07 \div 0,22$. Doktorant stwierdził, że na wartość współczynnika tarcia głównie wpływa interakcja prędkości obrotowej narzędzia i jego posuwu oraz interakcja posuwu narzędzia i podziałki ścieżki.

Czy w świetle otrzymanych wyników nie należy wiązać zmian współczynnika tarcia z temperaturą odkształcaną strefy materiału?

W kolejnej części podrozdziału zamieszczono analizę fraktograficzną zerwanej wytłoczki, dla której uzyskano maksymalny kąt nachylenia ścianki. Uzasadnienie otrzymanych wyników jest poprawne, identyfikacja pęknięcia ciągłego oraz obserwacje mikroskopowe SEM wskazują na wyczerpanie w materiale zapasu plastyczności i utratę jego ciągłości.

Jako ostatni zestaw wyników badań w podrozdziale 6.3 zamieszczono analizę zużycia narzędzia kształtującego. Analiz ta jest jednak niekompletna, gdyż nie podano jaki czas narzędzie pracowało oraz czy była to praca w stałych, czy zmiennych warunkach. Zasadniczo pokazane zużycie narzędzia nie odbiega od charakteru zużycia narzędzi stosowanych do kształtowania przyrostowego.

Ostatnie dwa podrozdziały rozdziału szóstego zawierają opis i wyniki modelowania numerycznego procesu kształtowania przyrostowego blach odpowiednio z tytanu klasy 2 i stopu tytanu klasy 5. Modelowanie numeryczne stanowi uzupełnienie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i jednocześnie posiada bardzo użyteczny charakter ze względu na wysoką zgodność otrzymanych wyników symulacji z eksperymentem. Świadczy to o poprawnie dobranych parametrach modelu MES obejmujących opis reologiczny odkształcanego materiału i warunki brzegowe, w szczególności współczynniki tarcia. Tym samym modele mogą zostać wykorzystane do analizy innych procesów kształtowania

przyrostowego blach tytanowych w celu uzyskania wytłoczek o bardziej złożonych kształtach. Podczas lektury tych podrozdziałów nasunęły mi się następujące pytania:

- czy rzeczywiście krzywe plastycznego płynięcia pokazane na rysunkach 6.66 i 6.74 zostały opracowane na podstawie prób rozciągania, pokazane w rozdziale 4 krzywe rozciągania badanych materiałów wskazują na znacznie niższe wartości odkształcenia powodujące utratę stateczności płynięcia i zerwanie próbki – dla tytanu klasy 2 przy temperaturze 20°C, a dla stopu tytanu klasy 5 dla wszystkich badanych temperatur?
- w modelu bardzo istotnym jest poprawne przewidywanie wzrostu temperatury materiału spowodowane tarciem pomiędzy odkształcanym materiałem i narzędziem, podano, że całość pracy sił tarcia ulega zamianie w ciepło, a w jaki sposób ciepło to rozdzielane jest na część wnikałą do odkształcanego materiału i do narzędzia?
- z czego wynika znaczna niejednorodność odkształceń plastycznych pokazana na rysunku 6.80d na obwodzie wytłoczki kształtowanej ze stopu tytanu klasy 5, z rozkładu widać różnice przekraczające wartość 0,5, czyli ponad 20% wartości maksymalnej odkształcenia zastępczego?

Ogólnie rozdział szósty pracy zawierający wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych oceniam wysoko. Sposób opracowania wyników świadczy o bardzo dobrym opanowaniu warsztatu badawczego przez Doktoranta.

Podobnie oceniam ostatni rozdział rozprawy zawierający wnioski i podsumowanie. Zawarte w nim stwierdzenia wynikają z przeprowadzonych analiz i zostały uzasadnione. Ważnym jest również fakt, że Doktorant widzi dalsze możliwości kontynuacji badań przedstawionych w rozprawie i deklaruje chęć ich realizacji.

5. Uwagi krytyczne

Pomimo wysokiej jakości opracowania rozprawy zarówno od strony merytorycznej, jak i edycyjnej, podczas lektury dysertacji zauważyłem kilka błędów i niedopowiedzeń. Dlatego oprócz pytań postawionych wcześniej, poniżej zamieszczam uwagi dodatkowe:

- str. 52 tabela 4.2: dlaczego do badań wytrzymałościowych stopu tytanu klasy 5 przyjęto temperatury 104, 183 i 261 °C, a nie zaokrąglone do pełnych dziesiątek 100, 180 i 260 °C?
- str. 63 rys.5.3: dlaczego na schemacie stanowiska badawczego nie pokazano jednego z głównych przyrządów pomiarowych, którym jest płyta piezoelektryczna służąca do pomiaru sił kształtowania?
- str. 64 ostatni akapit: co oznacza sformułowanie „dociskanych na obwodzie do górnej powierzchni korpusu ze stałym momentem 10 Nm”?
- str. 65 rys. 5.5: trajektoria narzędzia na tym rysunku jest mało czytelna, wystarczył rys. 5.4;
- str. 92: olej SAE 10W40 nie jest olejem mineralnym tylko półsyntetycznym;
- str. 95/96: rys. 6.7 rozdzielony został pomiędzy dwie kolejne strony;
- str. 112, 7 wiersz: pomiędzy strefą II i III nie obserwuje się skokowego wzrostu wartości współczynnika tarcia, czy chodziło o wzrost w strefie II?
- str. 118, 14w. od dołu: błędnie podano numery rysunków, powinno być 6.24-6.26, ponadto w tym przypadku lepiej byłoby mówić o topografii powierzchni, a nie o morfologii
- str. 215: w pozycjach literatury [225], [227] i [228] podano bliżej nie określone odnośniki, nazwy plików pdf oraz „Informacja Techniczna Produktu”, bez podania adresu strony, bądź danych publikacji.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność tematyki rozprawy doktorskiej, jej znaczenie poznawcze oraz umiejętności Autora, który:

- wykazał dobre opanowanie warsztatu naukowego w zakresie projektowania i analizowania procesów kształtowania przyrostowego blach oraz modelowania numerycznego procesu,
- sformułował i rozwiązał samodzielnie określony problem naukowy, zgodnie z postawioną tezą oraz zastosował do jego rozwiązania właściwie dobrane metody badawcze,
- zaprojektował i skonstruował złożone stanowisko badawcze,
- na podstawie badań doświadczalnych i analiz teoretycznych uzupełnił wiedzę naukową w zakresie istotnego wpływu parametrów procesu kształtowania przyrostowego blach tytanowych na parametry siłowe procesu oraz możliwości wykonania wytłoczek,
- w przedstawionej rozprawie doktorskiej wykazał ogólną wiedzę w obszarze projektowania i badania procesów obróbki plastycznej, a w szczególności niekonwencjonalnego tłoczenia blach, który to obszar przynależy do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna,

stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz.1668 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Marcina Szpunara do publicznej obrony tej rozprawy.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy przeprowadzonych badań, jak również analizy ich wyników oraz wyciągnięte wnioski końcowe, stawiam wniosek o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.

Marcin Knapiński

