

Dr hab. inż. Marek Hawryluk, prof. Politechniki Wrocławskiej

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wójcika pt: „Modelowanie fizyczne walcowania poprzeczno-klinowego”

Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater

Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Bulzak

Ocena istotności problemu naukowego

Ciągły rozwój firm przemysłowych oraz ośrodków naukowo-badawczych powodują, że wciąż poszukuje się nowych oraz bardziej zaawansowanych i optymalnych technologii przeróbki plastycznej, przy uwzględnieniu aspektów ekologicznych i ekonomicznych, mających na celu jednoczesne obniżanie kosztów wytwarzania. Dlatego podczas optymalizacji procesów kształtowania plastycznego pod uwagę brane są ograniczenia związane ze stopniem skomplikowania badań eksperymentalnych, które znacząco podnoszą koszty oraz czasochłonność testów. Obecnie w celu efektywnego przewidywania geometrii oraz jakości i własności gotowego wyrobu, już na etapie projektowania procesu stosuje się różnego rodzaju metody wspomagające procesy wytwarzania. Stąd do analizy i optymalizacji procesów obróbki plastycznej metali najczęściej wykorzystuje się modelowanie numeryczne oraz modelowanie fizyczne. Modelowanie oparte na aparacie matematycznym jest znaną metodą obliczeniową i polega na zastąpieniu kształtowanego materiału oraz narzędzi układami równań, rachunkami różniczkowymi oraz obliczeniami za pomocą metody elementów skończonych. Natomiast modelowanie fizyczne jest metodą, która pozwala na przeprowadzenie analizy płynięcia odkształcanego materiału, wyznaczenie rozkładów odkształceń i naprężeń oraz parametrów siłowych. Istotą modelowania fizycznego jest zastąpienie materiału rzeczywistego materiałem modelowym, który zachowuje symuluje zachowanie się materiału rzeczywistego poprzez spełnienie określonych warunków podobieństwa wynikających zarówno z teorii podobieństwa, jak i mechaniki procesów. Przy czym znacznie częściej ze względu na specyfikę materiałów modelowych jest ono wykorzystywane do symulowania objętościowych procesów kształtowania plastycznego na ciepło i gorąco, znacznie rzadziej procesów formowania na zimno lub procesów związanych z innym niż 3-osiowy stan naprężeń ściskających. Niemniej jednak zastosowanie modelowania fizycznego z wykorzystaniem miękkich materiałów modelowych powoduje, że w celu optymalizacji procesów wytwarzania zamiast prowadzić długie i kosztowne testy w warunkach przemysłowych możliwe jest ich duże odwzorowanie w warunkach laboratoryjnych, a oczywistym następstwem tego powinny być próby zastosowania otrzymanych wyników w procesach przemysłowych. Dlatego tematykę przedstawioną w recenzowanej pracy doktorskiej, w której Autor, opracowuje oryginalną metodykę badań z wykorzystaniem modelowania fizycznego dla procesu walcowania poprzeczno-klinowego, wykorzystując jako materiał modelowy plastelinę handlową PRIMO, należy uznać **za aktualną i nowatorską**.

Główną ideą pracy doktorskiej jest zaproponowanie autorskiej metody badawczej w oparciu o modelowanie fizyczne do badań plastometrycznych, wytrzymałościowych oraz badań związanych z warunkami tarcia, pękaniem materiału i ograniczeniami występującymi w trakcie walcowania poprzeczno-klinowego dla materiału modelowego (plasteliny). Wyniki uzyskanych badań zostały odniesione do analogicznych badań związanych z przemysłowymi procesami kształtowania głównie stali C45 na gorąco (R260, RHS). Analizowano także zastosowanie modelowania fizycznego do przypadków walcowania poprzeczno-klinowego elementów typu, stopniowany wałek, kula oraz sworzeń kulisty.

Uzyskane w ramach rozprawy doktorskiej wyniki badań przyczynią się do zoptymalizowania pod kątem ekonomicznym, obecnie realizowanych procesów walcowania poprzeczno-klinowego oraz ułatwią opracowanie zaleceń do innych operacji i technologii kształtowania plastycznego dla innych zbliżonych procesów.

Merytoryczna ocena pracy

Recenzowana praca doktorska pana mgr inż. Łukasza Wójcika została napisana w języku polskim w formie książki pod tytułem: „**Modelowanie fizyczne walcowania poprzeczno-klinowego**”. Łącznie rozprawa obejmuje 146 stron i składa się z 8 rozdziałów głównych, streszczenia w j. polskim i angielskim oraz bibliografii. Praca ma interdyscyplinarny charakter, bowiem po przeczytaniu całości można stwierdzić, że jest z pogranicza obróbki plastycznej metali a także w pewnym sensie inżynierii materiałowej, bowiem dotyczy określenia własności dla materiałów modelowych typu plastelina handlowa PRIMO.

Studium literaturowe (obejmujące 123 pozycje literaturowych – głównie w j. angielskim) zostało przeprowadzone rzetelnie, z krytycznym podejściem do omawianych problemów, w tym wykorzystaniem modelowania fizycznego przy użyciu miękkich materiałów modelowych do innych niż dotychczas objętościowych procesów wytwarzania (np. kucia, czy wyciskania), czyli procesu walcowania poprzeczno-klinowego. Informacje te były punktem wyjścia do określenia głównego celu pracy, który pokrywa się z tytułem doktoratu, czyli opracowaniem autorskiej metodyki badań modelowania fizycznego procesu walcowania poprzeczno-klinowego wykorzystując jako materiał modelowy plastelinę handlową PRIMO. W opinii recenzenta wybrane przez doktoranta pozycje literaturowe są adekwatne do opracowywanego zagadnienia, choć trochę dziwi fakt, że doktorant nie wykorzystał żadnej pozycji naukowej recenzenta, który też intensywnie zajmował i zajmuje się modelowaniem fizycznym z wykorzystaniem miękkich materiałów modelowych na bazie wosku filia oraz plastelin wraz z modyfikatorami. W części badawczo-doświadczałnej przeprowadzono cały szereg badań dotyczących materiału modelowego – plasteliny (w kolorze białym oraz czarnym) o handlowej nazwie PRIMO. Część ta obejmowała wstępne badania plastometryczne oraz wytrzymałościowe, na podstawie których wyznaczono modele materiałowe dla dwóch rodzajów plasteliny. Na tej podstawie stwierdzono podobieństwo krzywych płynięcia wybranych materiałów modelowych do stali C45 kształtowanej na gorąco. Następnie przeprowadzono badania dot. warunków tarcia pomiędzy materiałem modelowym a narzędziami wykonanymi z ABS. W kolejnej części badań przeprowadzono badania eksperymentalno-teoretyczne pozwalające na określenie granicznej wartości kryterium pęknięcia według kryterium Cockrofta-Lathama dla materiału modelowego oraz stali C45. Przeprowadzono również badania doświadczalne modelowania fizycznego powstawania tzw. zjawiska Mannesmanna za pomocą metody obciskania w kanale. Przedostatnim etapem badań były badania możliwości modelowania fizycznego ograniczeń występujących w trakcie walcowania poprzeczno-klinowego. Oba te rozdziały należy uznać za zdecydowaną nowość pracy doktorskiej. W ostatnim etapie przeprowadzono modelowanie fizyczne wybranych procesów walcowania w celu określenia możliwości zastosowania modelowania fizycznego do symulacji i analizy przemysłowych procesów walcowania poprzeczno-klinowego. Ostatni rozdział zawiera najważniejsze wnioski, które sformułowano na podstawie przeprowadzonych bardzo obszernych badań. Zrealizowane badania teoretyczno-doświadczalne pozwoliły na potwierdzenie tezy rozprawy doktorskiej, stanowiącej: że modelowanie fizyczne z wykorzystaniem plasteliny handlowej umożliwia analizę kinematyki płynięcia materiału oraz prognozowanie parametrów siłowych i ograniczeń występujących podczas walcowania poprzeczno-klinowego.

Należy podkreślić, że poruszane w pracy doktorskiej zagadnienia, wydają się być istotne dla określenia możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników.

Idea rozwiązania przedstawionego problemu jest ciekawa i stanowi spore wyzwanie naukowo-badawcze, a Autor podszedł do tego zagadnienia kompleksowo i wielowariantowo (różne plasteliny i różne warunki odkształcania dla kilku różnych badań), a uzyskane wyniki zostały porównane i zweryfikowane o procesy kucia poprzeczno-klinowego oraz przemysłowe procesy walcowania dla konkretnych wyrobów. Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Wójcika budzi również pewne uwagi dyskusyjne i krytyczne oraz edycyjne. Poszczególne, szczegółowe kwestie natury dyskusyjnej i krytycznej oraz uwagi z pytaniami zostały zawarte na końcu podsumowania każdego z rozdziałów pracy doktorskiej. Natomiast, jako najważniejsze uwagi dyskusyjne należy wskazać na nie odniesienie się konkretnie do stopnia dopasowania danego materiału modelowego (jego składu chemicznego/ kompozycji) do wytypowanego materiału rzeczywistego, lecz wskazywanie jedynie na podobieństwo krzywych płynięcia dla obu tych materiałów. W opinii recenzenta dobór odpowiedniego materiału modelowego (jego kompozycji) jest kluczowym czynnikiem decydującym o poprawności modelowania fizycznego. Można też odnieść wrażenie, że w niektórych miejscach brak jest krytycznego podejścia do uzyskanych wyników badań, bowiem Doktorant tylko odnosi się do „pozytywnych” wyników, a nie próbuje wyjaśnić, dlaczego w niektórych przypadkach uzyskane wyniki są nie do końca zgodne z przewidywaniem.

Szczegółowa charakterystyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wójcika

We wstępie Doktorant po krótko przedstawił zagadnienia związane z wykorzystaniem modelowania fizycznego do analizy przemysłowych procesów obróbki plastycznej oraz zasygnalizował, że badania modelowania fizycznego walcowania poprzeczno-klinowego prowadzono dotychczas w bardzo małym stopniu. Największa liczba pozycji literaturowych związanych z modelowaniem fizycznym z wykorzystaniem miękkich materiałów modelowych dotyczy procesów kucia i wyciskania, w których dominuje 3-osiowy stan naprężeń ściskających, czyli nieco inny niż podczas walcowania.

Następnie w **rozdziale nr I**, Doktorant zaprezentował analizę stanu zagadnienia opisując metody modelowania i symulacji procesów kształtowania plastycznego w warunkach kształtowania na gorąco i stwierdzając, że pozwalają one na znaczące ułatwienie projektowania technologii poprzez wyeliminowanie badań prowadzonych w warunkach przemysłowych. Skoncentrował się przede wszystkim na metodzie modelowania fizycznego z wykorzystaniem miękkich materiałów modelowych bazujących na plastelinie, jako alternatywnej metodzie do modelowania numerycznego. W związku z powyższym za celowe uznał opracowanie metody modelowania fizycznego procesu walcowania poprzeczno-klinowego przy użyciu plasteliny handlowej jako materiału modelującego stal kształtowaną na gorąco. Doktorant stwierdził, że przeprowadzone modelowanie fizyczne pozwoli na określenie możliwości zamodelowania procesu walcowania poprzeczno-klinowego, a także ograniczeń w procesie walcowania oraz określenie zgodności wyników otrzymanych z modelowania fizycznego i z badań rzeczywistych.

Uwaga nr 1: Po przeczytaniu tego rozdziału można mieć pewien niedosyt, bowiem Autor opisując materiały stosowane w modelowaniu fizycznym trochę miesza materiały modelowe do symulacji procesów z materiałami modelowymi stosowanymi na narzędzia w tej metodzie. W opinii recenzenta jest mało informacji na temat analizy materiałowej (składu chemicznego oraz zmian w strukturze podczas odkształcania-fizyki odkształcania elastomerów) materiałów modelowych, a w szczególności wybranych do badań plastelin. Ponadto Doktorant nie odniósł się konkretnie do stopnia dopasowania materiału modelowego do wytypowanego materiału rzeczywistego, wskazując jedynie na podobieństwo krzywych płynięcia tych materiałów. W opinii recenzenta dobór odpowiedniego materiału modelowego (jego kompozycji) jest kluczowym czynnikiem decydującym o poprawności modelowania fizycznego.

UWAGA 1: Czy wg Doktoranta materiał modelowy pokazany na rys. 1.6 jest wystarczająco dopasowany do materiału metalicznego, stali 35MnCr5?

W **rozdziale II** Doktorant przedstawił główny cel i zakres pracy. W rozdziale tym Mgr inż. Łukasz Wójcik w zaprezentowanym wcześniej stanie zagadnienia wyraźnie wskazał i podkreślił problem badawczy z jakim zamierza się zmierzyć. W rozprawie przedstawiona zostanie szczegółowa analiza możliwości zastosowania modelowania fizycznego jako metody symulacji, pozwalającej na badania i analizę procesów walcowania poprzeczno-klinowego. Prace badawcze będą prowadzone z wykorzystaniem materiału modelowego typu plastelina handlowa w kolorze białym oraz czarnym, kształtowanego w temperaturach 0°C, 5°C, 10°C, 15°C oraz 20°C, dla wymienionego wcześniej zakresu badań.

Na podstawie stanu zagadnienia (przedstawionego w rozdziale 2) mgr inż. Łukasz Wójcik sformułował następującą tezę pracy:

„Modelowanie fizyczne z wykorzystaniem plasteliny handlowej umożliwi analizę kinematyki płynięcia materiału, prognozowanie parametrów siłowych oraz ograniczeń występujących w procesie walcowania poprzeczno-klinowego” (opisaną szczegółowo na stronie 48) do udowodnienia której Doktorant przeprowadził wiele obszernych badań i analiz, a także ich weryfikację, co zostało opisane w kolejnych rozdziałach (od 3 do 7) rozprawy doktorskiej. W ostatnich rozdziałach mgr inż. Łukasz Wójcik przedstawił podsumowanie i wnioski oraz spis literatury.

W opinii recenzenta teza jest trochę ogólna i oczywista, lecz poprawna i oddaje zamysł badawczy, który w wyniku zaplanowanych i zrealizowanych badań pozwala na udowodnienie tezy rozprawy doktorskiej.

W **rozdziale III** przedstawiono główne badania dotyczące charakterystyk materiałów modelowych: plasteliny białej i czarnej. Obejmowały one: badania plastometryczne, w trakcie których wyznaczono krzywe płynięcia w próbie statycznego ściskania oraz rozciągania. Wyznaczono, także współczynnik i czynnik tarcia pomiędzy materiałem modelowym a narzędziami wykonanymi z ABS-u oraz co zasługuje na uznanie graniczne wartości kryterium pęknięcia według kryterium Cockrofta-Lathama. Badania materiału modelowego przeprowadzono w zakresie temperatur od 0°C do 20°C. Szkoda, że doktorant nie pokusił się o wykorzystanie tych wyników, np. w przypadku modelowania numerycznego konkretnych procesów walcowania opisanych w rozdziale 7. W rozdziale tym opisano także autorską procedurę przygotowania próbek z materiału modelowego. Zaprezentowane badania oraz analiza uzyskanych wyników są bardzo ciekawe i na pewno wymagały od doktoranta wielu czasochłonnych testów w rygorystycznych warunkach (2 materiały, 4 temperatury, 3 prędkości odkształcania i dla każdego wariantu po 3 powtórzenia). Niestety w opinii recenzenta jest kilka niedociągnięć oraz uwag. Najważniejsze z nich:

Uwaga nr 2: Zamiast podawać parametry i własności materiału z którego wykonane zostały narzędzia wykorzystywane w badaniach doktorant powinien włączyć się w skład chemiczny, zmiany podczas odkształcenia dla materiału modelowego, bo on stanowił meritum problemu.

Uwaga nr 3: Maszyna wytrzymałościowa Instron ma maksymalny zakres 50kN, podczas gdy w trakcie badań śpęczania/rozciągania siły są na poziomie kilku lub kilkunastu Newtonów, a więc w zakresie błędu maszyny.

Uwaga nr 4: Nie do końca zrozumiałą jest sposób wyznaczania średniej prędkości odkształcania, bo próba ściskania realizowana była przy stałej prędkości liniowej, co oznacza, że w końcowej fazie odkształcenia prędkości odkształcania wzrastają. Proszę o wyjaśnienie.

Uwaga nr 5: Dla jakich wartości odkształceń był opracowywany wykres na rys. 3.10? Bowiem w przypadku plasteliny czarnej, która charakteryzuje się osłabieniem wartości naprężenia wyraźnie zmieniają się z odkształceniem (rys. 3.9).

Uwaga nr 6: Czy równania 3.4-3.8 były wprowadzane do MES (Deform), czy wartości były wpisywane tabelarycznie.

Uwaga nr 7: Szkoda, że na wykresie 3.12 nie dołożono kilku krzywych dla materiału modelowego wybierając np. po prawej stronie dodatkową oś Y dla naprężenia upł. dla materiału modelowego.

Uwaga nr 8: W jaki sposób określano ϵ_r we wzorze 3.11? Jest to istotne w przypadku wyznaczenia względnego wydłużenia równomiernego.

Uwaga nr 9: Na rys. 3.18 przedstawiono wykresy rozciągania dla obu rodzajów plastelin, przy czym zastanawiające są wartości na osiach X, na których opisano wydłużenia względne i oznaczono E, podczas gdy na rys. 3.17c pokazano również wydłużenie względne, lecz w innych jednostkach. Co więcej przedstawienie krzywych rozciągania w takim układzie uniemożliwia ich porównanie z krzywymi wyznaczonymi w próbie ściskania. Dla krzywych ściskania powinno się uzyskać większe wartości odkształcenia niż dla próby rozciągania. Zdziwiałoby jest również to, że w próbach rozciągania uzyskano większe różnice w poziomach naprężenia zwłaszcza dla plasteliny czarnej wobec naprężeń uzyskanych w próbie ściskania.

Rozdział IV dotyczy wyznaczenia współczynników i czynników tarcia zarówno statycznych jak i dynamicznych wartości tych wskaźników. Należy podkreślić, że jest to ciekawy rozdział, lecz jednocześnie w opinii recenzenta budzi najwięcej uwag krytycznych. Doktorant w oparciu o prawo Amontonsa-Coulomba w próbie na opracowanym autorskim stanowisku badawczym opisanym i przedstawionym na rys. 4.1 i 4.2 przeprowadził cały szereg badań w celu określenia wspomnianych powyżej parametrów. Następnie w tabeli 12 zaprezentował uzyskane wartości.

Uwaga nr 10: Dlaczego w badaniach Doktorant wykorzystał właśnie tę próbę do wyznaczenia parametrów tarcia, podczas gdy zazwyczaj dla tego typu materiałów modelowych prawidłowe rezultaty uzyskuje się w próbie pierścieniowej.

Uwaga nr 11: Czy we wzorze 4.1 są poprawne jednostki dla q_n ?

Uwaga nr 12: Czy, aby na pewno uzyskane wartości współ. tarcia są prawidłowe, zwłaszcza w przypadku tarcia statycznego, bowiem w niektórych przypadkach są znacznie powyżej 1. Doktorant w stanie zagadnienia opisywał współczynniki tarcia uzyskiwane dla podobnych materiałów modelowych uzyskiwane przez innych badaczy, wówczas te współ. były na poziomie maks. do 0.44.

Uwaga nr 13: Dlatego zastanawiające jest dlaczego doktorant nie zweryfikował uzyskanych wartości współczynników tarcia w oparciu o inną metodę wyznaczenia współczynnika tarcia.

Uwaga nr 14: Jak można wytłumaczyć fakt, że przy wyższych temperaturach realizacji testów tarcia uzyskano niższe wartości współ. tarcia statycznego i dynamicznego dla obu plastelin? Co mogło być tego powodem?

Uwaga nr 15: W tabeli 12 Doktorant przytoczył wsp. tarcia dla stali węglowych i różnych warunków tribologicznych (smarów). Czy wobec takich wartości doktorant uważa, że jest możliwe zachowanie podobieństwa warunków tarcia dla materiałów modelowych i rzeczywistych?

Na uwagę zasługuje **rozdział V** dotyczący wyznaczenia wartości granicznej funkcji zniszczenia zastosowano kryterium Cockrofta-Lathama, określający moment rozdzielenia materiału następujący w wyniku wyczerpania się możliwości odkształcania plastycznego materiału. Przy czym w opinii recenzenta po zapoznaniu się z opisem badań jest to raczej znormalizowane kryterium CL. W celu określenia wpływu temperatury na zmianę wartości granicznej całki Cockrofta-Lathama badania wykonano dla pięciu różnych temperatur 0°C, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C. Próbki do badań z materiału modelowego przygotowano w oparciu o autorską procedurę oraz poprzez walcowanie poprzeczno-klinowe (łącznie 30 próbek, dla różnych warunków i po 3 powtórzenia dla każdego wariantu). Następnie przeprowadzono próby rozciągania statycznego materiałów modelowych do zerwania, a w trakcie prób mierzono siły oraz średnice próbek po zerwaniu. Jednocześnie przeprowadzono modelowanie numeryczne dla każdego wariantu do momentu, w którym w procesie modelowym dochodziło do rozdzielenia materiału. W ten sposób wyznaczono wartości kryterium C-L. Wartości otrzymanego kryterium w zakresie badanych temperatur zmieniają się w zakresie od 0,646 do 1,453 dla plasteliny PRIMO białej, a w przypadku plasteliny PRIMO czarnej w zakresie od 0,691 do 2,037. W celu skonfrontowania wyników przeprowadzono analogiczne badania dla stali C45 przy temperaturach: 900, 1000, 1100 i 1200 °C. Otrzymane wyniki dot. kryterium CL dla stali C45 są porównywalne z wyznaczonymi wartościami całki C-L.

Uwaga nr 16: Przy wyznaczaniu wartości C-L istotne jest poprawne określenie średnicy d po zerwaniu. Stąd pojawia się pytanie w jaki sposób dokonywano pomiarów tych średnic oraz jakie wartości średnic znajdują się w tabeli 4.15 ?

Uwaga nr 17: Dlaczego uzyskane wyniki nie zostały wykorzystane w dalszej części pracy do zamodelowania konkretnych procesów (opisanych w rozdziale V) i wykorzystanie wartości C-L do przewidywania pęknięcia materiału?

Rozdział VI dotyczy badań nad zjawiskami ograniczającymi procesy walcowania poprzeczno-klinowego, które obejmowały: analizę pęknięć wewnętrznych (efekt Mannesmanna) oraz badań modelowych zjawiska pęknięcia wewnętrznego, poślizgu, przewężenia oraz rozerwania. Jest to jeden z najbardziej wartościowych rozdziałów bowiem odnosi się stricte do wszystkich tych zjawisk i problemów, które występują w procesach walcowniczych.

W szczególności analiza efektu Mannesmanna realizowana w tzw. próbie obciskania wykazała dużą zbieżność zarówno dla materiałów rzeczywistych, jak i modelowych. Analiza porównawcza wyników otrzymanych w badaniach pozwoliła na określenie zakresów temperatur materiałów modelowych, w których odzwierciedlają one proces pęknięcia materiałów rzeczywistych w wybranych temperaturach kształtowania. Na przykład warunki kształtowania stali C45 w temperaturze 1050°C, najlepiej odwzorowuje plastelina PRIMO biała kształtowana w temperaturze 9°C.

Podobnie w przypadku badań modelowych zjawiska pęknięcia wewnętrznego, poślizgu, przewężenia oraz rozerwania, na podstawie których w wyniku niewłaściwego doboru parametrów geometrycznych narzędzi kształtujących dochodzi do wielu wad wyrobów walcowanych uzyskano wysoką zgodność pomiędzy materiałami rzeczywistymi, jak i modelowymi. Otrzymane wyniki pozwalają na określenie warunków procesu modelowania fizycznego procesów walcowania poprzecznego, w których mogą wystąpić pęknięcia wewnętrzne, poślizgi, przewężenia oraz rozerwania. Co więcej, można stwierdzić, że przeprowadzone porównanie walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów ze stali C45 w temperaturze 1050°C i modelowania fizycznego pozwala na zastosowanie plasteliny PRIMO jako materiału modelowego dającego możliwość oszacowania parametrów siłowych walcowania.

Uwaga nr 18: Dlaczego doktorant rozpoczął ten etap badań od prób dla materiałów rzeczywistych (metalicznych) oraz dlaczego wybrał dodatkowo poza stalą C45 inne stale typu 50HS oraz R260? Czy one miały zbliżone charakterystyki jak stal C45? Brakuje uzasadnienia ich wyboru oraz kolejności przeprowadzonych badań dotyczących efektu Mannesmanna.

Uwaga nr 19: Na rys. 6.22 jest prawdopodobnie błąd w nazwie stali.

Uwaga nr 20: Czy w przypadku modelowania fizycznego były stosowane po 3 próbki dla każdego wariantu (potwierdzenie wyników), bowiem oglądając zdjęcia próbek po testach są one niejednorodnie zdeformowane (niesymetryczna geometria).

Uwaga nr 21: Czy w przypadku badań powstawania pęknięć wewnątrz gotowego wyrobu uzyskiwano powtarzalną geometrię dla próbek odkształczanych w tych samych warunkach. Analizując bowiem zdjęcia na rys. 6.17 można odnieść wrażenie, że próbki są powykrzywiane (efekt banana). Podobnie widać to na rys. 6.18-6.19. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku próbek z plasteliny. Proszę o komentarz.

W **rozdziale VII** przeprowadzono modelowanie fizyczne oraz próby rzeczywiste dla 3 wybranych procesów walcowania poprzeczno-klinowego: wałka stopniowanego, kul oraz sworzni kulistych. Dla wszystkich tych procesów doktorant zaprojektował i wykonał narzędzia do modelowania fizycznego. Natomiast w przypadku procesów rzeczywistych wykorzystał dostępny sprzęt i aparaturę Katedry.

Uwaga nr 22: Proszę o wyjaśnienie dlaczego na rys. 7.7 i 7.8 przebiegi sił dla plasteliny białej są różne w stosunku do przebiegów dla stali C45.

Uwaga nr 23: Dlaczego doktorant stwierdza, że:

„W przypadku walcowania kul plastelina PRIMO biała okazała się materiałem lepiej modelującym proces walcowania kul pod względem odwzorowania wad powierzchni.”, skoro analizując zdjęcia na rys. 7.11-7.13 można zauważyć, że lepsze odwzorowanie daje plastelina czarna niż biała, dla której widoczne są liczne pęknięcia na powierzchni, których z kolei nie widać na zdjęciu dla materiału rzeczywistego?

Uwaga nr 24: jak można wytłumaczyć różnice w przebiegach sił dla stali i plasteliny w początkowej fazie kształtowania (rys. 7.16) ? Podobnie w przypadku kształtowania sworzni kulistych, siły są nieco bardziej rozbieżne.

Uwaga nr 25: Czy wobec przedstawionych wyników badań dla 3 wytypowanych przemysłowych procesów walcowania poprzeczno-klinowego oraz ich modelowania fizycznego nie wydaje się, że w jednym przypadku lepsze rezultaty uzyskano dla plasteliny białej (sworzni kulistych), a w innym dla czarnej (wałka stopniowanego), a dla jeszcze innego przypadku (kule) recenzent ma odmienne zdanie od wniosków Doktoranta. Może warto jednak zastanowić się, jaki jest stopień dopasowania materiału modelowego dla danego materiału rzeczywistego, na co zwrócił uwagę recenzent na początku?

Rozdział IX przedstawia bardzo rzeczowe podsumowanie oraz najważniejsze wnioski na podstawie przeprowadzonych badań. W wyniku czego, Doktorant słusznie stwierdza, że przeprowadzone badania teoretyczno – doświadczalnych pozwoliły na potwierdzenie postawionej w rozprawie tezy, że modelowanie fizyczne z wykorzystaniem plasteliny handlowej umożliwia analizę kinematyki płynięcia materiału oraz prognozowanie parametrów siłowych oraz ograniczeń występujących podczas walcowania poprzeczno-klinowego.

Podsumowanie

Opiniowana praca charakteryzuje się dobrym poziomem naukowym. Autor swobodnie porusza się w zagadnieniach dotyczących kształtowania plastycznego, w szczególności walcowania poprzeczno-klinowego. Prac odznacza się ona kompleksowym ujęciem problemu i starannym metodycznym podejściem do rozwiązania zagadnienia. Uzyskane wyniki stwarzają możliwość dalszego rozwijania metod kształtowania plastycznego w obszarze walcowania poprzeczno-klinowego.

Do największych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

1. Opracowanie autorskiej i kompleksowej metodyki badawczej dotyczących modelowania fizycznego oraz wyznaczenie kluczowych właściwości i parametrów dla miękkich materiałów modelowych opartych na plastelinie PRIMO.

2. Zaprojektowanie i wykonanie specjalnych narzędzi (charakteryzujących się oryginalnym i przemyślanym kształtem pozwalającym zarówno na spęczanie, rozciąganie oraz dla innych procesów walcowania poprzeczno-klinowego). Opracowanie autorskiego stanowiska wraz z narzędziami należy uznać za bardzo wartościowe, świadczące o dużej wiedzy i doświadczeniu Doktoranta w problematyce pękania.
3. Przeprowadzenie dużej liczby testów związanych z modelowaniem fizycznym, a także symulacji numerycznych, uwzględniającej wiele istotnych czynników oraz parametrów wykorzystywanych w analizach. Ponadto, często symulacje były weryfikowane w badaniach doświadczalnych. Należy pochwalić Doktoranta potrafi wyciągnąć interesujące wnioski i spostrzeżenia.
4. Bardzo ciekawe i praktyczne podejście do modelowania efektu Mannesmana dla materiałów modelowych i rzeczywistych oraz zaobserwowanie/wykazanie dużego podobieństwa pomiędzy tymi materiałami.

Zaproponowana metodyka badań jak również jej zastosowanie należy uznać za wartościowe i oryginalne osiągnięcia Autora pracy. W szczególności należy wskazać na duży aspekt aplikacyjny proponowanego rozwiązania, gdyż wykorzystanie modelowania fizycznego z prognozowaniem obszarów występowania pęknięć i innych defektów materiału jest cenne dla przemysłowych procesów walcowania.

Wymienione powyżej wątpliwości i uwagi krytyczne (zwłaszcza związane z wsp. tarcia oraz brakiem oszacowania stopnia dopasowania materiału modelowego do rzeczywistego), nie obniżają istotnie końcowej oceny pracy, gdyż uważam je raczej jako uwagi dyskusyjne, które mogą być pomocne przy dalszych badaniach mgr inż. Łukasza Wójcika, a które mogą zostać zweryfikowane i rozwiązane w warunkach przemysłowych. Mam również w pełni świadomość złożoności oraz czasochłonności przeprowadzonych licznych badań i testów w wysokim reżimie warunków realizacji badań.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona mi do opinii rozprawa doktorska pt.: „*Modelowanie fizyczne walcowania poprzeczno-klinowego*” w której mgr inż. Łukasz Wójcik:

- zadawalająco rozwiązał problemy o ważnym znaczeniu poznawczym i technologicznym z zakresu problematyki modelowania fizycznego procesów walcowania poprzeczno-klinowego
- wykazał niezbędną wiedzę z zakresu przedmiotu pracy i umiejętność twórczego prowadzenia badań eksperymentalnych oraz ich analizy, spełnia wymagania wynikające z Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. W związku z tym wnoszą o przyjęcie rozprawy mgr inż. Łukasza Wójcika i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Marek Hawryluk

