

---

dr hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.

Częstochowa, 29.07.2022 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Wójcika

pt.: „Modelowanie fizyczne walcowania poprzeczno-klinowego” – wykonana  
na zlecenie Pana prof. dr hab. inż. Wojciecha Franusa Prorektora ds. Nauki  
Politechniki Lubelskiej z dnia 24 maja 2022 r.

Zagadnienia modelowania procesów przeróbki plastycznej stali, w szczególności procesów prowadzonych „na gorąco” są ważnym aspektem, który pozwala na poznanie plastycznego płynięcia metalu w procesach wytwórczych takich jak: walcowanie, kucie, wyciskanie, itp. Projektowanie procesów technologicznych przeróbki plastycznej metali należy do najtrudniejszych zagadnień, w których obecnie niezmiernie ważna jest jakość i dokładność geometryczna wytwarzanych wyrobów. Obecnie dąży się do poszukiwania tanich rozwiązań pomocnych przy opracowywaniu procesów związanych z odkształcalnością metali w szczególności podczas opracowywania nowych technologii wytwórczych. Dlatego też praca podjęta przez Doktoranta wpisuje się w ten nurt a podjęta tematyka jest istotna i aktualna.

Praca powstała pod kierunkiem Pana prof. Zbigniewa Patera, który jest promotorem recenzowanej rozprawy a Pan dr inż. Tomasz Bulzak promotorem pomocniczym.

### 1. Charakterystyka dysertacji

Recenzowana praca Pana mgr inż. Łukasza Wójcika poświęcona jest możliwości wykorzystania materiałów modelowych, takich jak: komercyjna plastelina „PRIMO” jako materiału odkształcanego i polimeru technicznego ABS, (Acrylonitrile Butadiene Styrene) jako materiału na narzędzia do analizy procesu walcowania poprzeczno-klinowego.

Doktorant w swojej rozprawie podjął się trudnego zagadnienia związanego z określeniem ograniczeń dotyczących zastosowania komercyjnych materiałów modelowych do rozwiązania zagadnień plastycznego płynięcia metalu w procesie walcowania poprzeczno-klinowego. Autor pracy słusznie podjął się określenia możliwości wykorzystania materiałów modelowych w procesie kształtowania poprzeczno-klinowego.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że rozprawa doktorska została wykonana w ramach projektu OPUS nr 2017/25/B/ST8/00294, który był finansowany przez Narodowe Centrum Nauki.

Recenzowana praca składa się ze streszczenia w języku polskim oraz angielskim, wstępu, wykazu najważniejszych symboli, siedmiu głównych rozdziałów oraz spisu literatury zamieszczonych na 146 stronach maszynopisu. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 67% całej objętości pracy. Cytowana literatura (123 pozycji) w 32 % stanowi pozycje naukowe z ubiegłego wieku, sam dobór literatury jest adekwatny do tematyki rozprawy i potwierdza aktualność tematyki badawczej podjętej przez Doktoranta. Bibliografia w głównej mierze składa się z pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w czasopismach charakteryzujących się wysokim IF w okresie ostatnich 20 lat. W dziewięciu pozycjach Doktorant występuje jako współautor, w pięciu w wysoko punktowanych czasopismach indeksowanych w bazie JCR (w ostatnich 6-ciu latach).

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Doktorant bardzo szczegółowo omówił zagadnienia związane z modelowaniem fizycznym procesów przeróbki plastycznej. Wspomniał również o modelowaniu matematycznym i numerycznym stosowanym do analizy plastycznego płynięcia materiałów wskazując wady i zalety tej techniki. Przegląd literatury w głównej mierze poświęcony jest modelowaniu fizycznemu, który Autor przedstawił w rozdziale pierwszym. W podsumowaniu przeglądu literatury Doktorant zaznaczył, że badania nad procesem walcowania poprzeczno-klinowego mogą być wykonane z użyciem plasteliny co ma potwierdzenie w przeglądzie literaturowym. Przeprowadzony przegląd literatury przez Doktoranta potwierdza jego wiedzę i przygotowanie teoretyczne do prowadzenia badań.

Na podstawie przeglądu literatury Autor sformułował tezę pracy, w której stwierdza, że *„modelowanie fizyczne z wykorzystaniem plasteliny handlowej umożliwia analizę kinematyki płynięcia materiału, prognozowanie parametrów siłowych oraz ograniczeń*



występujących w procesie walcowania poprzeczno-klinowego.” Tak postawiona teza jest w pełni uzasadniona w kontekście zrealizowanych badań.

Główny cel pracy zdefiniowano jako „... analiza możliwości modelowania fizycznego procesów walcowania poprzeczno-klinowego z wykorzystaniem materiału modelowego typu plastelina handlowa.” a wykonane przez Autora badania jednoznacznie są ukierunkowane na zrealizowanie założonego celu pracy.

Druga część pracy, obejmująca 6 rozdziałów, dotyczy badań własnych. Doktorant przedstawił zakres prowadzonych badań prowadzących do osiągnięcia celu i udowodnienia tezy. W pracy zrealizował szeroki zakres badań doświadczalnych obejmujący:

- badania plastometryczne oraz badania wytrzymałościowe plasteliny handlowej „PRIMO” o barwie białej oraz czarnej,
- badania warunków tarcia par trących: plastelina „PRIMO” biała – narzędzia wykonane z ABS, plastelina „PRIMO” czarna – narzędzia wykonane z ABS,
- badania granicznej wartości funkcji zniszczenia według kryterium Cockrofta-Lathama, z wykorzystaniem badań laboratoryjnych oraz technik komputerowych MES,
- badania modelowe powstawania efektu Mannesmana metodą obciskania obrotowego w kanale,
- badania modelowe zjawisk ograniczających proces walcowania poprzeczno-klinowego takich jak: pękanie wewnątrz materiału, poślizgi, przewężenia oraz rozerwania,
- badania modelowe wybranych procesów walcowania poprzeczno-klinowego wyrobów osiowosymetrycznych i porównanie ich wyników z procesami rzeczywistymi takich elementów jak: stopniowany wałek napędowy, kule oraz sworznie kuliste.

Należy tutaj podkreślić umiejętność wykorzystania różnych metod badawczych, tzn. badań na materiale rzeczywistym (stal C45), badania na materiale modelowym oraz zastosowanie przez Doktoranta zaawansowanych metod numerycznych do określenia kryterium pękania. Wykorzystanie aparatury naukowej oraz wielu technik badawczych dają możliwość wzajemnego uzupełnienia, co budzi uznanie.

Przeprowadzone badania modelowe i eksperymentalne cechują się przemyślanym planem. Próby technologiczne rzeczywistych procesów kształtowania z wykorzystaniem walcarki poprzeczno-klinowej pozwalają na weryfikację wyników modelowania fizycznego i określenie ograniczeń procesowych.

W trzecim rozdziale Autor opisał badania własne dotyczące określenia właściwości materiałów modelowych, komercyjnej plasteliny „PRIMO” w kolorze białym i czarnym, przedstawił również charakterystykę komercyjnego materiału kopolimeru ABS P430 STRATASYS zastosowanego na narzędzia modelowe, które wykonano techniką druku 3D. W badaniach posłużył się próbami statycznego ściskania i rozciągania, które przeprowadził na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 3369. Otrzymane wyniki przedstawił na wykresach i na ich podstawie ich aproksymacji wyznaczył współczynniki funkcji naprężenia uplastyczniającego. Ponadto Autor przedstawił krzywe plastycznego płynięcia stali C45.

Na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie dla próby rozciągania, autorskich uchwytów wkładek zaciskowych wykonanych techniką druku 3D oraz sposób przygotowania próbek poprzez walcowanie poprzeczno-klinowe w przygotowanym specjalnie stanowisku.

Rozdział czwarty Autor poświęcił zjawisku tarcia, celem badań było ustalenie współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego pomiędzy plasteliną a drukowanym materiałem ABS. Badania zostały zrealizowane za pomocą specjalnych narzędzi wydrukowanych z ABS i ciągnarki ławowej CGD-E 2000. Na podstawie otrzymanych wykresów siły Autor wyznaczył współczynniki tarcia statycznego i dynamicznego, które dla badanych wariantów bez smaru i smarem w postaci oleju PTFE zamieścił w tabeli 12.

W podsumowaniu rozdziału Autor pisze: „ Podsumowując, materiał modelowy typu plastelina handlowa PRIMO kształtowany narzędziami wydrukowanymi z ABS, bardzo dobrze oddaje warunki tarcia stali kształtowanej na gorąco narzędziami wykonanymi ze stali” nie jest to precyzyjne stwierdzenie ponieważ dopiero przy zastosowaniu odpowiedniego środka smarnego plastelina w kontakcie z ABS odwzorowuje poprawnie warunki tarcia dla stali na gorąco.

W piątym rozdziale, Autor opisuje badania dotyczące określenia wartości kryterium Cockrofta-Lathama jako jeden z parametrów podobieństwa stali C45 i plasteliny białej i czarnej. Następnie zostały wykonane symulacje komputerowe rozciągania w programie komputerowym DEFORM, podczas których obserwowano rozkład znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama. W tym rozdziale Autor dokonał również weryfikacji otrzymanych wartości kryterium podczas rzeczywistych prób rozciągania tych samych próbek ze stali C45 w symulatorze fizycznym Gleeble 3800. Wyniki przedstawił na wykresach i dokonał porównania kryterium pęknięcia stal C45 z plasteliną białą i czarną. Wyznaczenie wartości znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama jest cenne w kontekście fizycznego



i modelowania numerycznego nieciągłości w procesach przeróbki plastycznej i stanowi istotny wkład badawczy.

W rozdziale 6 Autor podjął się określeniu ograniczeń stosowania materiału modelowego pod względem niekontrolowanego poślizgu materiału kształtowanego pomiędzy narzędziami, przewężenia kształtowanych odkuwek oraz powstawania pęknięć wewnętrznych. Przeprowadził badania z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanej walcarki modelowej. Doktorant badał efekt Mannesmana związany z pęknięciami wewnętrznymi. Badania modelowe zostały zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi, na podstawie których Doktorant stwierdził, że modelowanie pęknięć wewnętrznych nie odzwierciedla warunków rzeczywistych, natomiast pozostałe zjawiska poślizgu są odwzorowywane prawidłowo, co potwierdzone jest otrzymanymi wynikami. Uzyskane wyniki uważam, za cenne gdyż określają możliwości zastosowania materiału modelowego do złożonych procesów przeróbki plastycznej jakimi są walcowanie poprzeczno-klinowe czy walcowanie skośne.

W rozdziale tym Autor dokonał również analizy parametrów siłowych dla modelowania fizycznego i rzeczywistego walcowania. Na podstawie krzywych naprężenia uplastyczniającego wyznaczył współczynnik podobieństwa  $\lambda$  dla plasteliny białej i czarnej. Używając współczynników podobieństwa dokonał porównania siły walcowania. Uzyskane wyniki z uwzględnieniem współczynników podobieństwa są zbieżne, co świadczy o poprawności wykonanych badań plastometrycznych i dobrego odwzorowania plastycznego płynięcia materiału modelowego.

Ostatni siódmy rozdział Doktorant poświęcił badaniom nad zastosowaniem materiału modelowego do wytworzenia trzech elementów w postaci wałka stopniowanego, kul oraz sworzni kulistych. Rzeczywiste procesy walcowania prowadzone były dla stali C45 przy temperaturze 1050°C. Walcowanie modelowe wykonane zostało dla plasteliny białej i czarnej przy temperaturze 5°C. Dla każdego z badanych elementów Autor dokonał starannych pomiarów geometrii elementu po walcowaniu w charakterystycznych miejscach i oceny jakościowej powierzchni. Dokonał analizy przebiegu siły podczas walcowania i dokonał porównania wyników otrzymanych w modelowaniu fizycznym i rzeczywistym procesie, uwzględniając w modelowaniu współczynniki podobieństwa określone w poprzednim rozdziale. Przeprowadzone badania oceniam wysoko a na uznanie zasługuje wykorzystanie nowoczesnych technik druku 3D do przygotowania narzędzi modelowych.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. W rozdziale tym w syntetyczny sposób mgr inż. Łukasz Wójcik przedstawił i potwierdził nowość otrzymanych wyników badań i ich poznawczy charakter określając ograniczenia w procesie walcowania poprzeczno-klinowego z zastosowaniem materiału modelowego jakim była komercyjna plastelina „PRIMO”. Doktorant potwierdził możliwość modelowania ograniczeń w procesie walcowania poprzeczno-klinowego z wykorzystaniem plasteliny „PRIMO”, do których można zaliczyć zjawiska pęknięcia wewnętrznego, poślizgu, przewężeń i rozerwania co stanowi cenną wiedzę przydatną do modelowania podobnych procesów przeróbki plastycznej. Otrzymane wyniki badań potwierdzają zrealizowanie celu oraz udowadniają postawioną tezę pracy i wpisują się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Za oryginalną część badawczą można uznać metodykę prowadzonych badań z wykorzystaniem materiałów modelowych oraz autorskie konstrukcje narzędzi modelowych wykonanych w technologii druku 3D.

## 2. Uwagi do pracy:

Praca została przygotowana bardzo starannie, poprawnie pod względem redakcyjnym i językowym, jednakże Autor nie ustrzegł się pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący:

### 2.1 Uwagi o charakterze dyskusyjnym:

- 1) Na rysunku 3.18 Autor pokazał wykresy naprężenia rozciągania w stosunku do wydłużenia względnego dla prędkości 5 mm/min i plasteliny białej, gdzie plastelina biała w temperaturze 20°C posiada większe wydłużenie względne, jednak w tabeli 9 zamieszczone dane świadczą o większym wydłużeniu plasteliny białej w temperaturze 15°C?
- 2) Mimo interesującej metodyki badania tarcia Autor uzyskał współczynniki tarcia (tabela 12), które budzą wątpliwość gdyż dla plasteliny bez zastosowanego smaru współczynniki wyniosły powyżej jedności. Co jest powodem otrzymania takich wyników?
- 3) Doktorant niewystarczająco opisał metodykę wyznaczania wartości kryterium pęknięcia Cockrofta-Lathama dla plasteliny białej i czarnej. Określenie konkretnej wartości jest możliwe na drodze porównania wyników symulacji i rozciągania materiału modelowego. Jakie wyniki badań pozwoliły na określenie wartości kryterium próbek w momencie pojawienia się pęknięcia?



- 4) W rozdziale 6.1.3 dotyczącym zjawiska Mannesmanna, Autor stwierdził, że najlepsze odwzorowanie stali C45 odkształcanej przy temperaturze 1050°C odbywa się przy zastosowaniu plasteliny białej w 9°C i czarnej w 11°C. Na jakiej podstawie Doktorant tak twierdzi, czy doktorant prowadził badania przy dodatkowych wariantach temperaturowych w stosunku do założonych na początku badań?
- 5) Czy Doktorant może wyjaśnić dlaczego modelowanie fizyczne zjawiska Mannesmanna z wykorzystaniem plasteliny ujawnia nieciągłości wewnętrzne krążków w rozdziale 6.1.2, a nie ujawnia nieciągłości wewnętrznych podczas walcowania poprzeczno-klinowego w rozdziale 6.2.2?
- 6) Na rysunku 7.12 zostały pokazane kule z plasteliny białej otrzymane w procesie walcowania poprzeczno-klinowego, na powierzchni których widoczne są pęknięcia. Czy te pęknięcia nie dyskwalifikują materiału modelowego w tym przypadku?

## 2.2 Uwagi o charakterze szczegółowym:

- 1) str. 27 i 43, odwołanie literaturowe nieprawidłowe „... Chitkara [13].” powinna być pozycja [19].
- 2) str. 43, w badaniach prowadzonych przez Shih pozycja [80] wykorzystywano walcarkę skośną planetarną, stwierdzenie „... walcowania trzema rolkami ...” jest nieprecyzyjne.
- 3) str. 71, w równaniu 4.1 występują nieprawidłowe jednostki.
- 4) str. 103, Autor powołuje się na wzór (48) jednak w pracy nie występuje taki wzór.
- 5) str. 110, Autor powołuje się na wykresy na rys. 6.10 – rys. 6.10 nie zawiera wykresów, należy przypuszczać, że dotyczy to rys. 6.11.
- 6) str. 136, niepoprawna forma stylistyczna: „...plastelina PRIMO biała nieznacznie lepiej modelowa przebieg kształtowania”.
- 7) w wykazie literatury znajdują się pozycje, na które Doktorant nie powołał się w tekście, dotyczy to pozycji 7, 16, 19, 23, 86, 100, 106, 118.

Wymienione uwagi szczegółowe nie wpływają na poziom merytoryczny pracy.

### 3. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze i praktyczne, właściwą i wartościową tezę rozprawy, która została w pełni udowodniona, a także umiejętności Doktoranta, który:

- wykazał bardzo dobre opanowanie warsztatu naukowego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a także, co jest szczególnie istotne w dyscyplinach pokrewnych – inżynieria materiałowa,
- potrafił zastosować wiele nowoczesnych metod badawczych począwszy od technik komputerowych z zastosowaniem zaawansowanych metod numerycznych poprzez badania właściwości mechanicznych, oraz modelowanie fizyczne, do którego podchodzi ze świadomością występujących ograniczeń modelowych. W swojej pracy przedstawił wyniki wraz z analizą potwierdzającą możliwość wykorzystania plasteliny, jako materiału modelowego, do modelowania ograniczeń w procesie walcowania poprzeczno-klinowego.
- sformułował poprawne i wartościowe wnioski wynikające z wyników bardzo szerokiego zakresu badań doświadczalnych.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: „*Modelowanie fizyczne walcowania poprzeczno-klinowego*” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 z późn. zm.) oraz w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020 z dnia 20 lipca 2018 roku poz. 85 z późn. zm.) w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i **wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Wójcika do publicznej obrony.**

dr. hab. inż. Piotr Szota, prof. P.Cz.

Częstochowa, 29.07.2022 r.