

dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG
Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Mechaniczny



Gdynia, 25 marca 2022 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały, pt. „Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia”

Recenzję opracowano na podstawie pisma dr hab. inż. Jarosława Bieniaś, Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna z dnia 25 lutego 2022r., zgodnie z umową o dzieło w przewodzie doktorskim RDN/IM/14/2022, stosownie do postanowień Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 r. poz. 1586).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały zatytułowana „Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia” obejmuje wprowadzenie i analizę stanu zagadnienia (odkształcalność materiałów, rodzaje i charakterystyka pęknięcia materiałów, trójosiowość naprężenia, modele pęknięcia materiałów, dotychczas stosowane testy kalibracji używanych do wyznaczania wartości granicznych zniszczenia, przewidywalność kryteriów zniszczenia, problematyka pęknięcia w procesach walcowania poprzecznego). Na podstawie wniosków z przeglądu literatury, określono cel, tezę i zakres pracy doktorskiej. Wykonano badania własne, które obejmowały: badania plastometryczne oraz wyznaczenie warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania; badania doświadczalne obciskania obrotowego; wyznaczanie wartości granicznych funkcji zniszczenia badanych materiałów metalicznych w oparciu o klasyczne próby ściskania, rozciągania oraz skręcania; porównanie wartości funkcji zniszczenia uzyskanych z próby

obciskania obrotowego z wartościami z badań plastometrycznych dla badanych materiałów metalicznych; próby obciskania obrotowego w warunkach obróbki na gorąco; zastosowanie zaproponowanego testu obciskania obrotowego, w próbie walcowania poprzeczno-klinowego na gorąco. Na zakończenie zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe oraz bibliografię, która zawiera 179 pozycji literaturowych, zostały one prawidłowo dobrane i odpowiednio wykorzystane. Rozprawa doktorska zawarta jest na 158 stronach tekstu wraz z rysunkami, wzorami i tabelami.

Układ pracy, pod względem struktury, podziału treści, kolejności rozdziałów uważam za prawidłowy. Praca przedstawiona została w dwóch głównych częściach, pierwszą stanowi wnikliwy przegląd literaturowy stanu zagadnienia poruszanego w pracy, zaś druga obszerniejsza część pracy dotyczy badań własnych. Rezultaty prac badawczych określonych w dysertacji uważam za duże osiągnięcie naukowe Doktorantki. W szczególności istotne w pracy było przedstawienie nowego testu kalibracji do wyznaczania krytycznych wartości funkcji zniszczenia, który nazwano obciskaniem obrotowym krążka w kanale między płaskimi płytami. Wyniki badań dotyczące zastosowania obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia przyczyniły się do udowodnienia postawionej tezy.

W części pierwszej rozprawy dokonano wnikliwego przeglądu literatury na podstawie, którego scharakteryzowano odkształcalność materiałów, stosowane testy kalibracji do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia oraz problematykę pęknięcia materiałów podczas walcowania poprzeczno-klinowego.

Druga część była badawczą, w której przeprowadzono badania plastometryczne oraz badania tarcia w warunkach kształtowania na zimno wybranych materiałów, miedzi CW008A i stali S355. Na podstawie wykonanych testów kalibracji oraz obciskania obrotowego na zimno przeprowadzono analizę porównawczą otrzymanych wartości funkcji zniszczenia z uwzględnieniem różnych modeli pęknięcia. Przeprowadzono także próby obciskania obrotowego na gorąco stali S355. Na koniec przeprowadzono badania procesu walcowania poprzeczno-klinowego w warunkach kształtowania na gorąco, i wyznaczano funkcję zniszczenia dla warunków obciążeń zmiennych.

Przedstawione w rozprawie badania teoretyczno – doświadczalne potwierdziły przyjętą tezę, że obciskanie obrotowe pozwala na określenie wartości krytycznych funkcji zniszczenia w warunkach obciążeń zmiennych występujących, m.in. w procesach walcowania poprzecznego i skośnego.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny posiada bardzo dobry poziom, ma strukturę typową dla prac teoretyczno – doświadczalnych, zawiera w sobie wnikliwą analizę przeglądu literaturowego, tezę i cel, przedstawiony jest program pracy, zastosowane materiały oraz metodyka badań własnych oraz wyniki, a na zakończenie zamieszczono podsumowanie i sformułowano wnioski końcowe.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych na zimno klasycznych testów kalibracji oraz zaproponowanej metody jaką jest obciskanie obrotowe na zimno i na gorąco, oraz weryfikację w próbie walcowania poprzeczno-klinowego na gorąco.

W pracy doktorskiej zawarto dziewięć rozdziałów, które dotyczyły przeglądu literaturowego i badań własnych. Pierwszy dotyczył przeglądu stanu wiedzy w obszarze takich problemów jak: pękanie materiałów, kryteria stosowane do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia, opis dotychczas stosowanych testów kalibracji, problematykę pęknięcia w procesie walcowania poprzeczno – klinowego. Drugi rozdział dotyczył uzasadnienia podjęcia tematu, a także zawarto w nim cel i zakres pracy. W trzecim rozdziale przedstawiono opis badań plastometrycznych i wyznaczania warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania wybranych materiałów na potrzeby symulacji numerycznych. W czwartym rozdziale zaprezentowano wyniki badań prób obciskania obrotowego na zimno. W piątym rozdziale zamieszczono wyniki z klasycznych testów kalibracji w warunkach kształtowania na zimno. W rozdziale szóstym zawarto analizę porównawczą otrzymanych wyników wartości funkcji zniszczenia z próby obciskania obrotowego oraz testów kalibracji z uwzględnieniem różnych modeli pęknięcia: wzrostu i łączenia się mikroszczelin, fenomenologicznego oraz rozszerzonych fenomenologicznych pęknięcia ciągłego. Porównano w tym rozdziale stany naprężeń, wyznaczono wartości średnie trójosiowości naprężenia oraz parametru kąтового Lode'go dla przeprowadzonych wcześniej procesów. W rozdziale siódmym przedstawiono wyniki z próby obciskania obrotowego na gorąco dla stali, i ich weryfikację w procesie WPK. Rozdział dziewiąty dotyczył podsumowania rozprawy doktorskiej i wyciągnięcia wniosków końcowych o charakterze naukowym oraz praktycznym.

Na podstawie analiza stanu zagadnienia i wstępnych badań własnych Doktorantka postawiła tezę pracy:

„Obciskanie obrotowe pozwala na wyznaczenie wartości krytycznych funkcji zniszczenia w warunkach obciążeń zmiennych, występujących m.in. w procesach walcowania poprzecznego i skośnego.”

Celem naukowym pracy było opracowanie nowej metody badawczej umożliwiającej wyznaczanie odkształcalności materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń zmiennych. Doktorantka prawidłowo zrealizowała cel i wykazała słuszność postawionej tezy poprzez realizację następujących zadań:

- określenie własności wybranych materiałów metalicznych na podstawie badań plastometrycznych oraz wyznaczenie warunków tarcia w badanych przypadkach kształtowania,
- badania doświadczalne procesu obciskania obrotowego w walcierce płasko – klinowej dla wybranych materiałów metalicznych,
- analizę numeryczną zrealizowanych doświadczalnie prób obciskania obrotowego w walcierce płasko – klinowej,
- przeprowadzenie prób kalibracji: ściskania, rozciągania i skręcania, wybranych materiałów metalicznych dla próbek o różnej geometrii,
- określenie wartości granicznych funkcji zniszczenia z przeprowadzonych prób kalibracji przy wykorzystaniu symulacji numerycznych w zakresie parametrów kształtowania,
- porównanie wartości granicznych funkcji zniszczenia uzyskanych z testów kalibracji oraz w próbie obciskania obrotowego,
- porównanie stanów naprężenia dla przeprowadzonych prób kalibracji oraz próby obciskania obrotowego,
- badania doświadczalne oraz analiza numeryczna procesu obciskania obrotowego stali w warunkach kształtowania na gorąco w walcierce płasko – klinowej,
- badania doświadczalne oraz analiza numeryczna procesu walcowania poprzeczno – klinowego stali w warunkach kształtowania na gorąco w walcierce płasko – klinowej.

Na podkreślenie wkładu Doktorantki w rozwój nauki w szczególności zasługuje realizacja kompleksowych badań eksperymentalnych i dokonanie analizy numerycznej (próba ściskania, rozciągania, skręcania oraz obciskania obrotowego), które pozwoliły na

wyznaczenie rozkładu intensywności odkształcenia, rozkładu bezwymiarowych i naprężeniowych wartości funkcji zniszczenia oraz rozkładu trójosiowości naprężenia i parametru kąтового Lode'go.

Poddana do oceny rozprawa doktorska jest zredagowana należycie, posiada prawidłową strukturę, jest spójna przedmiotowo. Napisana jest poprawnie ze względu na język techniczny z użyciem właściwej terminologii. Tytuł pracy doktorskiej jest sformułowany w sposób przemyślany i odzwierciedla jej treść.

Wykonane badania teoretyczno – doświadczalne potwierdziły przyjętą tezę rozprawy, że obciskanie obrotowe pozwala na ustalenie wartości krytycznych funkcji zniszczenia w warunkach obciążeń zmiennych występujących, m.in. w procesach walcowania poprzecznego i skośnego. Rozprawa doktorska jest oryginalna, i uważam że rezultaty badań doświadczalnych i analiz numerycznych przedstawionych w pracy są dużym osiągnięciem naukowym i stanowią wartość dodaną do zagadnień związanych z dyscypliną naukową *inżynieria mechaniczna*.

3. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Po przeanalizowaniu zagadnień zawartych w rozprawie doktorskiej nasuwają się uwagi oraz kwestie o charakterze dyskusyjnym. Jednakże w niczym nie umniejszają one wartości naukowej, a w szczególności pomogą w dalszym wykorzystaniu analiz wyników i zamieszczeniu ich w ewentualnych publikacjach monograficznych czy w artykułach naukowych, a mianowicie:

- Określenie własności wybranych materiałów metalicznych na podstawie badań plastometrycznych w badanych przypadkach kształtowania odbyło się w bardzo szerokim aspekcie, badania zostały przeprowadzone na wielu stanowiskach badawczych co stanowi moje wielkie uznanie i świadczy o ogromie wykonanej pracy przez Doktorantkę. Wykonano próbę ściskania, rozciągania i skręcania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej INSTRON 1000HDX i skrętarki WP 510. Nasuwa mi się jednak pytanie, czy zasadne byłoby dodatkowe wykonanie badania plastometrycznego na dylatometrze – plastometrze, gdzie jest możliwe ustalenie w sposób precyzyjny dla materiałów metalicznych wpływu parametrów odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego?

- Rysunki przedstawione w drugiej części pracy są wykonane prawidłowo, jednak Doktorantka nie ustrzegła się błędów i braków w opisach. Przykładowo na rysunkach 7.8 – 7.16 powinny się znaleźć opisy ze szczegółowym oznaczeniem miejsc mikropęknięć i pęknięć, szczelin, a także kierunki ich propagacji, zgodnie z klasyfikacją procesów i morfologii pęknięcia. A także na rysunkach 4.13 – 4.16; 5.25 – 5.32, 7.19 – 7.21, są prawidłowo przedstawione rozkłady temperatury, odkształcenia, intensywności odkształcenia, funkcji zniszczenia, jednak na kolorowych skalach wartości nie są zapisane oznaczenia i brak jest jednostek.
- Brak jest również dokładnie określonych jednostek przy wartościach temperatury, przykładowo na stronie 114 jest „temperatury 950, 1050 i 1150 °C”, a powinno być „temperatury 950°C, 1050°C i 1150°C”, podobnie na stronie 122 jest „Rozkłady intensywności odkształcenia w próbkach nagranych odpowiednio do temperatur 950, 1050 i 1150 °C po obciążeniu na granicznych długościach drogi kształtowania przedstawiono na rysunku 7.19.”, a powinno być „Rozkłady intensywności odkształcenia w próbkach nagranych odpowiednio do temperatur 950°C, 1050°C i 1150°C po obciążeniu na granicznych długościach drogi kształtowania przedstawiono na rysunku 7.19.”
- W literaturze znajduje się bardzo bogaty spis publikacji dotyczący aktualnego stanu zagadnienia z zakresu tematyki rozprawy, są one najnowsze i precyzyjnie dobrane. Jednak wydaje mi się, że warto byłoby przedstawić aktualną wiedzę, którą można znaleźć w recenzowanych źródłach internetowych.

Zamieszczone uwagi szczegółowe są bardziej o charakterze dyskusyjnym i nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko.

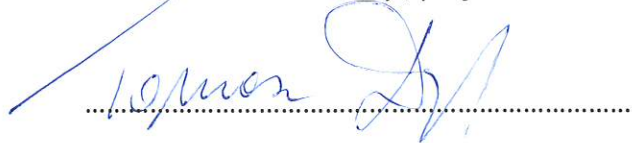
4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Doktorantka wykazała w opracowanej rozprawie doktorskiej opanowany kunszt badawczy poprzez samodzielność prowadzenia badań doświadczalnych oraz umiejętność wnioskowania merytorycznego na podstawie uzyskanych wyników analiz przeglądu literaturowego oraz badań doświadczalnych i teoretycznych. Opiniując przedstawioną rozprawę pragnę podkreślić, że podjęty w pracy temat jest bardzo aktualny i ważny. Pracę oceniam jako bardzo dobrą i wnoszącą znaczny wkład w rozwój nauki.

Podsumowanie i wnioski końcowe umieszczone w rozprawie doktorskiej jednoznacznie świadczą o poznawczej wartości dysertacji oraz wskazują na możliwości wykorzystania nowego testu kalibracji do wyznaczania wartości krytycznych funkcji zniszczenia dla materiałów ciągliwych. Określono w pracy, że długość pęknięć prognozowanych numerycznie jest większa od długości pęknięć wyznaczonych eksperymentalnie. Przyczyną tego stanu są różnice w stanach naprężenia w teście oraz podczas walcowania poprzeczno – klinowego, w szczególności w zakresie parametru kąтового Lode’go. Wydaje się zatem zasadne dalsze kontynuowanie przez Doktorantkę prac badawczych w zakresie opracowania testu kalibracji charakteryzującego się występowaniem identycznego stanu naprężenia jak w procesie WPK.

Wyrażam opinię, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały, pt. „Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia” spełnia określone przepisy i warunki zawarte w art. 13 ust. 1 w Ustawie odnośnie nadawania stopni i tytułu w systemie szkolnictwa wyższego i nauki. Rekomenduję zatem Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej przyjęcie rozprawy doktorskiej i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały do publicznej obrony.

dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG





Prof. dr hab. inż. Anna Kawalek
Prof. zwyczajny
Politechnika Częstochowska
e-mail: anna.kawalek@pcz.pl

Częstochowa, 03.05.2022

Recenzja

rozprawy doktorskiej pracy doktorskiej mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągała p.t.: „Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia”, opracowana na podstawie umowy o dzieło zawartej z Politechniką Lubelską, reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Franus, Prorektora ds. Nauki

1. Zakres rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały pod tytułem „Zastosowanie obciskania obrotowego do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia” mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, w oparciu o badania teoretyczne, laboratoryjne i technologiczne.

Przedstawiona w pracy metodyka badawcza powinna być pomocna przy uruchamianiu produkcji prętów metodami przeróbki plastycznej, w tym walcowania poprzeczno-klinowego na gorąco.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 158 stron, a jej układ uważam za prawidłowy. Została podzielona na 2 główne części. W pierwszej, Autorka przedstawiła analizę literatury z zakresu tematyki rozprawy, w drugiej części wyniki badań własnych obejmujące badania plastometryczne dwóch materiałów: miedzi CW008A oraz stali S355, badania warunków tarcia dla określonych w pracy warunków kształtowania plastycznego, analizę procesu obciskania obrotowego i wyznaczenie wartości granicznych funkcji zniszczenia dla kształtowanych materiałów w warunkach zmiennych obciążeń, w procesie walcowania poprzeczno-klinowego.

Zakres rozprawy obejmował analizę doświadczalną i teoretyczną próby obciskania obrotowego w walcierce płasko-klinowej, w celu wyznaczenia granicznej wartości drogi kształtowania dla materiałów odkształczanych przy temperaturze otoczenia, analizę standardowych testów kalibracji (próba spęczania, rozciągania i skręcania) dla poszczególnych materiałów, wykonanie badań plastometrycznych i badań warunków tarcia w analizowanych procesach, których wyniki były wykorzystywane w symulacjach numerycznych i przy wyznaczeniu wartości granicznych funkcji zniszczenia. Do ich określenia wykorzystano kryteria oparte na modelu wzrostu i łączenia się mikroszczelin (Rice&Tracey, Oyane'a, Argona), inicjacji i rozwoju pęknięcia ciągłego w procesach kształtowania (Freudenthala, Cockrofta-Lathama, Brozzo, Oh'a) oraz rozszerzone modele fenomenologiczne, oparte m.in. o historię trójosiowości naprężenia (Ayada) oraz wartości naprężenia średniego i zastępczego (Zhana).

Praca składa się z części wstępnej, zawierającej streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu oznaczeń i krótkiego wprowadzenia, oraz 8 rozdziałów merytorycznych pracy (strony 13÷144), zwieńczone rozdziałem 9 zawierającym „Podsumowanie i wnioski końcowe” (str. 143 i 144). Całość opracowania dopełnia zamieszczony na stronach 145÷158 spis literatury.

Wstęp do rozprawy (str. 11 i 12) zawiera genezę pracy doktorskiej. W rozdziale pierwszym (str.13÷48) Autorka przedstawiła przegląd stanu wiedzy w obszarze pękania materiałów, kryteriów stosowanych do wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia, opis dotychczas stosowanych testów kalibracji, problematykę pękania w procesie walcowania poprzeczno-klinowego.

W rozdziale 3 (str. 51÷65) zamieszczono wyniki badań plastometrycznych i badań nad warunkami tarcia w wybranych procesach kształtowania plastycznego dla wymienionych powyżej materiałów, w celu uzyskania własnego modelu materiałowego na potrzeby symulacji numerycznych.

W rozdziale czwartym scharakteryzowano podstawy procesu obciskania obrotowego i wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych tego procesu w warunkach odkształcania na zimno.

Rozdział piąty (str. 86÷110) zawiera wyniki badań numerycznych i doświadczalnych uzyskanych w testach kalibracji w warunkach kształtowania na zimno. W obydwu rozdziałach analizy numeryczne, przeprowadzono w środowisku oprogramowania Simufact.Forming v.15.

W rozdziale szóstym(str. 111÷113) przedstawiono analizę porównawczą otrzymanych wartości funkcji zniszczenia z próby obciskania obrotowego oraz testów kalibracji z uwzględnieniem różnych modeli pękania, tj. korzystając z kryteriów: opartego na modelach wzrostu i łączenia się mikroszczelin, fenomenologicznego oraz rozszerzonych modeli fenomenologicznych pękania ciągliwego. Dla porównania stanów naprężeń wyznaczono średnie wartości trójosiowości naprężenia oraz parametru kąтового Lode'go dla przeprowadzonych wcześniej procesów.

W rozdziale siódmym (str. 114÷132) zamieszczono wyniki badań uzyskane w próbach obciskania obrotowego na gorąco dla stali S355.

Rozdział ósmy (str.133÷142) zawiera metodykę wykorzystywania danych pozyskanych z prób obciskania obrotowego oraz ich weryfikację w warunkach obciążeń zmiennych występujących w procesie walcowania poprzeczno-klinowego.

Ostatni 9 rozdział przedstawia wnioski końcowe o charakterze naukowym oraz praktycznym.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Spis literatury obejmuje 179 pozycji, dotyczących tematyki rozprawy. Znajdują się tam wydawnictwa książkowe, poradniki i monografie zawierające teoretyczne i technologiczne podstawy mechaniki ciała stałego i mechaniki pękania materiałów, teoretycznych i technologicznych procesów przeróbki plastycznej stopów i zagadnienia inżynierii materiałowej, artykuły w czasopismach zagranicznych i krajowych (około 30

pozycji) publikowane w latach 1950-2020 oraz 2 patenty krajowe. Z cytowanych prac 53 były opublikowane przed rokiem 2000.

Pani mgr inż. Patrycja Walczuk-Gągała jest współautorką 6 publikacji wymienionych w spisie literatury.

Jedna pozycja literaturowa (ostatnia) nie zawiera roku wydania.

4. Ocena tezy i celu pracy doktorskiej

Na podstawie analizy literatury, w tym 8 prac własnego ośrodka naukowego, Autorka rozprawy w rozdziale 2 na stronach 49 i 50 postawiła tezę naukową **„Obciskanie obrotowe pozwala na wyznaczenie wartości krytycznych funkcji zniszczenia w warunkach obciążeń zmiennych, występujących m.in. w procesach walcowania poprzecznego i skośnego”**.

Podstawowym celem rozprawy było opracowanie nowej metody badawczej umożliwiającej wyznaczanie odkształcalności materiałów konstrukcyjnych do pracy przy zmiennych warunkach obciążania, na podstawie analizy obciskania obrotowego oraz testów kalibracji próbek z dwóch materiałów: miedzi EN CW008Ai stali EN S355.

Do udowodnienia postawionej tezy naukowej i zrealizowania celu rozprawy Autorka wyznaczyła sobie szeroki zakres badań eksperymentalnych nad procesem obciskania obrotowego oraz badań teoretycznych obejmujących analizę procesu w oparciu o metodę elementów skończonych (MES).

Zarówno teza, jak i cele rozprawy zostały sformułowane jasno i przejrzysto oraz odpowiadają one charakterowi rozprawy.

5. Ocena rozprawy

Wprowadzenie do rozprawy zawiera krótki opis warunków odkształcenia w procesach obróbki plastycznej i opis zawartości poszczególnych rozdziałów rozprawy.

W rozdziale 1 Autorka w sposób przejrzysty i zwarty przedstawiła zagadnienia potrzebne do opisu i analizy badań własnych. Na podstawie wykonanej analizy stanu zagadnienia słusznie stwierdziła, że w literaturze brak jest metody pozwalającej na jednoznaczne wyznaczenie wartości granicznych funkcji zniszczenia dla przypadków obciążeń zmiennych, występujących m.in. w procesach walcowania poprzeczno-klinowego i walcowania skośnego. Wyniki dotychczasowych badań procesu walcowania poprzecznego oparte na kryteriach pęknięcia sformułowanych przez Oyane'a-Sato, Oh'a, Johnson-Cook'a, Cockrofta-Latham były niepełne, a wartości graniczne uszkodzenia były niewłaściwe do modelowania pęknięcia materiału. Uznała za uzasadnione podjęcie badań nad nową metodą badawczą pozwalającą na przeprowadzenie testów kalibracji, opartą na procesie obciskania obrotowego próbek. Proces ten powinien bowiem gwarantować możliwość określenia momentu pęknięcia materiału m.in. w próbie walcowania poprzeczno-klinowego, ponieważ stan naprężenia występujący w materiale poddanym obrotowemu obciskaniu jest zbliżony do stanu powstającego w materiałach odkształcanych w procesach charakteryzujących się występowaniem naprężeń okresowo zmiennych.

W związku z tym, że praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych nad procesem obciskania obrotowego i późniejszą teoretyczną analizę stanu naprężenia i odkształcenia opartą na metodzie elementów skończonych Autorka przeprowadziła badania plastometryczne i badania warunków tarcia, aby dysponować własną bazą modeli materiałów użytych do badań. W rozdziale 3 opisała szczegółowo metodyki tych badań, stanowiska badawcze oraz wyniki badań eksperymentalnych. Badania te zostały zrealizowane przy wykorzystaniu nowoczesnych maszyn i urządzeń badawczych, zainstalowanych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Badania plastometryczne przeprowadzono w oparciu o próbę ściskania, rozciągania i skręcania. Do zrealizowania prób ściskania i rozciągania wykorzystano maszynę wytrzymałościową INSTRON 1000HDX o obciążeniu maksymalnym do 1000 kN, natomiast do prób skręcania zastosowano skrętarkę WP 510 o maksymalnym momencie skręcającym 200 Nm. Na podstawie wykonanych badań uzyskano krzywe płynięcia dla badanych materiałów, określono wartości naprężeń uplastyczniających i odpowiadające im wartości odkształceń, a następnie wyznaczono równania konstytutywne w postaci: $\sigma_p = C \varepsilon^n$, które wykorzystywano dalej w obliczeniach numerycznych.

Badania warunków tarcia w zakresie parametrów kształtowania plastycznego wybranych materiałów metalicznych przeprowadzono metodą spęczania próbek pierścieniowych z obydwu materiałów. Na podstawie tych badań wyznaczono wartości czynnika tarcia dla przyjętego modelu tarcia stałego, dla ogólnie znanych prób kalibracji i dla próby obciskania obrotowego.

W rozdziale 4 Autorka scharakteryzowała proces obciskania obrotowego, który odpowiada obciążeniom występującym w procesach rotacyjnej obróbki plastycznej: kuciu w kowarkach, dziurowaniu prętów w walcowniach rur, walcowaniu poprzeczno-klinowym i walcowaniu skośnym. Przeprowadziła analizę zamieszczonych w literaturze wyników badań stanu naprężenia i odkształcenia w materiale poddanym obrotowemu obciskaniu i stwierdziła, że stan naprężenia występujący w próbkach cylindrycznych w teście obciskania obrotowego jest najbardziej zbliżony do stanu naprężenia występującego podczas walcowania poprzeczno-klinowego i walcowania skośnego. Zaproponowała aby test obciskania obrotowego wykorzystywać do kalibracji funkcji zniszczenia materiałów w tych procesach. Nowy test kalibracji opracowany w Politechnice Lubelskiej może być realizowany w dwóch wersjach, tj. jako obciskanie obrotowe krążka w kanale oraz obciskanie obrotowe próbki cylindrycznej pomiędzy płaskimi płytami. Autorka przedstawiła wyniki badań doświadczalnych procesu obciskania obrotowego zrealizowanych na tym stanowisku badawczym. W swoich badaniach eksperymentalnych zastosowała narzędzia w postaci płaskich płyt, w których znajdowały się 2 wzdluzne kanały. Wartość zadawanego gniotu regulowano poprzez zmiany odległości między płytami. Testy prowadzono do chwili powstania pęknięć na powierzchni bocznej próbek cylindrycznych. Ustalono krytyczną wartość długości drogi odkształcenia w kanale, przy której następowało pęknięcie materiałów. Wartość ta w przypadku kształtowania miedzi CW008A wynosi $s = 280$ mm, a dla stali S355 równa jest $s = 500$ mm.

Po wyznaczeniu krytycznej wartości drogi s przeprowadzono modelowanie numeryczne testu obciskania obrotowego próbek w kanale. Utworzono identyczny z testem zrealizowanym w warunkach laboratoryjnych model geometryczny procesu używając

oprogramowania Simufact.Forming v.15. Zastosowanie MES pozwoliło Autorce wyznaczyć m.in. rozkłady intensywności odkształcenia i funkcji zniszczenia w przekrojach osiowych odkształczanych próbek. Największe odkształcenia wystąpiły na powierzchniach bocznych, w miejscach, w których materiał wchodzi w kontakt z płaszczyznami bocznymi kanału, zaś w strefie osiowej odkształcenia były jednorodne dla obydwu materiałów. Niewielki wzrost odkształceń zaobserwowano w obszarach leżących przy powierzchniach czołowych próbek.

Funkcję zniszczenia wyznaczano na podstawie znormalizowanego kryterium Cockrofta–Lathama. Uzyskane rozkłady zniszczenia pozwoliły stwierdzić, że w analizowanym teście obciskania obrotowego w kanale pęknięcie materiału będzie następowało w strefie osiowej próbki, gdzie funkcja przyjmuje wartości ekstremalne i zmniejszają się w kierunku powierzchni czołowych. Maksymalne wartości funkcji zniszczenia oraz ich rozkłady na przekroju próbek były podobne dla obydwu materiałów.

Autorka pokazała także rozkłady sił kształtowania uzyskane w warunkach doświadczalnych i obliczone teoretycznie. Charakter przebiegu sił zarejestrowanych podczas doświadczenia jak i symulacji numerycznej był podobny.

W końcowym opisie procesu obciskania obrotowego Autorka przedstawiła rozkłady naprężeniowych i bezwymiarowych funkcji zniszczenia w osi próbek oraz rozkłady trójosiowości naprężenia i parametrów kątowych Lode'go. Na ich podstawie mogła wyznaczyć średnie wartości funkcji zniszczenia dla obydwu materiałów i porównać je dla obydwu materiałów, co z kolei pozwoliło stwierdzić, że wartości naprężeniowych funkcji zniszczenia dla stali S355 są około trzykrotnie większe od wartości uzyskanych dla miedzi CW008A. Natomiast wartości bezwymiarowych funkcji zniszczenia dla obu materiałów są porównywalne.

Na podstawie modelowania numerycznego procesu obciskania Autorka stwierdziła, że trójosiowość naprężenia w osi próbki osiąga wartości zbliżone do wartości uzyskanych w próbach jednoosiowego rozciągania, a z rozkładu wartości parametru kąтового Lode'go wynika, że w osi kształtowanych próbek występują naprężenia ścinające. Średnia wartość trójosiowości naprężenia była większa w centralnej części próbki, a najmniejsze wartości przyjmowała na powierzchniach bocznych. Średnia wartość parametru kąтового Lode'go była najmniejsza w osi próbek.

Wyniki tego zakresu badań pozwoliły stwierdzić, że w strefie osiowej próbek należy spodziewać się pęknięcia badanych materiałów.

W rozdziale 5 przedstawiono wartości granicznych funkcji zniszczenia według kryteriów opartych na 3 modelach: wzrostu i łączenia się mikroszczelin, fenomenologicznego i rozszerzonych modeli fenomenologicznych pęknięcia ciągłego, wyznaczone na podstawie przeprowadzonych prób kalibracji badanych materiałów. Badania zostały zrealizowane przy użyciu wymienionej wcześniej maszyny wytrzymałościowej i skrętarki, na 5 rodzajach próbek (3 cylindrycznych, 1 cylindrycznej z kołnierzem i 1 podwójnym stożkiem) poddawanych ściskaniu, 3 rodzajach próbek z różnymi podcięciami w części środkowej poddawanych rozciąganiu i 1 rodzaju próbek poddawanych skręcaniu. W czasie doświadczeń próbki poddawane ściskaniu nie uległy zniszczeniu, co spowodowało, że próby te nie były analizowane numerycznie. Charakter pęknięcia próbek rozciąganych i skręcanych był typowy dla badanych materiałów. Przełomy próbek po rozciąganiu i skręcaniu były badane pod kątem

budowy krystalicznej, wad wewnętrznych za pomocą mikroskopu z zapisem cyfrowym, co pozwoliło Autorce na ich scharakteryzowanie.

W dalszej części pracy, w celu wyznaczenia krytycznych wartości funkcji zniszczenia w próbie rozciągania oraz skręcania, przeprowadzono modelowanie numeryczne tych prób kalibracji. Na tej podstawie wyznaczono rozkłady intensywności odkształcenia, wartości zniszczenia według znormalizowanego kryterium Cockrofta–Lathama oraz pozostałe wartości naprężeniowych i bezwymiarowych funkcji zniszczenia, dla końcowych etapów prowadzonych prób. Stwierdzono, że w rozciąganych próbkach największe odkształcenia wystąpiły w obszarach ich przewężenia, co skutkowało wystąpieniem tam maksymalnych wartości funkcji zniszczenia. We wszystkich typach próbek dla obydwu materiałów wartości naprężeniowych oraz bezwymiarowych funkcji zniszczenia w przekroju poprzecznym posiadały rozkład liniowy. Wartości naprężeniowych oraz bezwymiarowych funkcji zniszczenia dla materiałów poddanych próbie skręcania były najmniejsze w centralnym punkcie próbek. Wartości tych funkcji wzrastały w kierunku powierzchni bocznych, gdzie osiągały największe wartości. Wartość funkcji zniszczenia, podobnie jak w próbkach rozciąganych, była największa tam, gdzie odkształcenie osiągało wartości maksymalne.

W rozdziale 6 wykonano analizę porównawczą naprężeniowych oraz bezwymiarowych wartości funkcji zniszczenia z wartościami uzyskanymi dla materiałów poddanych próbie obciskania obrotowego. Na podstawie wykonanej analizy Autorka mogła stwierdzić, że krytyczne wartości funkcji zniszczenia uzyskane w testach kalibracji dla każdego rozpatrywanego kryterium znacznie się różnią. W przypadku stali S355 większe, od wyznaczonych w znanych powszechnie testach kalibracji, wartości funkcji wystąpiły w próbie obciskania obrotowego. Wyznaczyła także wartości średnie trójosiowości naprężenia oraz parametru kąтового Lode'go dla materiałów poddanych próbom kalibracji, obciskania obrotowego oraz procesowi walcowania poprzeczno-klinowego. Na tej podstawie mogła wykazać, że w próbie obciskania obrotowego miedzi CW008A oraz stali S355 wartość trójosiowości naprężenia jest na podobnym poziomie co w procesie walcowania poprzeczno-klinowego, natomiast wartość parametru kąтового Lode'go jest większa. Ponadto, z analizy tych parametrów wynika, że stan naprężenia w strefie osiowej próbek poddanych obciskaniu obrotowemu w kanale jest odmienny od stanu naprężenia występującego w próbkach poddanych ściskaniu, rozciąganiu, czy skręcaniu, które wykorzystywane są do wyznaczania wartości krytycznych funkcji zniszczenia.

W rozdziale 7 Autorka powróciła do badań nad procesem obciskania obrotowego próbek stalowych, ale w warunkach obróbki plastycznej na gorąco, przy temperaturach próbek 950, 1050 i 1150°C i przy stosowaniu współczynnika gniotu $\delta = 1,05$. Metodyka badań była podobna jak przy obciskaniu obrotowym przy temperaturze otoczenia. Autorka ustaliła krytyczne długości dróg odkształcenia w kanale, przy których następowało pękanie materiałów i wykazała, że wraz ze wzrostem temperatury (w badanym zakresie) zwiększa się długość drogi krytycznej. Dalej, podobnie jak poprzednio, przeprowadziła modelowanie numeryczne procesu obciskania, wykorzystując tym razem model odkształcanej stali z biblioteki programu Simufact.Forming v.15 i przyjmując model tarcia stałego, z czynnikiem tarcia równym 0,9. Przeprowadziła analizy zmian intensywności odkształcenia, temperatury i funkcji zniszczenia na podstawie znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama na przekrojach odkształcanych próbek, a także zmiany trójosiowości naprężenia i parametru

kątowego Lode'go oraz zmiany wartości zniszczenia według naprężeniowych i bezwymiarowych funkcji zniszczenia wzdłuż osi próbki po próbie obciskania obrotowego. Na podstawie tych analiz dla badanej stali S355, odkształcanej przy temperaturze z zakresu 950°C – 1150°C , zaproponowała własne równania do określania wartości krytycznej zniszczenia C , uzależnionym od temperatury materiału T , dla 9-ciu kryteriów pęknięcia. Dla znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama (kryterium Oh'a) według wzoru 7.10 dla stali odkształcanej przy temperaturze 1150°C krytyczna wartość zniszczenia $C_{OH} = 1,74563$.

W rozdziale 8 pokazano wyniki badań doświadczalnych nad weryfikacją zaproponowanego testu – obciskania obrotowego w procesie walcowania poprzeczno-klinowego na gorąco (przy temperaturze materiału 1150°C) stali S355 przy użyciu narzędzi klinowych, wyposażonych w trzy ścieżki prowadzące, co pozwoliło na walcowanie wsadu okrągłego o średnicach 26,33 i 40 mm na półwyrob o średnicy 22 mm ze współczynnikami gniotu odpowiednio 1,182; 1,500 i 1,818. Zastosowano zatem znacznie większe wartości współczynników gniotu niż w opisanych wcześniej doświadczeniach prowadzonych na materiałach w stanie zimnym. Stwierdzono, że przy walcowaniu poprzeczno-klinowym wsadu o średnicy 26 mm w odkształconych odcinkach próbek nie wystąpiły pęknięcia, czy też inne wady wewnętrzne. W pozostałych próbkach stwierdzono występowanie pęknięć wewnętrznych zlokalizowanych w środkowych przewężonych odcinkach półwyrobów.

Następnie, dla warunków prowadzonych doświadczeń przeprowadzono analizę numeryczną procesu walcowania. W odkształcanych próbkach wyznaczono rozkłady temperatury i wartości funkcji zniszczenia według znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama (kryterium Oh'a), co pozwoliło określić obszary, w którym funkcja zniszczenia była większa od wartości krytycznej $C_{OH} = 1,74563$ i wskazać lokalizację pęknięć wewnętrznych.

Następnie zaproponowano, aby do przewidywania pęknięć wewnątrz odkształcanej stali S355 przy temperaturze 1150°C stosować wskaźnik pęknięcia (zwany także wskaźnikiem zniszczenia) w_i , którego rozkłady na długości próbek przedstawiono graficznie i porównano z długościami pęknięć w próbkach otrzymanych z wsadu o średnicy 40 i 33 mm. Długość pęknięć prognozowanych numerycznie była większa od długości pęknięć w próbkach odkształcanych plastycznie. Autorka słusznie zauważyła, że przyczyną rozbieżności mogą być różnice w stanach naprężenia w metalu podczas walcowania poprzeczno-klinowego oraz w teście, w szczególności w zakresie parametru kątowego Lode'go.

Stąd w zakończeniu pracy Autorka postuluje kontynuowanie prac badawczych w zakresie opracowania testu kalibracji charakteryzującego się występowaniem identycznego stanu naprężenia jak w procesie walcowania poprzeczno-klinowego i dla materiałów ciągliwych.

Należy podkreślić, że w rozprawie zastosowano poprawne metodyki badawcze zarówno podczas badań doświadczalnych jak i numerycznych, a przedstawione na końcu rozprawy wnioski są odzwierciedleniem przeprowadzonych badań doświadczalnych i teoretycznych oraz wykonanych analiz i rozważań.

6. Uwagi do rozprawy

Autorka rozprawy przy jej redagowaniu nie ustrzegła się pewnych błędów i uchybień redakcyjnych, do których zwłaszcza zaliczam:

- Brak planu badań realizowanych w ramach rozprawy, który mógłby się znaleźć po tezie i celu rozprawy. Uczyniłoby to pracę ciekawszą i ułatwiłoby śledzenie głównego wątku rozprawy;
- Na str. 10 w spisie oznaczeń przy symbolu δ napisano, że jest to „stopień gniotu”, dalej na stronie 71 występuje „wartość stopnia gniotu”, jeszcze dalej na str. 74 pod rys. 4.7 i 4.8 oraz na str. 115 pod rys. 7.1÷7.3 mamy „przy gniocie δ ” i dalej na str. 133 „stopień gniotu δ ”. Autorka nie podała wzoru na wyznaczenie tej wielkości, a sądząc z wartości δ pod tymi rysunkami, w rozprawie posługuje się współczynnikiem gniotu $\delta = h_0/h_i$, a właściwie w przypadku prętów okrągłych $\delta = d_0/d_i$. Czy autorka nie uważa, że bardziej prawidłowe, przy określaniu wartości odkształceń byłoby posługiwanie się przekrojami ekwiwalentnymi i zamianą przekrojów okrągłych na przekroje kwadratowe i przyjęcie powszechnie stosowanych określeń: gniotu bezwzględnego Δh , gniotu względnego ϵ_h i współczynnika gniotu δ ;
- Na stronie 54 Autorka napisała, że „próby.... przeprowadzone zostaną na zimno”, raczej powinno się zostawić określenie zamieszczone w nawiasie: przy „temperaturze otoczenia”;
- Dalej na str. 54 podano błędnie „prędkość odkształcenia...wynosiła...”, a podane wartości dotyczą prędkości narzędzi ;
- Przy opisie stanowiska badawczego na stronach 69÷71 lub na str. 133 powinien być zamieszczony rysunek narzędzia płasko klinowego (str. 69) lub klinowego (str. 133) z zaznaczonymi kątami α i β , co nie wymuszałoby szukania przez czytelnika opisów walcarki w literaturze;
- Na stronie 87 zamieszczono rysunek 5.1 , który jest identyczny z rysunkiem 1.19;
- W podpisach pod rysunkami 5.9÷5.12 przy charakterystyce procesu, jest niefortunny zapis „prędkość kształtowania”, co może sugerować „prędkość odkształcenia”, a chodzi o prędkość ruchu narzędzi lub prędkość obrotową;
- Na str. 95 przy opisie próby skręcania bardziej adekwatne byłoby podanie liczby skręceń do zerwania L, niż podawanie kąta skręcającego, zwłaszcza, że we wzorze (3.5) występuje wartość L;
- Na str. 97 Autorka pisze: „powstała szyjka.....tworzy złożony stan naprężenia”, a raczej powinno być „w szyjce tworzy się złożony stan naprężenia”;
- Na tej samej stronie jest stwierdzenie: „rozpoczyna się tworzenie pęknięcia wskutek spiętrzenia dyslokacji przed przeszkodami”, Autorka nie badała jednak dyslokacji, zatem powinna powołać się na literaturę;
- Na str. 99 jest „korkiem” zamiast „krokiem”;
- Na str.111 zdanie przedostatnie jest prawdziwe dla funkcji zniszczenia określonej dla stali S355, a w przypadku miedzi wartości funkcji są w 4 przypadkach większe dla próbek skręcanych niż obciskanych obrotowo;
- Na str. 112 jest: „6.1-6.2”; „4.1-4.2”, a powinno być: „6.1 i 6.2” oraz „4.1 i 4.2”;

- Na str.112 w 4 zdaniu od końca strony wystąpił błąd gramatyczny;
- Na str. 114 opisano „zakres badań doświadczalnych” dla próby obciskania obrotowego w warunkach obróbki na gorąco stali S355. Proszę o ustosunkowanie się do relacji: szerokość kanału w narzędziu do procesu obciskania – szerokość (wysokość) obciskanej próbki po procesie nagrzewania, w stosunku do możliwości prawidłowego ustawienia próbki w kanale i czy określono grubość warstwy zgorzeliny na nagrzewanych próbkach i jak dobierano czas nagrzewania próbek przed odkształcaniem w kanale.
- Na str. 138 Autorka podaje wzór (8.1) na wyznaczenie wskaźnika pęknięcia w_i , natomiast w tekście na str.139 w 1 zdaniu od góry i na rys.8.10÷8.12 użyte jest pojęcie „wskaźnik zniszczenia”;
- Na str. 139 niefortunnie sformułowana jest treść dwóch ostatnich zdań, w których użyto określeń: „...próbek kształtowanych na wartość gniotu...” i „...próbki kształtowanej na gniot...”;
- Na str. 141 styl w 2 zdaniu od dołu jest niepoprawny. Wprowadzono tam także nowe pojęcie „stopnia redukcji” nie używanego i nie zdefiniowane wcześniej w rozprawie;
- W związku ze stwierdzeniem zamieszczonym w ostatnim zdaniu na str. 142 proszę o bliższe określenie zakresu badań pozwalających opracowanie testu kalibracji, który pozwoli uzyskać w badanym materiale stan naprężenia prawie identyczny ze stanem występującym we wsadzie obrabianym plastycznie w walcarkach poprzeczno-klinowych.

Zaprezentowane powyżej uwagi nie rzutują na ogólną wartość merytoryczną pracy doktorskiej, którą oceniam wysoko.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę trafność doboru tematu rozprawy doktorskiej, mającego istotne znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne oraz umiejętności Autorki, która:

- wykazała się dobrym opanowaniem warsztatu naukowego w zakresie inżynierii mechanicznej, a zwłaszcza zagadnień z obszaru mechaniki ciała stałego i pęknięcia materiałów, a także wysoką umiejętnością planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych oraz teoretycznych, opartych o modelowanie numeryczne procesów przeróbki plastycznej,
- rozwiązała samodzielnie określony problem naukowy w oparciu o rozważania teoretyczne i badania technologiczne, zgodnie z postawioną tezą naukową oraz zastosowała do jego rozwiązania nowoczesne i właściwie dobrane doświadczalne metody badawcze,
- udowodniła tezę rozprawy i zrealizowała postawione cele rozprawy i udowodniła, że opracowana nowa metoda badawcza, oparta o technologię obciskania obrotowego, umożliwia wyznaczenie odkształcalności materiałów konstrukcyjnych w warunkach zmiennych obciążeń,
- w przedstawionej rozprawie doktorskiej wykazała się ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna,

- wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności krytycznej analizy dostępnej wiedzy, umiejętnością modelowania numerycznego złożonych procesów technologicznych, wykorzystaniem wyników teoretycznych do wysoko zaawansowanych procesów przeróbki plastycznej, ale także prowadzeniem badań materiałowych i technologicznych, z wykorzystaniem zaawansowanej aparatury naukowo-badawczej i pomiarowej,

stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania art. 13 poz. 1 określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 i Dz.U. z 2018 r. poz.1669 z późn. zm.) i **wniosuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie P. mgr inż. Patrycji Walczuk-Gągały do publicznej obrony rozprawy przed Komisją ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej.**

Wnoszę o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr Patrycji Walczuk-Gągały. Wniosek motywuję bardzo szerokim zakresem i wysokim poziomem badań zrealizowanych w celu opracowania nowej metody badawczej umożliwiającej wyznaczenie odkształcalności materiałów konstrukcyjnych do pracy przy zmiennych warunkach obciążenia na podstawie analizy procesu obciskania obrotowego. Zrealizowane badania mieszczą się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna. Rozprawa zawiera także badania numeryczne oraz ich weryfikację doświadczalną. Opracowane wyniki badań wnoszą nowe elementy poznawcze do badań materiałowych i mogą być wykorzystane do skutecznego wyznaczania wartości granicznych funkcji zniszczenia materiałów ciągliwych, poddawanych zmiennym obciążeniom przy kształtowaniu plastycznym.

Anna Kawalek

