

Prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz

Częstochowa, 26.06.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Berelkowskiego

pt.: „*Technologia-obróbki cieplno-plastycznej odkuwek z wykorzystaniem ciepła**kucia*” – wykonana na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Naukowej

Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej

dr hab. inż. Jacka Reintera, prof. uczelni z dnia 26 kwietnia 2024 r.

Wzrost właściwości mechanicznych odkształcanych metali można uzyskać między innymi na drodze obróbki cieplno-plastycznej. Szczególnie jest to istotne w przemyśle kuźniczym, w którym to wyroby gotowe w postaci odkuwek stosowane są w wielu gałęziach przemysłu i wpływają na bezpieczeństwo użytkowania maszyn i urządzeń. Coraz częściej w procesach obróbki cieplnej, która wymaga ponownego nagrzania materiału po procesach przeróbki plastycznej, wykorzystuje się ciepło poprzedzającego procesu. Pozwala to na znaczną redukcję energochłonności oraz zwiększenie wydajności procesu. Takie technologie z powodzeniem są stosowane w procesach walcowania blach i prętów, przykładem których jest np. walcowanie normalizujące. Na podstawie danych literaturowych można stwierdzić, że od kilkunastu lat również branża kuźnicza, szczególnie w procesach kucia matrycowego, próbuje do procesów obróbki cieplnej odkuwek wykorzystać ciepło kucia. Niestety, prowadzone prace w większości przypadków są na etapie badań laboratoryjnych i brak jest szerszych informacji na temat wdrożenia ich do praktyki przemysłowej. Badania jakich podjął się Doktorant są skupione na doborze urządzeń, warunków i pa-

rametrów procesowych, dzięki którym przybliży się możliwość wdrożenia nowej technologii kucia z następującą po nim obróbką cieplną wykorzystującą ciepło kucia dla trzech typów odkuwek wykonanych z różnych gatunków stali. Stąd też, tematykę pracy należy uznać za uzasadnioną i bardzo aktualną, szczególnie pod kątem możliwości implementacji wyników badań do warunków przemysłowych.

Recenzowana praca składa się ze streszczenia w j. polskim oraz angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, 8 rozdziałów oraz spisu literatury zamieszczonych na 136 stronach. Praca została wydana w formie monografii, co nie jest często stosowane przez Doktorantów, a znacząco zwiększa jej atrakcyjność. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 70% całej objętości pracy. Cytowana literatura (92 pozycje) jest poprawna i jak najbardziej dobrana do tematyki rozprawy. Bibliografia w głównej mierze składa się z najnowszych pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w czasopiśmie charakteryzujących się wysokim IF w okresie ostatnich 10 lat. W dwóch pozycjach Doktorant występuje jako współautor, co potwierdza, że prezentowane wyniki są oryginalne i nie były wcześniej publikowane. Praca jest wynikiem realizacji projektu w ramach programu Techmatstrateg.

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Autor bardzo szczegółowo omówił podstawy teoretyczne przemian strukturalnych zachodzących w stali podczas procesów obróbki cieplej oraz cieplno-plastycznej. Dla obróbki cieplno-plastycznej Autor szczególnie odniósł się do procesów walcowania, w których to, ten rodzaj obróbki jest z powodzeniem stosowany od kilkunastu lat w warunkach przemysłowych. W przeglądzie literatury Doktorant omówił linię do kucia, na której prowadzono badania. Wszystkie prace w warunkach przemysłowych zrealizowano w Kuźni Jawor S.A. W tej części pracy

Autor dużą uwagę poświęcił zużyciu narzędzi, co zdaniem recenzenta nie jest bezpośrednio powiązane z tematem pracy. Część informacji jest powszechnie znana, np. układ warstw zgorzeliny. W rozdziale tym zdefiniowano odkuwki, które poddano badaniom. Jak wspomniano powyżej do badań wytypowano trzy typy odkuwek znacząco różniące się kształtem oraz gatunkiem stali, z której je wykonano. Do badań wytypowano odkuwkę typu adapter, ze stali w gatunku 42CrMo4 – konieczność stosowania wyżarzania izotermicznego, odkuwkę typu widłak, ze stali C45 – konieczność stosowania ulepszania cieplnego i odkuwkę typu kołnierz, ze stali w gatunku P250GH – konieczność stosowania wyżarzania normalizującego. W podsumowaniu analizy stanu zagadnienia Autor wykazał, że głównie ciepło nagrzanego wsadu wykorzystuje się w procesach walcowania i brak jest kompleksowych przemysłowych rozwiązań dla procesów kucia matrycowego. Tym samym podjęty temat pracy jest jak najbardziej zasadny.

Tezą pracy jest stwierdzenie *„że stosując obróbkę cieplno-plastyczną odkuwek z wykorzystaniem ciepła kucia można uzyskać produkt o tych samych właściwościach mechanicznych i mikrostrukturze, jak dla odkuwek wytwarzanych w konwencjonalny sposób”*. Tak postawiona teza jest w pełni uzasadniona w kontekście zrealizowanych badań.

Główny cel pracy zdefiniowano jako *zaprojektowanie parametrów obróbki cieplno-plastycznej dla trzech wybranych procesów przemysłowej produkcji odkuwek z trzech różnych gatunków stali, z wykorzystaniem ciepła kucia, zapewniających uzyskanie mikrostruktury i właściwości zgodnych ze specyfikacją*. Cel pracy jest w znacznej mierze użyteczny, ukierunkowany na wdrożenie do warunków przemysłowych, ale również ma elementy poznawcze.

Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy pracy Doktorant zrealizował szeroki zakres badań doświadczalnych w postaci:

- badania parametrów konwencjonalnego procesu kucia w warunkach przemysłowych,
- opracowanie i walidację w warunkach laboratoryjnych, a następnie przemysłowych charakterystyk chłodzenia,
- opracowanie modelu chłodzenia i założeń technologii obróbki cieplno-plastycznej,
- badania gotowych wyrobów.

Pewnym niedociągnięciem pracy jest brak zilustrowanego schematu badań, co utrudnia jego analizę. Natomiast należy podkreślić bogaty wachlarz badań zastosowanych przez Doktoranta w postaci badań termowizyjnych, metalograficznych, twardości, plastometrycznych, statystycznych.

Główne osiągnięcie Doktorant opisał w rozdziałach 5-7, w których to wg takiego samego schematu opisał badania oraz wyniki prób laboratoryjnych i przemysłowych dla trzech wytypowanych wyrobów. Podstawą opracowanych technologii była szczegółowa analiza obecnie stosowanych procesów i parametrów w kuźni Jawor. Następnie w warunkach laboratoryjnych, uwzględniając analizę obecnie stosowanych technologii (pomiar temperatury), opracowano krzywe chłodzenia. Krzywe te były podstawą opracowania modeli matematycznych obróbki cieplno-plastycznej. Należy zwrócić uwagę na złożoność zagadnienia polegającym na opracowaniu zależności matematycznych dla trzech różniących się między sobą rodzajów obróbek cieplnych: wyżarzania izotermicznego, ulepszania cieplnego i wyżarzania normalizującego. Oprócz złożoności samych procesów obróbki cieplno-plastycznej należy podkreślić również złożoność pod względem kształtu badanych wyrobów: adapter, widłak i kołnier. Z wykorzystaniem opracowanych modeli chłodzenia Autor przeprowadził badania w warunkach półprzemysłowych na dedykowanej linii, która znajduje się w Politechnice Wrocławskiej. Badania te zweryfikowały poprawność działa-

nia opracowanych modeli i były podstawą do zastosowania ich w warunkach przemysłowych. Wszystkie opracowane technologie zostały zweryfikowane w warunkach przemysłowych. Uzyskano założone właściwości mechaniczne (głównie określone pośrednio poprzez twardość) zgodne z wymaganiami norm i odpowiadające parametrom obecnie stosowanej technologii. Tym samym Autor w pełni udowodnił postawioną tezę pracy i zrealizował jej cel. Przeprowadzone badania wpisują się w zagadnienia związane z dyscypliną *inżynieria mechaniczna* poprzez powiązanie zastosowanych narzędzi i parametrów procesowych niezbędnych do otrzymania wyrobu gotowego o określonych właściwościach.

Całość pracy zakończona jest bardzo rozbudowanym podsumowaniem, co prawda Autor zatytułował ten rozdział *Podsumowanie i wnioski*, jednakże wnioski nie zostały wyodrębnione, a wyniki badań zostały przedstawione w obszernej formie opisowej. Nie umniejsza to ich poziomu merytorycznego, są bardzo cenne zarówno ze względu poznawczego, ale przede wszystkim aplikacyjnego.

Uwagi do pracy:

Praca została przygotowana w miarę starannie. Niestety występują liczne błędy stylistyczne, literowe, a nawet ortograficzne. Można odnieść wrażenie, że zabrakło finalnego sczytania, które na pewno wyeliminowałoby wszelkie niedociągnięcia językowe. Przedstawione niedociągnięcia zaznaczyłem w manuskrypcie i będą udostępnione Doktorantowi. Autor, przy tak ogromnym zakresie badań, nie uniknął pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący, (uwagi przytoczono w kolejności ich występowania w pracy):

- 1) str. 24: Autor stwierdza, że podczas walcowania, przeciwnie do procesu kucia, można kończyć proces nawet poniżej temperatury rekrytalizacji, bez znacznego pogorszenia trwałości walców. Proszę o wyjaśnienie dlaczego podczas walcownia, pomimo znacznego wzrostu nacisków, niższa temperatur walcowania nie wpływa na większe zużycie walców;
- 2) Autor stwierdza brak możliwości wykonania badań właściwości mechanicznych z uwagi, że wyroby gotowe były zbyt małe do wykonania odpowiednich próbek. Jednakże na rys. 4-2 przedstawia próbkę do badań plastometrycznych o długości 68 mm. Do badań właściwości mechanicznych można było wykorzystać mikropróbki, których długość nie przekracza 25 mm. Szczególnie byłoby to łatwe do wykonania dla wyrobu typu kołnierz. Określenie rzeczywistych wartości R_e i R_m byłoby cennym uzupełnieniem pracy;
- 3) Autor posługuje się składami chemicznymi na podstawie przedmiotowych norm, które dopuszczają bardzo szeroki zakres poszczególnych pierwiastków. W celu zwiększenia dokładności obliczeń Autor powinien wykorzystać rzeczywiste dane dotyczące składu chemicznego stali. Potwierdza to również Autor w stwierdzeniu: *„Przemysłowe doświadczenie wskazuje, że właściwości mechaniczne gatunków stali zamawianych według standardowych norm znajdują się częściej bliżej dolnych wartości granicznych, co można wytłumaczyć obawą, że zwiększenie zawartości tych pierwiastków wpłynie negatywnie na spawalność stali,...”*;
- 4) Autor stwierdza, że *„...dokładne wyznaczenie temperatury w poszczególnych operacjach kucia jest bardzo trudne.”* Pomocne byłoby zastosowanie symulacji MES.
- 5) Dla technologii produkcji adaptera Autor stwierdza, że w celu otrzymania założonej twardości należy zachować reżim 10°C podczas obróbki cieplnej. Jak

dochować taką dokładność skoro rozrzut początkowej temperatury sięga kilkudziesięciu stopni?

6) Jak wpłynie na dokładność obliczeń z wykorzystaniem modelu tak duża niestabilność temperatury podczas poszczególnych operacji kucia wyrobu typu kołnierz. Czy możliwe jest wystąpienie temperatury o wartości nieznacznie niższej od 1400°C?

Wnioski końcowe:

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie aplikacyjne, właściwą i wartościową tezę rozprawy, która została w pełni udowodniona, a także umiejętności Doktoranta, który wykazał dobre opanowanie warsztatu naukowego oraz wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, m.in. poprzez zastosowanie szerokiego zakresu metod badawczych, co umożliwiło poszerzenie wiedzy w obszarze wpływu parametrów procesowych i stosowanych narzędzi na jakość gotowych wyrobów obrabianych cieplnie z wykorzystaniem ciepła kucia. Ponadto Autor w podsumowaniu przedstawił wartościowe sformułowania wynikające z wyników badań doświadczalnych i teoretycznych. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego problemu naukowego.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

