

Prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz

Częstochowa, 02.09.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Filipa Lewandowskiego

pt.: *„Opracowanie warunków obróbki cieplnej przekuwanych szyn o profilu iglicowym, stosowanych w rozjazdach kolejowych o podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych”* – wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej
prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 08 lipca 2023 r.

Unia Europejska intensywnie dąży do ograniczenia skutków zmian klimatycznych, które w dużej mierze są spowodowane emisyjnym transportem. Sektor ten odpowiada za ponad 20% globalnej emisji dwutlenku węgla, z czego transport samochodowy, w tym przewozy osobowe, stanowią aż trzy czwarte tej emisji. Biorąc pod uwagę koszty, kolejowe przewozy towarowe na dłuższych trasach zazwyczaj są bardziej konkurencyjne niż transport samochodowy. Przewaga transportu kolejowego rośnie w UE, przez co rozwój transportu kolejowego pasażerskiego i towarowego staje się priorytetem. Kluczowym elementem modernizacji transportu kolejowego w krajach UE jest rozbudowa i modernizacja sieci torowisk, co ma na celu zwiększenie przepustowości oraz szybkości pociągów towarowych, które w Europie Środkowo-Wschodniej osiągają średnio jedynie 20-30 km/h. Wprowadzenie zunifikowanych standardów dotyczących kształtu i wymiarów szyn kolejowych ma na celu poprawę jakości torowisk oraz wyeliminowanie problemów technicznych związanych z kursowaniem pociągów w korytarzach transportowych w obrębie UE. Wymagania stawiane przez normy europejskie powodują, że szyny kolejowe muszą być produkowane w zawężonej tolerancji wymiarowej, a także o odpowiednich właściwościach, które w wielu przypadkach osiąga się za pomocą obróbki cieplnej. Wykonanie szyn iglicowych na rozjazdy kolejowe o wymaganej dokładności

i właściwościach mechanicznych wymaga zaprojektowania procesu i doboru parametrów procesowych, głównie kucia i obróbki cieplnej. O ile otrzymanie wymaganego kształtu nie stanowi dużego problemu technologicznego dla procesu kucia, to uzyskanie odpowiednich właściwości po tym procesie, gwarantujących wymaganą trwałość użytkowania, jest ciągle dużym wyzwaniem badawczym oraz technologicznym. Stąd też uważam, że podjęty przez Autora pracy temat należy uznać za uzasadniony i aktualny.

Recenzowana praca składa się z wstępu, aż dwunastu rozdziałów (często bardzo krótkich bo zaledwie 2 stronicowych), podsumowania i wniosków, spisu literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim zamieszczonych na 115 stronach. Praca wydana jest w formie monografii. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 70% całej objętości pracy. Cytowana literatura jest bardzo aktualna, a sam dobór literatury jest jak najbardziej adekwatny do tematyki rozprawy. Bibliografia w głównej mierze składa się z najnowszych pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w ostatnich 10 latach, ale również z fundamentalnych pozycji dotyczących właściwości i obróbki cieplnej szyn, m.in. Kuziaka. Doktorant występuje jako współautor w dwóch publikacjach, co potwierdza, że materiał przedstawiony do recenzji nie był dotychczas publikowany.

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Autor skupia się na omówieniu gatunków stali perlitycznych, jako tych, z których najczęściej wykonuje się szyny kolejowe, a następnie omawia wpływ obróbki cieplnej na właściwości tych stali i samych szyn oraz jakie wymagania są stawiane dla szyn kolejowych. W podsumowaniu przeglądu literatury Autor w klarowny sposób definiuje motywację i konieczność podjęcia badań w zakresie doboru parametrów obróbki cieplnej szyn wcześniej poddanych operacjom kucia w celu otrzymania założonych właściwości szyn iglicowych, głównie trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej. Należy stwierdzić, że przegląd literatury został wykonany bardzo starannie wskazując trendy prowadzonych badań naukowych w krajowych i światowych ośrodkach badawczych.

Postawiona teza w bezpośredni sposób wynika z postawionych celów pracy i jest w pełni uzasadniona w kontekście zrealizowanych badań. Cele pracy zdefiniowa-

no jako analizę procesu przemysłowego obróbki cieplnej szyn iglicowych ze stali R350HT pod względem uzyskanej mikrostruktury i właściwości mechanicznych; skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego do kontrolowanej obróbki cieplnej szyn iglicowych ze stali R350HT; opracowanie zależności pomiędzy szybkością chłodzenia, a właściwościami i mikrostrukturą dla stali R350HT oraz opracowanie technologii obróbki cieplnej przekutego fragmentu iglicy kolejowej. Należy podkreślić, że charakter pracy jest o dużym potencjale aplikacyjnym, a duża część badań została wykonana w warunkach przemysłowych.

Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy pracy Autor zrealizował bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych, w tym również w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych. Całość badań została uzupełniona modelowaniem numerycznym z wykorzystaniem oprogramowania MES. Pewnym niedociągnięciem jest brak zamieszczenia schematu badań w formie graficznej, co ułatwiłoby czytelnikowi analizę planowanych do realizacji badań. Autor szczegółowo opisuje zastosowany gatunek stali oraz aparaturę badawczą oraz samą metodykę badań. Pewien niedosyt stanowi brak krzywych plastycznego płynięcia, które determinują odkształcalność materiału w procesie kucia. Bardzo zdawkowo Autor przedstawił symulacje numeryczne procesu kucia. Co prawda powołuje się na 2 pozycje literaturowe, w których bardziej szczegółowo opisał badania teoretyczne procesu kucia. Jednakże z cytowanych dwóch prac jedna stanowi wewnętrzny raport z badań, niedostępny dla czytelnika. Uważam, że wyniki zamieszczone w cytowanych pracach podniosłyby wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej. Tym bardziej, że Autor sam stwierdza, że w przekuwanych szynach pojawia się różny stopień odkształcenia dla analizowanych stref i stąd można oczekiwać różnych właściwości mechanicznych. Bardziej szczegółowa analiza wyników modelowania numerycznego z pewnością wyjaśniła by powyższe stwierdzenie.

W pierwszym etapie badań Autor dokonał analizy materiału wyjściowego pod kątem rozkładu siarki, płynięcia metalu w procesie kucia oraz składu chemicznego. W kolejnym rozdziale Autor z wykorzystaniem programu komputerowego opartego na MES analizuje rozkład temperatury i intensywności odkształcenia podczas przekuwania szyn iglicowych. Głównym celem było określenie czy zastosowany kształt narzędzi

zapewni przekucie iglic kolejowych. Niestety Autor nie pokusił się o analizę otrzymanych kształtów przekuwanej szyny w poszczególnych przekrojach, co stanowiłoby weryfikację obliczeń numerycznych i poprawności przyjętych warunków początkowych do symulacji numerycznych.

W kolejnym etapie pracy Autor wykonał badania właściwości szyn (twardość oraz wytrzymałość zmęczeniowa), a także badania metalograficzne. Autor wykonał badania dla szyn bez oraz z obróbką cieplną wg obecnie stosowanej technologii. Analiza wyników badań dla przemysłowej technologii produkcji szyn iglicowych bez oraz z obróbką cieplną z szybkością chłodzenia na powierzchni tocznej $3,08^{\circ}\text{C/s}$ pozwoliła stwierdzić, że twardość na odcinku szyny bez obróbki cieplnej jest niższa niż wymaga norma i waha się w granicach 250 – 330 HV. Natomiast zastosowanie obróbki cieplnej powoduje wzrost twardości, jednakże dla zmierzonej szybkości chłodzenia otrzymane wartości są blisko granicy wartości minimalnej. Tym samym konieczne jest prowadzenie dalszych badań, dzięki którym nastąpi poprawa obróbki cieplnej poprzez zwiększenie szybkości chłodzenia, aby otrzymać większy zapas bezpieczeństwa twardości. Większa twardość wpłynie na zwiększoną odporność na zużycie trybologiczne oraz wytrzymałość zmęczeniową.

Otrzymane wyniki były podstawą najbardziej interesującej pod względem poznawczym części pracy, a mianowicie doboru parametrów obróbki cieplnej (szybkości chłodzenia), w tym medium chłodzącego, gwarantujących zwiększenie twardości główki szyny. Analiza wyników badań pozwoliła na wyznaczenie zależności pomiędzy szybkością chłodzenia a odległością międzypyłtkową oraz szybkością chłodzenia a twardością. W celu określenia rozkładu temperatury dla różnych szybkości chłodzenia Autor przeprowadził obliczenia numeryczne z wykorzystaniem MES. Analiza wyników obliczeń numerycznych pozwoliła dostarczyć bardzo cennych informacji o wartościach szybkości chłodzenia na przekroju główki szyny (nie rozkładu szybkości chłodzenia jak pisze Autor). Otrzymane wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych były podstawą zaprojektowania, a następnie budowy stanowiska laboratoryjnego do obróbki cieplnej, umożliwiającego sterowanie szybkością chłodzenia. Budowa autorskiego stanowiska wpisuje się w obszar dyscypliny inżynieria mechaniczna i jest niewątpliwie

osiągnięciem Autora rozprawy. Weryfikację koncepcji stanowiska wykonano z wykorzystaniem programu komputerowego opartego na MES. W następnym etapie badań, jak Autor słusznie stwierdza, że „...czysto teoretyczne rozważania, w którym przyjęte współczynniki wymiany i przewodzenia ciepła, w rzeczywistości mogą się nieznacznie różnić.”, co powoduje konieczność przeprowadzenia badań doświadczalnych. Tym samym możliwe było testowanie stanowiska laboratoryjnego dla różnych szybkości chłodzenia. Autor wykazał, że najbardziej optymalny rozkład twardości na przekroju główki szyny uzyskano dla szybkości chłodzenia 5°C/s (co odpowiada ciśnieniu 5 bar). Przedstawione wyniki i ich analiza w sposób kompleksowy pozwoliły określić wpływ parametrów obróbki cieplnej na właściwości szyn (twardość, a więc i długość eksploatacji).

Przeprowadzona analiza wyników badań była punktem wyjścia do modyfikacji technologii obróbki cieplnej, co zostało udokumentowane zgłoszeniem patentowym. Na podstawie wyników badań przemysłowych stwierdzono, że stała szybkość chłodzenia powoduje nierównomierny rozkład twardości na długości przekuwanej szyny. Ponadto, na podstawie własnych badań doświadczalnych stwierdzono, że podwyższona szybkość chłodzenia skutkuje wzrostem właściwości mechanicznych, gdzie punktem odniesienia jest twardość, stąd też pożądanym jest trzymanie się górnych granic twardości. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań Autor zaproponował modyfikację sposobu chłodzenia z jednoetapowego na dwuetapowy. W takim przypadku szybkość chłodzenia w strefie przekutej szyny może być stosunkowo niższa niż ta, którą stosuje się w strefie nieprzekuwanej obrabianej cieplnie szyny. Powinno to skutkować rozdrobnieniem struktury, zwiększeniem twardości i utrzymaniu jej stałego rozkładu na długości szyny i utrzymaniu możliwie wysokiego jej poziomu. Autor zaproponował dwa zakresy szybkości chłodzenia: w pierwszym obszarze 3,7 – 5°C/s na powierzchni główki strefy przekuwanej, natomiast dla zakresu nieprzekuwanego w zakresie 5 - 6°C/s. Dobór wartości dla zmiennego zakresu szybkości chłodzenia jest niewątpliwym osiągnięciem Autora i wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz inżynieria materiałowa.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. W rozdziale tym w syntetyczny sposób mgr inż. Filip Lewandowski przedstawił i potwierdził nowość otrzymanych wyników badań i ich poznawczy jak i aplikacyjny charakter określający wpływ parametrów procesowych obróbki cieplnej na twardość szyn iglicowych po procesie kucia. Otrzymane wyniki badań jednoznacznie potwierdzają zrealizowanie ambitnego celu oraz udowadniają postawioną tezę pracy.

Uwagi do pracy:

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

I. Uwagi o charakterze ogólnym:

1. We wstępie Autor wymienia zalety procesu kucia w stosunku do innych procesów przeróbki plastycznej, w tym „niskie straty materiału w całym procesie kucia”. Czy korzyść ta odnosi się również do kucia matrycowego?
2. Na rys. 5.2 Autor przedstawił schemat technologii przekuwania iglic. Czy w opisanej technologii stosowany jest również proces prostowania po kuciu na gorąco i obróbce cieplnej?
3. W tabeli 7.2 zamieszczono wartości m.in. $R_{0,2}$, R_m dla badanej stali R350 HT wyliczone na podstawie równań Kuziaka, a jakie były rzeczywiste wartości tych parametrów?
4. Na jakiej podstawie przyjęto wartość współczynnika tarcia dla procesu kucia na gorąco?
5. Na rys. 8.3b i c pojawia się w przekutej szynie wypływka, dla której następuje kumulacja odkształceń. Czy dla rzeczywistego procesu kucia również zaobserwowano taką wadę. Autor analizuje ten obszar podając, że „W przekroju Q3 największe odkształcenie $\varepsilon=1,9$ miało miejsce na dolnej krawędzi stopki szyny (Rysunek 8.3c).” Analizowany obszar i otrzymana wartość jest wynikiem powstania wypływkę w procesie kucia i nie odzwierciedla rzeczywistej wartości odkształcenia.
6. Jak zdefiniowano stopień odkształcenia?

II. Uwagi o charakterze szczegółowym:

- s. 8, rys. 2.1, brak podania źródła
- s. 37, rys. 6.1, jest Pomiar składu spektrometrem, brakuje chemicznego
- s. 43, jest „...korzystano z trzy termopary...”
- s. 44, niejasne stwierdzenie: „...materiał ulega licznym odkształceniom,...”
- s. 58, jest żywotność, powinno być trwałość
- s. 68, niepoprawne stwierdzenie „udało się”
- s. 68, niepoprawne stwierdzenie „wynosiła około 3,08°C/s”, usunąć około

Wnioski końcowe:

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze oraz przede wszystkim aplikacyjne, co nie jest często spotykane w realizowanych rozprawach doktorskich oraz 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,
- potrafił zastosować wiele nowoczesnych metod badawczych (w tym zaawansowane modelowanie numeryczne z wykorzystaniem MES) do analizy procesu kucia i obróbki cieplnej oraz właściwości analizowanych szyn, co umożliwiło poszerzenie wiedzy w zakresie wpływu parametrów procesowych (głównie wartości szybkości chłodzenia) na twardość, strukturę i wytrzymałość zmęczeniową,
- sformułował poprawne i wartościowe wnioski wynikające z wyników bardzo szerokiego zakresu badań teoretycznych i doświadczalnych, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: „Opracowanie warunków obróbki cieplnej przekuwanych szyn o profilu iglicowym, stosowanych w rozjazdach kolejowych o podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Filipa Lewandowskiego do publicznej obrony.



