

Gliwice, 5 grudnia 2025

Dr hab. inż. Jarosław Marcisz

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

ul. Karola Miarki 12-14

44-100 Gliwice

E-mail: Jaroslaw.Marcisz@git.lukasiewicz.gov.pl;

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Wojtachy, pt.: „Obróbka cieplno-plastyczna ultradrobnoziarnistych stali bainitycznych z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa”, opracowana na podstawie pisma Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej RDIMa.512.45.2025 z dnia 30.10.2025 (RDIMa/189/51/2025).

Promotorem rozprawy jest Dr hab. inż. Marek Opiela, prof. PŚ

Tematyka, zakres i cel pracy

Recenzowana praca została wykonana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod opieką merytoryczną prof. Marka Opieli. Promotorem pomocniczym była Pani dr inż. Aleksandra Kozłowska. Tematyka pracy dotyczy priorytetowego kierunku badawczego Politechniki, tj. obszaru projektowania i badań nowych materiałów (gatunków stali) i wyrobów, w szczególności wytwarzanych z zastosowaniem zaawansowanych procesów obróbki termomechanicznej, które są stosowane w przemyśle motoryzacyjnym.

Optymalizacja procesów wytwarzania odkuwek stalowych obejmująca projektowanie składu chemicznego i dobór parametrów obróbki cieplno-mechanicznej w połączeniu z zaawansowanymi analizami w zakresie przemian fazowych stanowi aktualny trend w rozwoju materiałów. Intensywnie rozwijają się także modele numeryczne oraz stosowanie sztucznej inteligencji w obszarze technologii materiałowych. Nowe kierunki są kreowane z uwagi na dostępność zaawansowanych urządzeń i automatyzację procesów, które umożliwiają precyzyjne sterowanie i kontrolę parametrów produkcji. Z kolei odbiorca / użytkownik końcowy wyrobów jakim jest przemysł motoryzacyjny stawia wciąż wysokie wymagania w zakresie redukcji masy elementów przy zapewnieniu sztywności konstrukcji i jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa biernego. Ponadto szczególnie w dobie wysokich cen energii, mediów, pierwiastków stopowych czy kosztów pracy, cena nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych ma istotne znaczenie na etapie wdrażania produkcji seryjnej.

Materiałem badań była stal średniomanganowa (3,10% Mn) o zawartości węgla poniżej 0,20% oraz zawierająca Mo, Si, Al i mikrododatki Ti i V. Skład chemiczny stali w połączeniu z opracowaną w ramach pracy obróbką cieplno-plastyczną, gwarantuje uzyskanie określonego rodzaju mikrostruktury i właściwości mechanicznych, spełniających wymagania odkuwek dla sektora motoryzacyjnego. Stale stosowane na elementy konstrukcyjne w przemyśle motoryzacyjnym powinny spełnić szereg wymagań co do właściwości mechanicznych statycznych i dynamicznych, w tym w ekstremalnych warunkach użytkowania. Przedmiotowa praca obejmowała szeroki zakres badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali zaprojektowanych do wytwarzania odkuwek, które poprzedzono symulacjami numerycznymi przemian fazowych. Analiza ilościowa i jakościowa składników

strukturalnych i fazowych po zastosowanych wariantach obróbki cieplno-plastycznej, umożliwiła wskazanie optymalnego rozwiązania dla elementów konstrukcyjnych co m.in. stanowiło rezultat pracy. Tematyka pracy obejmowała aktualne zagadnienia dotyczące bezpośredniej obróbki cieplnej wyrobów kutech co przyczynia się znacząco do obniżenia kosztów produkcji, z uwagi na wykorzystanie ciepła z procesu odkształcenia, bez konieczności ponownego nagrzewania.

„Celem pracy było opracowanie optymalnego składu chemicznego oraz wariantów czasowo-temperaturowych obróbki cieplno-plastycznej, gwarantujących otrzymanie stali bainitycznej o ultradrobnoziarnistej strukturze z austenitem szczątkowym w postaci cienkich warstw o pożądanej stabilności i jednorodności morfologicznej, pozwalającej na wytwarzanie odkuwek o wysokich właściwościach mechanicznych.” W tytule pracy wskazano na minimalną wartość wytrzymałości 1 GPa (w rozumieniu wytrzymałości na rozciąganie w statycznej próbie rozciągania). W pracy nie sformułowano bezpośrednio tezy ale z przedstawionych rezultatów badań i wniosków, wynika że doktorantka założyła uzyskanie określonych parametrów użytkowych materiału (mikrostruktura i właściwości mechaniczne) dla zaprojektowanego składu chemicznego i warunków procesu wytwarzania odkuwek, tzn. odkształcenia plastycznego i bezpośredniej obróbki cieplnej. Założono także zachodzenie określonych zjawisk fizycznych (np. przemiany austenitu w martenzyt w wyniku odkształcenia plastycznego), co znacząco wpływa na właściwości użytkowe materiału.

Doktorantka w rozdziale 2.1 zatytułowanym „Cel pracy” sformułowala następującą hipotezę: *„obecność austenitu szczątkowego, charakteryzującego się dobrą ciągliwością, powinna korzystnie oddziaływać na udurowienie”*. Stwierdziła przy tym, że w przedmiotowej pracy dotyczącej odkuwek, *„rola austenitu szczątkowego będzie rozpatrywana w nowym ujęciu, odmiennym niż w przypadku półproduktów w postaci blach”*.

Charakterystyka rozprawy

Pracę charakteryzuje tradycyjny układ z wydzieloną częścią dotyczącą przeglądu literatury oraz opisu wyników badań własnych wraz z ich omówieniem i wnioskami. Rozprawa została podzielona na następujące rozdziały: wstęp, przegląd piśmiennictwa i badania własne gdzie sformułowano cel pracy oraz opisano metody badań, wyniki badań i ich dyskusja oraz wnioski. Opracowano także streszczenie w języku polskim i angielskim. Sumarycznie praca zawiera 148 stron na których zamieszczono 89 rysunków i 13 tablic. Wstęp i analizę stanu zagadnienia opracowano na stronach od 12 do 50 z materiałem ilustracyjnym w liczbie 31 rysunków. Następnie na stronach od 51 do 64 opisano cel pracy, zakres i materiał badań oraz zastosowane narzędzia do symulacji numerycznych, metody badań mikrostruktury i pomiarów właściwości mechanicznych. Główny rozdział pracy dotyczący prezentacji wyników badań i pomiarów wraz z dyskusją przedstawiono na stronach od 65 do 124. Wnioski w liczbie 11 zamieszczono na 4 stronach (od 125 do 128).

W analizie literatury wskazano 207 pozycji, w tym 6 publikacji doktorantki i 1 publikację w materiałach konferencyjnych. Należy podkreślić, że w pięciu artykułach w punktowanych czasopismach doktorantka była pierwszą autorką, a w jednym drugą co wskazuje na samodzielność w profesjonalnym opracowywaniu wyników badań. Doktorantka publikowała wyniki badań w punktowanych czasopismach o wysokim Impact Factor w latach 2021-25, a dwie publikacje ukazały się w roku 2025. Zakres i obszar tematyczny analizowanej literatury został prawidłowo dobrany w aspekcie zrealizowanych badań w pracy doktorskiej. Pozytywnie oceniono szeroki zakres tematyczny analizowanych publikacji w celu odniesienia uzyskanych wyników badań własnych do już wykonanych w uznanych ośrodkach naukowych.

Układ pracy został opracowany prawidłowo, co ułatwiło ocenę i analizę uzyskanych rezultatów. Uwagę zwraca staranność redakcyjna pracy, w tym ilustracje i diagramy oraz poprawność językowa.

Obszerny materiał eksperymentalny stanowiący rezultaty pracy poddany został przez Doktorantkę dyskusji, stanowiącej podstawę do opracowania wniosków oraz potwierdzenia osiągnięcia założonych celów. Stwierdzam, że sposób opracowania wyników badań, zrealizowanych z zastosowaniem prawidłowo dobranych metod badawczych, świadczy o dobrym przygotowaniu do samodzielnej pracy eksperymentalnej i naukowej. Na uwagę zasługuje kompleksowe podejście do rozwiązania postawionych problemów naukowych, w szczególności analiza charakterystyk materiałowych dotyczących mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz ich zmian w warunkach odkształcenia plastycznego i w wyniku bezpośredniej obróbki cieplnej. Istotny jest aspekt praktyczny uzyskanych wyników, w postaci wytycznych technologii w wyniku których powstaje określony rodzaj mikrostruktury. Ten aspekt rozprawy jest ważny z punktu widzenia potencjalnego zastosowania odkuwek w sektorze motoryzacyjnym.

Zaplanowany i zrealizowany zakres symulacji numerycznych, eksperymentów i badań oraz dobrane metody były adekwatne do postawionego problemu badawczego. Wykonano badania mikrostruktury z zastosowaniem mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej (w tym EBSD) i transmisyjnej mikroskopii elektronowej (jasne i ciemne pole widzenia, dyfrakcja elektronowa), co jest szczególnie istotne w analizie przemian fazowych, w tym zachodzących w warunkach odkształcenia plastycznego na gorąco. Stosowano także metody rentgenowskiej analizy fazowej ilościowej i jakościowej. Zastosowane metody badań i techniki pomiarowe pozwalają na kompleksową ocenę morfologii mikrostruktury, w tym charakterystykę fazową ilościową i jakościową oraz właściwości mechaniczne w statycznej próbie rozciągania.

Na podstawie przedstawionej analizy wyników badań i osiągniętych rezultatów można stwierdzić, że uzyskano zaplanowane cele pracy. Najistotniejsze osiągnięcia Doktorantki są następujące:

- opracowanie składu chemicznego stali przeznaczonej do wytwarzania odkuwek o określonym rodzaju mikrostruktury i właściwościach mechanicznych dla przemysłu motoryzacyjnego ($R_m > 1$ GPa),
- opracowanie parametrów technologii produkcji w zakresie procesu kucia na gorąco (temperatura, wartość i liczba odkształceń) i bezpośredniego wygrzewania izotermicznego (szybkość chłodzenia po kuciu, czas i temperatura wygrzewania) w celu osiągnięcia założonego typu mikrostruktury, w szczególności ilości i morfologii austenitu resztkowego,
- charakterystyka ilościowa i jakościowa składników strukturalnych i fazowych, w szczególności bainitu, austenitu resztkowego i martenzytu powstałego z austenitu w rezultacie odkształcenia plastycznego w statycznej próbie rozciągania,
- wyznaczenie właściwości mechanicznych badanego gatunku stali w statycznej próbie rozciągania oraz korelacja uzyskanych wyników pomiarów ze składem fazowym w aspekcie potencjalnych zastosowań odkuwek w sektorze motoryzacyjnym,
- umiejętność stosowania zaawansowanych metod badań i interpretacja uzyskanych wyników, w szczególności analiz obrazów mikrostruktury z zastosowaniem SEM-EBSD, TEM (obserwacje w jasnym i ciemnym polu widzenia, mikrodyfrakcja) oraz krzywych dylatometrycznych i dyfraktogramów rentgenowskich.

Osiągnięte rezultaty oraz zdobyte doświadczenie Doktorantki stanowią niewątpliwie podstawy do rozwoju w obszarze projektowania i wytwarzania materiałów, metod badań i interpretacji wyników obserwacji mikrostruktury oraz pomiarów właściwości mechanicznych i korelacji ww. cech materiału.

Opiniowana rozprawa zawiera fragmenty, wymagające dyskusji i dodatkowych wyjaśnień. Wybrane skróty myślowe i/lub sformułowania wymagają odpowiednio wyjaśnienia i zdefiniowania. Poniżej przedstawiono komentarze, sformułowano pytania, uwagi i sugestie, które z punktu widzenia tematyki pracy i interpretacji uzyskanych wyników są istotne i wymagają uściśleń.

Komentarz 1

(strona 39 / rys. 25)

W opisie rysunku 25 (w akapicie nad rysunkiem), stwierdzono, że po austenitzowaniu stal jest *chłodzona nieco poniżej temperatury M_s (etap Q) a następnie jest nagrzewana do temperatury *nieco wyższej od M_s , w której jest realizowane wygrzewanie izotermiczne (etap P).* Na schemacie nie wskazano etapu wygrzewania izotermicznego **powyżej** temperatury M_s a jedynie poniżej M_s . Na rysunku znajdują się oznaczenia QT i PT, których nie ma w tekście.*

(str. 98. 13 linia od góry)

Użyto sformułowania „*podczas wolnego chłodzenia*”. Warto w tego rodzaju opisach warunków eksperymentu wskazać co najmniej zakres stosowanych szybkości chłodzenia, tym bardziej że w analizowanym procesie może mieć to znaczenie dla finalnej mikrostruktury i właściwości materiału.

Pytanie 1.1: W jaki sposób zmienia się wartość temperatury M_s w poszczególnych etapach obróbki cieplnej, w szczególności po zakończeniu „częściowej przemiany martenzytycznej” oraz w trakcie wygrzewania izotermicznego na skutek dyfuzji węgla i tym samym lokalnej zmiany składu chemicznego materiału (austenitu, który ulega przemianie i powstającego bainitu) ?

Pytanie 1.2: Jakie mogą być praktycznie stosowane czasy wytrzymania odkuwek w poszczególnych etapach (Q i P) i w jaki sposób zrealizować ten rodzaj/etap obróbki cieplnej (np. nagrzewanie po zakończeniu etapu Q do temperatury wygrzewania izotermicznego) ?

Pytanie 1.3: Ważnym etapem obróbki cieplnej jest chłodzenie materiału do temperatury otoczenia po zakończeniu wygrzewania izotermicznego. Proszę o informację nt. możliwych i stosowanych sposobów chłodzenia odkuwek (zależnie od pola przekroju/grubości ścianki) aby uzyskać wymagany rodzaj mikrostruktury finalnej i właściwości mechaniczne ? Jakie szybkości chłodzenia po zakończeniu wygrzewania izotermicznego stosowano w pracy, np. w eksperymentach zilustrowanych na schemacie na rys. 78 (str. 112) ?

Komentarz 2

(strona 108, rys. 76b)

Pytanie 2.1: Krzywa w kolorze żółtym ($t_p=60s$) w zakresie pierwszego etapu odkształcenia ($\epsilon < 0,2$) wyraźnie odbiega od pozostałych. Proszę o określenie przyczyny różnicy w kształcie krzywej i w wartości naprężenia w odniesieniu do pozostałych wariantów $t_p=1-30 s$?

Rys. 76 a-c

Pytanie 2.2: Jaka jest przyczyna niestabilności widocznych na krzywych naprężenie-odkształcenie w początkowym okresie ściskania ? Czy są to efekty wynikające ze specyfiki układu pomiarowego urządzenia czy wskazujące na konkretne zjawiska fizyczne ?

Komentarz 3 (strona 113, rys. 79)

W opisie mikrostruktur przedstawionych na rysunku 79, stwierdzono brak wydzieleni cementytu pomiędzy listwami ferrytu bainitycznego.

Pytanie 3.1: Warto określić jaki jest minimalny próg detekcji / wielkość cząstek, które są widoczne przy zastosowanym powiększeniu i metodzie badawczej (rozdzielczość) ?

Komentarz 4

Dot. (Rys. 82; Rys. 83, Tablica 13) / warianty: 380°C/900 i 280°C/1800 s

Pytanie 4.1: Pomiary twardości wykazały różnicę 26 HV pomiędzy ww. wariantami obróbki cieplnej. Z kolei różnica w wartości R_m , uwzględniając dodatkowo błąd pomiaru jest niewielka. Proszę o podanie możliwych przyczyn uzyskanej korelacji pomiędzy twardością i wytrzymałością na rozciąganie?

Pytanie 4.2: Proszę o wyjaśnienie spadku granicy plastyczności spowodowanego wydłużeniem czasu wytrzymania izotermicznego (tablica 13)? W jaki sposób można regulować wartość granicy plastyczności w aspekcie kontroli udziału i morfologii składników strukturalnych i fazowych w materiale? Jaki wpływ na wartość granicy plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie wykazuje austenit reszkowy w aspekcie udziału objętościowego, morfologii i wielkości ziaren, stabilności mechanicznej i temperaturowej w badanym materiale?

Komentarz 5

Wskazane w pracy aktualnie stosowane gatunki stali (Tablica 3), które mogą być potencjalnie zastąpione opracowanym w pracy doktorskiej materiałem, wykazują wyższy poziom wydłużenia (w statycznej próbie rozciągania).

Pytanie 5.1: Proszę o wskazanie możliwych działań w zakresie modyfikacji składu chemicznego i technologii produkcji aby uzyskać wyższą plastyczność materiału. Należy zwrócić uwagę na porównywalność wartości wydłużenia wyznaczonego na próbkach zgodnych z wymaganiami normy w odniesieniu do stosowanych w pracy badawczej – proszę o komentarz.

Pytanie 5.2: Proszę o komentarz w aspekcie uderzalności opracowanego materiału, w tym podjęcie próby określenia poziomu KV (KU). Czy są planowane tego rodzaju badania i czy istnieje dla opracowanego materiału ryzyko występowania np. wyraźnej temperatury przejścia w stan kruchy w temperaturze eksploatacji poniżej 0°C (często określa się uderzalność materiałów konstrukcyjnych w temperaturze -40°C)?

Komentarz 6

Czy analizowano, m.in. w trakcie badań mikrostruktury, równomierność odkształcenia w objętości próbek poddanych ściskaniu w Gleeble? Może to mieć znaczący wpływ na procesy zarodkowania podczas przemian fazowych czy rekrytalizację. Zjawiskiem typowym z uwagi na występujące tarcie pomiędzy materiałem a narzędziami (kowadłami) jest lokalizacja naprężenia i w rezultacie odkształcenia w określonych miejscach próbki (tzw. „krzyż kucia”).

Komentarz 7

W tytule i w celu pracy wskazano stale o strukturze *ultradrobnoziarnistej*. Proszę o jednoznaczne zdefiniowanie co oznacza to sformułowanie, w szczególności którego składnika mikrostruktury dotyczy, jakiego parametru stereologicznego (średnia cięciwa, szerokość listwy itp.) a przede wszystkim jak jest graniczna wartość/wielkość określonego parametru.

Skróty myślowe/usterki edycyjne

Str.5. ASTM - ... *Matrials*, powinno być: *Materials*

Str.14. Tablica 3. Podając wartości uderzalności KV dobrze jest wskazać temperaturę badania. Przy jej braku z zasady jest to temperatura otoczenia ale ten parametr bardzo często jest wyznaczany w określonym przez normę zakresie temperatur np. od -40 do +60 °C.

Str.28. Tablica 5. Zawartość węgla w stalach nanobainitycznych jest bardzo często wyższa niż 0,6% masowych (literatura). Przy zawartości węgla 0,3% i pozostałych pierwiastków wskazanych w tablicy, uzyskanie nanolistew bainitycznych (o szerokości poniżej 100 nm) wg dostępnych danych literaturowych nie jest możliwe.

Str.34. (1 linia od góry) i Str.51. (8 linia od góry), „korzystanie”, powinno być: korzystnie

Str.35. (5 linia od góry) ...*umożliwia wytworzenie nanostruktury o wielkości ziarna poniżej 1 μm ...*
Przyjęty umownie graniczny rozmiar (średnica ziarna/szerokość listew itp.) elementów mikrostruktury, stanowiących podstawę materiału, które decydują o jego właściwościach, definiujący nanostrukturę wynosi 100 nm (0,1 μm).

Str.36. Rys. 21 Czy rzeczywiście w artykule [14] wskazano tego rodzaju schemat OC stali bainityczno-austenitycznej ? Podobny diagram jest opublikowany w pracy [17].

Str.39. (2 linia od dołu). Co oznacza „duża ilość Si” w stalach niskowęglowych i wysokowęglowych (jaka zawartość C), która nie zapobiega wydzielaniu węglików? Czy istnieje zależność dla badanych stali, która określa minimalną zawartość Si w funkcji zawartości C i innych pierwiastków węglotwórczych (Cr, Mo, V), gwarantującą brak wydzieleni węglików powstających podczas chłodzenia lub wygrzewania ?

Str.42. ... *Aby efektywnie zahamować wydzielanie się cementytu, minimalna zawartość krzemu w stali powinna wynosić co najmniej 0,8%...*

Należy sprecyzować dla jakiego gatunku stali (składu chemicznego) wskazana zawartość Si gwarantuje pożądany wpływ na procesy wydzieleniowe węglików.

Str.52. Rys. 33.*Ultradrobnoziarnista odkuwka wielofazowa...*; poprawnie: Odkuwka o ultradrobnoziarnistej wielofazowej strukturze

Str.61. Tablica 9. oraz Str. 112. Rys. 78.

W temperaturze $T_d=1000^\circ\text{C}$ wskazano wartość odkształcenia 0,25, a w pozostałych temperaturach 0,15. Jak była przyczyna zmiany wartości odkształcenia w 1000°C ?

Str.64. a_γ -parametr sieci austenitu: brak jednostki w równaniu (3,556) i w opisie składników zależności.

Str.71. Rys. 43.

Proszę o wyjaśnienie znaczenia krzywej/punktów „*Martenzyt start*” (w legendzie diagramu oznaczono kwadratem w kolorze zielony ciemny) ?

Brak jednostki twardości na diagramie CTPc. (Hardness-jedyne słowo na rys. w jęz. ang. (?))

Str.76. (5 linia od dołu), „*część*”, powinno być: część

Str.82. w tekście jest: ...*od 8% do 10%* a dane na wykresie wskazują na zakres od 5 do 10% (?)

Str. 91. Podpis pod rys. 61. ...*stali badanej stali* ...

Str. 95. 12 linia od dołu. Jest: „*da*”, powinno być „*dla*”.

Podsumowując, stwierdzam że wskazane powyżej komentarze i uwagi o charakterze polemicznym i uzupełniającym oraz edytorskie nie zmieniają pozytywnej i wysokiej oceny pracy, która stanowi samodzielne opracowanie naukowe zawierające weryfikację postawionych tez. Przedstawione komentarze nie obniżają istotnie wartości naukowej zamieszczonych w rozprawie oryginalnych wyników badań, dotyczących perspektywicznych materiałów konstrukcyjnych i ich dojrzałej interpretacji. W mojej opinii Doktorantka wykazała umiejętność rozwiązania problemu badawczego w szerokim kontekście zakresu działań od szczegółowego rozpoznania stanu wiedzy, przez zaprojektowanie materiału i dobór metod badawczych oraz zaplanowanie i wykonanie eksperymentów, po wnikliwą analizę i dyskusję uzyskanych wyników oraz opracowanie wniosków. Zrealizowany w ramach pracy doktorskiej zakres badań i analiz w obszarze technologii materiałowych, potwierdzają dojrzałość Doktorantki do samodzielnego prowadzenia projektów badawczych, w tym o charakterze aplikacyjnym. Tym samym świadczą również o posiadaniu przez Panią Annę Wojtachę ogólnej wiedzy teoretycznej w reprezentowanej dyscyplinie. Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, który posiada potencjał aplikacyjny w sferze gospodarczej.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018 r. (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187 i wnioskuję o dalsze procedowanie przewodu mgr inż. Anny Wojtachy, w tym przyjęcie i dopuszczenie niniejszej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

dr hab. inż. Jarosław Marcisz

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)