AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

AGH

Dr hab. inż. Janusz Krawczyk, prof. AGH
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków, dn. 12.08.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Krzysztofa Wasiaka**

pt. „Kształtowanie mikrostruktury i właściwości nawęglonej stali 35CrSiMn5-5-4 przy wykorzystaniu nowoczesnych metod obróbki cieplnej"

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa, Pani prof. dr. hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej w związku z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej z dnia 24 marca 2023 roku (pismo z dnia 12 czerwca 2023 roku).

1. Ogólna charakterystyka pracy

Pracę doktorską mgr. inż. Krzysztofa Wasiaka, napisana pod promotorstwem dra hab. inż. Wiesława Świątnickiego, prof. PW można uznać za komplementarną pod względem jej koncepcji w odniesieniu do dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa co wynika ze spełnienia głównych założeń dla tej dyscypliny naukowej. Założeniami tymi jest: poszukiwanie nowego składu chemicznego, świadome ukształtowanie mikrostruktury, świadome ukształtowanie właściwości mechanicznych oraz realizacja tych cech przez zaprojektowanie procesu technologicznego, który ma konkretnie wskazane zastosowanie utylitarne. Skład chemiczny konstruowano na bazie komercyjnej stali 35CrSiMn5-5-4 przez

sekwencyjne technologie nawęglania. Jest to z jednej strony proste rozwiązanie problematyki poszukiwania aplikacyjnego składu chemicznego, który ma potencjał technologiczny. Niestety zmienność zawartości węgla w warstwie nawęglonej stwarza duże problemy interpretacyjne oraz konieczność zastosowania pewnych założeń i uogólnień zwłaszcza w odniesieniu do obliczeń teoretycznych składów fazowych, dyfuzji i zawartości węgla w poszczególnych fazach. Czyni to wyniki uzyskiwane w pracy bardzo wymagającymi dla ich interpretacji. W pracy pod względem składu chemicznego porównywano trzy składy chemiczne tj. odpowiadający nienawęglonemu rdzeniowi oraz maksymalnej zawartości węgla dla dwóch procesów nawęglania. Świadome kształtowanie mikrostruktury oparto o badania dylatometryczne i obliczenia teoretyczne lub oparto o wzory empiryczne. Istotnym zagadnieniem w tym przypadku było opracowanie logicznej konstrukcji myślowej zmierzającej do uzyskania struktur nanokrystalicznych. Zastosowane badania objęły klasyczny proces hartowania i niskiego odpuszczania, hartowania bainitycznego z przystankiem izotermicznym, hartowania bainitycznego z przystankiem izotermicznym i partycjonowaniem oraz hartowania bainitycznego z przystankiem izotermicznym i partycjonowaniem przy zmiennej szybkości chłodzenia. Biorąc pod uwagę trzy stany materiału pod względem zawartości węgla, różne temperatury oraz czasy wytrzymania izotermicznego uzyskano bardzo dużą ilość wariantów materiałów (ich mikrostruktur) do badań. Dokonano jednak ograniczenia zakresu badawczego przedstawiając logikę badawczo-naukową wyboru poszczególnych wariantów parametrów materiałowych i obróbki cieplnej. Należy zaznaczyć, że przyjęte zadanie badawcze wymagało bardziej wyrafinowanych badań mikrostruktury niż mikroskopia świetlna a nawet skaningowa mikroskopia elektronowa, która nie pozwoliłaby na ocenę uzyskania założonej mikrostruktury nanobainitycznej. Stąd obok badań przy użyciu mikroskopii świetlnej (nie dla wszystkich wariantów) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej, wykonano również dużo badań przy użyciu transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Powyższa logika wyboru wariantów kształtowania mikrostruktury opierała się również o założenia dotyczące uzyskania odpowiednich właściwości mechanicznych jak twardość, udarność, wytrzymałość, wydłużenie czy odporność na kruche pękanie. Poza twardością, ze względu na zastosowaną metodykę zmiany składu chemicznego poprzez nawęglanie, pozostałe parametry odnoszono do składu chemicznego stali 35CrSiMn5-5-4 a więc tzw. nienawęglonego rdzenia. Weryfikacji zaprojektowanych stanów materiałowych i rezultatów zaprojektowanych technologii ich wykonania oparto również o badania technologiczne (lub związane z technologicznością lub zagadnieniami eksploatacyjnymi) tj. badania odkształceń hartowniczych jak i badania tribologiczne. Nie wszystkie warianty kształtowania zostały poddane wszystkim wymienionym wyżej badaniom a w przypadku badań tribologicznych zastosowano różne układy trące, których wyniki są trudne do porównywania. Należy zwrócić uwagę, że dla ostatecznej wersji obróbki cieplnej i korzystnych parametrów właściwości mechanicznych nie wykonano badań tribologicznych. Istotnym jest, że w

doborze parametrów obróbki cieplnej, warstwy nawęglonej oraz uzyskanych właściwości odnoszono się do przemysłowych możliwości technologicznych oraz konkretnego produktu jak wysoko obciążone koła zębate. Przyjęto więc bardzo rozbudowany zakres badawczy dla realizacji bardzo złożonego i wymagającego zagadnienia pod względem naukowym i badawczym.

Praca ma układ klasyczny, w którym można wyróżnić 2 zasadnicze części tj. przegląd piśmiennictwa oraz część badawczą odnoszącą się do zrealizowanych badań własnych. Praca zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych symboli i skrótów użytych w pracy, wstęp oraz bibliografię. Przegląd piśmiennictwa należy uznać za syntetyczny lecz oparty o 149 pozycji literaturowych. Niestety w tej części opis zamieszczonych rysunków jest w języku angielskim a nawet czasami w angielskim i polskim (w sposób mieszany), co można próbować uzasadniać dążeniem do zgodności ze źródłem lecz nie jest zgodne z zasadą unifikacji językowej opracowania. Zarówno streszczenia jak i wstęp dobrze oddają paradygmat pracy. Praca liczy 173 strony i składa się z 10 rozdziałów, w tym jako rozdział 1 jest umieszczony wstęp (jako 11 rozdział błędnie oznaczono bibliografię). Rozdziały mają ciągłą numerację niezależnie od ich umieszczenia w przeglądzie literatury (rozd. 2) czy też związanych z badaniami własnymi (rozd. 3-10). Praca zawiera 102 rysunki (niejednokrotnie złożone z więcej niż jednego slajdu lub wykresu) i 24 tabel oraz 29 wzorów. W pracy odwołano się do 191 pozycji literaturowych czyniąc to nie tylko w części dotyczącej przeglądu literatury ale i podczas dyskusji uzyskanych wyników lub uzasadniania przyjętych założeń lub wyborów badawczych lub projektowych. W drugim rozdziale dotyczącym przeglądu literatury omówiono zagadnienia przemian fazowych przechłodzonego austenitu, obróbki cieplnej Q&P, obróbki cieplnej B-Q&P, obróbki cieplnej kół zębatych, nawęglania, obróbki cieplnej po nawęglaniu, który został zakończony podsumowaniem. W trzecim rozdziale przedstawiono cel i tezę pracy. Założenia dotyczące wyboru stali do badań i jej charakterystyka została zawarta w rozdziale czwartym. Natomiast zastosowane procesy nawęglania przedstawiono w rozdziale piątym. W rozdziale szóstym przedstawiono postępowanie związane z projektowaniem technologii obróbki cieplnej. Zakres badań zamieszczono w rozdziale siódmym a metodykę badań w rozdziale ósmym. Najbardziej rozbudowany jest rozdział dziewiąty obejmujący wyniki badań i ich dyskusję. Rozdział ten składa się z podrozdziałów opisujących symulacje komputerowe, przemiany fazowe zachodzące w stali 35CrSiMn5-5-4 podczas grzania, przemiany fazowe zachodzące w stali 35CrSiMn5-5-4 podczas wytrzymania izotermicznego, charakterystykę materiału

nawęglonego w procesie nawęglania nr I, proces hartowania izotermicznego nawęglonej stali – 0,64% wag. C, charakterystyki materiału nawęglonego w procesie nawęglania nr II, procesu hartowania izotermicznego nawęglonej stali – 0,79% wag. C, obróbki cieplnej B-Q&P nawęglonej stali – 0,79% wag. C, obróbki cieplnej B-Q&P ze zmienną szybkością chłodzenia – B-Q&Pc. Dla podrozdziałów dotyczących poszczególnych rodzajów obróbek cieplnych w osobnych podrozdziałach zamieszczono ich podsumowanie. Wprowadza to pewne zamieszanie w logice numeracji rozdziałów i podrozdziałów. Rozdział dziesiąty dotyczy podsumowania wyników badań uzyskanych w pracy oraz wniosków.

Przyjęty układ pracy należy ogólnie uznać za dobry. Istotną cechą prowadzonej narracji jest to, że Doktorant przystępując do kolejnego rozdziału opisującego efekty następnego rodzaju obróbki cieplnej uzasadnia podjęty zakres badań i parametry procesu obróbki cieplnej o wyniki uzyskane wcześniej. Daje to efekt ciągłości prowadzonego rozumowania, co ułatwia czytanie pracy i jest istotne w przypadku tak złożonych zagadnień badawczych jak i naukowych oraz różnych zastosowanych technik badawczych.

2. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy

Podjęte zagadnienie badawcze oceniam jako bardzo wymagające i adekwatne dla rozprawy doktorskiej. Zagadnienie to wymagało dobrego przygotowania teoretycznego do prowadzenia narracji i projektowania kolejnych obróbek cieplnych. Założenie uzyskania nanobainitycznej mikrostruktury ustawia tematykę badawczą jako zgodną z nowymi koncepcjami w zakresie kształtowania mikrostruktury stali. Jednocześnie trudność podjętego zadania stwarzała duże niebezpieczeństwo braku uzyskania sukcesu. Widoczne jest też utylitarne znaczenie uzyskanych wyników badań. Można stwierdzić że tematyka pracy bardzo dobrze mieści się w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Pozwala to uznać koncepcję pracy jako mającą potencjał do wniesienia elementów nowości do dziedziny naukowej inżynieria materiałowa.

Uważam, że problematyka naukowa podjęta w opiniowanej pracy doktorskiej Pana Krzysztofa Wasiaka jest aktualna z punktu widzenia zadań stawianych przed inżynierią materiałową w kształtowaniu mikrostruktury i właściwości po obróbce cieplno-chemicznej oraz obróbce cieplnej. Pod tym względem można wskazać wątpliwości co do stosowania obróbki cieplnej nie bezpośrednio z procesu nawęglania oraz przyjętych założeń co do składu chemicznego warstwy nawęglonej tylko dla największej uzyskanej zawartości węgla.

Sformułowano następującą tezę pracy: **„Zaprojektowanie i przeprowadzenie procesu nanostrukturyzacji nawęglonej stali z wykorzystaniem przemiany bainitycznej pozwala ukształtować w jednym procesie technologicznym odpowiednią mikrostrukturę zarówno rdzenia jak i nawęglonej warstwy wierzchniej, co zapewnia korzystne właściwości mechaniczne stali 35CrSiMn5-5-4 pod kątem zastosowania jej do produkcji kół zębatych w silnie obciążonych przekładniach"**. Tak sformułowaną tezę pracy można ocenić jako poprawną ale i wymagającą. Wydaje się, że w odniesieniu do parametrów odpowiedzialnych za właściwą pracę wysoko obciążonych kół zębatych uzyskanie odpowiedniej twardości w warstwie wierzchniej oraz udarności w rdzeniu nie wyczerpuje tych wymagań. Nawet podstawowe testy tribologiczne nie są w tym zakresie wystarczające. Ważnymi pominiętymi zagadnieniami w tej kwestii są odporność na zmęczenie (w tym zużycie pittingowe - gruzełkowe) w warstwie wierzchniej w zależności od gradientu zawartości węgla i mikrostruktury. W tym aspekcie ważnym byłoby również wyznaczenie modułu sprężystości jak i obliczenia umiejscowienia największych naprężeń Hertza a nawet testy kół zębatych. Podczas gdy dla finalnej wersji obróbki cieplnej nie wykonano nawet testów tribologicznych. Jednakże w tezie wskazano ostrożnie, że chodzi o uzyskanie korzystnych właściwości mechanicznych, ograniczając się w badaniach tylko do twardości (dla warstwy wierzchniej w przypadku finalnej obróbki cieplnej B-Q&P ze zmienną szybkością chłodzenie – B-Q&Pc) oraz odporności na kruche pękanie, udarności i parametrów ze statycznej próby rozciągania dla rdzenia jak i badań zakresu odkształceń hartowniczych. Uzupełnienie pracy o wskazane wyżej zagadnienia badawcze wymagałoby jednak znacznego poszerzenia zakresu badań oraz zmiany metodyki badawczej o wykonanie wytopów o zmiennej zawartości węgla (odpowiadającej zawartościom w warstwie nawęglonej). Znacznie poszerzyłoby to zakres pracy, który już w formie zawartej w recenzowanej pracy jest bardzo szeroki i złożony.

Głównym celem pracy było więc: **Opracowanie technologii obróbki cieplnej, która pozwoli ukształtować w jednym procesie technologicznym korzystną mikrostrukturę i właściwości warstwy wierzchniej oraz rdzenia nawęglonej stali 35CrSiMn5-5-4, przy jednoczesnej redukcji wad obecnie znanych technologii obróbki cieplnej.**

Rozwinięciem tezy są też następujące cele aplikacyjne:

- Opracowanie obróbki cieplnej nawęglonej stali 35CrSiMn5-5-4, która będzie mogła być zastosowana do produkcji wysokoobciążonych kół zębatych;

- Wytworzenie mikrostruktury nanokrystalicznej w warstwie nawęglonej stali 35CrSiMn5-5-4 zapewniającej mikrotwardość co najmniej 700 HV0,2;
- Uzyskanie udarności rdzenia nawęglonej stali ≥ 27 J.

Powyżej przedstawione cele pracy należy uznać za już w pełni odpowiadające zakresowi wykonanych badań i będące adekwatne dla przyjętej metodyki badań.

3. Opis metodyki badawczej

Do zweryfikowania postawionej tezy badawczej Autor użył komercyjnej stali 35CrSiMn5-5-4 co można uznać za w pełni właściwe w stosunku do zamierzonych celów. Zakres wykonanych badań przedstawiono w sposób uporządkowany zestawiając go nawet w postaci diagramu na rysunku 8.1. Potwierdzono poprawność składu chemicznego materiału wyjściowego. Materiał wyjściowy został scharakteryzowany przez badania dylatometryczne. Brakowało odniesienia się do stanu ujednorodnionego o najmniejszej energii swobodnej, co pozwoliłoby na zwiększenie znaczenia naukowego uzyskiwanych wyników oraz eliminowałoby wskazywanie przyczyny nieoczekiwanych rezultatów jako ich genezę w niejednorodności materiału. Obserwacje mikrostrukturalne w stanie wyjściowym ograniczono do jednej mikrofotografii ze stanu dostawy. Temperatury krytyczne ustalono jedynie w oparciu o krzywe dylatometryczne nagrzewania bez potwierdzenia ich np. innymi badaniami jak tzw. szereg hartowniczy, co pozwoliłoby na lepsze wskazanie temperatury austenityzowania. W tym względzie na uznanie pod względem metodologicznym zasługuje wykonanie wykresów CTPi, co jest adekwatne dla planowanego hartowania z przystankiem izotermicznym (jednakże na wykresach CTPi nie zamieszczano krzywych parametrów chłodzenia, co utrudnia weryfikację poprawności skonstruowania ww. wykresów). Analiza wyników badań dylatometrycznych stała się jedną z lepszych części pracy (może poza częstym brakiem wyznaczania temperatury końca przemiany perlitu w austenit oraz wątpliwą analizą efektu przypisanego temperaturze Acc). Badania dylatometryczne zostały zweryfikowane w oparciu o symulacje w programie JMatPro. Wykonane dwa procesy nawęglania zweryfikowano przez analizę składu chemicznego. Pozwoliło to na ocenę zmiany zawartości węgla od powierzchni (szkoda że nie wykonywano zestawień zależności twardości od zawartości węgla dla poszczególnych wariantów obróbki cieplnej, co pozwoliłoby wskazać składy chemiczne, dla których można by było wykonać w przyszłości wytopy celem oceny właściwości mechanicznych charakteryzujących warstwę nawęgloną). Dla zastosowanych

procesów nawęglania (w tym dla nawęglonych próbek do badań dylatometrycznych) oraz materiału wyjściowego (ocenianego jako rdzeń) dokonano obróbek cieplnych, które w kolejnych wariantach ulegały logicznemu rozwinięciu. Zaczynając od hartowania izotermicznego przez obróbkę B-Q&P a kończąc na obróbce B-Q&Pc dla intensywniejszego nawęglenia. Stosując przyjęto (z reguły właściwą) metodykę ograniczania wyników prowadzonych badań w oparciu o uzyskanie założonych celów oraz uzyskiwane wcześniej wyniki. Przedstawiono generalnie przekonujące uzasadnienia doboru zastosowanych badań oraz szczegółowych parametrów obróbek cieplnych. Badaniami tymi były: badania metalograficzne (mikroskopia świetlna, elektronowa mikroskopia skaningowa, transmisyjna mikroskopia skaningowa), rentgenowska analiza fazowa, pomiary twardości i mikrotwardości, statyczna próba rozciągania, próba udarności, badania odporności na kruche pękanie, badania tribologiczne oraz pomiary odkształceń hartowniczych. Dobrym odniesieniem do analizy kolejnych wyników badań byłoby scharakteryzowanie mikrostruktury i twardości po nawęglaniu dla poszczególnych próbek nawęglanych (np. próbek masywnych oraz próbek dylatometrycznych).

Podsumowując, stwierdzam że pomimo ww. uwag do metodyki badawczej oceniam ją pozytywnie jako wystarczającą do zrealizowania założonego celu pracy i w wystarczającym zakresie adekwatną dla wymaganego poziomu rozprawy doktorskiej.

4. Ocena merytoryczna pracy

Oceniając pracę od strony merytorycznej, należy zacząć od dokonanego przeglądu literatury. W tym względzie na uznanie zasługuje kompaktowy charakter tego przeglądu przy wykorzystaniu podstawowej i najnowszej literatury. Pod tym względem w tej części pracy odstaje poziomem opis ferrytu allotriomorficznego i idiomorficznego, ferrytu Widmanstättena a zwłaszcza perlitu. Moim zdaniem ten opis nie jest na poziomie właściwym dla rozprawy doktorskiej a ponadto kompletnie zbędnym dla zakresu tematycznego pracy.

Autor wykazał się wystarczającą umiejętnością w realizacji badań, ich opracowywania oraz interpretacji uzyskanych wyników. Praca w zakresie merytorycznym jest skonstruowana logicznie. Pozwoliło to Doktorantowi świadomie projektować kolejne wersje obróbek cieplnych. Przedstawienie nowej koncepcji obróbki cieplnej, której rezultat daje nadzieję na poprawę właściwości użytkowych nawęglonych kół zębatych jest niewątpliwie oczekiwaną w rozprawach doktorskich nowością uzupełniającą wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej.

Praca napisana jest w sposób generalnie staranny pod względem jej konstrukcji, choć Doktorant nie ustrzegł się licznych błędów językowych i interpunkcyjnych. Począwszy od przeglądu literatury przez zastosowaną metodykę badań (w sposób bardzo dobry objaśniono co, jak i w jakim celu wykonano) po opis wyników badań własnych i analizę osiągniętych wyników badań własnych (osiągając zamierzony cel badawczy jak i generalnie weryfikując postawioną tezę) udało się zrealizować rozprawę doktorską na wystarczającym poziomie naukowym. Ogólnie pracę doktorską mgra inż. Krzysztofa Wasiaka oceniam pod względem merytorycznym jako spełniającą wymagania. Jednak podczas jej lektury nasuwają się pewne spostrzeżenia natury polemicznej odnoszące się do zagadnień merytorycznych oraz uwagi szczegółowe (natury edycyjnej oraz inne drobne uwagi), które zostały niżej przedstawione.

5. Polemiczne uwagi merytoryczne

1. Temperatura A_{c1} powinna być oznaczana jako A_{c1p} aby odróżnić ją od temperatury A_{c1k}, co wtedy eliminowałoby karkołomną definicję temperatury A_{c1k}: „najwyższa wartość niższej temperatury krytycznej (A_{c1}) przemiany w austenit podczas nagrzewania, gdy w stali występuje zakres tej temperatury (°C)". Temperatura A_{c1p} jest to początek przemiany eutektoidu w austenit a temperatura A_{c1k} jest to koniec przemiany eutektoidu w austenit. Natomiast temperatura A_{c3} jest to koniec przemiany ferrytu w austenit. Oczywiście wyznaczane przy nagrzewaniu.
2. Poza efektem dylatacyjnym nie udowodniono efektu określanego jako temperatura A_{cc} w rozumieniu temperatury, powyżej której w stali nie obserwuje się wydzieleń węglików, wyznaczonej podczas nagrzewania. Nie zaprezentowano takich węglików w badaniach mikrostrukturalnych a efekt ten może pochodzić od rozrostu ziarna. W tym względzie wątpliwości budzi to, że po nawęglaniu wg. I technologii temperatura ta uległa zmniejszeniu do czego nie odniesiono się w tekście pracy. Nie wskazano również tej temperatury dla II procesu nawęglania, co pozwoliłoby zbliżyć się do wyjaśnienia tej kwestii.
3. Obrazy mikrostruktur z rysunku 2.2 mogą wprowadzać w błąd przez ich opis, jak np. wskazanie jako ferryt mikrostruktury ferrytyczno-perlitycznej.
4. Mikrostruktura na rysunku 2.22 pokazuje raczej odpuszczony martenzyt lub bainit niż martenzyt listwowy.

5. Obecnie zgodnie z normą zamiast określenia stal węglowa używa się określenia stal niestopowa.
6. Do badań można było użyć stali z zawartością molibdenu zabezpieczającą przed kruchością odpuszczania drugiego rodzaju – czy uzyskiwane wyniki nie mogą mieć związku z tym efektem.
7. Co oznacza powierzchniowa zawartość węgla? Czy nie właściwszym jest zawartość węgla blisko powierzchni?
8. Podobnie nielogicznym z punktu metrologicznego jest stosowanie pojęcia twardości i mikrotwardości powierzchniowej – jest to skrót myślowy.
9. Jaki gradient zawartości węgla był w nawęglonych próbkach dylatometrycznych o średnicy większej niż strefa nawęglona – jaki to ma wpływ na przyjęte założenia zawartości węgla do analizy wyników badań dylatometrycznych.
10. Co oznacza G-PHASE na rys. 9.2?
11. Tylko raz wykorzystano krzywe różniczkowe w analizach efektów dylatacyjnych (rys. 9.7) a ułatwiają one analizę subtelnych zmian, które są na tych krzywych.
12. W tabeli 9.4 nie podano wielkości ziarna pomimo wzmiankowania tego w jej tytule.
13. Na str. 84 wspomina się o węglikach wtórnych bez wskazania jakie to węgliki powinny być – jeśli cementyt to byłoby to niezgodne z wyznaczonymi temperaturami A_{cc} w nawęglonej i nie nawęglonej stali.
14. Jaka jest przyczyna zmniejszenia relatywnej zmiany wydłużenia z czasem dla temp. 320°C na rys. 9.17? W badaniach TEM w małym stopniu dokonywano weryfikacji składowych mikrostruktury przy użyciu ciemnego pola ze wskazaniem refleksu na dyfrakcji, dla którego je wykonano.
15. Czy efekt zmniejszenia twardości przy powierzchni nie jest związany z brakiem odpowiedniego odstępu miejsca wykonania odcisku od powierzchni swobodnej lub efektu kołyskowania zgładu podczas jego wykonania a jednak związany z odwęgleniem - jak to jest sugerowane?
16. Istotnym dla analizy rdzenia byłoby wykonanie wykresów Wöhlera celem oceny roli nawęglenia (grubości warstwy nawęglonej) i wykonanych obróbek cieplnych.
17. Jaka jest geneza przyjętej wymaganej twardości?
18. Czym wyjaśnić różnice w temperaturze A_{c1} dla stali nienawęglonej i nawęglonej?

19. Spadek temperatury A_{c3} jest bardzo mały przy istotnym wzroście stężenia węgla po nawęgleniu. Czy to nie świadczy o tym, że w nawęglonych próbkach dylatometrycznych zawartość węgla była mniejsza niż założona?
20. Wątpliwości odnośnie zawartości węgla w nawęglonych próbkach dylatometrycznych mogą skutkować niepewnością odnośnie wyników obliczeń redystrybucji węgla pomiędzy fazami podczas obróbki cieplnej.
21. Czy na str. 117. rys. 9.37 jest mikrostruktura po B czy po B-Q&P? Ponieważ opis dotyczy zmian po bainityzacji.
22. Czy wartości podane na stronie 119 odnoszą się do B20QP, B30QP i B40QP czy raczej do B20, B30 i B40?
23. Na stronie 119 jest ostatni akapit: Poniżej przedstawiono opis przemian fazowych, jakie zachodzą w rdzeniu podczas etapu częściowej bainityzacji warstwy nawęglonej. Czy raczej nie chodzi o materiał nienawęglony skoro dotyczy to rdzenia?
24. Czy rys. 9.39 i 9.40 nie dotyczą raczej procesów B30 oraz B20 i B40 niż B20QP, B30QP i B40QP? Ponadto na rysunku 9.40 podano ujemny czas na osi X.
25. Z jakim błędem oceniano zawartość austenitu resztkowego i jaki to ma wpływ na analizę zmian jego zawartości. Jeśli zawsze błąd pomiaru był 3% tak jak w tab. 9.13 to analizowane zmiany są wątpliwe a podanie zawartości γ z częściami dziesiętnymi, jak w tej tabeli, jest błędne.
26. Na rysunku 9.46 podano ujemny czas na osi X.
27. Dlaczego zmieniano warunki prób tribologicznych co uniemożliwia ich porównanie? Nie uwzględniano przy tym zmienności materiału z zagłębianiem się w warstwę nawęgloną. Czy w wyniku wytarcia przekroczona została warstwa nawęglona? Brak odniesienia do współczynnika tarcia.
28. Jak mierzono twardość dla zerowej odległości od powierzchni?
29. Na stronie 137 stwierdzono, że: W mikrostrukturze występują również drobnodyspersyjne węgliki, niewidoczne na obrazach TEM. To skąd wiadomo, że występują?
30. Na stronie 160 stwierdzono że: „w wyniku obróbki B-Q&P_c uzyskano mikrostrukturę bainityczną w rdzeniu nawęglonej stali, której udarność wyniosła 35 J i spełniła cel aplikacyjny pracy,", jednakże nie zaprezentowano odpowiedniej mikrostruktury w rozprawie.

6. Uwagi redakcyjne i szczegółowe

1. Stosowanie języka angielskiego w opisie rysunków należy uznać za błąd redakcyjny.
2. Stosowane jest często nie wzrastające podawanie numerów odnośników literaturowych np. str. 45, 49.
3. Czasami niepotrzebnie są wyprzedzane pewne informacje, jak np. na stronie 59 w odniesieniu do tabeli 9.8.
4. Podstawowe znaczenie ma tekst, natomiast rysunki i tabele mają znaczenie pomocnicze dlatego nie powinno być rozdziału bez tekstu jak rozd. 8 (przed jego podrozdziałami) tylko z rysunkiem.
5. Na wykresach przedstawiających krzywe dylatometryczne części dziesiętne od całości są błędnie oddzielone kropką zamiast przecinkiem.
6. Często niekonsekwentnie pominięto wcięcia na początku akapitów (oczywiście poza pierwszymi akapitami w rozdziałach -co jest właściwe) np. str. 113.
7. Str. V. Streszczenie: „... w obróbce cieplnej nawęglonej **stali zabiegu** nanostrukturyzacji ...".
8. Str. V. Streszczenie: „... **wykorzysującą** zmienną szybkość chłodzenia ...".
9. Str. VII. Symbole: „... wartość niższej **temperatura** krytycznej ...".
10. Str. VIII. Symbole: „... **martenytyczno**-austenitycznych utworzonych ...".
11. Str. XI. Spis treści: „Procesy **Nawęglania**"; „**Warunku** realizacji obróbek cieplnych".
12. Bibliografii się nie numeruje jako rozdziału.
13. Str. 1. „... materiały **musza** być ...".
14. Str. 3. „... obecnie **sosowane** metody ...".
15. Rys. 2.1. „ pomiędzy fazą ciekła, austenitem, ...".
16. Str. 5. „... obróbek **cielnych** stali, ...".
17. Str. 7. „**Energa** odkształcenia ..."; „... że przemiana odkształceniowa zaczyna być coraz bardziej korzystne energetycznie ...".
18. Str. 9. „... od austenitu (0,77% wag. C**)** **z** którego powstają ...".
19. Str. 10. „... dyfuzyjnej redystrybucja pomiędzy ..."; „... przemiana perlityczna zachodzić nie tylko ...".
20. Str. 11. „... redukująca energię swobodnej układu ...".
21. Str. 12. „... z szybkością umożliwiająca ominięcie ..."; „... poprzedzielanych wydzieleniami cementytem lub w przypadku bainitu ...".

22. Str. 13. „Spiętrzenia dyslokacji tworzone przed przemieszczającą się granicą międzyfazową prowadzi do zatrzymania ...".
23. Str. 15. „... przedstawiony została poniżej ..."; „... i pod katem 55°- 60° ...".
24. Str. 27. „Mniejsza przesycenie węglem martenzytu **listowego** ...".
25. Str. 30. „... aby zwiększyć odporności na pękanie ...".
26. Str. 31. „Drugi zakres **opuszczania** występuje ..."; „... i szybkie schłodzenie. [24]."; „... do segregacji *do* granic~~ach~~ ziaren, ..."; „... obejmuje ona niepełn~~ego~~ hartowanie martenzytyczneg~~o~~ z późniejszą dyfuzyjną ..."; „... że prezentowana kombinację właściwości ...".
27. Str. 33. „... jak np. wzór opracowane przez ...".
28. Str. 34. „... nad obróbka typu B-Q&P pracował ...".
29. Str. 36. „... procesów posiada wady i **graniczenia**, a wybór ...".
30. Str. 38. „... zazwyczaj **ok** 0,2% wag. ...".
31. Str. 39. „... intensywność odziaływanie poszczególnych pierwiastków ...".
32. Str. 40. „... jednakże coraz większa popularność zyskuje ...".
33. Str. 41. „**Podchodzenie** nie prowadzi do rozdrobienia ziarna austenitu, ..."; „hartowanie bezpośrednie z przemiana perlityczną. ..." oraz błąd stylistyczny: „wytrzymuje w tej temperaturze do czasu jej wyrównania w całym wsadzie i następnie szybko chłodzi.".
34. Str. 42. „Drugie hartowania prowadzi się ..."; „Metoda ta była powszechnie stosowana przed wprowadzeniem kontroli wielkości ziarna, ale obecnie jest stosowane rzadziej," oraz błąd stylistyczny: „wytrzymuje w tej temperaturze do czasu jej wyrównania w całym wsadzie i następnie szybko chłodzi.".
35. Str. 51. „Parametry poszczególnych etapów **przestawione** zostały w poniższej ...".
36. Str. 52. „Powierzchniowa zawartości węgla wyniosła ...".
37. Str. 54. „... nadmiernego rozrostu ziarna austenit.".
38. Str. 55. „... z punktu **wodzenia** uzyskiwanego"; „... i ujemnego współczynniki nachylenia krzywej ..."; „Dla wybranych temperatur wytrzymania izotermicznego dokonana zostanie charakterystyka mikrostruktury warstwy wierzchniej i rdzeniu."; „... zredukować wady **konwojowanej** obróbki cieplnej ..."; „... zbudowana będzie z ferryty bainitycznego, ...".
39. Str. 58. „Chłodzenie do temperatury 25°C odbywało *się* w polimerowym ..."; „Obróbki **cieple** zrealizowane w ...".

40. Str. 63. „... skokiem **100µm**, dokonując ...".
41. Str. 64. Skrót od minuta jest min a od minimum min., tak więc błednie podano jednostki.
42. Str. 65. „... z wbudowaną kamera cyfrową."; „... do określenie grubości warstw ...".
43. Str. 71. „... **gdzie L_1^* –** ...".
44. Str. 80. „... zakresów występowania przemiany fazowych ...".
45. Str. 81. „... jest wzrostem wytrzymałość macierzystego ..."; „... od wyboru temperatury austenityzowanie stali."; „Oba wymienione parametru mają istotny ..."; „... pokojowej z szybkością 50°**C** /s.".
46. Str. 85. „... całkowitego wydłużenie próbki."; „... prowadzi do umocnienia austenitu, co **utrudnienia** ruchu granic międzyfazowych.".
47. Str. 88. „... w rdzeniu wywołuje hartowania izotermicznego ..."; podpis pod rys. 9.15 „... obrazujące zmianę wydłużenie próbek ...".
48. Str. 89. „... za wzrost wydłużenie próbki."; „... przed przemianą izotermiczna sprawia, ...".
49. Str. 90. podpis pod rys. 9.16 i 9.17 „... obrazujące zmianę wydłużenie próbek ...".
50. Str. 91. podpis pod rys. 9.18 „... z 260 i 320°**C** .".
51. Str. 92. podpis pod rys. 9.19 „... 320°C .".
52. Na mikrofotografiach z rys. 20 brakuje skali a w podpisie nie ma odstępu pomiędzy liczbą a „h".
53. Str. 95. podpis pod rys. 9.23 „... w 320°**C** . TEM jasne ...".
54. Str. 96. podpis pod rys. 9.24 i 9.25 „... uzyskana w rdzenia w nawęglonej ...".
55. Str. 97. „... martenzytu widoczna są wydzielenia ...".
56. Str. 99. „**Mikrostruktur** bainityczne pomimo niższej ...".
57. Str. 100. „... udział **austenitu blokowego** odkształcenia wywołane tarciem ..."; „... doprowadzić do podwyższenia twardość w miejscu ..."; „... przełożyło się na największą odpornością na zużycie ..."; „... izotermicznego w 260°**C** , ..."; „... po którym w mikrostrukturze obecnych było mniej bloków austenitu oraz były one **drobniejsze odkształcenia** występujące podczas tarcia przy niższym ...".
58. Str. 101. „... obróbki **cieplnej do** których ...".
59. W tabeli 9.7 w jej tytule jest odniesienie tylko do hartowania izotermicznego a zawiera ona również wyniki dla klasycznej obróbki cieplnej.

60. Str. 102. „... w 260°C .”; „... skutkuje dodatkowym **zwiększę** udarności ...”; „... stać się konkurencyjnym **proces** obróbki cieplnej ...”; „Szczegółowe podsumowanie wyników badań uzyskanych dla stali 35CrSiMn5-5-4 po nawęglaniu do zawartości 0,64% wag. C i hartowaniu izotermicznym, **przedstawiony został** w kolejnym rozdziale.”.
61. Str. 103. „... do 220°C .”; „... uzyskać znacznie wyższa udarność rdzenia ...”.
62. Str. 104. „... do poprawy odporność na zużycie ...”; „Może to wynikać ze z byt niskiej zawartości węgla w warstwie nawęglonej lub zastosowanie zbyt wysokich temperatur hartowania ...”.
63. Str. 106. „... odporności na zużycie ~~przez~~ przeprowadzonych po procesie hartowania izotermicznego.”; „Wzrost wydłużenie próbek w funkcji ...”.
64. Podpis pod rys. 9.30 „... w temperaturach: 235°C , 200°C , 170°C .”.
65. Str. 107. „... do 235°C ,”; „... oraz zwiększeniem wytrzymałością austenitu, ...”; „... kinetyka tworzenia ferryty bainitycznego ...”.
66. Podpis pod rys. 9.31 „... w **235** , 200 i 170°C .”. Na osi temperatury zbędne są zera dla wartości dziesiętnych.
67. Str. 108. „... temperatura 235 °C,...”.
68. Str. 109. „... i została obliczonej przy użyciu ...”; „... które ~~stanowią~~ mogą stanowić ich miejsca ...”; „... 35CrSimn5-5-4 ...”.
69. Str. 110. „... zmniejszenie tetragonalności **ferryt** bainitycznego ...”.
70. Str. 113. „Dyfrakcja elektronów ujawniła również na obecność cementytu.”; „... izotermicznego dochodzi *do* wydzielania kruchych węglików.”.
71. Str. 114. „... możliwe jest uzyskanie **korzystanych** właściwości stali.”; „... zakłada wprowadzeniu pewnej ...”.
72. Str. 115. „... wyznaczono **korzystające** z proporcji.” oraz podpis pod rys. 9.35 „... poszczególnym procentom zaawansowaniu przemiany bainitycznej.”.
73. Str. 116. „... przyrostem wydłużenie próbki ...”; „... obrazujących zmianę wydłużenie próbek ...”.
74. Str. 117. rys. 9.36 jest tożsamy z rys. 9.41 tylko bez podania wartości Ms'.
75. Str. 118. „... ferrytu bainitycznego widoczną są ...”.
76. Str. 119. „... podczas chłodzenia **to** temperatury etapu Q.”.
77. Podpis pod rys. 9.39 „... uzyskany po procesie B30~~QP~~, obrazujący etapy chłodzenia do częściowej bainityzacji, wytrzymania **izotermiczne** podczas częściowej bainityzacji ...”

78. Str. 122. „... i **B40QP Uzyskane** wyniki ...".
79. Str. 123. „... wynoszą **140 ,** 135 ..."; „... obszary austenitu **bokowego**, ..."; „... co nie pozwoliło *na* ujednorodnienie zawartości ..."; „... M_S austenitu **pierwotnego .**"; „... temperatura bardzo **korzystana** z punktu widzenia, ..."; „... odpowiedniego udziału **austenit** po etapach ...".
80. Str. 124. „... małych rozmiarach **utrudniającym** identyfikację ...".
81. Str. 125. „... martenzytu **korzystanie** wpływa ..."; „... Prawoto i **.in.** ..."; „... zwiększenia **gęstość** granic międzyfazowych, ..."; „... na **jednostkową powierzchni**, ...".
82. Podpis pod rys. 9.44 „Zmiana **wydłużenie** próbek podczas ..."
83. Str. 128. „... Q_α = **122.5** kJ mol^{-1}..."; „... i średnią grubość warstw austenitu wynosząca 56 nm."; „... wynikają z **ok** 1000-krotnie wyższej ..."; „... temperaturze 235**°C .**".
84. Str. 131. „... przedstawiono udział objętościowy~~ch~~ składników ...".
85. Podpis pod rys. 9.46 „... z przemianą bainityczna zachodząca podczas etapów **B**ainityzacji oraz **P**artycjonowania."
86. Str. 132. „... stosując obciążenie~~m~~ 0,2 kg.".
87. Str. 133. „Przedstawione wynika badań mikrotwardości wskazują, ...".
88. Str. 134. „... w blokach **austenit** resztkowego podczas ...".
89. Str. 135. „... zawiera większa zawartość węgla ..."; „Uzyskane wyniki odporność na zużycie ..."; „... łączy **zalet** nanobainitu oraz martenzytu ...".
90. Str. 136. „... wpłynęło na znaczna poprawę ...".
91. Str. 137. „... pożądanej w **calach** aplikacyjnych ..."; „... konwencjonalnej obróbce **cielnej** stanowi ..."; „... wpłynęła również na **znaczą** poprawę ..."; „... po hartowaniu martenzytycznym i niskim **opuszczaniu** ...".
92. Str. 138. „... ze zmienną szybkością **chłodzenie** – B-Q&P_c" – tytuł podrozdziału.
93. Str. 139. „szybkość chłodzenie powinna być ..."; „... zbudowana z wiązek ferryty bainitycznego ..."; „... będzie przemiana bainityczna prowadzącą do uzyskania ...".
94. Str. 140. „... szybkości chłodzenia i **sprawdzano które** z nich ...".
95. Podpis tabeli 9.14 „Zaprojektowana zmienna szybkość **chodzenia** nawęglonej ...".
96. Str. 141. „... na krzywej dylatometrycznej w **przedziela** ...".
97. Str. 143. „... zarodków ferrytu **bainityczne** już na etapie ..."; „... do uzyskania zawansowanie przemiany bainitycznej ...".
98. Str. 144. „... uległy zmianie w stosunku *do* parametrów zaprojektowanych ...".

99. Str. 145. „... podczas chłodzenia do temperatury **marbur** nie dochodziło do przemiany ..."; „... zbudowanej z ferryty bainitycznego ...".
100. Podpis pod rys. 9.46 „... relatywna zmianę wydłużenia ..."
101. Str. 146. „Podczas **chodzenia** do etapu ...".
102. Str. 147. „... obserwacje mikroskopowe, oraz badania ...".
103. Str. 148. „... poprzedzielanych **warwami** austenitu ..."; „Zastosowanie zmiennej szybkość chłodzenia ..."; „... procesu B-Q&P ze stała szybkością chłodzenia, ..."; „W kolejnej tabeli **(...** ..."; „... jest bardzo zbliżony do składy fazowego ..."..
104. Str. 149. „Badania rozkładu mikrotwardości na przekroju poprzecznym warstwy nawęglonej **poddaje** obróbce cieplnej B30QPc ...".
105. Str. 150. „Wskazują na to wyniki **przestawione** na wykresie ..."; „... badania udarności metoda Charpy'ego."; „... oraz badania **odkształcenia hartownicze.**".
106. Str. 151. „... odporności na pękanie (K_I) oraz **statyczna** próby rozciągania."; „Wyznaczony w badaniach odporności na pękanie współczynniki umocnienia ...".
107. Str. 152. „... zastosowana szybkości chłodzenia ...".
108. Str. 153. „... płytki ferrytu bainitycznego akomodowane są przez otaczający je **austenicie**, ..."; „... i kształtu obrabianych **elementu**.".
109. Str. 154. „... ewentualne **przeszłe** wdrożenie technologii ..."; „... chłodzenia **(50°C/s),co** sprawiło,".
110. Str. 155. „... powinna osiągnąć mikrotwardość wyższa bądź równą ..."; „... co przełoży się *na* uzyskanie pożądanej ..."; „... udarność rdzenia **miła** zostać zapewniona ...".
111. Str. 156. „... zbudowana z ferryty bainitycznego ..."; „... w stosunku do pełnej nanobainityzacji (koncepcja I) poskutkuje *to* dodatkowym wzrostem udarności, ..."; „... stali 35CrSimn5-5-4.".
112. Str. 157. „hartowania izotermiczne nawęglonej stali ..."; „... zawartości węgla z 0,64% wag. do **0,79 %** wag. oraz ..."; „... przemiany bainitycznej w przed uzyskaniem ...".
113. Str. 158. „... do uzyskania 20% (3 h 37 min_{γ}), 30% (4 h 4 min_{γ}) oraz 40% (4 h 39 min_{γ}) ..."; „... powstają „wyspy" martenzytyczno-austenityczne, zawierającą silnie rozdrobniony ..."; „... aplikacyjnych mikrotwardość **warstw** nawęglonej, ..."; „Kilkukrotne skrócenia czasu wytrzymania izotermicznego ..."; „Uzyskane wyniki badan eksperymentalnych ...".

114. Str. 159. „w wyniku **opracowana technologia** obróbki cieplnej B-Q&P..."; „... zachowaniu **korzystanej** mikrostruktury ...".
115. Str. 160. „W wyniku zmodyfikowanej obróbka cieplnej (B-Q&P_c)..."; „... uzyskanych wyników badan eksperymentalnych ...".
116. Dostrzeżono również błędy edytorskie w zestawieniu bibliografii dla pozycji: [2], [4], [53], [88], [100], [187].

7. Podsumowanie odnośnie przedstawionych uwag

Wszystkie przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny oraz uzupełniający i nie wpływają na moją pozytywną ocenę całości pracy. Duży zakres przedstawionych uwag oraz ich szczegółowość miały na celu stworzenie Autorowi możliwości swobodnego ich wykorzystania dla własnych celów w dalszym rozwoju naukowo-badawczy. wyniki badań, sposób ich zaprezentowania oraz ich interpretacja potwierdza, że Autor wystarczająco przestudiował literaturę i potrafi poruszać się w tematyce nowoczesnych obróbek cieplnych stali do nawęglania jak i wystarczająco opanował wymagające techniki badawcze oraz sposoby prezentowania wyników. Moim zdaniem Autor poradził sobie z rozwiązaniem sformułowanego problemu badawczego, osiągnął cel badawczy i osiągnął postawione cele związane z postawioną tezą. Praca zawiera dosyć dobrze dobrany zakres analizy literaturowej odnoszący się do badanego zagadnienia, zawiera nowe wyniki badań w dziedzinie naukowej inżynieria materiałowa oraz zawiera dobrą dyskusję prezentowanych wyników badań. Wszystko powyższe wyczerpuje niezbędne znamiona wymagane dla rozprawy doktorskiej.

8. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa jest dobrze ulokowana w obecnym stanie wiedzy, została wykonana i napisana prawidłowo oraz przy użyciu dobrze dobranych technik badawczych. Zamieszczone uwagi szczegółowe nie mają istotnego wpływu na moją pozytywną opinię o całości pracy.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Krzysztofa Wasiaka pt.: „Kształtowanie mikrostruktury i właściwości nawęglonej stali 35CrSiMn5-5-4 przy wykorzystaniu nowoczesnych metod obróbki cieplnej" stwierdzam, że spełnia ona wymogi stawiane pracom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule

naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw z 2017 r. poz. 1789 z późniejszymi zmianami) a także przepisami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2022 poz. 574, z późniejszymi zmianami) oraz wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.