



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

Prof. dr hab. inż. Piotr Bała

Kraków, dn. 26.05.2023

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Krzysztofa Chmielarza**

pt. „**Rola węglików w kształtowaniu struktury i właściwości stali 100CrMnSi6-4 na drodze przemiany bainitycznej**”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej Pani Prof. dr hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej, w związku z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny z dnia 24 lutego 2023 roku (pismo z dnia 27 marca 2023 roku)

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska Pana mgr. inż. Krzysztofa Chmielarza, napisana pod kierownictwem dra hab. inż. Wiesława Świątnickiego, prof. PW, dotyczy badań wpływu udziału objętościowego oraz morfologii węglików na kinetykę przemiany bainitycznej w stali 100CrMnSi6-4. Praca ma układ klasyczny i składa się z 2 zasadniczych części (przeglądu literatury oraz części badawczej). Praca wydana jest w formie książki, liczy 94 strony, składa się z 8 rozdziałów, spisu literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W przeglądzie literaturowym Autor opisał obróbkę

cieplną i przemiany fazowe w stopach na osnowie żelaza, wprowadzając w złożone zagadnienia przemian fazowych w stopach żelaza. Po przeglądzie literaturowym Autor przedstawił tezę oraz materiał i zakres badań. Następnie wyniki badań wraz z ich dyskusją. Doktorant przedstawił obliczenia termodynamiczne i opis przemian fazowych w badanej stali. Na tej podstawie zaprojektował 3 warianty obróbki cieplnej, które pozwoliły na uzyskanie próbek o różnym udziale objętościowym i różnej wielkości węglików wtórnych. W dalszej części zaprezentowano analizę mikrostruktury oraz właściwości uzyskanych materiałów. Wyniki badań opisano syntetycznie w rozdziale podsumowanie i wnioski, w którym zawarto 5 wniosków szczegółowych. Autor odnosi się do 62 pozycji literaturowych. Odwołania obejmują głównie specjalistyczne czasopisma naukowe oraz podręczniki akademickie w temacie metaloznawstwa stopów żelaza. Przegląd literatury jest właściwy i świadczy o dobrej orientacji Doktoranta w temacie, niemniej jednak, w szczególności w odniesieniu do dyskusji, należało umiejscowić osiągnięte wyniki na tle osiągnięć innych autorów. Generalnie praca napisana jest poprawnym językiem technicznym. Oceniając cały układ pracy uważam, że jest on właściwy i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

2. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy

Poszukiwania nowych materiałów inżynierskich oraz możliwości poprawy właściwości już używanych jest podstawowym zadaniem inżynierów materiałowych. W zakresie stopów żelaza obserwowany jest w ostatnich latach rozwój technologii metalurgicznych, przeróbki plastycznej, zaawansowanych technologii obróbki cieplnej i powrót do analizy wpływu roli podstawowych pierwiastków stopowych, co przekłada się na podniesienie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych oraz pozwala na wydłużenie czasu eksploatacji elementów konstrukcyjnych czy narzędziowych wykonanych ze stopów żelaza. Rozwój ten stymulowany jest głównie wymogami ekonomicznymi oraz rosnącą konkurencją ze strony innych materiałów np. stopów lekkich. Niewątpliwie w ostatnich latach jednym z najintensywniej badanych zagadnień w stopach żelaza były stale nanobainityczne. Badania te zainicjowane zostały pracami Irvine'a i Pickeringa, a potem kontynuowane m. in. przez Bhadeshję, Caballero, Garcia-Mateo i innych. Wykorzystując różne mechanizmy umocnienia, ograniczono zawartość węgla i istotnie zwiększono ciągliwość tych stali, przy zachowaniu ich wysokiej wytrzymałości. W wyniku odpowiednio przeprowadzonej obróbki cieplnej powstają złożone morfologicznie

rodzaje bainitu oraz pozostaje pewna część austenitu szcążkowego, co finalnie zapewnia unikatową kombinację właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. W większości badania skupione były na ograniczeniu zawartości węgla i takim doborze składu chemicznego, aby wyeliminować lub mocno ograniczyć wydzielenia węglików podczas przemiany bainitycznej. Niewątpliwym ograniczeniem w stosowaniu stali nanobainitycznych są względy ekonomiczne, gdyż podczas obróbki cieplnej wytrzymanie w zakresie tworzenia się bainitu wymaga stosowaniu długich czasów, co generuje duże koszty. W niniejszej rozprawie postanowiono zbadać wpływ nierozpuszczonych węglików wtórnych, o różnej wielkości i różnym udziale objętościowym na kinetykę przemiany bainitycznej, co dałoby możliwość szerszego zastosowania stali nanobainitycznych. Uważam, że problematyka naukowa podjęta w opiniowanej rozprawie doktorskiej Pana Krzysztofa Chmielarza jest aktualna i technologicznie istotna. W oparciu o studia literaturowe i wyniki własnych badań doświadczalnych sformułowano tezę pracy: „Udział objętościowy węglików i rozkład ich wielkości w strukturze wyjściowej wpływa na kinetykę przemiany bainitycznej oraz uzyskiwanych właściwości stali. Stąd też poprzez sterowanie udziałem i rozkładem węglików możliwe jest sterowanie właściwościami stali.” Teza jest poprawna, niemniej jednak jest niestylistyczna, a jej druga część jest oczywista i znana. Moim zdaniem teza jest zbyt ogólna i można było pokusić się o jej doprecyzowanie. Praca ma zarówno charakter badań podstawowych jak i stosowanych.

3. Ocena merytoryczna pracy

Rozprawę doktorską Pana mgr inż. Krzysztofa Chmielarza oceniam pozytywnie. Za największe osiągnięcie Autora uważam projekt obróbek cieplnych, które pozwoliły w sposób świadomy kształtować węgliki wtórne w badanej stali oraz wykazanie, że zwiększenie wielkości węglików wtórnych w mikrostrukturze przyspiesza kinetykę przemiany bainitycznej, co pozwala na skrócenie czasu wytrzymania izotermicznego i ewentualnie w przyszłości zmniejszyć koszty. Sam dobór stali do badań był bardzo trafny. W stali tej ze względu na wysoką zawartość węgla i jednocześnie niską zawartość pierwiastków węglilotwórczych wydziela się tylko cementy stopowy bogaty w chrom i mangan. W wyniku czego zabiegi cieplne nie prowadzą do wydzielenia innych węglików stopowych, a możliwa jest zmiana udziału objętościowego i wielkości wydzieleni cementytu wtórnego. Jednocześnie bainit możliwy jest do uzyskania

w szerokim zakresie temperatur, co daje możliwość uzyskania bainitu o różnej morfologii. Zaplanowane w pracy eksperymenty oraz w większości interpretacja wyników wykonane są poprawnie i jako całość stanowią zwarte opracowanie tematu. Wszystkie warianty obróbki cieplnej służące do realizacji postawionej tezy, zostały zaprojektowane w przemyślany sposób i zapewniły zmienny udział objętościowy i wielkość węglików wtórnych. Badania wykonano w sposób przemyślany i wykorzystano odpowiedni zestaw badań w celu charakterystyki wytworzonych materiałów, czym Autor udowodnił postawioną tezę.

Podczas uważnej lektury opiniowanej rozprawy doktorskiej nasuwają się jednak pewne spostrzeżenia natury krytycznej i polemicznej oraz uwagi szczegółowe (natury edycyjnej oraz inne drobne uwagi), które wyrażam poniżej:

Uwagi ogólne i dyskusyjne:

1. Konsekwencją zmiany udziału objętościowego i wielkości węglików wtórnych jest zmiana składu chemicznego osnowy, która wpływa na uzyskiwane rezultaty. Szkoda, że Autor nie wykonał badań dylatometrycznych symulacji hartowania próbek z różnego stanu wyjściowego. Po różnicach w temperaturze M_s można pośrednio wnioskować o różnicach w składzie chemicznym osnowy.
2. Na stronie 10 znajduje się stwierdzenie, że „W większości nowoczesnych projektowanych obróbek cieplnych stali unika się wydzielenia węglików”. To niefortunny skrót myślowy Autora. Węgiel są nieodzownym elementem mikrostruktury wielu grup stali, czy to pierwotne, wtórne czy trzeciorzędowe.
3. Na stronie 15 rozprawy znajduje się stwierdzenie, że „Cementyt i węgliki stopowe charakteryzują się wysoką twardością, nie zmniejszają więc twardości struktury hartowanej”. Trudno się z tym stwierdzeniem zgodzić. Wydzielone w mikrostrukturze stali węgliki wtórne, dają pewien stały wkład w twardość, niemniej jednak zabierają węgiel i pierwiastki stopowe, co powoduje obniżenie twardości zahartowanej osnowy. Dlatego w procesie austenitowania do hartowania np. w wysokostopowych stalach narzędziowych stosuje się wysoką temperaturę, aby przez rozpuszczenie części węglików zwiększyć zawartość węgla i innych pierwiastków stopowych w osnowie.
4. Na stronie 22 znajduje się błędne stwierdzenie w odniesieniu do II stadium odpuszczania „Również w tym zakresie następuje spadek kruchości stali, tzw. kruchość odpuszczania I rodzaju”. W tym stadium odpuszczania następuje spadek udarność stali.

5. Na stronie 25 znajduje się nieścisłość w odniesieniu do procesu ASR. Autor twierdzi, że podczas procesu prowadzonego poniżej temperatury A_{c1} w wyniku rekrytalizacji rozdrobnieniu ulega ziarno austenitu.
6. Dlaczego do wyznaczania temperatur krytycznych w badaniach dylatometrycznych użyto szybkości nagrzewania $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, tj. $12^{\circ}\text{C}/\text{h}$ podczas gdy stosowna norma mówi, że tego typu pomiary wykonuje się w zakresie szybkości nagrzewania $180\text{-}300^{\circ}\text{C}/\text{h}$?
7. Na stronie 48 Autor stwierdza, że nagrzewanie stali nadeutektoidalnych powyżej temperatury A_{cm} pozwala uzyskać stop jednoskładnikowy. Nie jest to stop jednoskładnikowy lecz jednofazowy.
8. Uważam, że zamiast określenia „symulacje komputerowe” należało do wykonanych obliczeń używać sformułowania „obliczenia termodynamiczne”.
9. Temperatury A_{c1s} , A_{c1f} i A_{cm} wyznacza się przy nagrzewaniu a nie przy chłodzeniu. Przy chłodzeniu wyznacza się temperatury A_{r1s} , A_{r1f} i A_{cm} (komentarz do opisu na stronie 51).
10. Na rysunku 5.4 wyznaczono temperatury krytyczne z bardzo dużą precyzją do jednego miejsca po przecinku. W praktyce należy tego unikać. Nawet przy dużej precyzji urządzenia wyniki powinno się zaokrąglić przynajmniej do jedności.
11. W tabeli 5.1 zestawiono wpływ temperatury austenitowania na temperaturę M_s . Dlaczego od temperatury austenitowania 1000°C temperatura M_s rośnie? Zaproponowane wyjaśnienie jest nieodpowiednie a zacytowane prace dotyczą zupełnie innych stali - wysokomanganowych.
12. Zaprezentowane w tabeli 6.2 zmiany w wielkości ziarna byłego austenitu są nieistotne i nie było potrzeby na siłę doszukiwania się różnic.
13. Wg Autora po wygrzewaniu izotermicznym w 250°C występują w badanej stali obszary bainitu górnego (strona 69). Trudno się z takim stwierdzeniem zgodzić.
14. Zawarte w tabeli 7.2 wyniki określenia udziału objętościowego austenitu szczątkowego na podstawie badań VSM dla temperatury 430°C są źle zinterpretowane. Najprawdopodobniej nie uwzględniono przemiany magnetycznej cementytu i uzyskano bardzo wysoki udział objętościowy austenitu.
15. Z rysunku 7.10 (strona 82) nie jest jasne czy chodzi o udarność czy pracę złamania. Autor konkluduje wyniki „Można więc stwierdzić, że wpływ wielkości węglików na udarność obrabianej stali silnie zależy od temperatury obróbki”. Trudno się z tym stwierdzeniem zgodzić. Mówimy o węglkach wtórnych, a rolę gra tutaj również morfologia i udział

objętościowy ferrytu bainitycznego, austenitu szcążkowego i węglików trzeciorzędowych.

16. Jako odniesienie do uzyskanych wyników dla osnowy bainitycznej zastosowano stal w stanie zahartowanym i odpuszczonym. Niestety nie podano dla niej udziału objętościowego i wielkości węglików wtórnych.
17. W wyniku zastosowanych obróbek cieplnych uzyskano poprawę właściwości mechanicznych w porównaniu do pojedynczego austenitowania. Przemilczano jednak fakt, że najlepszą odporność na ścieranie w badanym układzie trącym, uzyskano dla stanu H+O.

Uwagi edycyjne:

1. W rozprawie w odniesieniu do właściwości mechanicznych używane są naprzemiennie właściwości i własności mechaniczne. W odniesieniu do mikrostruktury używane są mikrostruktura i struktura. Należało wybrać jeden sposób nazewnictwa.
2. Moim zdaniem nie warto było w spisie treści w podpunkcie 2.3 wprowadzać tylko jeden podpunkt 2.3.1.
3. Jakość rysunku 1.1. jest bardzo niska.
4. Podpis rysunku 6.5 jest nieprawidłowy.
5. Opis tabeli 7.3. na stronie 71 jest nieprawidłowy.
6. Na stronie 81 rysunek 7.9 nie zamieszczono rozrzutu wyników. Na ilu próbkach wyznaczono te wyniki?
7. W pracy znaleziono inne niewymienione wyżej literówki lub błędy stylistyczne, które wskazano Doktorantowi.

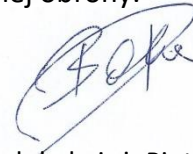
Wszystkie przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny i uzupełniający.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa Pana mgr. inż. Krzysztofa Chmielarza została wykonana i napisana na odpowiednim poziomie naukowym, jest dobrze ulokowana w obecnym stanie wiedzy i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor wykazał, że posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie stali nanobainitycznych, w tym również węglików w stopach żelaza, wykonał badania i opracował wyniki eksperymentalne,

które odpowiednio zinterpretował czym udowodnił, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Krzysztofa Chmielarza pt.: „Rola węglików w kształtowaniu struktury i właściwości stali 100CrMnSi6-4 na drodze przemiany bainitycznej” stwierdzam, że spełnia ona wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) oraz wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Piotr Bała