

Dr hab. inż. Grzegorz Golański, prof. PCz  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, 02 września 2019 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tadeusza Józwika pt.

*„Zmiana trwałości resztkowej stali Cr-Mo-V długotrwale eksploatowanej w warunkach pełzania poddanej regenerującej obróbce cieplnej”*

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach z dnia 18.06.2019 r., pismo nr RM/454/2018/2019 z dnia 19.08.2019 roku.

### Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr inż. Tadeusza Józwika dotyczy zagadnień problematyki rewitalizacji drogą obróbki cieplnej struktury i właściwości użytkowych elementów części ciśnieniowej bloków energetycznych wykonanych ze stali 13HMF (14MoV6-3 według PN – EN). Zastosowany do badań materiał był długotrwale eksploatowany w warunkach pełzania powyżej obliczeniowego czasu pracy 100 000 godzin i różnił się stopniem wyczerpania oraz charakteryzowały się częściowo utratą zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych. Recenzowana praca doktorska ma układ klasyczny i składa się zasadniczo z dwóch części – przeglądu literaturowego oraz badań własnych. Powyższe rozdziały poprzedzone są streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wprowadzeniem. Praca zawiera 160 strony, 25 tabel, 102 rysunków oraz 33 pozycje literaturowe. Treść pracy zgodna jest z tytułem rozprawy. We Wprowadzeniu Autor w zwięzły sposób przedstawił genezę i problematykę opiniowanej pracy doktorskiej. W przeglądzie literatury Doktorant omówił problematykę związaną z obecnym stanem polskiej energetyki i założeniami polityki energetycznej do roku 2040, następnie przedstawił charakterystykę oraz procesy degradacji stali Cr-Mo-V, a także kwestie związane z trwałością elementów kotłów energetycznych. Na podstawie przeglądu literatury, doświadczenia zawodowego oraz wstępnych badań własnych Doktorant sformułował tezę i cel pracy (rozdział III.4 i III.5). Z postawionej tezy oraz celu

rozprawy wynikał przyjęty materiał badawczy oraz program i metodyka eksperymentu przedstawiona w rozdziale III.5-III.8. W rozdziale od III.9 do III.12 przedstawiono wyniki badań własnych, natomiast w rozdziale IV zamieszczono analizę uzyskanych wyników badań oraz sformułowano wnioski końcowe. Na końcu rozprawy zamieszczono Załącznik nr 1 będący procedurą rewitalizacji struktury i właściwości użytkowych elementów ciśnieniowych urządzeń energetycznych po długotrwałej eksploatacji wykonanych ze stali Cr-Mo-V. Rozdział ten poprzedzony był spisem literatury. W pracy brak jest natomiast zwyczajowo umieszczonego na końcu rozprawy spisu rysunków oraz tabel.

### **Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne**

Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce oparte jest w głównej mierze na spalaniu węgla kamiennego i brunatnego w blokach energetycznych. Zdecydowana większość krajowej mocy wytwórczej sektora elektroenergetycznego została wybudowana w latach 70 i 80-tych ubiegłego wieku i projektowana była na obliczeniowy czas pracy wynoszący 100 000 godzin. W ostatnim dziesięcioleciu wybudowano w Polsce zaledwie kilka nowoczesnych bloków na tzw. parametry nadkrytyczne. Obecnie większość bloków energetycznych, w tym rurociągów pary jest eksploatowana przez ponad 200 – 250 000 godzin, przy zachowaniu dotychczasowych lub skorygowanych parametrów pracy. Dotyczy to głównie bloków o mocy nominalnej 200 MW, ale również bloków o mocy 360 i 500 MW. W blokach tych rurociągi główne pary pierwotnej wykonane są ze stali 13HMF (14MoV6-3 według PN – EN). Prowadzone prace remontowe i modernizacyjne tych bloków napotykają trudności, związane głównie z ograniczonym dostępem do tego gatunku stali, długich terminów dostaw oraz wysokich kosztów zakupu. Rozwiązaniem tego dość palącego problemu zdaniem Autora rozprawy jest rewitalizacja poprzez regeneracyjną obróbkę cieplną elementów rurociągów wykonanych ze stali Cr-Mo-V. W rozprawie przedstawiono badania metaloznawcze mające na celu określenie parametrów obróbki cieplnej rewitalizowanych elementów i jej wpływu na mikrostrukturę i właściwości użytkowe regenerowanej stali. Dobór parametrów regenerującej obróbki cieplnej powiązано ze stanem mikrostruktury materiału po eksploatacji – stopniem jej wyczerpania. W oparciu o przeprowadzone w pracy badania i analizę uzyskanych wyników opracowano projekt procedury rewitalizacji elementów ciśnieniowych urządzeń energetycznych po długotrwałej eksploatacji. Podjęcie przez mgr inż. Tadeusza Józwika tematu pracy związanego z możliwością przeprowadzenia rewitalizacji elementów rurociągów wykonanych ze stali Cr-Mo-V uważam za celowe i uzasadnione. W mojej ocenie problematyka rozprawy doktorskiej

jest nie tylko ważna, ale również istotna zarówno z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia, gdyż bloki typu 200 MW mają nadal znaczący wkład w rynek dyspozycyjnej mocy. W części literaturowej Doktorant dokonał przeglądu ponad 30 pozycji literaturowych obejmujących zarówno publikacje naukowe, jak i książki oraz podręczniki akademickie, a także strony www. Zdecydowana większość z cytowanych w pracy pozycji źródłowych pochodzi z kilku, kilkunastu ostatnich lat. Przegląd literaturowy jest jasny i zrozumiały, chociaż nie pozbawiony błędów edytorskich i stylistycznych, które zaznaczyłem w treści pracy. Na wyróżnienie w tej części pracy zasługuje rozdział II.1. pt. *Stan energetyki krajowej i polityka energetyczna do 2040 roku*, gdzie Autor przedstawił szanse, zagrożenia oraz możliwości rozwoju polskiej energetyki. Niemniej jednak zdaniem recenzenta zasadnym byłoby uzupełnienie tej części rozprawy o stan wiedzy dotyczący regenerującej obróbki cieplnej stosowanej w przypadku staliw Cr-Mo-V i jej wpływu na strukturę i właściwości mechaniczne tych elementów.

W oparciu o dane literaturowe oraz bogate doświadczenie zawodowe Doktorant w rozdziale III.5 sformułował następującą tezę rozprawy: *„istnieje możliwość uzyskania struktury i zespołu właściwości użytkowych zbliżonych do charakterystycznych dla materiału w stanie wyjściowym poprzez regenerującą obróbkę cieplną materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Skuteczność obróbki cieplnej może być zależna od stopnia wyeksploatowania materiału po długotrwałej pracy”* która w mojej ocenie jest prawidłowa oraz przedstawił cel pracy zakładający *„określenie parametrów obróbki cieplnej, głównie parametrów austenitizacji jakie należy stosować w przypadku uzasadnionych potrzeb rewitalizacji elementów rurociągowych eksploatowanych długotrwale w warunkach pełzania dobieranych w zależności od stanu mikrostruktury oraz odpowiadającego jej stopnia wyczerpania i trwałości resztkowej. Parametry te muszą być powiązane ze stopniem zaawansowania zmian powstałych w wyniku pełzania. Celem z tym związanym było określenie stopnia zmian pełzaniowych, po których regenerująca obróbka cieplna nie znajduje uzasadnienia technicznego i ekonomicznego”*, który jest w pełni zasadny, ale zbyt rozbudowany.

Do potwierdzenia postawionej tezy i osiągnięcia założonego celu Doktorant przeprowadził szeroki zakres badań metaloznawczych, co przedstawił w postaci graficznej na rysunku 7.1 strona 51 rozprawy. Przyjęty program badawczy obejmował m.in. badania metalograficzne za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej, pomiar twardości, statyczną próbę rozciągania przeprowadzoną w temperaturze pokojowej i podwyższonej (550°C), próbę udarności, wyznaczenie temperatury przejścia w stan kruchy i przyspieszone próby pełzania. Ponadto przeprowadzono badanie procesów wydzieleniowych wykorzystując rentgenowską analizę

izolatów węglkowych. Eksperyment w recenzowanej pracy przeprowadzono na próbkach pobranych z: materiału w stanie dostawy, materiałów długo eksploatowanych o różnym stopniu wyczerpania oraz materiałów po regenerującej obróbce cieplnej. Zastosowana w pracy przez Autora metodyka badawcza nie budzi zastrzeżeń i jest prawidłowa, choć zdaniem recenzenta cennym byłoby poszerzenie eksperymentu o numeryczną symulację przemian fazowych i procesów wydzieleniowych zachodzących w badanej stali za pomocą np. programu ThermoCalc czy też JMatPro.

Doktorant dążąc do potwierdzenia tezy i osiągnięcia celu pracy w rozdziale III przeprowadził, co zasługuje na podkreślenie, obszerne badania obejmujące analizę struktury z uwzględnieniem procesów wydzieleniowych oraz badania właściwości mechanicznych. Bogato udokumentowane wyniki badań własnych i analiz zostały ujęte w formie licznych wykresów, diagramów, tabel oraz obrazów struktur badanych materiałów. Szczególnie cenne z aplikacyjnego punktu widzenia były przedstawione w pracy wyniki skróconych prób pełzania, które najbardziej obiektywnie wyznaczają potencjalną przydatność materiału do eksploatacji. Szkoda jednak, że Autor w pracy nie przeprowadził tych badań dla trzyczabiegowej obróbki cieplnej, co w sposób jednoznaczny, a nie pośredni jak przedstawiono w rozprawie, potwierdziłoby jej skuteczność. W rozdziale IV rozprawy Autor przedstawił analizę i omówił uzyskane wyniki badań własnych. Rozdział ten zasługuje na podkreślenie, gdyż zawarte w nim wyniki badań stanowią nową wiedzę w zakresie możliwości i sposobu przeprowadzenia regenerującej obróbki cieplnej stali 13HMF celem uzyskania wymaganych właściwości użytkowych. Chociaż w ocenie recenzenta w celu pogłębienia dyskusji uzyskanych wyników i podniesienia wartości poznawczej pracy w tematyce analizy mikrostruktury i procesów wydzieleniowych należałoby poszerzyć zakres badań o transmisyjną mikroskopię elektronową. Założony i zrealizowany eksperyment, uzyskane wyniki badań oraz ich analiza w pełni uzasadniają przedstawione w pracy wnioski, które jednak w niektórych punktach są nazbyt rozbudowane.

Praktycznym podsumowaniem rozprawy doktorskiej mgra inż. Tadeusza Józwika jest zamieszczony na końcu pracy Załącznik nr 1, który w mojej opinii zasługuje na uznanie, gdyż przedstawia procedurę i wytyczne pozwalające na przeprowadzenie rewitalizacji elementów wykonanych ze stali 13HMF poprzez regenerującą obróbkę cieplną. Istotnym jest również to, że procedura zawarta w tym załączniku może być stosowana dla innych gatunków niskostopowych stali.

Oceniając recenzowaną pracę doktorską od strony merytorycznej, stwierdzam, że zarówno zaplanowanie eksperymentu, dobór i zastosowanie technik badawczych, opracowanie

i interpretacja wyników były wykonane prawidłowo i jako całość nie budzą większych zastrzeżeń. Strona redakcyjna pracy jest na wysokim poziomie. Praca napisana jest poprawnym językiem, a zastosowana terminologia techniczna poza pewnymi wyjątkami jest właściwa. Pojedyncze zauważone niezręczności stylistyczne, powtórzenia, tzw. „literówki” oraz miejscami nazbyt rozbudowane zdania nie wpływają na wysoką ocenę recenzowanej rozprawy.

### **Uwagi dyskusyjne i szczegółowe**

W trakcie szczegółowej analizy recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Tadeusza Józwika nasuwają się pewne spostrzeżenia natury polemicznej oraz uwagi szczegółowe, które przedstawiam poniżej:

1. Materiał do badań oznaczony jako 2E który eksploatowany był przez ok. 230 000 godzin i charakteryzował się stopniem wyczerpania do 0,2-0,3, natomiast materiał eksploatowany przez ok. 130 000 godzin (oznaczenie 1PE) charakteryzował się wyższym stopniem wyczerpania wynoszącym ok. 0,5. Co zdaniem Autora mogło być przyczyną tych różnic. Proszę o komentarz.
2. Doktorant w pracy stosuje określenie „Obszary bainityczne po części skoagulowane” nie jest to zbyt fortunny opis, prawidłowa i bardziej precyzyjna sentencja powinna brzmieć „koagulacja wydzielen w bainicie”, którą zresztą Doktorant stosuje w pracy.
3. Nie do końca przekonujące są identyfikacje wydzielen dokonane za pomocą analizy SEM+EDS przedstawione na rys. 12.9 i 12.10.
4. W tabeli 12.4 i 12.5 oraz w tekście rozprawy na stronie 110 ostatni wers, jako kryterium energii łamania stosuje Autor wartość 40 J, natomiast na rys. np. 12.21, 12.22 czy też 12.23 stosuje jako kryterium wartość 27 J. Skąd te rozbieżności, proszę Doktoranta o komentarz.
5. Dlaczego jako jedno z kryteriów zastosowano wartość twardości na poziomie 150 HV10, skoro nie ma takiego wymogu w żadnej przedmiotowej normie dotyczącej badanej stali. Jaka jest dopuszczalna odchyłka dla tej przyjętej wartości. Proszę Doktoranta o komentarz.
6. Proszę o wyjaśnienie na czym musi polegać podobieństwo morfologiczne bainitu, aby uzyskać „w stali po regenerującej obróbce cieplnej obszary bainityczne są zbliżone do charakterystycznych dla stanu wyjściowego”.

7. Szkoda, że dla wariantu austenitowania 1050°C/120' ograniczono odpuszczanie, jedynie do temperatury 730°C, pomimo, że wymagania zawarte zarówno w normie PN-H-84024:1975, jak i PN-H-74252:1998 dopuszczają maksymalną temperaturę odpuszczania odpowiednio: 750 i 760°C. Zastosowanie wyższej temperatury odpuszczania być może pozwoliłoby na uzyskanie wymaganej energii łamania.
8. W mojej ocenie zastosowanie nazwy „wyżarzanie ujednorodniające” dla trybu zabiegowej obróbki cieplnej jest niezbyt trafne. Według definicji zawartej w normie PN EN 10052 *Słownik terminów obróbki cieplnej stopów żelaza* wyżarzanie ujednorodniające „*jest to długotrwałe wysokotemperaturowe wyżarzanie mające na celu – poprzez dyfuzję – zmniejszenie niejednorodności składu chemicznego powstałej na skutek zjawiska segregacji*”. Zastosowane w pracy wyżarzanie w przypadku zmodyfikowanej regenerującej obróbki cieplnej jest też wyżarzaniem normalizującym, ale przeprowadzonym w wyższej temperaturze.
9. Załącznik nr 1 – w tekście na stronie 157 podano, że czas odpuszczania nie powinien być krótszy niż 3 godziny, natomiast na rys. 1 i 2 strona 156 widoczny jest czas 2,5 godziny. Sytuacja analogiczna w przypadku odchyłki temperatury w tekście (strona 158) podana jest wartość  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , natomiast na rys. 1 i 2 (strona 156) widnieje wartość  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , które wartości są prawdziwe?
10. Czy według Autora regenerującą obróbkę cieplną będzie można zastosować dla nowoczesnych gatunków stali np. martenzytycznych typu 9-12%Cr? - proszę Doktoranta o komentarz.
11. Czy istnieje ograniczenie w ilości możliwych do przeprowadzenia regenerujących obróbek cieplnych dla danego detalu (zakładając brak uszkodzeń pełzaniowych)? - proszę Doktoranta o komentarz.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że Autor recenzowanej rozprawy w pełni rozwiązał podjęte zadanie badawcze, a przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań mają bardzo znaczący aspekt użyteczny. Doktorant potwierdził sformułowaną tezę oraz osiągnął zaplanowany cel badawczy. Autor rozprawy wykazał się znajomością różnorodnych metod badań metaloznawczych oraz umiejętnością zaprojektowania i przeprowadzenia eksperymentu. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę i kompetencje Doktoranta

w tematyce oceny stanu struktury i właściwości mechanicznych materiału po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania oraz po regenerującej obróbce cieplnej.

Reasumując stwierdzam, że po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Tadeusza Józwika pt: „*Zmiana trwałości resztkowej stali Cr-Mo-V długotrwałe eksploatowanej w warunkach pełzania poddanej regenerującej obróbce cieplnej*” spełnia ona wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i na tej podstawie wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



