

Gdańsk, dnia 30. 01. 2022 r.

**dr hab. inż. Marek Szkodo, prof. PG.**  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Artura Bajwoluka

### **„Konstrukcyjno-eksploatacyjne czynniki procesu niszczenia odlewów palet stosowanych w piecach do obróbki cieplnej”**

wykonanej w Katedrze Mechaniki  
na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie  
pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Pawła Gutowskiego, prof. ZUT

#### **Wstęp**

W praktyce przemysłowej powszechnie wykonuje się obróbkę cieplną i cieplnochemiczną wytwarzanych elementów maszyn i urządzeń, w celu nadania im pożądanych właściwości fizykochemicznych. Obróbkę taką przeprowadza się w specjalistycznych piecach wyposażonych w odpowiednie oprzyrządowanie. Podstawowym elementem oprzyrządowania pieców są palety i kosze, w których umieszcza się obrabiane elementy. Służą one do transportu obrabianych cieplnie elementów a także zapewniają ich odpowiednie rozmieszczenie w piecu. Z uwagi na warunki eksploatacji, palety i kosze narażone są na oddziaływanie niekorzystnych czynników, negatywnie wpływających na ich trwałość. To sprawia, że przedsiębiorstwa wykonujące obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną ponoszą co roku znaczące koszty związane z wymianą zużytych palet i koszów. Celem podjętych przez Doktoranta badań było poznanie mechanizmów niszczenia tego rodzaju osprzętu oraz ocena możliwości wydłużenia trwałości eksploatacyjnej palet i koszy. Rezultaty badań uzyskane przez Doktoranta znacząco przyczyniają się do zwiększenia wiedzy o wpływie czynników strukturalnych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na procesy niszczenia osprzętu do transportu wsadu w piecach do obróbki cieplnej i cieplnochemicznej, w tym, w szczególności wytwarzanych ze staliwa austenitycznego gatunku GX40NiCrSiNb38-19. Na podstawie opracowanej przez Doktoranta metodyki porównawczej i przeprowadzonych przy jej wykorzystaniu numerycznych analiz symulacyjnych możliwe jest dokonanie zmiany

konstrukcji palet i koszy, które zapewnią zmniejszenie naprężeń cieplnych generowanych w nich podczas eksploatacji a tym samym zwiększą ich trwałość eksploatacyjną. Podjęty przez Doktoranta temat, oprócz aspektu naukowego, ma więc bardzo duże znaczenie użytkowe, co jest dodatkową wartością dodaną dysertacji i nadaje jej walor aktualności.

### **Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska liczy 157 stron i składa się z dwóch części: przeglądu stanu wiedzy dotyczącego omawianych zagadnień i części opisującej badania własne Autora. Rozprawa zawiera w swojej początkowej części ogólną charakterystykę osprzętu do obróbki cieplnej. W kolejnym rozdziale Autor opisuje zmiany zachodzące w materiale oprzyrządowania pieców w trakcie jego eksploatacji. Czwarty rozdział został poświęcony omówieniu źródeł naprężeń cieplnych w odlewach osprzętu pieców a w rozdziale piątym Doktorant opisał typowe zniszczenia eksploatacyjne osprzętu pieców. Pierwszą część pracy kończy rozdział zatytułowany „Wnioski wynikające z przeglądu literatury”, w którym Doktorant podsumowuje czynniki mające wpływ na generowanie naprężeń podczas cyklu pracy w stalowych odlewach oprzyrządowania pieców. Pierwsza część rozprawy doktorskiej liczy 48 stron.

W dalszej części rozprawy zamieszczony jest rozdział „Cel, teza i zakres pracy”, w którym Autor zamieszcza jako główny cel pracy poznanie mechanizmów niszczenia palet, określenie zasad poprawnego projektowania tych palet oraz zaproponowanie metodyki oceny porównawczej różnych rozwiązań konstrukcyjnych. W rozdziale tym Autor rozprawy stawia też tezę iż **możliwe jest wprowadzenie takich zmian konstrukcyjnych palet, które istotnie zmniejszą naprężenia cieplne w czasie każdego cyklu pracy, skutkiem czego będzie znaczące podwyższenie ich trwałości.** Tezę pracy uważam za poprawną pod względem naukowym. Program badań i zastosowane metody badań są całkowicie adekwatne do postawionych zadań. W dalszej części rozprawy Autor opisuje wyniki badań własnych. Ta część rozprawy liczy 84 stron i składa się z pięciu rozdziałów. Pierwszy rozdział poświęcony jest charakterystyce przedmiotu badań. Autor opisuje w nim obiekt badań oraz przyjęty model materiału palety. W kolejnym rozdziale opisano metodologię badań, stanowisko badawcze oraz wyniki badań doświadczalnych kinetyki nagrzewania i chłodzenia wybranych elementów palet. Plan eksperymentu obejmował użycie jako środka chłodzącego wody oraz oleju hartowniczego dla próbek wygrzewanych w temperaturach 300, 500, 700 i 900 °C. W rozdziale tym Doktorant przeprowadził także analizy symulacji komputerowych kinetyki

nagrzewania i chłodzenia żebra palety i porównał je z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej.

W kolejnym dziesiątym rozdziale Doktorant przedstawia wyniki komputerowej analizy naprężeń II rodzaju wywołanych zmianami temperatury materiału palety. W tym rozdziale Autor dokonuje symulacji rozkładu naprężeń w węglkach oraz otaczającej je osnowie austenitycznej w dwóch wariantach tj. z uwzględnieniem występowania na powierzchni stopu warstwy tlenków chromu i bez niej. Dodatkowo przeanalizował rozkład naprężeń wokół pojedynczego węglika stykającego się z powierzchnią stopu oraz kilku wydzielen węglików rozmieszczonych wzdłuż warstwy tlenków w bezpośrednim jej sąsiedztwie jak i węglików rozmieszczonych jeden pod drugim w głąb materiału. W dalszej części tego rozdziału Doktorant dokonuje także analizy naprężeń w węglkach rozmieszczonych na granicach ziaren austenitu. Głównym celem tej analizy było określenie wpływu głębokości strefy wydzielen węglików i grubości warstwy tlenków na naprężenia w nich występujące. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że istnieje taka kombinacja grubości warstwy tlenków i grubości nawęglonej warstwy wierzchniej, przy której na powierzchni warstwy tlenków zamiast naprężeń ściskających pojawiają się naprężenia rozciągające. Jeszcze innym wnioskiem z przeprowadzonej analizy jest to, że gruboziarnista struktura austenitu sprzyja generowaniu na powierzchni warstwy tlenkowej naprężeń rozciągających i w konsekwencji inicjowaniu w niej pęknięć. Na koniec tego rozdziału Autor analizuje jednocześnie oddziaływanie naprężeń II rodzaju, wywołanych różną rozszerzalnością cieplną składników strukturalnych stopu i naprężeń I rodzaju wywołanych różnicą temperatur. Jak wynika z przeprowadzonej analizy synergiczne oddziaływanie obu rodzajów naprężeń jest czynnikiem sprzyjającym powstawaniu w trakcie chłodzenia, w warstwie nawęglonej, rozkładów naprężeń umożliwiających inicjację i propagację mikropęknięć.

Rozdział 11 został poświęcony analizie naprężeń I rodzaju spowodowanych nierównomiernym nagrzewaniem i chłodzeniem elementów konstrukcyjnych palet. Autor rozpatruje trzy przypadki to jest naprężenia na przekroju żebra pionowego palety, naprężenia w węzłach cieplnych palet oraz naprężenia i odkształcenia w palecie obciążonej wsadem chłodzonej w powietrzu i oleju hartowniczym. Dokonana analiza wskazuje na to, że mniejsza grubość żebra sprzyja mniejszym naprężeniom cieplnym a tym samym opóźnieniu inicjowania i propagacji pęknięć podczas zmęczenia cieplnego. Uzyskane wyniki symulacji numerycznych pozwalają również stwierdzić, że najmniej korzystne z punktu widzenia trwałości eksploatacyjnej palet są połączenia żeber typu X, T<sub>45</sub> oraz T<sub>60</sub>, ponieważ naprężenia w tych węzłach są znacząco wyższe niż naprężenia w węzłach typu R i Y. Modyfikacja

wszystkich węzłów cieplnych, poza węzłem typu R, poprzez wybrania technologiczne dają zbliżone wyniki. To wszystko oznacza, że poprzez odpowiedni dobór węzłów konstruktor palet może w istotny sposób wpłynąć na trwałość projektowanej palety. Natomiast analiza naprężeń i odkształceń na różnych kierunkach palety obciążonej wsadem pozwala stwierdzić, że w przypadku chłodzenia w powietrzu powstające odkształcenia i naprężenia są większe niż przy chłodzeniu w oleju. Analiza wskazuje również, że wysokie naprężenia powstają zarówno w strefie palety pomiędzy jej obciążoną i nieobciążoną wsadem częścią, ale również na całym obszarze znajdującym się pod wsadem.

W rozdziale tym Doktorant proponuje też rozwiązania konstrukcyjne minimalizujące naprężenia w paletach polegające na zastosowaniu tzw. rozprężaczy mających na celu zmniejszenie sztywności zewnętrznego obrysu palety. Powyższą analizę przeprowadził dla węzłów typu X i typu T modyfikowanego w różnych wariantach. Z analizy wynika, że wprowadzenie jednego rozprężacza pozwoliło zmniejszyć maksymalne naprężenia o około 42% w stosunku do wersji konstrukcji palety bez rozprężacza i o 35% w stosunku do wersji z pojedynczym rozprężaczem.

Rozdział 12 poświęcony jest autorskiej propozycji Doktoranta modernizacji konstrukcji kosza do transportu wsadu. Numeryczne obliczenia przepływu ciepła w kluczowych obszarach kosza i przeprowadzona na jej podstawie analiza odkształceń i naprężeń umożliwiła zaproponowanie zmiany konstrukcji kosza tak aby zmniejszyć sztywność jego ścian bocznych z podstawą, poprzez wprowadzenie w wybranych kolumnach ścian bocznych podcięć odciążających. Zaproponowane przez Doktoranta zmiany konstrukcyjne zostały zweryfikowane doświadczalnie w kosztach eksploatacyjnych w warunkach przemysłowych i potwierdziły słuszność przeprowadzonych zmian konstrukcyjnych.

Podsumowanie wyników badań zawiera rozdział zatytułowany „Podsumowanie oraz wnioski i uwagi końcowe”, w którym Autor rozprawy nie tylko krótko podsumowuje uzyskane wyniki ale także wskazuje przewidywane dalsze kierunki możliwych badań w tym temacie. Dysertacja kończy się spisem literatury. Autor powołuje się na 134 pozycje literaturowe, w tym cytuje 12 swoich prace, których jest autorem lub współautorem i dotyczą one tematu rozprawy. Praca zawiera również streszczenie w języku polskim oraz angielskim a także trzy załączniki oznaczone jako A, B i C, w których zamieszczono skład chemiczny stopów żarowytrzymałych (załącznik A), wykresy zmiany przebiegu kinetyki nagrzewania i chłodzenia uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych (załącznik B) oraz siatki elementów skończonych użyte w analizach numerycznych przepływu ciepła i naprężeń cieplnych (załącznik C)

## Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### Do krytycznych lub dyskusyjnych uwag merytorycznych zaliczam:

- Str. 11, podpis pod rys. 2.1a „Piec komorowy do wysokiego odpuszczania”. Taki piec może służyć również do innych rodzajów odpuszczania czy wyżarzania.
- Str. 18, Tabela 3.1, w składzie chemicznym staliwa brak jest informacji o ilości kobaltu oraz wolframu.
- Str. 20, na rys. 3.1d pokazano fazę G, także na str. 21 Autor wspomina o fazie G i  $\sigma$  jednak nie wyjaśnia jakiego rodzaju są to fazy.
- Str. 20, Doktorant pisze, że wydzielenia węglików MC poprawiają własności mechaniczne staliwa. To wymaga wyjaśnienia czy wszystkich własności mechanicznych np. i twardości i udarności.
- Str. 21, rozdział 3.2 Degradacja staliwa podczas eksploatacji. W tym rozdziale Doktorant opisuje zmiany mikrostruktury w staliwie wywołanej środowiskiem pracy palety. Struktura staliwa się zmienia pod wpływem środowiska a nie degraduje.
- Str. 46, Doktorant pisze „powodują degradację własności mechanicznych”. Własności mechaniczne nie ulegają degradacji tylko zmieniają się.
- Str. 52, Autor podaje, że wykonał badania na próbkach ze staliwa 1.4849, jednak nie zbadał składu chemicznego tego staliwa. Nie wiadomo więc czy staliwo to zawierało 0,3% C czy 0,5%, czy chromu było 18% czy 21%. Dodatkowo nie sprawdzając składu chemicznego tego materiału nie można być pewnym czy to był w ogóle ten gatunek staliwa.
- Str. 57, Autor podaje, że rejestrował temperaturę przy nagrzewaniu co 3 s a przy chłodzeniu co 1 s. Wydaje się, że przy oziębianiu w wodzie jest to zbyt duży krok.
- Str. 60, Autor pisze: „Granica ta jest związana z temperaturą wrzenia wody, powyżej której należy ją traktować jako ciecz wrząco parującą, dla której proces wymiany ciepła przebiega znacznie intensywniej niż dla wody w stanie ciekłym”. Trudno się z tym zgodzić ponieważ pęcherze pary wodnej zmniejszają zdolność wody do odprowadzania ciepła a nie zwiększają ją.
- Str. 62, na rys. 9.8 Autor przedstawił przyjętą przez siebie funkcję zmiany współczynnika przenikania ciepła  $Up$  od różnicy temperatur w czasie nagrzewania a na rys. 9.9 w czasie chłodzenia dla oleju i wody. Jednak w pracy nie wyjaśnia dlaczego akurat takie przyjął założenia.

- Str. 66, równanie (9.3), w liczniku różnica została zapisana w nawiasie co sugeruje, że czegoś w liczniku brakuje.
- Str. 67, rys. 9.15 i 9.16 powinny być opisane jako a) i b). Na tych rysunkach zamienione są linie „doświadczenie” i „model”. Opisując te rysunki Autor pisze: „Na wykresie wyznaczonym w sposób doświadczalnie widać wyraźne spowolnienie procesu chłodzenia występujące w zakresie 700 - 300 °C. Jednak spadek prędkości chłodzenia widać tylko w temperaturach 700 – 600 °C a w niższych temperaturach jest taki jak w modelu. Dalszy opis tych rysunków podaje, że przy chłodzeniu w wodzie z temperatury 900 °C wynik doświadczalny różni się od modelowego dlatego, że wydzielają się węgliki. Przy szybkim oziębieniu w wodzie węgliki się raczej nie wydzielą ponieważ aby tak było musi być odpowiedni czas i temperatura do zajścia procesów dyfuzyjnych.
- Str. 70, Autor podaje, że znalazł w literaturze wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej dla węgliku  $M_7C_3$  równą  $8,6 \times 10^{-6} K^{-1}$  a dla warstwy  $Cr_2O_3$  w zakresie  $(5,7 - 9,6) \times 10^{-6} K^{-1}$  i przyjął dla niej wartość  $7,5 \times 10^{-6} K^{-1}$ . Przy tych założeniach naprężenia własne w warstwie tlenków wyniosły prawie 2GPa i miały charakter ściskający. Jednak gdyby Autor przyjął wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej dla warstwy  $Cr_2O_3$  równą  $9,6 \times 10^{-6} K^{-1}$  to naprężenia miałyby nie tylko inną wartość ale również inny znak. Czy Doktorant może wyjaśnić dlaczego przyjął akurat taką wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej dla warstwy  $Cr_2O_3$ .
- Str. 70, w staliwie gatunku 1.4849 tworzy się nie tylko warstwa tlenków  $Cr_2O_3$  ale również  $SiO_2$ . Dlaczego Doktorant nie uwzględnił tego przy symulacjach naprężeń własnych.
- Str. 77, Rys. 10.9b, Autor przyjął grubość warstwy nawęglonej tylko 0,2 mm, podczas gdy w praktyce będzie ona znacznie grubsza.
- Str. 90, rys. 11.3, str. 91, rys. 11.4, str. 94, rys. 11.7, naprężenia nie mogą przekraczać granicy plastyczności bowiem przy takich naprężeniach materiał zaczyna płynąć i naprężenia własne relaksują się.
- Str. 125, rys. 12.4, jest „ $t_m$ ”, powinno być „ $t_{max}$ ”.
- Str. 126, jest „w wyższych temperaturach kiedy własności mechaniczne są obniżone”. Do własności mechanicznych zaliczają się własności wytrzymałościowe takie jak  $R_m$ ,  $R_e$  czy HB, oraz własności plastyczne takie jak A, Z czy U, powinno więc być „w wyższych temperaturach kiedy własności wytrzymałościowe są obniżone”

Pod względem edytorskim praca jest wykonana dobrze, napisana jest prostym i jasnym językiem. Jednak i w tym obszarze Autor nie ustrzegł się błędów. Najważniejsze z nich to:

- Autor często dla policzalnych rzeczowników używa słowa „ilość” zamiast „liczba”, np. str. 13 „ilość elementów”, str. 92. „ilość pęknięć”, str. 108 „ilość obszarów” str. 127 „ilość osprzętu”.
- Str. 20, Autor pisze „przemiana austenitu w martenzyt powoduje wzrost objętości właściwej w stosunku przeważającym”. W pracy naukowej należy być precyzyjnym.
- Str. 33, Autor pisze „silne naprężenia” a powinno być „naprężenia o wysokiej wartości”.
- Str. 60, jest „spadek temperatury z mniejszą intensywnością”, powinno być „mniejsza szybkość chłodzenia”.
- Str. 67, jest „w Tabeli 9.1”, powinno być w „Tabeli 9.2”.
- Str. 80 jest „naprężenia I i II rodzaju nakładają się”, powinno być „naprężenia sumują się”.
- Str. 82-84, Doktorant myli pojęcia „gradient temperatury” i „różnica temperatury”.
- Str. 95, rys. 11.8, brak oznaczenia i opisu rys. a) i rys. b).
- Str. 96, rys. 11.9, brak wyjaśnienia czym jest wartość „D” (średnicą wewnętrzną czy zewnętrzną).
- Str. 117, rys. 11.29, brak oznaczenia i opisu rys. a) i rys. b).
- Str. 117, rys. 11.30, brak skali kolorów.

Inne zauważone drobne nieścisłości stylistyczne nie były warte umieszczenia w recenzji, pozwoliłem sobie zwrócić na nie uwagę bezpośrednio Autorowi.

## **Wnioski**

W ogólnej ocenie stwierdzam, że Pan Artur Bajwołuk w pełni zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy w świetle prowadzonych badań, potrzeby praktycznych rozwiązań inżynierskich, klarowne sformułowanie tezy i celu pracy oraz ich osiągnięcie na drodze dobrze zaplanowanych i przeprowadzonych badań, a w końcu dyskusji otrzymanych wyników, oceniam przedstawioną rozprawę doktorską pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Artura Bajwołuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam,

że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przewidziane odpowiednimi ustawami.

Gdańsk, 30 styczeń 2022 r.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Szkodo', written in a cursive style.

Dr hab. inż. Marek Szkodo, prof. ucz.