

Mgr inż. Artur Bajwoluk

Temat rozprawy: *Konstrukcyjno-eksploatacyjne czynniki procesu niszczenia odlewów palet stosowanych w piecach do obróbki cieplnej*

Słowa kluczowe: osprzęt pieców do obróbki cieplnej, odlewy palet, staliwo żarowytrzymałe, naprężenia cieplne, metoda elementów skończonych

Streszczenie

Odlewy palet, stanowiące przedmiot analiz podjętych w niniejszej rozprawie doktorskiej, stanowią podstawowy element osprzętu pieców do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, na których ulepszane cieplnie elementy są transportowane podczas procesów obróbki. Z uwagi na warunki eksploatacji palety narażone są na oddziaływanie wielu niekorzystnych czynników wpływających negatywnie na ich trwałość. Celem prowadzonych badań było poznanie mechanizmów powodujących niszczenie tego rodzaju osprzętu oraz ocena możliwości spowolnienia tego procesu.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury obejmującego m.in. takie zagadnienia jak: warunki pracy osprzętu technologicznego pieców, materiały stosowane do wykonywania analizowanych odlewów, źródła naprężeń w elementach eksploatowanych w warunkach gwałtownych zmian temperatury oraz przegląd powszechnie występujących zniszczeń rzeczywistych elementów osprzętu pieców postawiono 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.

Zmiany takie nie mogą być jednak wprowadzane arbitralnie, lecz muszą wynikać z odpowiednio przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych, w których uwzględnione zostaną zarówno zmiany struktury i związane z tym zmiany właściwości mechanicznych zachodzące w materiale palet w czasie ich eksploatacji, jak i naprężenia cieplne powstające w każdym cyklu pracy wskutek gradientu temperatury w przekroju nagrzewanych i chłodzonych elementów oraz naprężenia cieplne wywołane różną rozszerzalnością cieplną faz występujących w materiale.

W ramach prowadzonych badań opracowano metodykę porównawczą rozwiązań konstrukcyjnych palet pod kątem powstających w nich, w warunkach gwałtownych zmian temperatury, naprężeń cieplnych. Pierwszym krokiem prowadzonych według opracowanej metodyki analiz jest modelowanie numeryczne przepływu ciepła w badanych elementach podczas realizowanego procesu cieplnego, a następnie wyznaczenie czasu t_{max} , po którym na wybranym kierunku powstają największe różnice temperatury. Następnym krokiem jest przeprowadzenie obliczeń numerycznych naprężeń cieplnych, jakie powstają w poszczególnych punktach badanego elementu po zmianie temperatury z wyjściowej – jednakowej dla całego obiektu do rozkładu temperatury wyznaczonego dla danego procesu po czasie t_{max} . Krokiem końcowym jest optymalizacja rozwiązań konstrukcyjnych pod kątem minimalizacji powstających w czasie cyklu pracy naprężeń cieplnych.

Z uwagi na istotną rolę analiz przepływu ciepła w zaproponowanej metodyce, zbudowano stanowisko badawcze do pomiaru zmiany temperatury podczas nagrzewania lub chłodzenia próbki odzwierciedlającej kształtem żebro pionowe palety. Na zbudowanym stanowisku przeprowadzono pomiary kinetyki zmian temperatury wewnątrz próbki przy nagrzewaniu w piecu oraz przy chłodzeniu w oleju i wodzie, przy różnych temperaturach granicznych danego procesu. Uzyskane wyniki wykorzystano do opracowania modelu MES przepływu ciepła w nagrzewanym i chłodzonym żebrze palety.

Po uzyskaniu zgodności wyników obliczeń numerycznych przepływu ciepła z wynikami badań doświadczalnych, przeprowadzono numeryczne analizy naprężeń cieplnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Przyjęto, że głównymi źródłami tych naprężeń w analizowanych paletach jest różna rozszerzalność cieplna składników strukturalnych występujących w staliwie, z którego są one wykonywane oraz tworzący się podczas procesów wymiany ciepła gradient temperatury. W prowadzonych analizach przyjęto, że w całym zakresie temperatury pracy stosowane do produkcji palet staliwo ma stabilną strukturę austenityczną, a więc w czasie zmian temperatury nie zachodzą w nim przemiany fazowe żelaza α w żelazo γ i odwrotne.

Do analizy naprężeń strukturalnych wywołanych różną rozszerzalnością cieplną składników staliwa opracowano modele MES strefy przypowierzchniowej nawęglonego stopu austenitycznego. Modele te wykorzystano do analizy wpływu takich parametrów, jak: głębokość strefy nawęglonej, grubość warstwy tlenków na powierzchni stopu czy wielkość ziarna, na naprężenia powstające w warstwie przypowierzchniowej gwałtownie chłodzonego elementu. W etapie końcowym prowadzonych analiz opracowane modele wykorzystano do obliczeń uwzględniających jednocześnie oddziaływanie naprężeń spowodowanych różną rozszerzalnością cieplną składników strukturalnych staliwa oraz tworzącego się gradientu temperatury. Uzyskano rozkłady naprężeń sprzyjające powstawaniu obserwowanych w rzeczywistości pęknięć. Dzięki przeprowadzonym analizom modelowym i obliczeniom numerycznym uzyskano wyniki dostarczające informacji o czynnikach sprzyjających formowaniu się naprężeń, w przypowierzchniowej warstwie nawęglonego stopu, przyczyniających się do inicjacji obserwowanych pęknięć.

Analizy naprężeń wywołanych gradientem temperatury wykorzystano do oceny wpływu czynników, takich jak rodzaj medium chłodzącego oraz temperatura początkowa i końcowa procesu, na rozkłady naprężeń powstających w pionowym żebrze palety. Zaproponowaną metodykę wykorzystano do analiz wpływu różnych rozwiązań konstrukcyjnych palet na kształtowanie się naprężeń cieplnych podczas gwałtownego chłodzenia. W ramach tych badań przeprowadzono analizy wpływu grubości ścianek palety i rozwiązania konstrukcyjnego ich połączenia oraz analizy wpływu usztywnienia zewnętrznego obrysu palety na naprężenia powstające na wybranych kierunkach. Dzięki uzyskanym wynikom stwierdzono, które rodzaje połączeń powinny być stosowane w paletach poddanych gwałtownym zmianom temperatury, a których należy unikać oraz jakie decyzje konstrukcyjne powinny być podejmowane w celu zmniejszenia naprężeń cieplnych powstających na analizowanych kierunkach.

Zaproponowaną metodykę porównawczą zweryfikowano w praktyce dokonując modernizacji konstrukcji kosza wykorzystywanego do transportu wsadu. W wyniku identyfikacji, na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych, mechanizmu odpowiedzialnego za powstawanie zniszczeń (dużych deformacji) kosza, zaproponowano zmianę rozwiązania konstrukcyjnego połączenia jego ścian bocznych z podstawą. Zmiana ta przyniosła zamierzony efekt w postaci istotnego zmniejszenia powstających w cyklu cieplnym deformacji, co w znaczący sposób wydłużyło czas eksploatacji badanej konstrukcji.

Rezultaty uzyskane w ramach zrealizowanej rozprawy doktorskiej znacząco przyczyniają się do zwiększenia wiedzy o wpływie czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na procesy niszczenia osprzętu do transportu wsadu w piecach do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, w tym, w szczególności wytwarzanych ze staliwa austenitycznego odlewów palet. Na podstawie opracowanej metodyki porównawczej i przeprowadzonych przy jej wykorzystaniu numerycznych analiz symulacyjnych można jednoznacznie stwierdzić, czy i poprzez jakie zmiany konstrukcyjne można zredukować naprężenia cieplne powstające w konstrukcjach palet podczas cyklu eksploatacji, a tym samym podwyższyć ich trwałość. Zaproponowana w pracy metodyka porównawcza może być stosowana nie tylko przy projektowaniu palet, ale także przy projektowaniu innych elementów konstrukcyjnych eksploatowanych w warunkach gwałtownych zmian temperatury.

Bajarski Artur

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Bajwoluka zatytułowanej „*Konstrukcyjno-eksploatacyjne czynniki procesu niszczenia odlewów palet stosowanych w piecach do obróbki cieplnej*”.

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

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego, l.dz. WIMiM/723/2021 z dnia 29.12.2021 r.

Informacje wstępne

Rozprawa doktorska przedstawiona do recenzji zawiera 157 stron. Składa się z dwunastu rozdziałów, spisu literatury, streszczeń oraz trzech załączników. Sześć pierwszych rozdziałów (41 stron) ma charakter wprowadzający w zagadnienie, zakończonych wnioskami wynikającymi z przeglądu literatury. Następny rozdział to cele, teza i zakres pracy. W kolejnych sześciu rozdziałach (85 stron), a także w załącznikach, Doktorant przedstawił własne wyniki badań zakończone podsumowaniem, wnioskami i uwagami końcowymi. Spis literatury zawiera 134 pozycje bibliograficzne.

Doktorant badał wpływ eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych czynników na niszczenie elementów oprzyrządowania pieców, głównie odlewów palet do transportu wsadu. Przeanalizował również mechanizmy powstawania oraz rozkłady mikro i makronaprężeń powstających w trakcie cyklu cieplnego w tych elementach.

Recenzowana rozprawa przedstawia **badania o charakterze eksperymentalnym**, dotyczy zagadnień związanych z **inżynierią mechaniczną**, w zakresie badania niezawodności oprzyrządowania stosowanego w technologii obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej.

Problem badawczy teza i cele pracy

Doktorant po przeprowadzeniu wnikliwego przeglądu literatury oraz po wykonaniu badań własnych postawił tezę: „*Możliwe jest wprowadzenie takich zmian konstrukcyjnych palet, które istotnie zmniejszą naprężenia cieplne w czasie każdego cyklu pracy, skutkiem czego będzie znaczące podwyższenie ich trwałości*”.

Aby potwierdzić tak sformułowaną tezę Doktorant postawił sobie kilka celów: **poznanie mechanizmów niszczenia palet stanowiących osprzęt pieców do obróbki**

cieplnej i cieplno-chemicznej, określenie zasad poprawnego projektowania tych palet oraz zaproponowanie metodyki mającej na celu ocenę porównawczą różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Dla realizacji tak postawionych celów Doktorant określił czynniki determinujące procesy niszczenia odlewów palet, opracował modele przepływu ciepła przez konstrukcje palet podczas gwałtownych zmian temperatury, opracował modele obliczeniowe do analizy rozkładów naprężeń cieplnych powstających w konstrukcjach badanych palet w czasie ich gwałtownego chłodzenia i nagrzewania oraz przeprowadził, z wykorzystaniem opracowanych modeli obliczeniowych, ocenę wpływu zmian konstrukcyjnych na zmniejszenie negatywnych skutków tych procesów.

Podjętą tematykę rozprawy uważam za nowatorską i ważną, w aspekcie poznawczym jak i utylitarnym, dlatego wybór jej oceniam pozytywnie.

Wkład Autora

Poniżej przedstawiono wykaz najciekawszych aspektów rozprawy wraz z moimi opiniami na ich temat, które obejmują również komentarze o charakterze krytycznym i polemicznym.

W części wstępnej Doktorant dokonał przejrzystego wprowadzenia do tematyki Rozprawy. Następnie, w oparciu o przegląd literatury, przeprowadził charakterystykę osprzętu pieców do obróbki cieplnej, głównie przeznaczonego do transportu wsadu, opisując warunki jego eksploatacji. W rozdziale 3 opisał niekorzystne zmiany mikrostruktury, w staliwach żarodpornych stosowanych na oprzyrządowanie pieców do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, zachodzące w trakcie eksploatacji. Na podstawie literatury zidentyfikował źródła naprężeń cieplnych w odlwach osprzętu technologicznego pieców do obróbki cieplnej oraz scharakteryzował ich rozkład podczas nagrzewania lub gwałtownego chłodzenia. **Doktorant zauważył, że w modelach wtrąceń i wydzielen przedstawionych w literaturze, obliczenia prowadzono dla pojedynczych wydzielen o niewielkich rozmiarach, podczas gdy w rzeczywistości obserwowane pęknięcia występują w skupiskach węglików o dużej koncentracji. Wykazał również, że w obliczeniach prezentowanych w literaturze, nie uwzględniano warstwy tlenków tworzącej się na powierzchni stopów.** W dalszej części rozprawy Doktorant scharakteryzował naprężenia spowodowane gradientem temperatury tworzące się na przekroju nagrzewanego lub chłodzonego elementu oprzyrządowania. Następnie w rozdziale 5 Doktorant zaprezentował oraz opisał typowe rodzaje zniszczeń jakim ulegają odlewy oprzyrządowania pieców.

Uwaga: Tabela 3.2 na str. 18 jest zbędna ponieważ zawiera tylko jedną dodatkową informację o maksymalnej temperaturze eksploatacji. Dane te mogły być uzupełnione w tabeli 3.1 jako dodatkowa kolumna.

W tej części pracy występuje spora liczba błędów redakcyjnych, których zbiorcza lista znajduje się w dalszej części niniejszej recenzji.

Jako **przedmiot badań** (rozdział 8) Autor przyjął różne rozwiązania konstrukcyjne palet stosowane lub możliwe do zastosowania w osprzęcie pieców do transportu wsadu. Przedstawione analizy dotyczyły zarówno małych wycinków ścianek palety, samych ścianek

i ich połączeń, jak i całych konstrukcji. Doktorant przyjął, że badane palety wykonane są ze staliwa GX40NiCrSiNb38-19, z którego najczęściej wykonywane jest oprzyrządowanie przeznaczone do eksploatacji w piecach do nawęglania.

Uwagi: Przyjęcie jednego rodzaju staliwa stanowiło pewne uproszczenie, biorąc pod uwagę dużą różnorodność stopów stosowanych do budowy oprzyrządowania w praktyce. Właściwości mechaniczne austenitu Doktorant nie zbadał osobiście, a do obliczeń przyjął dane zaczerpnięte głównie z pracy [31].

Ponieważ **wyznaczenie kinetyki przepływu ciepła** (rozdział 9) z wykorzystaniem metod numerycznych MES wymaga znajomości wielu danych wejściowych Doktorant przeprowadził badania doświadczalne zmian temperatury w wybranych punktach tych elementów. W tym celu **Doktorant zbudował autorskie stanowisko badawcze** umożliwiające wielokanałowy pomiar temperatury, wewnątrz badanych próbek, podczas ich nagrzewania w powietrzu oraz chłodzenia w wodzie lub oleju. **Otrzymane krzywe kinetyki chłodzenia i nagrzewania charakteryzowały się dużą powtarzalnością, co świadczy o właściwym doborze przez Doktoranta komponentów stanowiska pomiarowego oraz o poprawnej metodyce pomiarów.** Dlatego krzywe kinetyki chłodzenia i nagrzewania mogły być wykorzystane jako odniesienie dla wyników uzyskanych w opracowanych modelach numerycznych przepływu ciepła. **Doktorant uzyskał dobrą zgodność wyników obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych** w przypadku chłodzenia w oleju, natomiast przebiegi te nie pokrywały się w pełni z wynikami doświadczalnymi przy chłodzeniu w wodzie.

Uwaga: Doktorant wykazuje pewną niekonsekwencję przy analizie zmian temperatury próbki podczas chłodzenia (str. 60, wiersze 1-2) - podał z dużą dozą niepewności: „*można przypuszczać, iż widoczny efekt związany jest najprawdopodobniej z wydzielaniem się węglików chromu $M_{23}C_6$* ”. Natomiast przy analizie wyników badań numerycznych (str. 67, wiersze 19-22) podał, w nawiasie, już bez wątpliwości: „*Podobnie jak dla chłodzenia w oleju, wyniki analiz symulacyjnych nie oddają także zmian temperatury spowodowanych przemianami fazowymi (wydzielaniem się węglików) zachodzącymi w materiale, przy chłodzeniu z 900 °C*”.

W rozdziale dziesiątym Doktorant przeprowadził **analizę mikronaprężeń strukturalnych wywołanych gwałtownymi zmianami temperatury**. Wcześniej w przeglądzie literatury (rozdział 4) scharakteryzował źródła naprężeń cieplnych w odlewach osprzętu technologicznego pieców do obróbki cieplnej. Rozpatrywał problem naprężeń występujących w węglkach i otaczającej je osnowie, związanych z różną rozszerzalnością cieplną tych faz. Przedstawił modele wydzieleń węglików: kulisty całkowicie otoczony austenitem i walcowy dochodzący do powierzchni stopu. Wskazał, że **w węgliku całkowicie otoczonym austenitem powstają w trakcie chłodzenia naprężenia ściskające, natomiast w węgliku dochodzącym do powierzchni stopu w strefach przypowierzchniowych mogą powstawać silne naprężenia rozciągające, których rozkład sprzyja powstawaniu obserwowanych w rzeczywistości lokalnych mikropęknięć.**

Doktorant poprawnie przeprowadził obliczenia naprężeń powstających podczas gwałtownej zmiany temperatury rozpatrując model prostopadłościennego węglika w osnowie

austenitycznej, dochodzącego do powierzchni stopu. **Rozpatrywał również przypadek, zbliżony do warunków występujących w rzeczywistości**, gdy węgliki w warstwie nawęglonej nie wychodzą bezpośrednio na powierzchnię stopu, lecz odizolowane są od niej warstwą tlenków, **co stanowiło nowe autorskie podejście nie opisywane w literaturze**. W tym modelu obliczeniowym, Doktorant wykazał, że naprężenia na powierzchni zmieniły znak z rozciągających na silnie ściskające, co **ograniczać może rozwój pęknięć rozchodzących się od powierzchni**.

Doktorant przeprowadził również podobne analizy mikronaprężeń strukturalnych dla otoczenia kilku węglików oraz dla węglików na granicy ziaren austenitu. W symulacjach tych naprężeń uwzględnił również wpływ wielkości ziaren austenitu. Uważam, że **doktorant trafnie porównał rozkłady uzyskane dla analizowanych wariantów i doszedł do słuszných konkluzji**, że jednoczesne oddziaływanie gradientu temperatury powstającego w chłodzonym odlewie oraz obecność węglików, jest czynnikiem sprzyjającym powstawaniu w trakcie chłodzenia, w strefie nawęglonej, niekorzystnych rozkładów naprężeń umożliwiających zarodkowanie i rozwój mikropeknięć.

Uwagi: Dość oczywistym wydaje się stwierdzenie ze str. 70: „*Otrzymany dla opisanego modelu rozkład naprężeń kierunkowych σ_x wzdłuż osi pionowej węglika przedstawiono na wykresie na rys. 10.2a. Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami przedstawionymi w cytowanych już pracach [31-33]*”. Wyniki te powinny być zgodne z cytowanymi pracami [31-33] ponieważ dane materiałowe zaczerpnięto właśnie z tych prac.

Aby wskazać, czy naprężenia wyliczone w analizach numerycznych badanych układów, osiągają krytyczne wartości dla węglików, dobrze by było nanieść wartość wytrzymałości na rozciąganie/ściskanie tych węglików na wykresach (rys. 10.2, 10.4, 10.5, 10.8, 10.14, 10.15).

W obszernym rozdziale jedenastym Doktorant przeprowadził **analizę makronaprężeń spowodowanych gradientem temperatury** powstającym pomiędzy powierzchnią a rdzeniem, podczas chłodzenia lub nagrzewania elementów konstrukcji oprzyrządowania stosowanego do nawęglania. Z opracowanego wcześniej numerycznego modelu przepływu ciepła w pionowych żebrach palety Doktorant przyjął dane wejściowe w analizach naprężeń cieplnych powstających na przekroju, chłodzonego w oleju lub wodzie zeбра palety. Na podstawie wyników analiz numerycznych Doktorant wykazał, że **naprężenia spowodowane gradientem temperatury powstającym w wyniku gwałtownego chłodzenia na przekroju zeбра palety do transportu wsadu mogą w czasie chłodzenia osiągać wartości przekraczające granicę plastyczności materiału, przyczyniając się do intensyfikacji procesu zmęczenia cieplnego**. Doktorant słusznie wskazał, że na czynniki eksploatacyjne konstruktor oprzyrządowania technologicznego pieców nie ma żadnego wpływu i w praktyce **jedynym czynnikiem konstrukcyjnym mającym realny wpływ na gradient temperatury tworzący się na przekroju zeber pionowych palety jest grubość ścianki palety**.

Na podstawie kolejnych analiz numerycznych Doktorant wykazał, że cieńsza ścianka palety sprzyja mniejszym naprężeniom cieplnym, a tym samym opóźnieniu powstawania i rozwoju pęknięć na skutek postępujących procesów zmęczeniowych. **Doktorant słusznie zauważył ograniczenie, że konstrukcja palety musi jednocześnie zapewnić odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, dlatego możliwość redukcji naprężeń wywoływanych**

gradientem temperatury poprzez zmniejszanie grubości ścianki jest dla konstruktora ograniczona.

W podrozdziale 11.2 Doktorant przeprowadził **nowatorską analizę naprężeń w węzłach cieplnych różnych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń ścianek odlewów palet**, wykorzystując metodykę zastosowaną we wcześniejszych analizach naprężeń na przekroju pojedynczych żeber palety. Doktorant wykazał, że **dzięki zmniejszeniu grubości połączenia zarówno obszar występowania podwyższonych naprężeń w pobliżu środka połączenia, oraz wartość powstających naprężeń uległy zmniejszeniu**. Ponadto wykazał również, że o ile zakres modyfikacji możliwych do wprowadzenia przez konstruktora w celu obniżenia naprężeń w obrębie pojedynczych żeber jest znacznie ograniczony, o tyle **poprzez dobór odpowiednich połączeń można w istotny sposób wpłynąć na zmniejszenie powstających w ich obrębie naprężeń, a tym samym na zwiększenie przewidywanej trwałości danego osprzętu**.

Analizę naprężeń w paletach obciążonych wsadem Doktorant przeprowadził w podrozdziale 11.3. Wykazał, że różna jest szybkość zmian temperatury obszarów obciążonych i nieobciążonych wsadem, co generuje w konstrukcji palety dodatkowe naprężenia cieplne. **Doktorant zauważył zgodność deformacji konstrukcji palet obserwowanych w rzeczywistości z wynikami obliczeń numerycznych i poprawnie wywnioskował z analiz numerycznych, że deformacje te są wypadkową oddziaływania naprężeń termicznych oraz obciążenia wsadem**.

W rozdziale 11.4 Doktorant zajął się wpływem modyfikacji konstrukcji na naprężenia cieplne wywołane obecnością wsadu. Sprawdził, jak modyfikacja konstrukcji palety w postaci zmniejszenia sztywności jej zewnętrznego obrysu może wpłynąć na zmniejszenie naprężeń cieplnych powstających w czasie chłodzenia w żebrach przy narożach palety. **Wyniki wykonanych przez Doktoranta analiz numerycznych wskazują, że poprzez stosowanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz rozmieszczenie ładunku można w istotny sposób wpływać na rozkład naprężeń powstających w konstrukcji palety w czasie jej cyklu cieplnego**.

Uwaga: Uważam za zbyt duże uproszczenie założenie w obliczeniach, że zarówno paleta wykonana ze staliwa stopowego austenitycznego, jak i spoczywający na niej wsad (np. stal stopowa konstrukcyjna) wykonane są z materiału charakteryzującego się takimi samymi właściwościami cieplnymi.

W rozdziale dwunastym, w oparciu o wcześniejsze analizy, Doktorant zaproponował **modernizację konstrukcji kosza do transportu wsadu**. Na wstępie przeprowadził analizy numeryczne rozkładu temperatury oraz powstających naprężeń i deformacji elementów kosza. Dzięki uzyskanej wiedzy na jakim etapie procesu zmiany temperatury powstają najwyższe naprężenia, i jakie są mechanizmy za nie odpowiedzialne, Doktorant zaproponował zmiany konstrukcyjne. **Zmiany konstrukcyjne zweryfikował doświadczalnie, wprowadzając je w koszach eksploatowanych w warunkach przemysłowych uzyskując zadowalającą trwałość 1 roku**.

Uwagi: Dopiero na str. 126, wiersz 8 wspomniano, że „w wyższych temperaturach, kiedy właściwości mechaniczne materiału są obniżone, dochodzi w połączeniach z podstawą do

odkształceń plastycznych". We wcześniejszych analizach nie uwzględniano funkcyjnej zależności właściwości mechanicznych staliwa od temperatury.

Warto wskazać odnośnikami miejsce przecięcia na rys. 12.7b oraz wprowadzone ograniczniki na rys.12.7c. Nie wskazano, na rysunku 12.7b oraz w tekście, pod jakim kątem wykonane zostały przecięcia odcinające w kolumnach ścian bocznych kosza.

W rozdziale **podsumowanie oraz wnioski i uwagi końcowe** znajduje się skrócony opis wyników badań wraz z komentarzem i uwagami, jednakże **zabrakło zwięzłe sformułowanych najważniejszych wniosków końcowych**

Spis literatury obejmuje zestawienie łącznie 134 pozycji, głównie artykułów, materiałów konferencyjnych, książek i norm. **Dobór literatury uważam za właściwy i aktualny.** Część rezultatów przedstawionych w niniejszej rozprawie opublikowana była w publikacjach Doktoranta. Podkreślić należy, że Doktorant ujął w **bibliografii 12 autorskich prac** opublikowanych w latach 2014 – 2019. We wszystkich tych publikacjach Doktorant występuje na pierwszym miejscu. **Siedem z tych prac indeksowanych jest w bazie Web of Science, a 10 w bazie Scopus, z indeksami cytowań $h = 3$.**

Uwagi redakcyjne i inne

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem i z dużą starannością o szatę graficzną. Jednak zwykle w tak obszernym opracowaniu znajdują się jakieś błędy. Również i w tym przypadku pojawiły drobne potknięcia, których wybrane przykłady podano poniżej:

- Nie podano pozycji bibliografii lub informacji, że jest to opracowanie własne Doktoranta, w podpisach rysunków: 3.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7.
- Brak skali odniesienia na rysunkach: 3.6, 5.2, 4.5, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 8.1, 11.29, 11.32, 12.5b, 12.7.
- Strona 11 – brak odwołania w tekście do rys. 2.1 oraz brak przecinka w liście cytowanych publikacji [1, 8, 12, 13].
- Strona 15, wiersze 32-33 – mało precyzyjne, co do wymaganego czasu eksploatacji jest określenie „*zadowalającej użytkowników trwałości*”. Trwałość palet powinna być określona np. sumarycznym czasem eksploatacji lub liczbą cykli do uzyskania katastroficznego ich zużycia.
- Strona 18, wiersz 5 – podawany przedział zawartości węgla powinien być w zakresie $0,3 \div 0,5$ %.
- Strona 23 – mało precyzyjne jest określenie z jakiej głębokości pochodzą obrazy mikrostruktury na rysunku 3.2 a) „*w pobliżu powierzchni*”, b) „*na granicy warstwy nawęglonej i nienawęglonego rdzenia*”.
- Strona 24, rys. 3.4 c – błędnie opisane są węgliki „ M_7C ”, powinno być „ M_7C_3 ”.
- Strona 24, wiersz 1 – zamiast określenia „*stopu*” powinno być bardziej precyzyjne określenie „*staliwa*”.
- Strona 33, rys. 4.2 – powinny być wprowadzone oznaczenia wartości dodatnich „+” i ujemnych „-” dla osi naprężenia.

- Na rys. 5.5 a, b, str. 43 – opisywane odkształcenia warto wskazać odpowiednimi odnośnikami/strzałkami na prezentowanych fotografiach naroży palet.
- Strona 43, wiersz 11 oraz strona 47, wiersz 31 – żargonowo stosowane określenie „*detalami*” powinno być zastąpione „*przedmiotami*”.
- Strona 49, wiersz 12 – podane w tezie pracy słowo „*istotne*” powinno być zastąpione poprzez „*istotnie*”.
- Brak jest wyjaśnienia oznaczeń „*Oz*” (rys. 4.2) oraz „*E_{ai}*” (str. 53) w tekście oraz w wykazie ważniejszych skrótów i oznaczeń.
- W podanych wymiarach próbek (strona 56, wiersz 7), wycinka żebra (strona 80, wiersz 25) prostopadłościennych obszarów wydzielen węglików (strona 80, wiersz 27), żebra pionowego palety (strona 93, wiersz 6), wymiar kosza (strona 93, wiersz ostatni), prostopadłościenny wsad (strona 123, wiersz ostatni) zamiast znaków „x” powinny być znaki mnożenia „×”.
- Strona 59, wiersz 15 – określenie „*chłodzenia olejowego*” lepiej zastąpić „*chłodzenia w oleju*”.
- Strona 60, wiersz 6 – określenie „*chłodzeniu wodnym*” lepiej zastąpić „*chłodzeniu w wodzie*”.
- Strona 70, wiersz 4 – wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej powinna być podana z separatorem dziesiętnym w postaci przecinka.
- Strona 72, wiersze 12-14 oraz podpis rys. 10.3 – w powołaniach na rysunki powinny być skróty „rys.” zamiast „Fig.”
- Strona 94, wiersze 5-6 zdanie: „*Następnie jako obciążenie założono nagłą zmianę temperatur z temperatury wynoszącej 900° C do rozkładu uzyskanego dla danego przypadku po czasie t_{max} .*”. Zdanie wymaga stylistycznej korekty.

Wymienione uwagi, głównie redakcyjne, nie wpływają na obniżenie ogólnie pozytywnej oceny opiniowanej rozprawy doktorskiej.

Głównym wkładem Autora rozprawy jest zbudowanie stanowiska badawczego, przeprowadzenie szeregu interesujących i ważnych eksperymentów, opracowanie numerycznych modeli przepływu ciepła przez ścianki palety w kolejnych etapach nagrzewania i chłodzenia w realizowanym procesie cieplnym, a następnie wykorzystanie tych modeli do obliczeń numerycznych rozkładów temperatury. Uzyskane dane dotyczące zmian temperatury w badanych konstrukcjach Doktorant przyjął za podstawę do analizy naprężeń cieplnych wywołanych gradientem temperatury. Uwzględnił również wpływ zmiany mikrostruktury rozwijającej się od powierzchni materiału w warstwie nawęglonej, jak i wpływ warstwy tlenków narastającej w kolejnych cyklach na powierzchni odlewu na powstawanie mikronaprężeń w warstwie wierzchniej odlewu. Taką metodykę obliczeniową Doktorant wykorzystał do modyfikacji rzeczywistej konstrukcji odlewów, wprowadzonych do eksploatacji w warunkach przemysłowych. Na podstawie przeprowadzonych badań określił czynniki sprzyjające powstawaniu trwałych deformacji i pęknięć palet oraz zaproponował konstrukcyjne możliwości zwiększania ich trwałości.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, Doktorant wykazał, że poprzez uwzględnienie w analizach numerycznych jednoczesnego oddziaływania różnych źródeł naprężeń można zbliżyć warunki prowadzonych analiz symulacyjnych do warunków jakie występują w trakcie chłodzenia lub nagrzewania rzeczywistych obiektów. Opracowanie tych modeli wymagało od Doktoranta dużej wiedzy związanej z technologią obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, opanowania również zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej, jak i modelowania matematycznego. Przedstawiona do oceny rozprawa oraz obszerny dorobek publikacyjny świadczy o wysokim poziomie naukowym Doktoranta i jednocześnie potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Rozprawa cechuje się odpowiednim poziomem merytorycznym, wymagany w tego typu pracach, a Autor wykazał się biegłością w praktycznym stosowaniu złożonej metodyki badawczej z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury oraz oprogramowania do symulacji. Uzyskane wyniki badań własnych są oryginalne, wartościowe poznawczo i mogą mieć również znaczenie aplikacyjne, co zostało również dowiedzione. W mojej opinii przedstawiona praca doktorska zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i formalną.

Na podstawie dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Artura Bajwoluka zatytułowana „*Konstrukcyjno-eksploatacyjne czynniki procesu niszczenia odlewów palet stosowanych w piecach do obróbki cieplnej*” w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym zakresie przepisy (art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki - Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882) i może stanowić podstawę do nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być, zatem dopuszczona do obrony publicznej.

Ponciek

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, T₄₅ oraz T₆₀, 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 odciażających. Zaproponowane przez Doktoranta zmiany konstrukcyjne zostały zweryfikowane doświadczalnie w koszach eksploatowanych 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 σ 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 Bajwoluk 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 Bajwoluka 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.



Dr hab. inż. Marek Szkodo, prof. ucz.

UCHWAŁA NR 102
Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 30 maja 2022 r.

w sprawie nadania mgr. inż. Arturowi Bajwolukowi
stopnia doktora

Na podstawie art. 179 ust. 1 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) w związku z art. 14 ust. 2 pkt 5 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.) uchwala się, co następuje:

§ 1.

Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nadaje mgr. inż. Arturowi Bajwolukowi stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu

Rektor

dr hab. inż. Jacek Wróbel, prof. ZUT