

Prof. dr hab. inż. Jan Taler
Katedra Energetyki
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska
Al. Jana Pawła II 37
31-864 Kraków

Kraków, 22.05.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Mateusza Zielińskiego pt. „Badania własności termofizycznych stali lufowych
oraz symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty wykonanej z tych stali”

Przedmiotem rozprawy są badania własności fizycznych i struktur metalograficznych wybranych stali lufowych. Kandydat opracował również numeryczne modele do symulacji wymiany ciepła w lufie działka kalibru 35 mm oraz przeprowadził symulacje numeryczne przy podziale lufy na 6 lub 30 stref z uwzględnieniem chromowej powłoki ochronnej na wewnętrznej powierzchni lufy.. Praca napisana jest bardzo starannie. Tematyka pracy dotyczy aktualnych zagadnień nieustalonej wymiany ciepła.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa składa się z 6 rozdziałów, spisu tabel oraz spisu rysunków i wykresów. Wykaz literatury cytowanej zawiera 93 pozycje literaturowe. Objętość rozprawy wynosi 145 stron.

W rozdziale pierwszym omówione zostały krótko warunki pracy lufy broni palnej. Zjawisko strzału zachodzi od kilku do kilkudziesięciu milisekund. Maksymalne ciśnienie i temperatura gazów prochowych dochodzą w tym czasie odpowiednio do wartości kilkuset MPa i kilku tysięcy stopni Celsjusza. Przedmiotem rozprawy jest eksperymentalne wyznaczenie własności termofizycznych kilku stali stopowych, z których może być wykonana lufa armaty o kalibrze 35 mm oraz przeprowadzenie numerycznych symulacji wymiany ciepła w lufie armaty. Wyniki badań materiałowych i symulacji numerycznych pomogą zoptymalizować konstrukcję lufy jak i warunki jej eksploatacji. W paragrafie 1.1 przedstawione zostały przesłanki podjęcia tematyki rozprawy. Z analiz wewnętrznej powierzchni lufy wynika, że pod wpływem wysokiej i zmiennej w czasie temperatury wewnętrznej powierzchni lufy zachodzą przemiany strukturalne w stali stanowiącej podłoże dla ochronnej warstwy chromu. Zachodzące przemiany ferrytu w austenit przy nagrzewaniu lufy i powrotna przemiana austenitu w ferryt przy jej ochładzaniu wywołuje zjawisko zmęczenia cieplnego, które jest przyczyną powstawania głębokich pęknięć na wewnętrznej powierzchni lufy i w konsekwencji prowadzi do zniszczenia ochronnej warstwy chromowej. Z dotychczasowych badań przeprowadzonych przez innych autorów wynika, że nowe gatunki stali przeznaczone na lufy broni palnej, w tym na lufę analizowanej armaty, powinny mieć strukturę, w której podczas nagrzewania nie zachodzi przemiana skurczowa ferryt-austenit, a przy ochładzaniu przemiana

rozkurczowa austenit-feryt. Innym alternatywnym rozwiązaniem pozwalającym uniknąć zjawiska zmęczenia cieplnego jest dobór takiej stali na lufę, w której przemiana fazowa ferryt-austenit zachodzi w temperaturze wyższej od maksymalnej temperatury pracy lufy. Do badań własności termofizycznych wytypowane zostały następujące gatunki stali:

- stal stopowa 30HN2MFA; jest to stal tradycyjnie stosowana na lufy, między innymi do wytwarzania luf działek małokalibrowych 23 mm,
- stal 38HMJ (1.8509); jest stal stopowa o europejskim oznaczeniu En-41CrAlMo7-10,
- stal DUPLEX 2205 (1.4462); jest to stal wysokostopowa odporna na korozję stosowana do produkcji luf do broni myśliwskiej, zawartość chromu wynosi ok. 22%, a zawartość niklu ok. 5%,
- stal WCL (1.2342); jest to stal narzędziowa stosowana w budowie elementów silnie obciążonych mechanicznie i cieplnie,
- stal MARAGING 350 (1.6355); jest to stal stosowana w technice lotniczej, raketowej i zbrojeniowej w zakresie temperatury od -200 °C do 600°C.

Cel i układ pracy omówiony został w paragrafie 1.3. Celem dysertacji mgr inż. Mateusza Zielińskiego było:

- wyznaczenie własności cieplnych 5 wybranych gatunków stali, takich jak: współczynnik przewodzenia ciepła k , współczynnik dyfuzyjności cieplnej, $a = k / (c \rho)$, liniowy współczynnik rozszerzalności temperaturowej α^* , wydłużenie względne ε oraz ciepło właściwe c_p ,
- analiza wybranych stali z uwagi na przemianę ferryt-austenit,
- obróbka cieplna oraz badania metalograficzne stali DUPLEX 2205 pod kątem regulowania proporcji ferrytu do austenitu,
- symulacja komputerowa wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm o długości 3150 mm, bez i z cienką warstwą chromu na wewnętrznej powierzchni lufy.

W rozdziale drugim omówione zostały stanowiska laboratoryjne do wyznaczania następujących własności termofizycznych badanych stali: dyfuzyjności cieplnej, współczynnika przewodzenia ciepła, odkształcenia liniowego i współczynnika rozszerzalności temperaturowej oraz ciepła właściwego.

Przedmiotem rozdziału trzeciego są badania własności termofizycznych i struktury metalograficznej wybranych stali lufowych. Wyniki badań własności termofizycznych stali 30HN2MFA, 38HMJ oraz DUPLEX 2205 przedstawione są w paragrafie 3.1. Pomiary dyfuzyjności cieplnej, ciepła właściwego i liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej stali lufowej 30HN2MFA pokazują, że przemiana fazowa ferryt-austenit występuje w tej stali w przedziale temperatury od 743 °C do 751 °C. Przedmiotem paragrafu 3.2 są badania własności termofizycznych oraz struktury metalograficznej stali DUPLEX 2205 o różnym stosunku ferrytu do austenitu. Badania własności termofizycznych stali WCL oraz MARAGING 350 przedstawione są w paragrafie 3.3.

Podsumowanie rozdziału 3 przedstawiające wyniki badań własności 5 wybranych stali stopowych i ważniejsze wnioski sformułowane na podstawie tych badań przedstawione są w paragrafie 3.4.

W drugiej części rozprawy, którą rozpoczyna rozdział 4, przedstawiono symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty. Kandydat opracował prosty model matematyczny do wyznaczania ciśnienia i temperatury gazów w lufie oraz prędkości ich wypływu z lufy z

pominięciem wymiany ciepła między gazami prochowymi i wewnętrzną powierzchnią lufy. Współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni lufy wyznaczony był ze wzoru Dittusa-Boeltera. Nieustalony rozkład temperatury w lufie w funkcji współrzędnej promieniowej i osiowej wyznaczony został za pomocą metody elementów skończonych (MES) przy użyciu komercyjnego programu COMSOL.

Obliczenia rozkładu temperatury przeprowadzono również dla luf z chromową warstwą ochronną na wewnętrznej powierzchni lufy. Symulacje przeprowadzone zostały dla czterech różnych grubości warstwy chromu: 10, 20, 30 i 200 μm . Symulacje komputerowe przewodzenia ciepła w ściance lufy przeprowadzono przy podziale całej długości lufy na 6 lub 30 sektorów. Uwzględniono, że współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość stali 30HN2MFA, 38HMJ, DUPLEX 2205 oraz chromu są zależne od temperatury. W paragrafie 4.3.1 Kandydat szczegółowo omawia wyznaczanie nieustalonego rozkładu temperatury w lufie jednowarstwowej wraz z charakterystyką podziału geometrycznego modelu lufy na elementy skończone. Numeryczne modelowanie przewodzenia ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm przeprowadzono przy użyciu programu COMSOL dla pojedynczego strzału oraz dla sekwencji strzałów. W paragrafie 4.3.2 przeprowadzono podobne obliczenia nieustalonego rozkładu temperatury w lufie armaty dwuwarstwowej, tj. z warstwą ochronną chromu na wewnętrznej powierzchni lufy. Założono idealny kontakt na styku warstwy chromu i stalowej części lufy. Siatka elementów skończonych została zagęszczona w pobliżu wewnętrznej powierzchni lufy oraz na styku warstwy chromu z pozostałą stalową częścią lufy. Grubość elementów skończonych powiększono w kierunku promieniowym od wewnętrznej powierzchni lufy według zadanego ciągu geometrycznego, aby zwiększyć dokładność obliczeń temperatury w pobliżu wewnętrznej powierzchni lufy bez nadmiernego wzrostu czasu obliczeń komputerowych.

Wyniki symulacji komputerowych dla luf armaty kalibru 35 mm dla pojedynczego strzału oraz serii strzałów przedstawiono i omówiono szczegółowo w paragrafie 4.4. Przedstawiono między innymi czasowe przebiegi temperatury wewnętrznej powierzchni lufy oraz temperatury lufy w różnych odległościach od powierzchni wewnętrznej dla pojedynczego strzału oraz serii siedmiu i sześćdziesięciu strzałów.

Stwierdzono, że maksymalna temperatura powierzchni wewnętrznej występuje w lufie ze stali DUPLEX, z uwagi na duży udział składników stopowych zawartych w tej stali. Dla luf ze stali 30HN2MFA lub 38HMJ maksymalna temperatura lufy jest niższa o około 136 $^{\circ}\text{C}$ po dwudziestu pięciu strzałach i o około 52 $^{\circ}\text{C}$ po sześćdziesięciu strzałach w porównaniu z odpowiednimi wartościami dla lufy ze stali DUPLEX.

Posumowanie rozprawy przedstawione jest w rozdziale piątym.

Główne osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie

Wyniki badań własności fizycznych pięciu wybranych stali lufowych: 30HN2MFA, 38HMJ, DUPLEX 2205, WCL i MARAGING 350 oraz przemian fazowych zachodzących w tych stalach podczas obróbki cieplnej mają nie tylko duże znaczenie poznawcze ale również są bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia.

Mgr inż. Mateusz Zieliński wyznaczył procedury obróbki cieplnej stali DUPLEX 2205 zapewniające uzyskanie różnych proporcji ferrytu do austenitu oraz określenie tych proporcji za pomocą programu ImageJ. Ponadto wyznaczył własności termofizyczne stali DUPLEX 2205 w funkcji temperatury przy następujących proporcjach ferrytu do austenitu: 75:25, 63:35 i 44:56 oraz dla próbki w stanie dostawy.

Na wyróżnienie zasługuje przeprowadzone modelowanie matematyczne zmian temperatury i ciśnienia gazów prochowych w lufie oraz wyznaczanie nieustalonego rozkładu temperatury w lufie w czasie pojedynczych oraz seryjnych strzałów. Symulacje numeryczne przeprowadzone zostały w lufie armaty kalibru 35 mm bez warstwy ochronnej na wewnętrznej powierzchni lufy jak i z chromową warstwą ochronną o różnych grubościach.

Uwagi krytyczne

Pomimo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Zielińskiego mam również następujące uwagi krytyczne:

1. Przyjęto, że gazy prochowe (spaliny) są gazem doskonałym. Jest to założenie upraszczające model matematyczny zjawisk zachodzących w lufie armaty. Może ono jednak prowadzić do niedokładności modelu matematycznego rzędu kilkunastu procent. Spowodowane jest to zależnością ciepła właściwych c_p i c_v od temperatury i ciśnienia, gdyż, ciśnienie i temperatura spalin są wysokie.

W przyszłych pracach poświęconych modelowaniu zjawisk przepływowo-ciepłnych w lufie broni palnej można uwzględnić nieustalone równania zachowania pędu i energii dla spalin oraz równanie nieustalonego przewodzenia ciepła w lufie, tj. modelować sprzężoną wymianę ciepła w gazach prochowych i lufie. Nie zachodzi wtedy konieczność zadawania warunku brzegowego trzeciego rodzaju na wewnętrznej powierzchni lufy. Należy się spodziewać, że taki model zapewni lepszą zgodność uzyskanych wyników z danymi doświadczalnymi.

2. Brak porównania wyników symulacji numerycznych z danymi eksperymentalnymi.

3. Do obliczania współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni Kandydat zastosował wzór Dittusa-Boeltera, który wyprowadzony został dla wody przepływającej wewnątrz rur chłodnicy samochodowej. W przyszłych badaniach można zastosować dokładniejsze korelacje do obliczania współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznej powierzchni lufy, np. poniższą korelację

$$Nu = 0,02155 Re^{0,8018} Pr^{0,7095} \quad 3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^6 \quad 0,1 \leq Pr \leq 1,0$$

opublikowaną w następujących artykułach:

D. Taler, J. Taler, Simple heat transfer correlations for turbulent tube flow. E3S Web of Conferences 13, 0200 (2017), DOI: 10.1051/e3sconf/2017130200.

D. Taler, Simple power-type heat transfer correlations for turbulent pipe flow in tubes. Journal of Thermal Science, 26, 339–348 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11630-017-0947-2>.

Powyższe uwagi krytyczne nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy doktorskiej, którą oceniam bardzo wysoko. Mogą one być jednak przydatne przy opracowywaniu publikacji po obronie pracy doktorskiej.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Zielińskiego spełnia z nadmiarem wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Proponuję przyjąć rozprawę do dalszego

procedowania przewidzianego ustawą oraz dopuścić mgr inż. Mateusza Zielińskiego do publicznej obrony swojej pracy doktorskiej.

Proponuję również wyróżnić rozprawę doktorską mgr inż. Mateusza Zielińskiego z uwagi na przeprowadzenie obszernych badań materiałowych i wyznaczenie własności fizycznych pięciu stali lufowych w szerokim zakresie zmian temperatury. Przeprowadzone symulacje komputerowe są bardzo obszerne i symulują poprawnie rzeczywiste warunki pracy lufy działa kalibru 35 mm.

J. Taler