

Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski

Poznań, 22 maja 2023 r.

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Energetyki Ciepłej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Zielińskiego pt.: Badania własności termofizycznych stali lufowych oraz symulacje numeryczne wymiany ciepła w lufie armaty wykonanych z tych stali

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Mateusza Zielińskiego stanowi pismo z dnia 20 marca 2023 r. Prof. dra hab. inż. Jerzego Małachowskiego przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”.

Praca zawarta jest na 145 stronach i jest podzielona na 6 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, a w zakończeniu bibliografią liczącą 93 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy. Promotorem pracy jest **Prof. dr hab. inż. Piotr Koniorczyk**.

1. Uwagi wstępne

Bezpieczeństwo jest nadrzędnym obowiązkiem w każdej sferze działalności. Do zapewnienia bezpieczeństwa służą różne środki a jednymi z nich są środki militarne służące między innymi do obrony. Szczególną rolę pełnią wszelkiego rodzaju lufy pistoletów, karabinów czy armat. W trakcie oddawania strzału zachodzą w lufie procesy cieplne (wzrost temperatury gazów prochowych) i mechaniczne (wzrost ciśnienia w lufie). Obciążenia te zachodzą w ciągu kilku do kilkudziesięciu milisekund. Procesy te mają charakter niezwykle dynamiczny, przeto zbadanie ich wpływu na trwałość lufy jest niezwykle ważnym a zarazem niełatwym zadaniem badawczym. Podstawowym problemem jest dobór właściwej stali na lufy i metody zwiększenia trwałości na wspomniane obciążenia. Pierwszą stalą, która stanowi obiekt badań jest stal 30HN2MFA wykorzystywana do produkcji broni strzeleckiej w Fabryce Broni „Łucznik-Radom”. Lufy z tej stali są zabezpieczone przed korozją (w trakcie składowania) jak również przed negatywnym oddziaływaniem gazów prochowych poprzez galwaniczne nakładanie cienkiej warstwy chromu. W trakcie oddawania strzału następuje w krótkim czasie quasi-skokowe obciążenie cieplno – mechaniczne powierzchni lufy co przy wielokrotnym oddawaniu strzałów powoduje cykliczne zmęczenie podłoża będące wynikiem zmian objętościowych związanych z przejściem fazowym podłoża. Negatywnym skutkiem tej zmiany strukturalnej jest obniżenie prędkości wylotowej pocisków. Zachodzenie zmian objętościowych w podłożu wynika z faktu, że dla stali 30HN2MFA zmiana strukturalna zachodzi poniżej temperatury nagrzewania się powierzchni lufy. Na zjawisko zmiany

strukturalnej wpływa też duża wartość ciśnienia co w efekcie powoduje pękanie i wykruszanie się warstwy chromu (w lufach dwuwarstwowych) . Zatem jednym ze sposobów podwyższenia trwałości luf jest zastosowanie stali 30HN2MFA, stali posiadającej wysoką temperaturę zmiany strukturalnej (przejście ferrytu w austenit) a najlepiej stali w której nie zachodzi zmiana strukturalne.

Obliczenia wytrzymałościowe luf dla wybranej stali o wspomnianych własnościach eksploatacyjnych wymagają znajomości właściwości cieplnych (współczynnik przewodzenia ciepła lub współczynnik dyfuzji , ciepło właściwe, gęstość) i mechanicznych (moduł Younga, granica sprężystości, granica plastyczności) w funkcji temperatury. Nieliniowe własności cieplno – mechaniczne prowadzą do nieliniowych równań różniczkowych których rozwiązanie wymaga zastosowania metod komputerowych. Opanowanie tych metod wymaga kompleksowej wiedzy Doktoranta co jest widoczne w dalszej części pracy.

Podstawę do wyznaczenia kierunku badań stanowią badania broni strzeleckiej przeprowadzone przez zespół pracowników WAT (pod kierunkiem dra inż. Dębskiego) wspólnie z zespołem Fabryki Broni „Łucznik-Radom”. Wyniki badań przedstawione na rys. 1.1-1.4 pozwoliły zrozumieć proces powstawania pęknięć w warstwie stali jak również w cienkiej warstwie ochronnej jaką stanowił chrom. Zniszczenie warstwy chromu jest efektem pęknięć w podłożu stalowym. Pęknięcia w warstwie stalowej są efektem skokowej zmiany objętości przy przejściu ferrytu w austenit i procesie odwrotnym przy chłodzeniu lufy. Ponadto oddziaływanie wysokiego ciśnienia powoduje przesunięcie przemiany ferryt-austenit do niższej temperatury. Sprężenie tych dwóch pól przyczynia się do powstawania głębszych pęknięć. Zatem w celu zwiększenia trwałości lufy należy zastosować stale w których nie zachodzą przemiany typu skurczowego ferryt-austenit lub też stale o podwyższonej temperaturze przemiany ferryt-austenit. Stanowi to podstawę do zbadania własności termofizycznych stali niezbędnych do badania obciążeń mechanicznych i wymiany ciepła. Badanie procesów wymiany ciepła w lufie wymaga opracowania wspomnianych charakterystyk termofizycznych stali, opracowania modelu wymiany ciepła w lufie z uwzględnieniem również chromowej warstwy ochronnej, której różne grubości wpływają na proces pękania podłoża a przez to skrócenie czasu użytkowania.

2. Omówienie pracy

Przedstawione w części poprzedniej zjawiska zachodzące w lufie w procesie strzelania i przesłanki do podjęcia badań w kierunku zwiększenia trwałości lufy, stanowią podstawę do wyboru grupy stali o różnym składzie chemicznym co wpływa na własności eksploatacyjne luf. Doktorant w punkcie 1.2 szczegółowo omówił własności wybranych stali spełniających różnicowane wymagania eksploatacyjne. Do dalszych badań Doktorant wybrał 5 stali: 30HN2MFA, 38HMJ, DUPLEX 2205, WCL, MARANGING 350. Dla tych stali Doktorant dokonał pomiarów własności termofizycznych.

Zatem celem dysertacji było wyznaczenie (dla powyższych stali) w funkcji temperatury, w przedziale od temperatury otoczenia do 1100⁰C, współczynników:

- przewodności cieplnej,
- dyfuzji cieplnej (współczynnika wyrównania temperatury),
- ciepła właściwego,
- wydłużenia cieplnego i względnego.

Jedną z przyczyn pęknięcia stali lufy jest przemiana ferrytyczno-austenityczna, przeto następnymi celami badań było:

- przeanalizowanie wybranych stali pod kątem przemiany ferryt-austenit,
- wpływ obróbki cieplnej stali DUPLEX 2205 pod kątem regulowania stosunku ferrytu do austenitu na podstawie badań metalograficznych.

Następnym celem dysertacji było wykonanie symulacji numerycznych wymiany ciepła w lufie armaty kalibru 35 mm i długości 3150 mm w dwóch wariantach (i ich porównaniu)

- bez pokrycia wewnętrznej powierzchni lufy warstwą chromu,
- z pokryciem wewnętrznej powierzchni lufy warstwą chromu o różnej grubości.

Przeprowadzenie przedstawionego programu badań wymaga użycia aparatury specjalistycznej, którą Doktorant szczegółowo opisuje w punkcie 2. Rozdział 3 poświęcony jest badaniom charakterystyk termofizycznych różnych stali.

Przebieg Dyfuzyjności cieplnej $a(T)$ Doktorant określił w zakresie temperatury $<0,1000^{\circ}\text{C}>$ dla stali 30HN2MFA, 38HMJ, DUPLEX za pomocą dyfuzometrów LFA 467 i LFA 427 zwracając uwagę na niewielkie różnice wartości w okolicach 500°C . W otoczeniu temperatury 741°C występuje minimum związane z przemianą fazową ferrytyczno-austenityczną charakterystyczną dla stali 30HN2MFA i 38HMJ.

Następnym ważnym współczynnikiem jest przewodność cieplna stali 38HMJ i 30HN2MFA jak również stali DUPLEX (nie wykazującej zmiany strukturalnej ferrytyczno - austenitycznej). Przebiegi przewodności cieplnej uzyskano ze znajomości przebiegu współczynnika dyfuzyjności, ciepła właściwego i gęstości. Badanie przebiegu rozszerzalności cieplnej stanowi domknięcie badań przebiegu współczynników termofizycznych niezbędnych do wyznaczenia rozkładu temperatury i analizy stanu naprężenia w lufie. Przeprowadzone badania wykazują piki w obszarze zmiany strukturalnej zachodzącej w okolicy temperatury 741°C (z wyjątkiem stali DUPLEX). Interesujący jest przypadek przebiegu pozornego ciepła właściwego dla stali 38HMJ charakteryzujący się 2 pikami w punktach 758°C i 809°C . Zdaniem Autora wymaga to dalszych badań, gdyż badania dyfuzyjności cieplnej wykazują pik dla temperatury 741°C .

Ważną częścią badań było określenie własności termofizycznych stali DUPLEX 2205 dla różnych proporcji ferrytu do austenitu. Osobny punkt stanowi szerokie badanie własności termofizycznych stali WCL i MARAGING 350.

*Jaki pisze Doktorant na str.64 o powiązaniu dyfuzyjności cieplnej ze współczynnikiem przewodzenia ciepła, ciepłem właściwym i gęstością, to nasuwa się pytanie skoro te wielkości można określić oddzielnie, to wiarygodność ich wyznaczenia stanowi miara $\delta=|a-k/(\rho*c_p)|$, której wartość powinna być mała. Wyznaczając współczynnik przewodzenia ciepła z wartości dyfuzyjności miara ta $\delta=0$. Jaki zatem wpływ na pola temperatury w lufie mają wartości $\delta>0$?*

Symulacje numeryczne będące treścią punktu 4 zostały poprzedzone szerokimi badaniami własności termofizycznych stali lufowych, których przebiegi są niezbędne dla określenia rozkładów temperatury w lufie. Wyznaczenie rozkładów temperatury w lufie w trakcie strzelań pojedynczymi pociskami jak również ich seriami jest podstawowym elementem do wyznaczenia trwałości lufy. Erozja powierzchni wewnętrznej lufy jest skutkiem oddziaływania zmiennego obciążenia termicznego i mechanicznego pochodzącego od ciśnienia gazów prochowych jak również chemicznego pochodzącego od gazów prochowych. Wielość czynników wpływających negatywnie na trwałość lufy wymaga znajomości mechanizmów procesów cieplnych, mechanicznych i chemicznych. Podstawową rolę

odgrywa tutaj wybór stali lufowej dla której przejście fazowe ferryt-austenit zachodzi w wyższych temperatury (powoduje to unikanie zmiany objętości ferrytu i dalej skurczy stali) lub też wybór stali dla których nie zachodzi przejście fazowe ferryt-austenit.

Przesłanki omówione w punkcie 1.1, rys. 1.1-1.4 wskazują na potrzebę przeprowadzenia obliczeń rozkładu pola temperatury w lufie bez uwzględnienia warstwy ochronnej chromu jak również ze zmienną grubością warstwy chromu. Do rozwiązania równania przewodnictwa ciepła niezbędne są warunki brzegowe na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej lufy jak również warunek początkowy. Przyjęcie warunku brzegowego III rodzaju pozwala na wykorzystanie wzoru korelacyjnego na liczbę podobieństwa Nusselta dla w pełni rozwiniętego przepływu turbulentnego co wynika z szybkości poruszających się gazów prochowych w lufie (założono liniową prędkość poruszających się gazów). Wyznaczenie gęstości, temperatury i prędkości poruszających się gazów prochowych uzyskano z rozwiązania głównego problemu balistyki wewnętrznej.

Określenie warunków brzegowych i początkowego pozwoliło Doktorantowi rozwiązać nieliniowe niestacjonarne równanie przewodnictwa ciepła (4.26) - zagadnienie jednowarstwowe i (4.31) – zagadnienie z warstwą chromu i z warunkami brzegowymi III rodzaju. Ze względu na geometrię obszaru równania te rozwiązano w układzie (r,z,t) . Uwzględnienie nieliniowości współczynników $\lambda(T), \rho(T), c_p(T)$ wymaga stosowania metod iteracyjnych. Wielkie obciążenia cieplne powierzchni wewnętrznej lufy wymagają siatki zagęszczonej w otoczeniu jej powierzchni. Autor korzysta z komercyjnego oprogramowania dla metody elementu skończonego.

Doktorant wyznaczył rozkłady temperatury w lufie wykonanej z różnych stali dla podziału lufy na 6 i 30 stref dla jednego strzału i serii strzałów. Istotą obliczeń symulacyjnych było poznanie wpływu zmiennej temperatury powierzchni wewnętrznej na jej przebieg w funkcji grubości i długości lufy co pozwala na wybór stali w której temperatura nie powoduje zachodzenia przemian ferrytyczno-austenitycznej powodujących skurcz materiału(nie zachodzi ona dla stali MULTIPLEX i MARAGING) . Doktorant szczegółowo przedstawił przebiegi temperatury na powierzchni wewnętrznej lufy w kolejnych przedziałach w kierunku osi z jak również po grubości w funkcji promienia r lufy w kolejnych chwilach czasu. Obliczenia w zakresie temperatury powyżej 1000°C przeprowadzono wyznaczając wartości współczynników $\lambda(T), \rho(T), c_p(T)$ z ekstrapolacji liniowej. Bardzo ważnym elementem symulacji numerycznych są obliczenia rozkładu temperatury w lufie z uwzględnieniem zmiennej grubości warstwy chromu 10,20,30 i 200 μm . Współczynnik przewodzenia ciepła chromu jest około 3 razy większy niż dla stali lufowych co przy dłuższej serii strzałów może spowodować przekroczenie temperatury przemiany fazowej co w dalszej kolejności prowadzi do szybszego zużycia lufy. Obliczenia te Doktorant wykonał dla stali 30HN2MFA.

Symulacje Doktorant uzupełnia obliczeniami ze stałymi wartościami λ, ρ, c_p co dowodzi, że uwzględnienie nieliniowości tych współczynników jest podstawowym warunkiem poprawności obliczeń pod względem fizycznym.

4. Uwagi (sugestie)

Przedstawiona praca ma duży potencjał rozwojowy i posiada impulsy do dalszego rozwijania badań jak na przykład rozwiązanie analityczne zadania liniowego dla równania hiperbolicznego przewodzenia ciepła, gdyż krótkotrwałe oddziaływanie impulsu ciepła może zmienić pole temperatury w pierwszych chwilach czasu. Rozwiązanie analityczne ponadto pozwoliło by na wyznaczenie optymalnego podziału siatki w kierunku promienia. Badania Doktoranta wskazują też na potrzebę rozwiązania zagadnienia odwrotnego, które pozwoliłoby na wyznaczenie obciążenia cieplnego

powierzchni wewnętrznej lufy i porównanie z obciążeniem cieplnym wynikającym z rozwiązania wewnętrznego zagadnienia balistyki.

Dalszym problemem do badania byłoby sprawdzenie wrażliwości rozwiązania równania przewodnictwa ciepła na błędy określenia współczynników $\lambda(T)$, $\rho(T)$, $c_p(T)$. Sugestia ta wynika z faktu stosowania wzorów korelacyjnych do określenia współczynników termofizycznych na podstawie punktowej ich wartości. Czy nie prościej byłoby stosować interpolację pomiędzy punktami pomiarowymi? Innymi słowy jaka jest różnica wartości pomiarowych od wartości uzyskanej ze wzorów korelacyjnych? Stanowi to po części odpowiedź na wrażliwość rozwiązania równania przewodnictwa ciepła.

5. Podsumowanie

Doktorant mgr inż. Mateusz Zieliński w trakcie wykonywania swej pracy doktorskiej w pełni zrealizował założone cele którymi było

- wyznaczenie nieliniowych charakterystyk wybranych stali lufowych,
- poznanie przyczyn pękania w stalach w funkcji przemiany ferrytyczno-austenitycznej,
- wykonanie symulacji numerycznych rozkładu temperatury w lufie jednowarstwowej i dwuwarstwowej przy różnych grubościach warstwy chromu.

Ponadto Doktorant przeprowadził obróbkę cieplną próbek ze stali DUPLEX 2205 celem uzyskania różnych proporcji ferrytu do austenitu z wykonaniem pomiarów własności termofizycznych dla różnych proporcji ferrytu do austenitu.

Realizacja każdego z tych celów wymagała dużej wiedzy Doktoranta i olbrzymiej pracy doświadczalnej i numerycznej. Wyniki badań Doktoranta świadczą o Jego umiejętnościach do prowadzenia badań na najwyższym poziomie naukowym z wykorzystaniem najnowszej aparatury naukowej i nowoczesnych metod komputerowych mechaniki i termodynamiki.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Zielińskiego **z nadmiarem** spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” WAT o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Zielińskiego do publicznej obrony recenzowanej pracy.

Wyniki badań Doktoranta znajdują bezpośrednie zastosowanie w praktyce, gdyż w przekonaniu recenzenta stanowią kompendium wiedzy z zakresu termicznego badania stali lufowych i ich użytkowania. Poziom przeprowadzonych badań uważam za wyróżniający się, przeto wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Zielińskiego.

Mieczysław Zieliński