



ANALIZA WPLYWU NAGRZEWANIA SIĘ PENETRATORA POCISKU PODKALIBROWEGO NA JEGO WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Mariusz MAGIER, Tomasz MERDA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu nagrzewania się penetratora pocisku podkalibrowego na torze lotu i wpływ tego procesu na własności wytrzymałościowe spieku na osnowie wolframowej, z którego jest wykonany penetrator. Wyniki obliczeń przedstawiają w części teoretycznej przybliżone (ze względu na ograniczoną dokładność zastosowanego oprogramowania) rozkłady temperatur w poszczególnych elementach i obszarach penetratora pocisku podkalibrowego. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki badań dynamicznych próbek spieku na osnowie wolframowej, wykonanych na zmodyfikowanym pręcie Hopkinsona dla temperatur 20°C, 150°C i 300°C.

Słowa kluczowe: mechanika, balistyka, pocisk podkalibrowy

ANALYSIS OF HEATING UP SUBCALIBRE PROJECTILE PENETRATOR AND ITS STRENGTH PROPERTIES

Mariusz MAGIER, Tomasz MERDA
Military Institute of Armament Technology

Abstract: The paper presents some results of numerical analysis of heating process which kinetic penetrator is subjected on its flying path with the influence of this process on strength properties of a sintered tungsten alloy. In the theoretical part the distributions of approximate temperatures (because of a limited accuracy of used computer code) in particular elements and areas of the penetrator are presented. In the experimental part there are presented some results of dynamic tests of specimens of the tungsten alloy carried out on the modified Hopkinson's split bar for temperatures of 20°C, 150°C and 300°C.

Keywords: mechanics, ballistic, subcalibre projectile

1. Wprowadzenie

Od kilkunastu lat prowadzone są w świecie intensywne prace nad zwiększaniem zdolności przebicia pancerza przez pociski podkalibrowe. Głębokość penetracji pociskami kinetycznymi zależy przede wszystkim od: dynamicznych twardości H_p i gęstości ρ_p materiału pocisku oraz dynamicznych twardości H_t i gęstości ρ_t materiału pancerza, jednostkowej masy pocisku odniesionej do pola maksymalnego jego przekroju poprzecznego $\rho_p L$ (L - długość penetratora) oraz prędkości uderzenia V_p [1].

Istotny wpływ na głębokość penetracji pancerza może mieć także przebieg procesu nagrzewania się penetratora na torze lotu (i jego wpływu na własności wytrzymałościowe), szczególnie na początkowy okres wnikania pocisku w pancerz, formowanie się krateru i zachodzenie zjawiska tzw. „grzybkowania”. Celem wstępnej analizy powyższego zjawiska przeprowadzono symulacje numeryczne i badania własności wytrzymałościowych spieku na osnowie wolframowej przedstawione w niniejszej pracy.

2. Charakterystyka modelu obliczeniowego nagrzewania się penetratora na torze lotu

Na podstawie wniosków i doświadczeń wynikających z obliczeń wykonanych w pracy [2] dokonano modyfikacji siatki (zagęszczenie siatki w wybranych obszarach badanego obiektu), udokładniono dane materiałowe (na podstawie dodatkowych wyników uzyskanych podczas realizacji pracy [3]) oraz zmniejszono krok czasowy obliczeń. W celu wykonania obliczeń wykorzystano program ANSYS Fluent v14,5, który umożliwia wykonywanie obliczeń dotyczących zagadnień mechaniki płynów (CFD), przenikania ciepła oraz nagrzewania się ciał stałych. Program Fluent wykorzystuje metodę objętości skończonych (MOS). Do obliczeń wykorzystano siatkę obliczeniową wykonaną przez autorów oraz dane pobrane z opracowanej w WITU dokumentacji technicznej na pocisk podkalibrowy typu APFSDS-T do 120 mm armaty czołgu LEOPARD 2A4 [4]. Jako prędkość początkową przyjęto rzeczywistą wartość $v_0=1650$ m/s. W modelu uwzględniono spadek prędkości penetratora na torze lotu wraz z czasem przyjętym na podstawie badań poligonowych. Jako czas lotu przyjęto 1,25 s, który odpowiada pokonaniu przez penetrator drogi 2000 m. Jako temperaturę początkową procesu obliczeniowego przyjęto wartość 15°C . Ze względu na mniejszą niż w przypadku programów specjalistycznych (opartych na metodzie MRS) dokładność obliczeń zastosowanego oprogramowania komercyjnego ANSYS Fluent v14,5, uzyskane wyniki obliczeń należy traktować z dużym przybliżeniem.

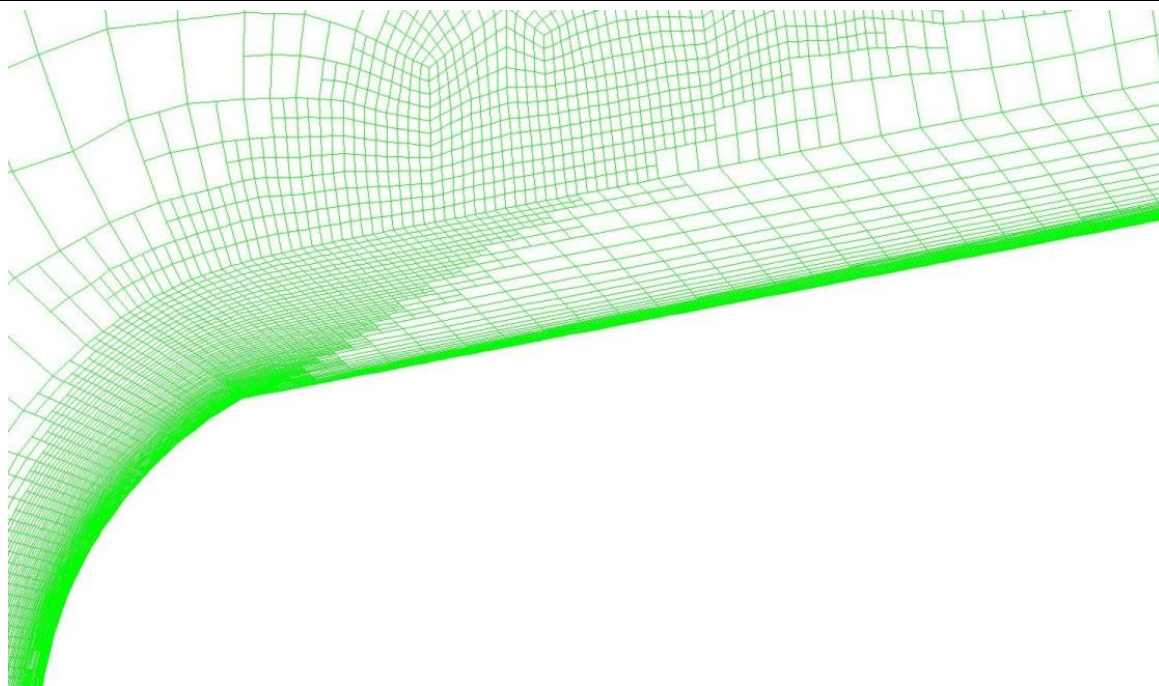
2.1. Siatka obliczeniowa

Ogólną konstrukcję penetratora przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Konstrukcja penetratora pocisku podkalibrowego przyjęta do modelowania

W celu ograniczenia liczby elementów w siatce obliczeniowej zastosowano model osiowosymetryczny. Dlatego też w modelowaniu pominięto skrzydełka stabilizatora w bryle penetratora. Do obliczeń wykorzystano czworokątną siatkę obliczeniową, aby zmniejszyć liczbę elementów skończonych. Jednocześnie pozwoliło to zagęścić w odpowiednich rejonach siatkę obliczeniową bez nadmiernego wydłużenia czasu obliczeń. Aby spełnić wymagania przyjętego modelu zastosowano w warstwie przyściennej obszaru powietrza pierwszy element o grubości 0,0002 mm. Jednocześnie znacznie zwiększono ogólną grubość warstwy przyściennej względem modelu przyjętego w pracy [2], w celu poprawy modelowania lepkości w strefie przejścia do obiektów właściwych. Zastosowano również warstwę przyścienną wewnątrz penetratora. Kształt warstwy przyściennej na wierzchołku penetratora przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Siatka obliczeniowa obejmująca warstwę przyścienną obszaru powietrza na wierzchołku penetratora

Wielkość liniowa elementów na powierzchni penetratora mieściła się w przedziale $0,3 \div 0,7$ mm. W trakcie procesu obliczeniowego dokonywano kolejnego zagęszczenia siatki w miejscach występowania dużych gradientów ciśnienia i temperatury, w szczególności w miejscu występowania fal uderzeniowych. Strefa zagęszczenia w miejscu występowania fali uderzeniowej na wierzchołku penetratora jest uwidoczniła na rysunku 2. Po zagęszczeniu siatka obliczeniowa składała się z 223500 elementów.

2.2. Model matematyczny i fizyczny

Do obliczeń zastosowano model oparty na gęstości typu jawnego, uwzględniający ściślność z równania gazu doskonałego i lepkość gazu. Jako model lepkości wybrano $k-\omega$ SST (*standard*). Jest to model Mentera typu RANS (uśredniający liczbę Reynoldsa w równaniach Naviera-Stokesa) opierający się na energii kinetycznej turbulencji (k) i charakterystycznym współczynniku dyssypacji (ω) z funkcją mieszania równań w funkcji odległości od ściany. Mieszanie pozwala na płynne przejście ze zmodyfikowanego modelu $k-\omega$ Wilcoxa przy ścianie do standardowego modelu $k-\varepsilon$ daleko od ściany. Jego stosowanie jest szczególnie zalecane podczas analizy procesów z wymianą ciepła. Model ten, w celu odpowiedniego odwzorowywania, wymaga przyjęcia parametru $y^+ < 2$. Parametr y^+ jest bezwymiarową odległości od ściany w funkcji określonych parametrów przepływu. Po wykonaniu obliczeń w całej siatce obliczeniowej otrzymano parametr $y^+ < 0,5$. Parametry powietrza przyjęto zgodnie z standardem NAA (*Normal Artillery Atmosphere* – normalna atmosfera artyleryjska).

Układ równań wyrażający model turbulencji Mentera BSL (*baseline*) $k-\omega$, w tym i $k-\omega$ SST (wg. Fluent Theory Guide), ma następującą postać [5, 6]:

– równanie przenoszenia energii kinetycznej turbulencji:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (1)$$

– równanie przenoszenia dyssypacji energii turbulencji:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (2)$$

gdzie:

t – czas,

ρ – gęstość,

k – energia kinetyczna turbulencji,

ω – charakterystyczny współczynnik dyssypacji,

x – współrzędna przestrzenna,

u – prędkość,

Γ_k, Γ_ω – człony dyfuzji energii kinetycznej i współczynnika dyssypacji,

G_k – człon wytwarzania energii kinetycznej turbulencji,

G_ω – człon wzrostu współczynnika dyssypacji,

Y_k, Y_ω – człony rozpraszania energii kinetycznej i współczynnika turbulencji,

D_ω – człon dyfuzji wzajemnej między modelami k- ϵ i k- ω

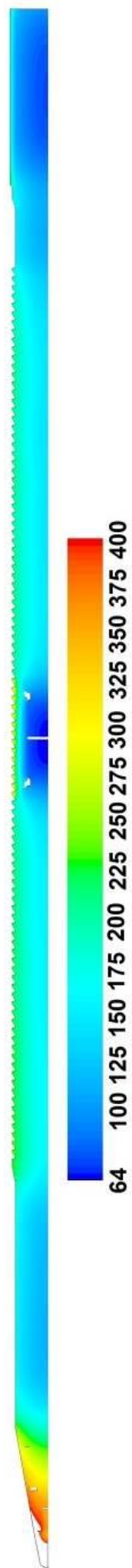
W modelu uwzględniono właściwości fizyczne materiałów, z których wykonano elementy penetratora pocisku. W przypadku spieku wolframowego własności te były oszacowane na podstawie składu procentowego spieku (91,23% W, 7% Fe, 1,75 Ni) oraz jego gęstości

17,3 g/cm³. Wartości przyjęte w modelu zostały umieszczone w tabeli 1. Dane uzyskano na podstawie informacji dostarczonych przez producentów n/w stopów i spieków – zostały one wyznaczone dla wartości temperatury otoczenia (około 20°C) i ciśnienia atmosferycznego (około 1000 hPa).

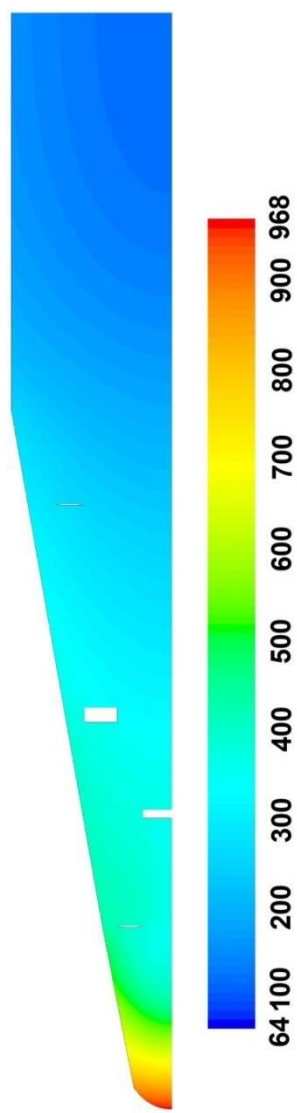
Tabela 1.

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Przewodność cieplna [W/(m·K)]
Spiek wolframu	17300	147	156
Stal 36crnimo4	7700	460	25
Stop PA-6	2810	862	134

Obliczenia wykonano z krokiem czasowym 0,001s.



Rys. 3. Rozkład temperatury w penetratorze pocisku podkalibrowego po 1,25s lotu



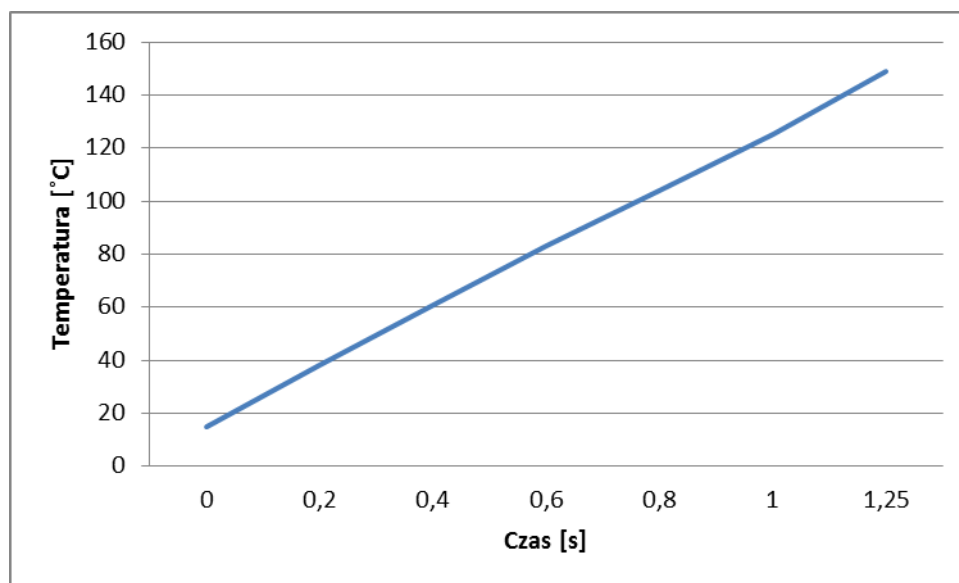
Rys. 4. Rozkład temperatury na wierzchołku penetratora

3. Wyniki symulacji numerycznych

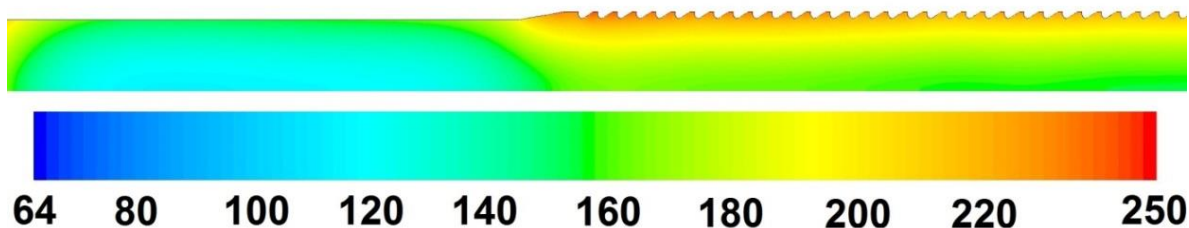
Przeprowadzone obliczenia wykazały znaczne różnice w procesie nagrzewania się penetratora pocisku podkalibrowego na torze lotu. Różnice te spowodowane są zmianami kształtu i zastosowaniem materiałów o różnych właściwościach fizycznych w poszczególnych elementach penetratora. Zobrazowany rozkład temperatury wewnątrz penetratora jest przedstawiony na rysunku 3. W celu uzyskania większej czytelności na rysunku 3 przedstawiono rozkład temperatur do wartości 400°C .

Wierzchołek penetratora nagrzewał się intensywniej od walcowej i bruzdowanej części penetratora. Jest to spowodowane silnym sprężaniem opływającego powietrza na wierzchołku. Rozkład temperatury na wierzchołku został przedstawiony na rysunku 4. Nierównomierności nagrzewania są spowodowane zastosowaniem stali, duralu i spieku na osnowie wolframowej w wierzchołku penetratora.

W procesie penetracji pancerza o głębokości przebicia decydują parametry wytrzymałościowe spieku na osnowie wolframowej. Zmiana średniej ważonej temperatury rdzeni penetratora w funkcji czasu została przedstawiona na rys. 5. Najwyższa temperatura, którą osiągnęły elementy wolframowe podczas symulacji nagrzewania się penetratora na torze lotu wyniosła około 400°C , a najniższa około 60°C . Zobrazowanie rozkładu temperatury na części walcowej i bruzdowanej penetratora przedstawione jest na rysunku 6. Wyniki wskazują, że część bruzdowana nagrzewa się znacznie silniej niż część walcowa.

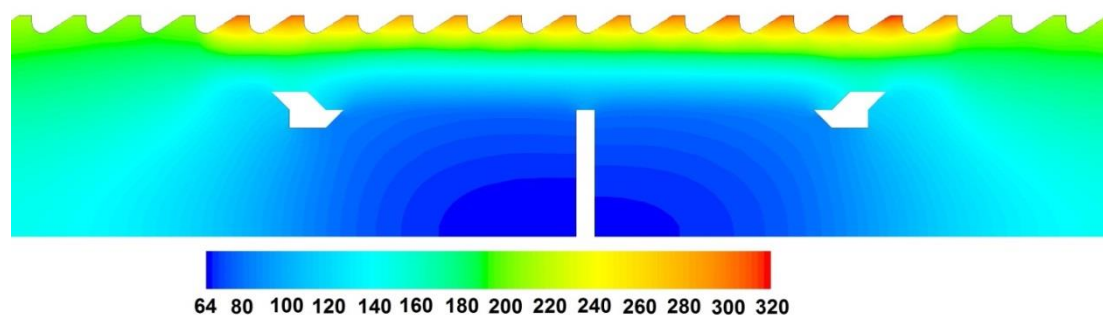


Rys. 5. Zmiana temperatury rdzeni penetratora w funkcji czasu



Rys. 6. Rozkład temperatury na części walcowej i bruzdowanej penetratora

W miejscu łączenia segmentów penetratora występuje strefa obniżonej temperatury. Jest to spowodowane tym, że tuleja łącząca pręty penetratora jest wykonana ze stali, która ma niższą przewodność cieplną względem pozostałych materiałów. Spowodowało to zmniejszenie wnikania ciepła do prętów w miejscu łączenia. Podwyższona temperatura na powierzchni tulejki jest spowodowana ograniczonym odprowadzaniem ciepła w głąb materiału. Zobrazowanie rozkładu temperatury w miejscu łączenia przedstawione jest na rysunku 7.



Rys. 7. Rozkład temperatury w miejscu łączenia prętów penetratora

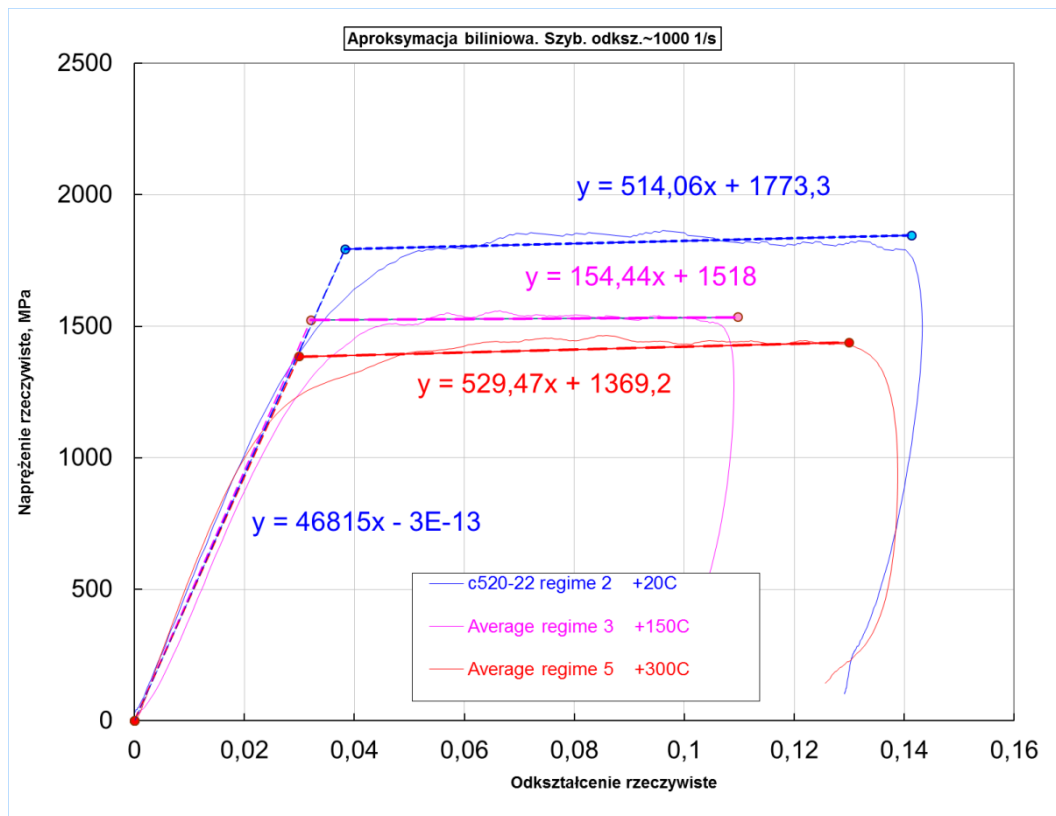
4. Analiza parametrów dynamicznych spieku na osnowie wolframowej badanego w temperaturach 20°C, 150°C i 300°C dla dużych szybkości odkształceń

Próbki walcowe badanego spieku na osnowie wolframowej poddano jednoosiowemu ścisnaniu w temperaturach 20°C, 150°C i 300°C w warunkach obciążenia dynamicznego. Badania dynamiczne w zakresie szybkości odkształcenia $\sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ÷ $\sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ wykonano metodą zmodyfikowanego (dzielonego) pręta Hopkinsona. Na podstawie otrzymanych wyników eksperymentów przeprowadzono modelowanie zachowania się badanego materiału z uwzględnieniem efektów lepkoplastycznych. Szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [3].

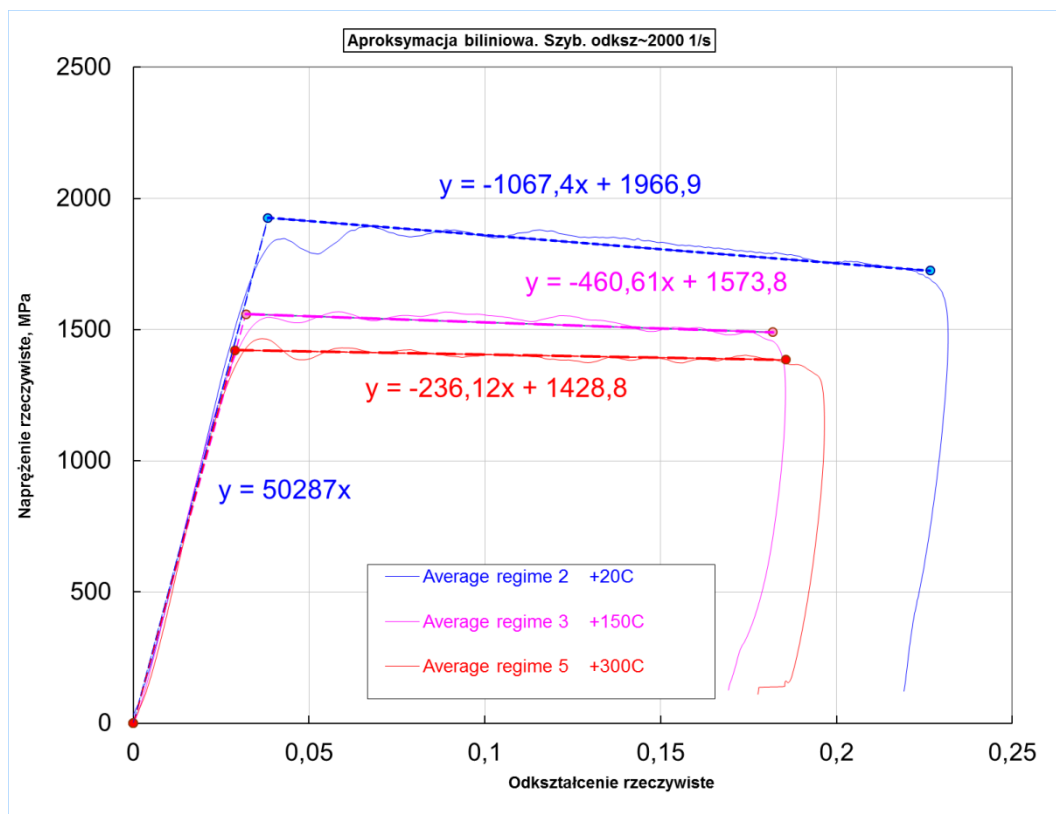
Na rysunkach: 8, 9, 10, 11 zaprezentowano graficzne zestawienie wyników biliniowej aproksymacji krzywych naprężenie-odkształcenie w zależności od szybkości odkształceń próbek badanego spieku, celem wyznaczenia ekstrapolowanych wartości granicy plastyczności w funkcji szybkości odkształceń i temperatury badanych próbek.

Dla obciążeń dynamicznych badanego w temperaturze 150°C spieku w zakresie szybkości odkształceń $\sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed1} wynosi 1574 MPa, a dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed2} wynosi około 1740 MPa, zaś dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed3} wynosi 1829 MPa. Dla obciążeń dynamicznych badanego w temperaturze 300°C spieku w zakresie szybkości odkształceń $\sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed1} wynosi 1429 MPa, a dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed2} wynosi około 1460 MPa, zaś dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ekstrapolowana granica plastyczności R_{ed3} wynosi 1713 MPa.

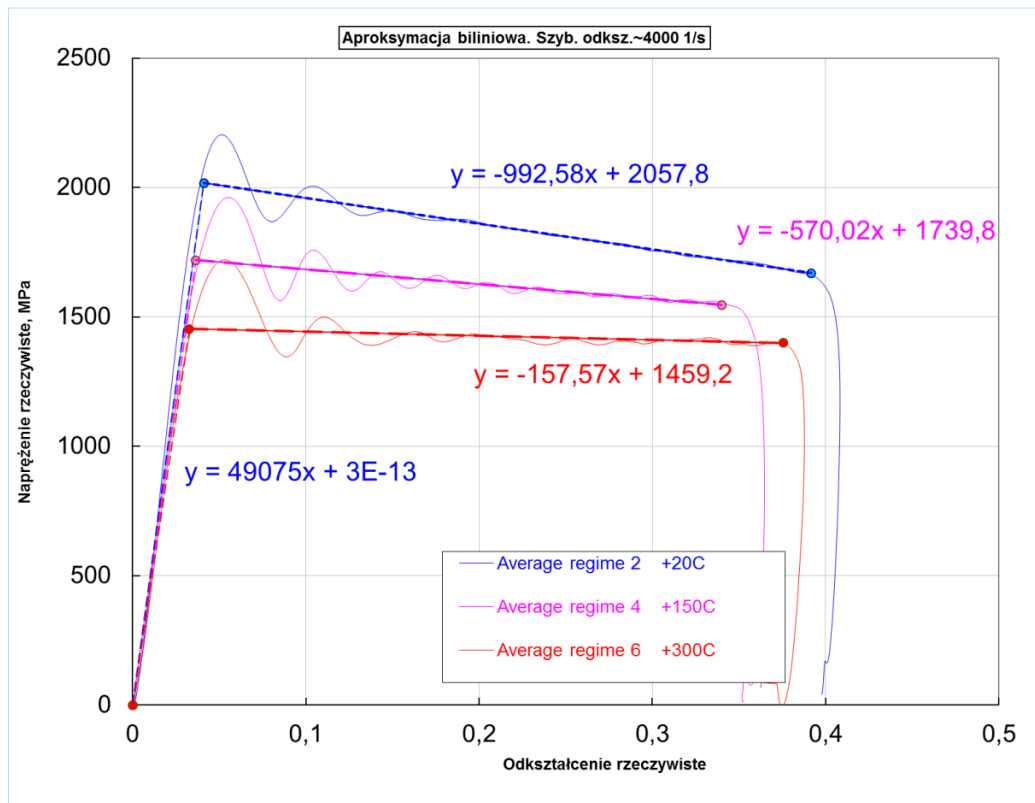
Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że wpływ procesu nagrzewania się materiału penetratora pocisku podkalibrowego ma istotny wpływ na spadek jego własności wytrzymałościowych.



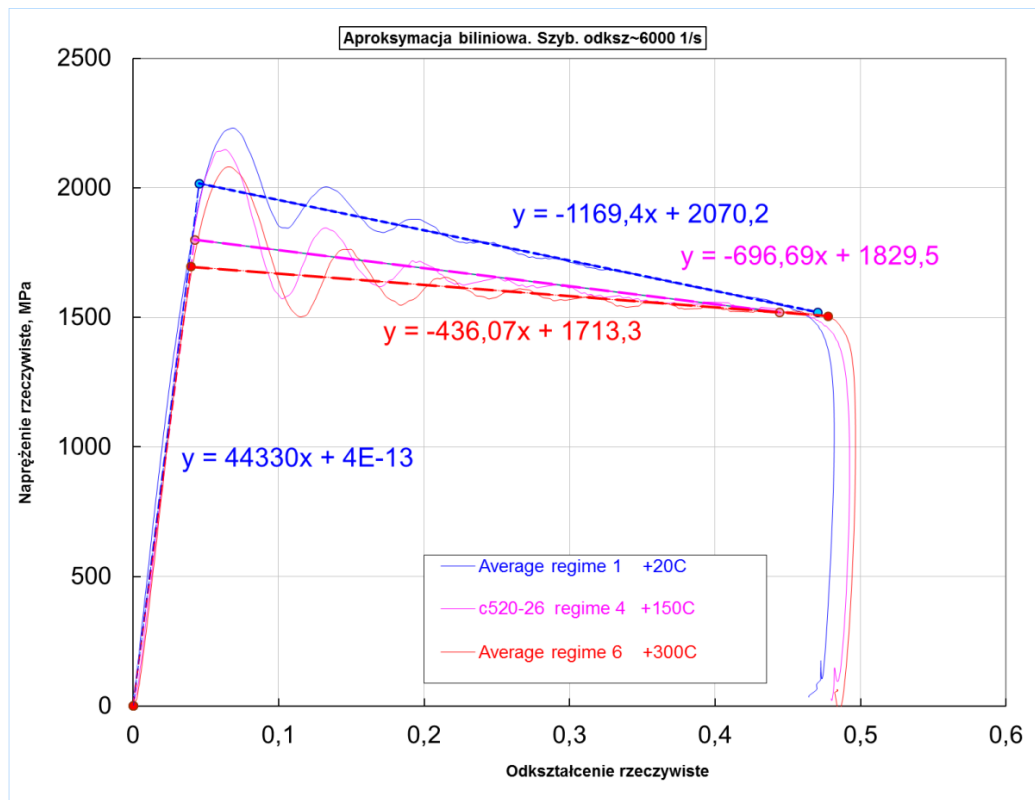
Rys. 8. Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$



Rys. 9. Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$



Rys. 10. Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\epsilon \sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$



Rys. 11. Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\epsilon \sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

5. Wnioski

Przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu nagrzewania się penetratora pocisku podkalibrowego na torze lotu pozwoliło na uzyskanie przybliżonego rozkładu i wartości temperatury w jego elementach w momencie potencjalnego uderzenia pocisku w cel - pancerz (tj. dla odległości 2000 m). Analiza rozkładu temperatury wskazuje na silne nagrzewanie się przedniej stożkowej części penetratora w zakresie 300÷1000°C. Jak już wcześniej wspomniano, ze względu na mniejszą niż w przypadku programów specjalistycznych (opartych na metodzie MRS) dokładność obliczeń zastosowanego oprogramowania komercyjnego ANSYS Fluent v14,5, uzyskane wyniki obliczeń należy traktować z dużym przybliżeniem.

Natomiast przeprowadzone badania spieku na osnowie wolframowej w temperaturach 20°C, 150°C i 300°C w warunkach obciążenia dynamicznego w zakresie szybkości odkształcenia $\sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ÷ $\sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ wykonane metodą zmodyfikowanego (dzielonego) pręta Hopkinsona, wykazały przede wszystkim znaczny wpływ osłabienia termicznego nagrzewanych do temperatury 150°C i 300°C próbek na charakter przebiegu wykresów naprężenie-odkształcenie. Wraz ze wzrostem temperatury badanej próbki dla danej wartości szybkości odkształceń zanotowano spadek wartości granicy plastyczności badanego spieku na osnowie wolframowej.

Fakt ten może mieć istotny wpływ na dokładność odwzorowania przebiegu procesu penetracji pancerzy przez penetratory pocisków podkalibrowych. W świetle uzyskanych i przedstawionych powyżej wyników symulacji i badań dynamicznych własności wytrzymałościowych należy rozpatrzyć potrzebę podjęcia prac nad nowymi algorytmami modelowania przebiegu, które uwzględniałyby zmiany własności wytrzymałościowych spieku na osnowie wolframowej w funkcji jego zmiany temperatury podczas nagrzewania się penetratora na torze lotu. Pozwoliłoby to na dokonanie głębszej analizy początkowego okresu wnikania pocisku w pancerz, czyli zderzenia pocisku z pancerzem, podczas którego następuje przejście materiałów pancerza i pocisku w stan plastyczny i w efekcie powstanie krateru [7].

Dotychczas weryfikacja eksperymentalna procesu nagrzewania się penetratora na torze lotu nie była możliwa ze względu na brak dostępu do szybkich kamer termowizyjnych. Obecnie autorzy są w kontakcie z firmą, która posiada i wynajmuje tego typu sprzęt i podczas najbliższych badań amunicji podkalibrowej zostanie zarejestrowany proces nagrzewania się penetratora na torze lotu. Wyniki dalszych prac naukowo-badawczych w tej problematyce będą przedstawione w kolejnych publikacjach.

Literatura

- [1] MAGIER M., *Metody oszacowania głębokości przebiecia pancerza przez pociski kinetyczne*, (2007), Biuletyn PTU WITU nr 1, zeszyt 101, s. 103-116.
- [2] MERDA T., *Symulacja nagrzewania się obiektów na torze lotu*, Materiały z IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk 25-28.09.2012r., s. 604-611,
- [3] KRUSZKA L., MAGIER M., *Doświadczalne badania lepkoplastycznych własności materiału penetratora wykonanego ze spieku na osnowie wolframowej*, Biuletyn Naukowy Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zielonka, 2011, 119, str.63-76,
- [4] *Dokumentacja Konstrukcyjna. 120 mm Pocisk Podkalibrowy APFSDS-T. Nr rys. P11.1.0.0-PS*. Archiwum WITU, 2014,

- [5] F. R. Menter., "*Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*", AIAA Journal, 32(8), 1994, str. 1598–1605,
- [6] F. R. Menter., "*Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective*", International Journal of Computational Fluid Dynamics. Volume 23, Issue 4, 2009,
- [7] WŁODARCZYK E., JACKOWSKI A., *Balistyka pocisków szybkich*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2008.

