

Numeryczna analiza ze sprzężeniem termomechanicznym procesu niskocyklowego zginania belki

Agnieszka Derewońko¹, Hong Phong Nguyen¹, Tadeusz Niezgodą¹, Jerzy Jachimowicz¹

¹Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna

email: agnieszka.derewonko@wat.edu.pl, hong.phong.nguyen@wat.edu.pl, tadeusz.niezgoda@wat.edu.pl, jerzy.jachimowicz@wat.edu.pl

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono numeryczną analizę ze sprzężeniem termomechanicznym testów zginania belki wspornikowej. Rozważono dwa przypadki obciążenia cyklicznego: symetryczny i asymetryczny. Przeanalizowano powstawanie odkształceń plastycznych oraz pochodzących od nich pól temperatury. Zastosowano model materiału z umocnieniem kinematycznym, w którym nie odwzorowano jawnie zmian parametrów mechanicznych od temperatury. Otrzymane wyniki zestawiono z rezultatami badań eksperymentalnych z pozytywnym rezultatem.

SŁOWA KLUCZOWE: sprzężenie termomechaniczne, niskocyklowe zginanie, MES

1. Wstęp

Analiza numeryczna sprzężonych zagadnień termomechanicznych, przeprowadzona z użyciem programów do wyznaczania wytrzymałości konstrukcji, pozwala na symulację w szerokim zakresie parametrów. Stosując konstytutywną teorię lepkoplastyczności zaproponowaną przez Bodnera i Partoma [1], Allen [2] sformułował zależność naprężenia od odkształcenia w pręcie przegubowym, które zadano w funkcji czasu. Uznając, że istnieje znaczna strata ciepła w pręcie obciążonym osiowo, Allen [3] stworzył jednowymiarowy w pełni sprzężony model elementów skończonych dla problemu pręta przegubowego.

W niniejszej pracy przedstawiono termomechaniczną analizę numeryczną niskocyklowego zginania belki o przekroju kwadratowym. Przyjęto założenie, że mechaniczne właściwości materiału takie jak granica plastyczności, moduł Younga oraz moduł styczny nie polegają zmianie pod wpływem temperatury co osiągnięto przy ograniczeniu liczby cykli obciążenia. Dlatego zastosowano model materiału, w którym właściwości mechaniczne zależą od współczynnika umocnienia i nie są jawnymi funkcjami temperatury. Odwzorowano jednak zmiany termicznych właściwości materiału takich jak współczynnik rozszerzalności cieplnej, ciepło właściwe oraz przewodność cieplną. Przedstawiono procentowy błąd względny temperatur wyznaczonych w testach doświadczalnych i analizach numerycznych.

2. Opis modelu materiału

Do opisu zachowania materiału zastosowano model uwzględniający efekt wzmocnienia odkształceniowego zaproponowany w pracy [4] i zaimplementowany do programu Ls-Dyna. Zgodnie z nim powierzchnia plastyczności o stałym wymiarze przesuwają się a translacja jej środka opisana jest zależnością

$$\alpha_{ij}^{n+1} = \alpha_{ij}^n + \frac{E_p \Delta \varepsilon_{eff}^p}{\Lambda} \xi_{ij}^* \quad (1)$$

gdzie α_{ij}^n – położenie środka w poprzednim kroku iteracyjnym, E_p - plastyczny moduł umocnienia,

$$\xi_{ij}^* = s_{ij}^* - \alpha_{ij} \quad (2)$$

$$\Lambda^2 = \frac{3}{2} s_{ij}^* s_{ij}^* \quad (3)$$

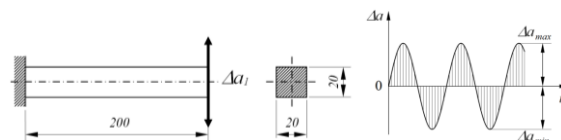
dla którego s_{ij}^* reprezentuje składowe dewiatora naprężenia w kroku $n+1$. Przyrost efektywnego odkształcenia plastycznego jest definiowany jako

$$\Delta \varepsilon_{eff}^p = \frac{\Lambda - \sigma_y}{3G + E_p} \quad (4)$$

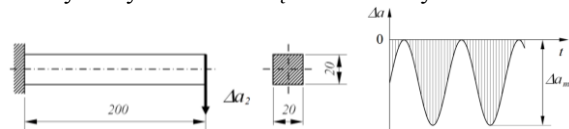
gdzie G – moduł Kirchhoffa, σ_y – granica plastyczności, σ_{ij}^* – tensor naprężeń.

3. Obiekt badań i jego model numeryczny

Analizy numeryczne oraz badania eksperymentalne cyklicznego zginania wykonano w temperaturze otoczenia dla belki wykonanej ze stali stopowej 41Cr4, o przekroju kwadratowym.



Rys. 1. Schemat badania zginania belki podlegającej symetrycznemu obciążeniu niskocyklowemu



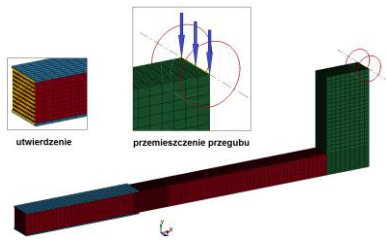
Rys. 2. Schemat badania zginania belki podlegającej asymetrycznemu obciążeniu niskocyklowemu

W badaniu, belkę utwierdzono jednostronnie i obciążono siłą prostopadłą do jej osi na swobodnym końcu. Testy przeprowadzono dla dwóch przypadków niskocyklowego obciążenia:

- symetryczne (Rys. 1), $\Delta a_{max} = 10$ mm, $\Delta a_{min} = -10$ mm,
- asymetryczne (Rys. 2), $\Delta a_{max} = 0$ mm, $\Delta a_{min} = -20$ mm.

W modelu dyskretnym zastosowano sześciocienne elementy, w których macierz sztywności obliczana jest dla jednego punktu Gaussa w środku ciężkości. Utwierdzenie belki wspornikowej zrealizowano przy wykorzystaniu

kontaktu. Węzłom na lewej ścianie belki odebrano wszystkie stopnie swobody. Siły zginania generowane były przez przemieszczenie węzłów na osi przegubu w dwóch przypadkach: symetrycznym i asymetrycznym. Model numeryczny oraz schemat opisujący warunki brzegowe przedstawiono na Rys. 3.



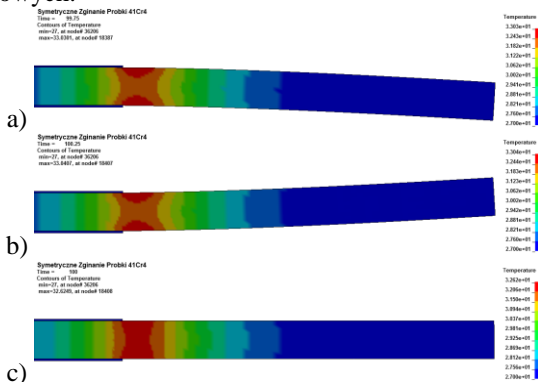
Rys. 3. Model numeryczny próbki na niskocyklowe zginanie i schemat opisujący warunki brzegowe

Analizy numeryczne wykonano z algorytmem sprzężenia termomechanicznego, w których przyjęto założenie że, praca plastyczna zamienia się w ciepło w 95% poprzez jej zamianę w strumień ciepła generowany z jej obszaru. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu systemu LS-Dyna metodą niejawną (ang. Implicit method).

Zastosowano model materiału z kinematycznym umocnieniem przyjmując Moduł Younga $E = 212 \text{ GPa}$, współczynnik Poissona $\nu = 0,3$ oraz granicę plastyczności $SIGY = 720 \text{ MPa}$. Założono również, że wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej, ciepło właściwe oraz przewodność cieplna są funkcjami temperatury.

4. Wyniki analiz

Na Rys. 4 przedstawiono zmianę rozkładu temperatury pod obciążeniem symetrycznym w różnych chwilach czasowych.



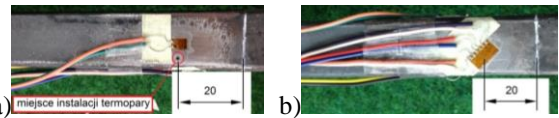
Rys. 4. Przykładowe rozkłady temperatury podczas symulacji zginania symetrycznego próbki 41Cr4;

- a) $t = 99,75 \text{ s}$, $\Delta a = -10 \text{ mm}$; b) $t = 100 \text{ [s]}$, $\Delta a = 0 \text{ mm}$;
- c) $t = 100,25 \text{ s}$, $\Delta a = +10 \text{ mm}$.

5. Walidacja eksperymentalna

Badania eksperymentalne przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego oprzyrządowania do testów zginania.

W celu pomiaru temperatury i odkształceń liniowych instalowano dwie termopary i dwa tensometry oporowe na górnej i dolnej powierzchni belki (Rys. 5a), natomiast prostokątną rozetę tensometryczną naklejono na powierzchni bocznej (Rys. 5b).



Rys. 5. Miejsce mocowania: a) tensometrów i termopar, b) rozety tensometrycznej na bocznej powierzchni belki

Wyniki pomiarów z kamery termowizyjnej, termopary górnej i dolnej oraz symulacji wraz z procentowym błędem względnym średnich wartości zestawiono w postaci Tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie temperatur z badań eksperymentalnych i symulacji numerycznego procesu zginania symetrycznego

Czas [s]	Temperatura [°C]				Błąd wzgl. [%]
	Elm. górny	Elm. dolny	Średnia z symulacji	Średnia z testów	
0	27	27	27	27	0
100	31,84	31,84	31,84	31,47	1,2
200	34,22	34,22	34,22	34,03	0,6

6. Podsumowanie

Z analizy wynika, że zastosowany model MES jest właściwy, a wyniki uzyskane na drodze symulacji numerycznych są zbieżne z doświadczeniem.

W badaniu podjęto próby odizolowania obserwowanego obszaru od atmosfery i elementów układu badawczego, aby zminimalizować straty odprowadzania ciepła (warunki adiabatyczne) w czasie badania. W wyniku obciążeń cyklicznych temperatura zmierza asymptotycznie do stanu ustalonego, w którym zachodzi równowaga pomiędzy generowanym i rozchodzącym się ciepłem, a oddawanym do otoczenia.

Ciepło generowane w przegubie plastycznym w każdym kolejnym cyklu jest kumulowane i jednocześnie rozpraszane do pozostałych obszarów w kierunku ustalenia temperatury. Kumulacja ciepła jest zależna od wielkości generowanego ciepła w czasie i współczynnika przewodzenia ciepła. Wielkość strumienia ciepła generowanego w cyklu zależy min. od obszarów i rozkładów odkształceń plastycznych i ich poziomów oraz od strumienia odprowadzanego ciepła, który dalej zależy od współczynnika przewodzenia i pojemności cieplnej pozostałej części konstrukcji. Jeśli częstość cykli zginania belek wykonanych z materiałów o małym współczynniku przewodzenia ciepła jest dostatecznie wysoka to ciepło będzie się kumulowało w obszarze odkształceń plastycznych i może dojść do powstania pęknięcia i zniszczenia tego elementu struktury.

Literatura

- [1] Bodner S.R., Partom Y., *Constitutive Equations for Elastic-Viscoplastic Strain-Hardening Materials*, J Appl Mech 42, pp. 385-389, 1975.
- [2] Allen D.H., *A Prediction of Heat Generation in a Thermoviscoplastic Uniaxial Bar*, Int J Solids Struct 21(4), pp. 325-342, 1985.
- [3] Allen D.H., *Predicted Axial Temperature Gradient in a Viscoplastic Uniaxial Bar Due to Thermomechanical Coupling*, Int J Num Methods Eng 23(5), pp. 903-917, 1986.
- [4] Krieg R.D., Key S.W., *Implementation of a Time Dependent Plasticity Theory into Structural Computer Programs*, Vol. 20 of Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects (ASME, New York, N.Y., 1976), 125-137.