

ZRÓŻNICOWANIE MODELI OBCIĄŻENIA W OBLICZENIACH MATRYC DO WYCISKANIA

PIOTR CZYŻEWSKI, ANDRZEJ KOCAŃDA

LOAD MODELS VARIATION IN NUMERICAL MODELING OF EXTRUSION DIES

Abstract

There has been presented the results of numerical analysis of cyclic loading of forward extrusion dies. Various techniques reported in literature have been used in this work for modeling of cyclic loading. Comparison of the results of calculations for simplified as well as for quite complicated models has revealed some interesting differences. Simple models could be regarded as the most universal for the analysis of cyclic loading but only qualitative results would be accepted. On the other hand, some complicated models can take into account many parameters of processes and the results of calculations are usually much more accurate. However, these models are difficult to implement and calculation time is sometimes very long. Finally, the recommendations for selection of appropriate models of deformation processes with cyclic loading have been provided.

1. WPROWADZENIE

W chwili obecnej coraz powszechniejsze w projektowaniu procesów obróbki plastycznej jest użycie oprogramowania do numerycznej analizy procesów technologicznych. Takie podejście umożliwia efektywną ocenę płynięcia materiału w czasie kształtowania. Na ogół do takiej analizy wykorzystuje się Metodę Elementów Skończonych. Duża różnorodność oferowanego na rynku oprogramowania pozwala na elastyczny wybór takiego programu, które najlepiej spełni warunki stawiane przez technologów. Zazwyczaj przyjmuje się, że narzędzie użyte do kształtowania wyrobu jest doskonale sztywne. Pozwala to na znaczne uproszczenie modelu numerycznego, skrócenie czasu obliczeń i łatwą modyfikację geometrii narzę-

dzi. Niestety, nieuwzględnienie sprężysto-plastycznego charakteru odkształcania się narzędzi może prowadzić do otrzymania wyników obliczeń znacznie odbiegających od rzeczywistości. Najlepsze efekty można oczywiście uzyskać uwzględniając w analizowanym modelu jak najszersze spektrum czynników wpływających na przebieg procesu kształtowania wyrobu. Niestety takie analizy są z reguły bardzo czasochłonne. Dodatkowo należy dysponować całym szeregiem różnorodnych danych dotyczących warunków procesu, stałych materiałowych, danych opisujących zachodzące zjawiska itp. Jest to bardzo kłopotliwe ze względu na trudność w pozyskiwaniu tychże danych. Często także nie ma jednoznacznie opisanych procedur, które pozwoliłyby na określenie danego parametru.

tru. Wobec powyższego przygotowując analizę numeryczną na ogół stajemy przed problemem wyboru kompromisowego rozwiązania, które pozwoli na szybkie uzyskanie względnie dokładnych wyników. Należy pamiętać, że w przypadku modelowania pojęcie dokładności jest ściśle związane z pytaniami na jakie chcemy uzyskać odpowiedź. Dwa różne modele tego samego procesu mogą służyć zupełnie innym celom. Np. model w którym narzędzia zostaną potraktowane jako ciała doskonale sztywne może doskonale pokazywać możliwość pojawienia się zakuć w trakcie procesu, natomiast stan obciążenia matrycy będzie można określić jedynie w bardzo przybliżony sposób.

Pęknięcie zmęczeniowe jest najczęstszą przyczyną wycofywania z eksploatacji narzędzi do objętościowej obróbki na zimno. Niniejszy artykuł zaprezentuje różne sposoby modelowania obciążeń matrycy pod kątem uzyskania jak najdokładniejszych danych, umożliwiających określenie jej trwałości zmęczeniowej.

Najprostszym jest model w którym obciążenie matrycy jest zdefiniowane w postaci jednorodnego pola ciśnienia oddziaływującego na pewnym obszarze matrycy. Przykładem jest model przedstawiony w pracy S. H. Ann i in. Jednocześnie materiał matrycy zdefiniowano jako sprężysty. Na podstawie tak określonego modelu można określić przybliżone pole naprężeń w matrycy. Wyniki te mogą być wykorzystane w dalszej kolejności do prognozowania rozwoju pęknięcia w określonym miejscu matrycy. Jednak na podstawie uzyskanych z tego modelu wyników trudno ocenić trwałość zmęczeniową, a zwłaszcza liczbę cykli do momentu inicjacji pęknięcia.

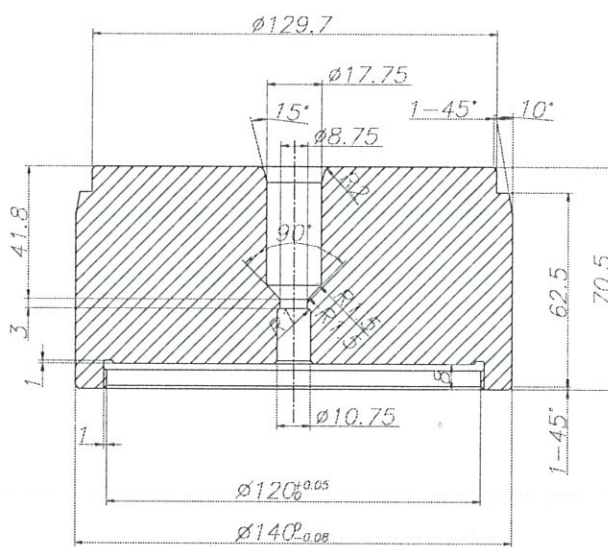
W innym uproszczonym modelu, zakłada się pewien zróżnicowany rozkład ciśnienia na powierzchni roboczej narzędzia (np. praca Pedersen'a). Jest to podejście podobne do opisanego powyżej, jednak dodatkowo zakłada się cykliczne zmiany obciążenia narzędzia (zmiany są opisane w funkcji czasu). Ta drobna zmiana pozwala na ocenę amplitud odkształceń i naprężeń występujących w matrycy. To z kolei można wykorzystać do wyznaczenia liczby cykli potrzebnych do inicjacji pęknięcia.

Stosując metodykę modelowania opisaną w pracach (Kocańda i in. 1997, 1998) można jeszcze dokładniej określić zmiany zachodzące w narzędziu. Wymaga ona obliczenia obciążeń narzędzi w wyniku przeprowadzenia analizy procesu w układzie przedmiot obrabiany-narzędzie. Dzięki temu uproszczone obciążenie matrycy (poprzez zdefiniowane ciśnienie) przyjęte w poprzednim modelu zastąpione jest oddziaływaniem przedmiotu odkształcanego. Dalszym rozszerzeniem tego modelu jest uwzględnienie procesów cieplnych zachodzących w trakcie realizacji procesu plastycznego kształtowania. Wymaga to zastosowa-

nia równoległej analizy cieplno-mechanicznej. Dzięki temu możliwa jest ocena czy lokalne nagrzewanie matrycy ma wpływ na zmiany obciążenia matrycy.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wszystkie zasygnalizowane wyżej sposoby modelowania obciążeń matrycy. Porównanie uzyskanych wyników obliczeń umożliwi wybór sposobu modelowania, umożliwiającego efektywną ocenę trwałości zmęczeniowej matrycy.

Wszystkie analizy zostaną przeprowadzone dla procesu wyciskania współbieżnego na zimno. Geometrię narzędzia przedstawia rysunek 1. Do wykonania modelu i obliczeń wykorzystano oprogramowanie komercyjne MSC.Marc. Oprogramowanie to pozwala na prowadzenie analiz w bardzo szerokim zakresie z uwzględnieniem wszystkich opisanych wcześniej czynników. We wszystkich przypadkach model materiałowy matrycy był sprężysto-plastyczny. Wprowadzone dane materiałowe odpowiadały stali narzędziowej NC10, zahartowanej i odpuszczonej na twardość 58 HRC.



Rysunek 1. Matryca do współbieżnego wyciskania pręta.
Figure 1. Die for forward extrusion of rods.

2. UPROSZCZONY MODEL OBCIĄŻENIA MATRYCY

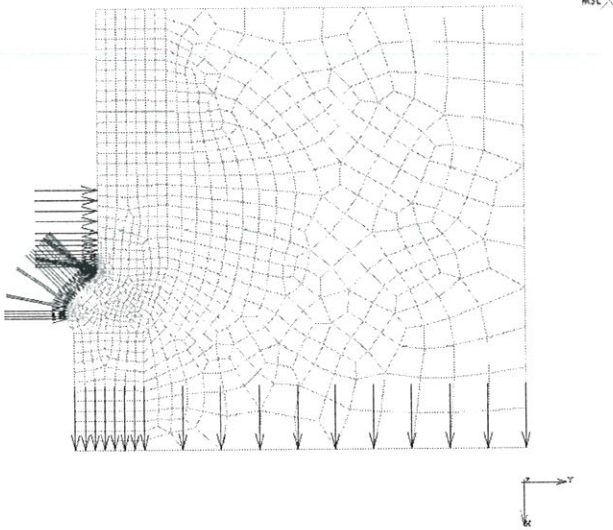
Określenie obciążenia narzędzia w trakcie kształtowania wyrobu jest podstawowym problemem w ocenie jego trwałości. Na podstawie wieloletnich badań i analiz wypracowano uproszczony sposób szacowania nacisków na powierzchni roboczej matrycy w trakcie wyciskania współbieżnego. Został on wprowadzony do praktyki przez *International Cold Forging Group* w postaci zaleceń do projektowania matryc. Zgodnie z tymi zaleceniami przyjmuje się, że naciski działające w trakcie procesu na powierzchnię wewnętrzną

matrycy są równe naciskom na powierzchni czołowej stempla. Z kolei nacisk na stempel jest zdefiniowany jako stosunek siły maksymalnej w procesie wyciskania do powierzchni stempla:

$$\bar{p} = \frac{F_{max}}{A_{st}} \quad (1)$$

gdzie:

p – nacisk na powierzchnię wewnętrzną matrycy,
 F_{max} – siła maksymalna procesu,
 A_{st} – powierzchnia czołowa stempla.



Rysunek 2. Siatka elementów skończonych i warunki brzegowe (model uproszczony).

Figure 2. Finite element mesh and boundary conditions-simplified model.

Korzystając z tych zaleceń przygotowano model numeryczny obciążenia matrycy (model 1). Przyjęto w nim, że naciski robocze o wartości 1850 MPa występują na części powierzchni matrycy, odpowiadającej powierzchni styku wypraski z narzędziem w połowie realizacji procesu. Siatkę elementów skończonych wraz z zaznaczonym obszarem oddziaływania nacisków przedstawiono na rysunku 2. Ponieważ proces wyciskania współbieżnego ma charakter osiowosymetryczny, wobec tego analizowany model zredukowano do zagadnienia 2D. Do dyskretyzacji analizowanego obszaru wybrano elementy czworoboczne, czterowęzłowe z czterema punktami całkowania (*full integration*). Kształt matrycy odpowiadał wymiarom narzędzia używanego do badań doświadczalnych. Oddziałujące ciśnienie było zdefiniowane jako zmienne w czasie, co po-

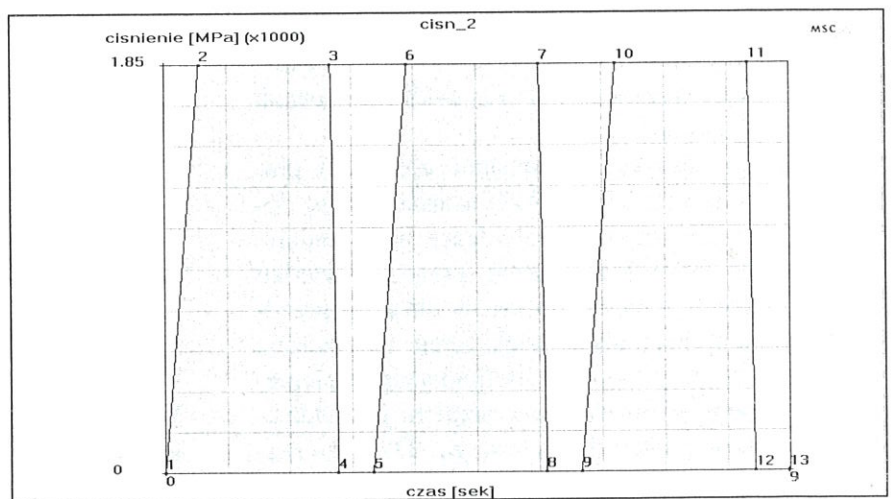
kazano na rysunku 3. Przebieg zmian był tak dobrany, aby w miarę możliwości odpowiadał czasowo przebiegowi rzeczywistego obciążenia matrycy przy wykonaniu trzech wyprasek. Tak zdefiniowany przebieg ciśnienia w czasie pozwala na łatwiejsze porównanie wyników z innymi modelami i nie ma istotnego wpływu na jakość modelu.

3. ZAAWANSOWANE MODELE OBCIĄŻEŃ MATRYCY

Szczegółowa ocena sposobu obciążenia matrycy w trakcie procesu wyciskania wymaga wykonania analizy numerycznej procesu dla trzech kolejnych wyprasek (model 2). W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto, że trzy kolejne operacje wyciskania będą wykonywane z użyciem tej samej matrycy. Dzięki temu można było przeanalizować, jak zmieniają się w matrycy pola naprężeń i odkształceń w kolejnych operacjach.

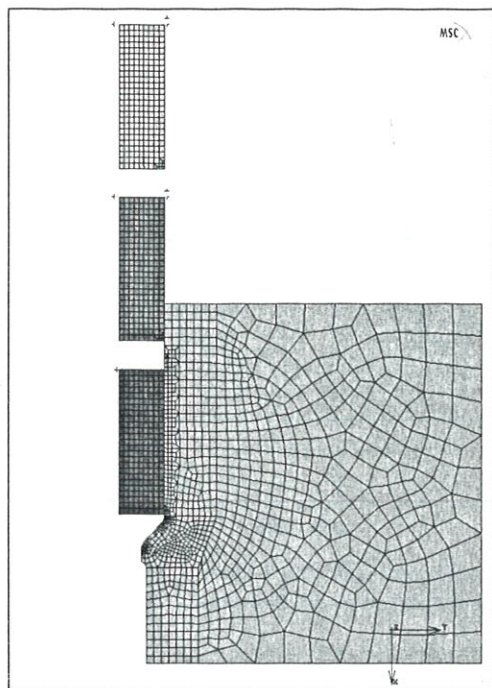
Model geometryczny matrycy został zdefiniowany identycznie jak w przypadku uproszczonym. Natomiast obciążenie matrycy było realizowane poprzez oddziaływanie odkształcanego materiału na narzędzie. Własności materiału wyciskanego odpowiadały stali 20 i były jednakowe dla trzech próbek. Oddziaływanie pomiędzy materiałem odkształcanym, a narzędziem opisywał model tarcia wg teorii Coulomb'a. Ponieważ w badaniach doświadczalnych próbki były fosforanowane i namydlane, wobec tego przyjęto wartość współczynnika tarcia równą 0,05. Wprowadzony współczynnik tarcia był stały i nie zależał ani od nacisków pomiędzy wstępniakiem i narzędziem, ani od temperatury obu elementów. Widok modelu przedstawiono na rysunku 4.

W trzecim przypadku (model 3) postanowiono sprawdzić wpływ lokalnego nagrzewania narzędzia w



Rysunek 3. Przebieg zmian ciśnienia (model uproszczony).

Figure 3. Changes of pressure-simplified model.

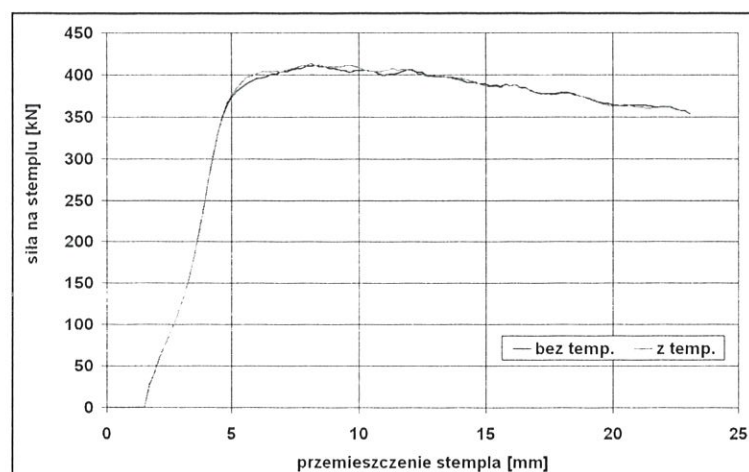


Rysunek 4. Model wyciskania współbieżnego trzech kolejnych wyprasek (model zaawansowany).

Figure 4. Model of forward extrusion of three subsequent workpieces-advanced model.

trakcie realizacji procesu na zmianę obciążenia cyklicznego matrycy. W tym celu wykonano model termomechaniczny procesu wyciskania. Uwzględniono w nim wpływ temperatury na zmianę wartości: modułu Young'a, przewodności cieplnej i ciepła właściwego elementów biorących udział w analizie. Uwzględniono także zmiany geometrii pod wpływem rozszerzalności cieplnej. Pozostałe parametry modelu odpowiadały modelowi 2.

Rysunek 5 przedstawia porównanie siły wyciskania pierwszej wypraski dla modelu 2 i 3. Lokalne niewielkie nagrzanie matrycy nie wpłynęło na zmianę przebiegu siły kształtowania. Na rysunku 6 przedstawiono rozkład nacisków na powierzchni matrycy. Taki



Rysunek 5. Porównanie siły wyciskania dla pierwszej wypraski (model 2 i 3).

Figure 5. Comparison of extrusion loads for the first extrusion (model 2 and 3).

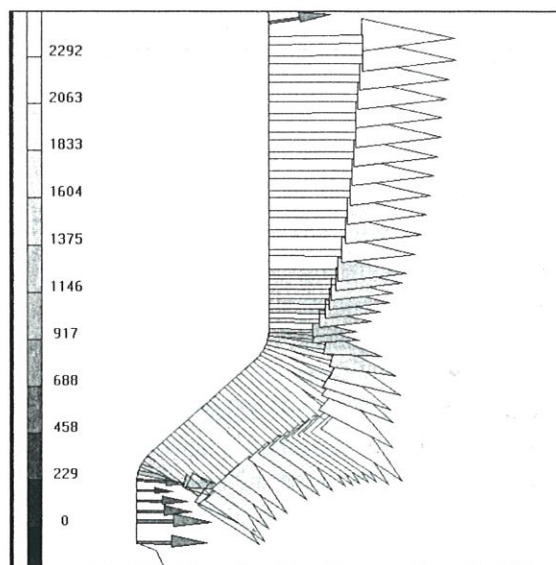
stan obciążenia był wyliczony w połowie procesu wyciskania trzeciej wypraski. Odpowiada to założonej chwili obciążenia matrycy dla modelu pierwszego (obciążenie matrycy ciśnieniem). Widać znaczną nierównomierność rozkładu nacisków. Średnia wartość oscyluje w granicach 1800 MPa, co jest wartością zbliżoną do przyjętej w analizie uproszczonej.

4. ANALIZA WYNIKÓW

Dzięki odpowiedniemu przygotowaniu modelu możliwa stała się ocena cyklicznych obciążeń matrycy. W pierwszym modelu cykliczność obciążenia wymuszona jest zmiennym w czasie ciśnieniem działającym na wewnętrzną powierzchnię matrycy. W drugim i trzecim modelu zmienność obciążenia wywołana była kolejnymi operacjami wyciskania.

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg odkształceń zastępczych w czasie. Dla wszystkich modeli wartości odkształceń były określone w tym samym miejscu matrycy (na wejściu w górną strefę stożka matrycy).

Amplituda odkształcenia obliczona dla modelu 1 jest znacznie większa niż w przypadku gdy obciążenie wymuszone jest na skutek oddziaływania odkształcanego materiału (model 2). Jest to spowodowane znaczną różnicą nacisków działających w tym obszarze matrycy. W modelu 1, w całym obszarze działania, wartość nacisków jest taka sama. Natomiast w modelu 2, w analizowanym obszarze widoczny jest lokalny spadek nacisków działających na matrycę (rysunek 6). Na uwagę zasługuje przebieg zmian odkształceń w modelu 3. Pasuje się on pomiędzy przebiegami dla dwóch pozostałych modeli. Ponieważ model 3 jest modelem najbardziej dokładnym można stwier-



Rysunek 6. Rozkład nacisków przy wyciskaniu trzeciej wypraski (model zaawansowany).

Figure 6. Pressure distribution in the third extrusion-advanced model.

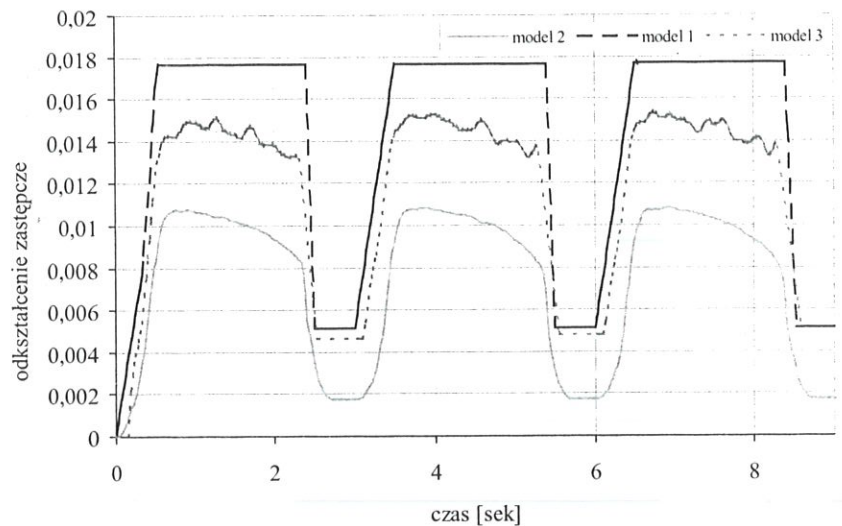
dzić, że model 1 pozwala na oszacowanie z góry, natomiast model 2 na oszacowanie z dołu wartości amplitudy odkształcenia.

Rysunek 8 obrazuje zmiany naprężeń w funkcji czasu. Mamy do czynienia z cyklicznym charakterem tych zmian. Uzyskane dla modeli zaawansowanych wyniki obliczeń obciążeń matrycy mogą być podstawą do określenia jej trwałości do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego w oparciu o procedury zmęczenia niskocyklowego (Kocańda 2002).

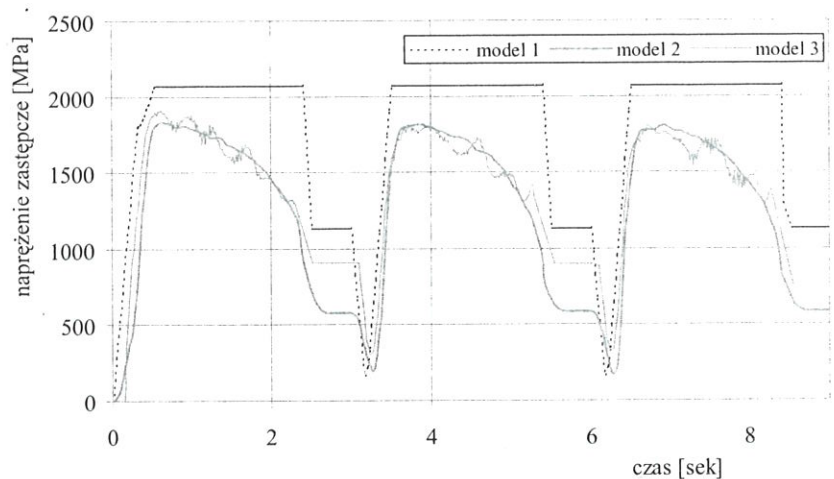
Jak widać na wykresie zmiany naprężenia w trakcie obciążania matrycy, obliczone dla modelu 2 i 3 są bardzo zbliżone. Odbiega to od obliczonych zmian odkształceń. Jest to związane z rozszerzalnością cieplną matrycy. Model 3 zasługuje więc na większą uwagę ze względu na uwzględnienie w nim wpływu temperatury. Lokalne nagrzewanie matrycy ma charakter okresowy, a zmiany temperatury matrycy przy wyciskaniu kolejnych wyprasek przedstawia rysunek 9. W kolejnych operacjach maksimum temperatury jest coraz wyższe. Aby w pełni ocenić wpływ temperatury na obciążenie matrycy należało by zastosować algorytm pozwalający na efektywne określenie rozkładu temperatury dla okresu pracy narzędzia, w którym zmiany temperatury są ustabilizowane (A. Kocańda, P. Czyżewski, 2002). Na tej podstawie można w drugiej kolejności określić faktyczne obciążenie mechaniczne narzędzia.

Z przedstawionych wyników widać że najbardziej czułe na sposób modelowania są zmiany odkształceń w matrycy. Ich charakter jest bardzo zbliżony w każdym modelu. Istotne różnice dotyczą jednak wartości. Choć dla modelu 2 i 3 wartości maksymalne odkształceń wyraźnie różnią się od siebie, to już amplituda ich jest bardzo zbliżona. Dla modelu 2 amplituda odkształcenia wynosi ok. 0,09, natomiast dla modelu 3 amplituda jest równa ok. 0,1.

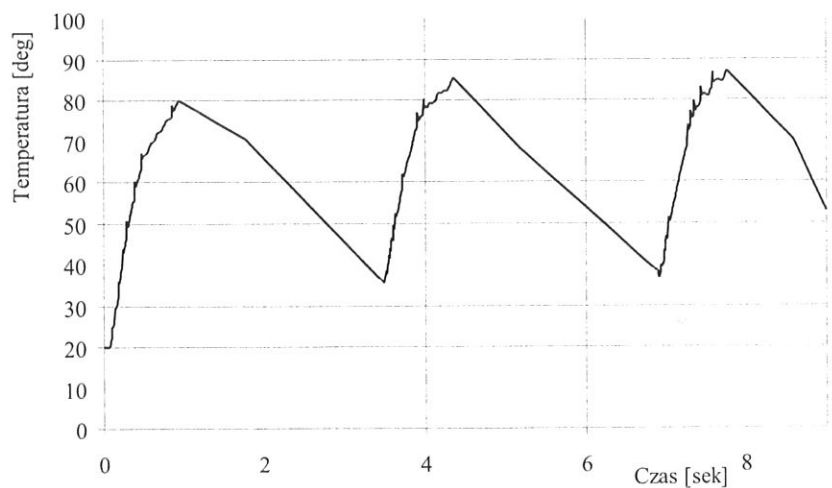
Przedstawione modele w różny sposób odzwierciedlają rzeczywistość od najprostszego modelu 1 do modelu



Rysunek 7. Cykliczne zmiany odkształceń dla trzech modeli obciążenia matrycy.
Figure 7. Cyclic changes of equivalent strain for three models of die loading.



Rysunek 8. Cykliczne zmiany naprężenia zastępczego dla trzech modeli obciążenia.
Figure 8. Cyclic changes of equivalent stress for three models of die loading.



Rysunek 9. Zmiany temperatury w wybranym punkcie matrycy dla 3 kolejnych wyprasek (model 3).
Figure 9. Temperature changes at selected point of die for 3 subsequent extrusions (model 3).

najbardziej rozbudowanego (model 3). Zakres zastosowania przedstawionych modeli jest w pewnym stopniu zdeterminowany możliwościami użytkownika. Modele 2 i 3 wymagają oprogramowania MES z możliwością aktywnego przesiatkowania. Niestety tylko niektóre pakiety obliczeniowe są standardowo wyposażone w tę opcję. Część (nawet tych powszechnie stosowanych) nie posiada takich możliwości. Innym rozwiązaniem spotykanym na rynku jest możliwość dokupienia dodatkowych modułów, umożliwiających przesiatkowanie. Z tego powodu często może się zdarzyć, że wykonanie obliczeń z użyciem modeli zaawansowanych pociągnie za sobą dość znaczne koszty. W takim przypadku należy dobrze rozważyć, czy wyniki uzyskane z modelu uproszczonego nie będą wystarczające do efektywnego rozwiązania postawionego zadania.

Modele zaawansowane należy stosować wtedy, gdy zależy nam na dużej dokładności uzyskanych wyników. Ich wadą są niestety czasochłonne obliczenia, kilkanaście razy dłuższe niż w przypadku modelu uproszczonego. Tym niemniej pozwalają na uzyskanie najpełniejszego obrazu zmian, jakie zachodzą w narzędziu. Jest to niewątpliwą zaletą w przypadku procesów technologicznych o dużym skomplikowaniu warunków pracy matrycy.

Rozważając możliwości kolejnych modyfikacji modeli pod kątem analiz zmęczeniowych, należy również uwzględnić zmiany własności plastycznych materiału matrycy wywołane cyklicznymi odkształceniami plastycznymi, stosując w tym celu odpowiedni opis materiału (np. wg modelu Chaboche). Wyniki takich rozważań zostały przedstawione przez Pedersena (2000). Pozwalają one uwzględnić zmiany amplitudy odkształcenia na skutek cyklicznych zmian własności plastycznych narzędzia.

LITERATURA

- Ahn A. H., Kim T. H., Kim B. M., Choi J. C., 1997, A study on the prediction of fatigue life in an axi-symmetric extrusion die. *Journal of Materials processing technology*, 71, 343-349.
- Calculation methods for cold forging tools. *ICFG-Dokument*, nr 5/1982
- Czyżewski P., Kocańda A., 2002, Cykliczne obciążenie cieplne narzędzi do wyciskania na zimno., *Mat. konferencyjne KomPlasTech 2002*, ed. Pietrzyk M., Kusiak J., Grosman F., Piela A., Szczawnica, 181-186.
- Kocańda A., Cacko R., Czyżewski P., 1997, Wpływ kolejnych obciążeń matrycy na dokładność przedmiotów wyciskanych współbieżnie (część I)., *KomPlasTech 1997*, ed. Piela A., Pietrzyk M., Kusiak J., Ustroń-Jaszowiec 157-163.
- Kocańda A., Cacko R., Czyżewski P., 1998, Wpływ kolejnych obciążeń matrycy na dokładność przedmiotów wyciskanych współbieżnie (część II)., *KomPlasTech 1998*, ed. Pietrzyk M., Kusiak J., Piela A., Bukowina Tatrzńska 51-57.
- Kocańda A., Problem of tool life in cold forging. *Metallurgy on the Turn of 20th Century*, Komitet Metalurgii PAN, Akapit, Kraków, 2002.
- Pedersen T. O., 2000, Numerical studies of low cycle fatigue in forward extrusion dies. *Journal of Materials processing technology*, 105, 359-370.

Artykuł otrzymano 1 kwietnia 2004 r.