

mgr inż. Andrzej ŻMUDZKI, mgr inż. Piotr SKUBISZ,
dr hab. inż. Jan SIŃCZAK, prof. AGH, prof. dr hab. inż. Maciej PIETRZYK
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Wykorzystanie metod symulacji w procesach kuźniczych

Numerical simulation methods in forging processes

Streszczenie

W artykule przedstawiono aspekty modelowania przemysłowych procesów kucia precyzyjnego. Pokazane zostało nowoczesne podejście do projektowania procesów, zawierające sposoby dobierania kształtu wsadu i narzędzi w celu eliminacji niepożądanych efektów takich jak wypływka czy nadmierne zużycie matryc do kucia. Jako przykłady procesów kucia precyzyjnego, wybrano kształtowanie stożkowego koła zębatego, oraz śruby z sześciokątnym łbem. Przedstawiono kompleksowe wyniki symulacji numerycznych wymienionych procesów, uzyskane za pomocą komercyjnych pakietów opartych o metodę elementów skończonych: FORGE3 oraz QForm2D/3D, analiza których może posłużyć technologom do projektowania procesów charakteryzujących się wysoką jakością produktów i niskimi kosztami wytwarzania.

Abstract

Aspects of modeling of industrial precision forging processes has been presented. A modern approach to process design contains several ways of ingot and tools shape selection for undesired effects elimination, such as flash or die wear. The conical gear wheel and hexagon-head bolt forming were chosen as the examples of precision forging analysis. The complex results of numerical simulations, obtained from commercial software packages, based on finite elements method: FORGE3 and Qform2D/3D, have been presented. Analysis of these results may be used for high quality products and low costs processes design for engineers and technologists.

Słowa kluczowe: modelowanie MES, kucie precyzyjne, projektowanie procesów

Key words: FEM modeling, precision forging, process design

1. WSTĘP

Modelowanie numeryczne procesów kucia pozwala przewidywać zachowanie materiału w kolejnych operacjach kucia. Dotyczy to głównie plastyczności odkształcanego materiału, która może być opisana poprzez pola naprężeń i odkształceń oraz zmian mikrostrukturalnych będących wynikiem danego procesu. Najczęściej metody symulacji komputerowej uwzględniają przepływ ciepła w odkształcanym metalu oraz pomiędzy wsadem a narzędziami, opisany warunkami tarcia na powierzchni kontaktowej, sprężyste oraz termiczne rozszerzanie się i kurczenie wsadu i matryc oraz sprzężenie konstytutywnej charakterystyki

materiału wsadu. W praktyce, oznacza to, że przy wykorzystaniu metod symulacji można przewidzieć siły oraz energię potrzebną do przeprowadzenia danej operacji kucia, wypełnienie (lub brak wypełnienia) matryc, występowanie defektów płynięcia metalu oraz wynikowe właściwości materiału wsadu. Dodatkowo, zaawansowane techniki post-processingu pozwalają na bezpośrednią wizualizację wyników [1].

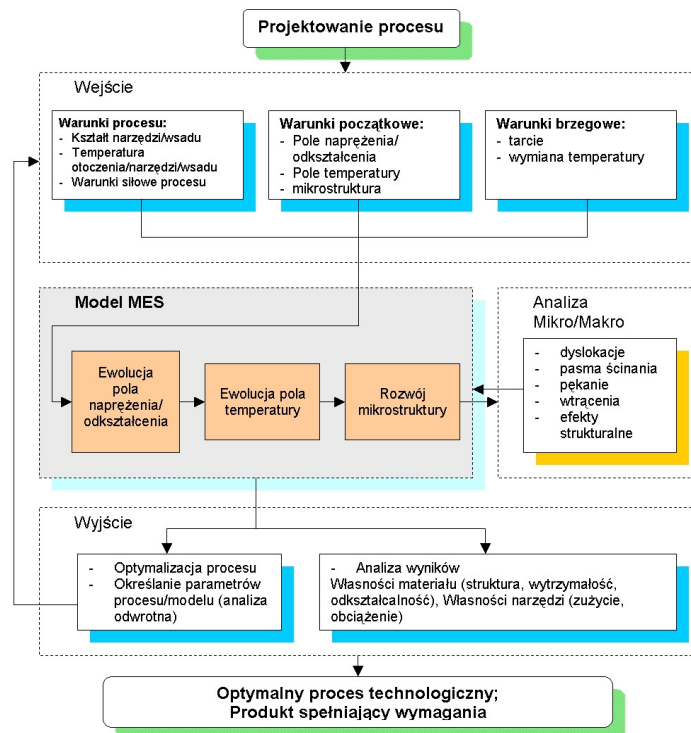
Cały rozwój metod modelowania numerycznego, którego początkiem było opracowanie hipotezy Treski w połowie XIX wieku, do niedawna nie miał odzwierciedlenia w zastosowaniu teorii plastyczności w przemyśle kuźniczym. Z początkiem lat dziewięćdziesiątych

ubiegłego wieku, wraz z gwałtownym rozwojem mocy obliczeniowej komputerów, metody numeryczne z zastosowaniem metody elementów skończonych zyskały odpowiedni grunt, którego efektem było pojawienie się pakietów komercyjnych programów do symulacji procesów kucia [2]. W kontekście aplikacji przemysłowych prawdziwą korzyścią jest nie tylko pomoc przy projektowaniu procesu, która eliminuje tym samym kosztowne próby technologiczne, lecz również zmniejszenie czasu odpowiedzi na zapytania i oferty. Zwiększa to możliwości poszerzenia asortymentu produkowanych odkuwek.

Współcześnie procedura projektowania nowych technologii, opierająca się głównie na kompleksowym modelowaniu komputerowym, zawiera wiele etapów, począwszy od wprowadzenia założonych parametrów procesu (na przykład kształtów, warunków, danych materiałowych, itd.), aż do analizy wyników przeprowadzanych symulacji (właściwości produktu, zużycia materiałów, energii, itd.), oraz optymalizacji w celu uzyskania jak najlepszego jakościowo produktu relatywnie niewielkim kosztem.

Schemat takiego podejścia zaprezentowany został na rysunku 1.

Zwykle oprogramowanie z zastosowaniem metody elementów skończonych zezwala na rozszerzenie dostępnych narzędzi o dodatkowe zewnętrzne procedury. Zawierać one mogą interesujące w danym etapie projektowania elementy takie jak analiza mikro/makro opisująca wpływ takich czynników jak efekty mikrostrukturalne na płynięcie metalu w czasie odkształcenia [4]. Kończącym etapem jest zwykle zastosowanie metod optymalizacji bazujących na algorytmie wstecznej propagacji. Takie podejście do projektowania procesów technologicznych ma wiele zalet, w tym skrócenie czasu samego projektowania jak i oszczędności w kosztach i materiałach (eliminacja procedury prób i błędów w warunkach przemysłowych). Co więcej, wśród parametrów, które mogą być optymalizowane znajduje się bardzo wiele elementów, począwszy od warunków procesu, kształtu narzędzi i wsadu, aż do końcowych właściwości produktu, które stanowią jedno z podstawowych kryteriów oceny.

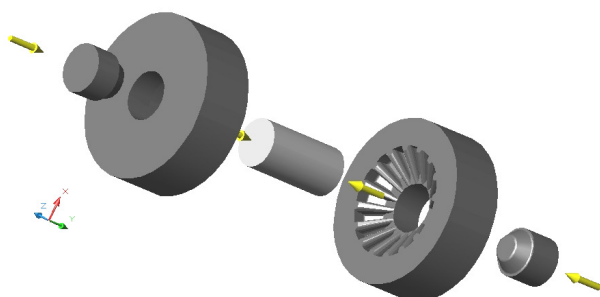


Rys. 1. Schemat blokowy zastosowań modelowania do kompleksowej analizy i projektowania procesów technologicznych w przetwórstwie metali [3]

Fig. 1. Flowchart of numerical modeling usage for complex analysis and design of technological processes in metal forming industry [3]

2. KUCIE PRECYZYJNE NA GORĄCO KOŁA ZĘBATEGO

Poniższy przykład dotyczy jednooperacyjnego kucia precyzyjnego stożkowego koła zębatego. Pożądanym efektem w tym procesie jest dokładne wypełnienie wykroju matrycy przy jednoczesnym minimalnym wydatku energetycznym. Do realizacji tego celu zastosowano układ narzędzi z dwoma stemplami (od góry i od dołu), tak jak pokazano to schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat narzędzi do kucia precyzyjnego stożkowego koła zębatego

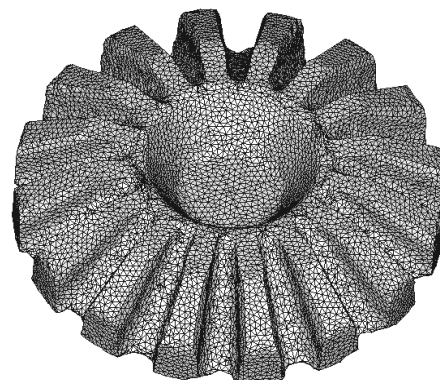
Fig. 2. Schematic view of dies for conical gear wheel precision forging

Produktem procesu jest odkuwka o kształcie stożkowego koła o 16 zębach, o średnicy zewnętrznej 100 mm i wysokości 45 mm. Kształt odkuwki (z naniesioną siatką elementów skończonych) przedstawiony został na rysunku 3a. Istotnym problemem w procesach kucia bezwypływkowego jest gwałtowny przyrost siły podczas końcowego etapu kucia, gdy niedokładnie dobrany jest rozmiar materiału wsadowego. Ma to duży wpływ na nadmierne zużycie matryc w związku z występowaniem dużych naprężeń średnich. Aby wyeliminować ten efekt stosuje się otwory technologiczne w dolnej matrycy celem wymuszenia powstania wypływki przy dolnej krawędzi zębów odkuwki tak jak pokazano to na rysunku 3b.

Przeanalizowane zostały cztery przykłady procesu dla różnych temperatur i kształtu matryc (kucie z wypływką i bez wypływki). Powszczególne warianty parametrów procesu zestawiono w tablicy 1. Oprócz tego przyjęto dla wszystkich wariantów: wysokość początkową wsadu $h_0 = 111,1$ mm, średnicę wsadu $d_0 = 22,2$ mm, współczynnik tarcia o wartości 0,3

oraz prędkości górnego i dolnego stempla 0,25 m/s.

a)



b)



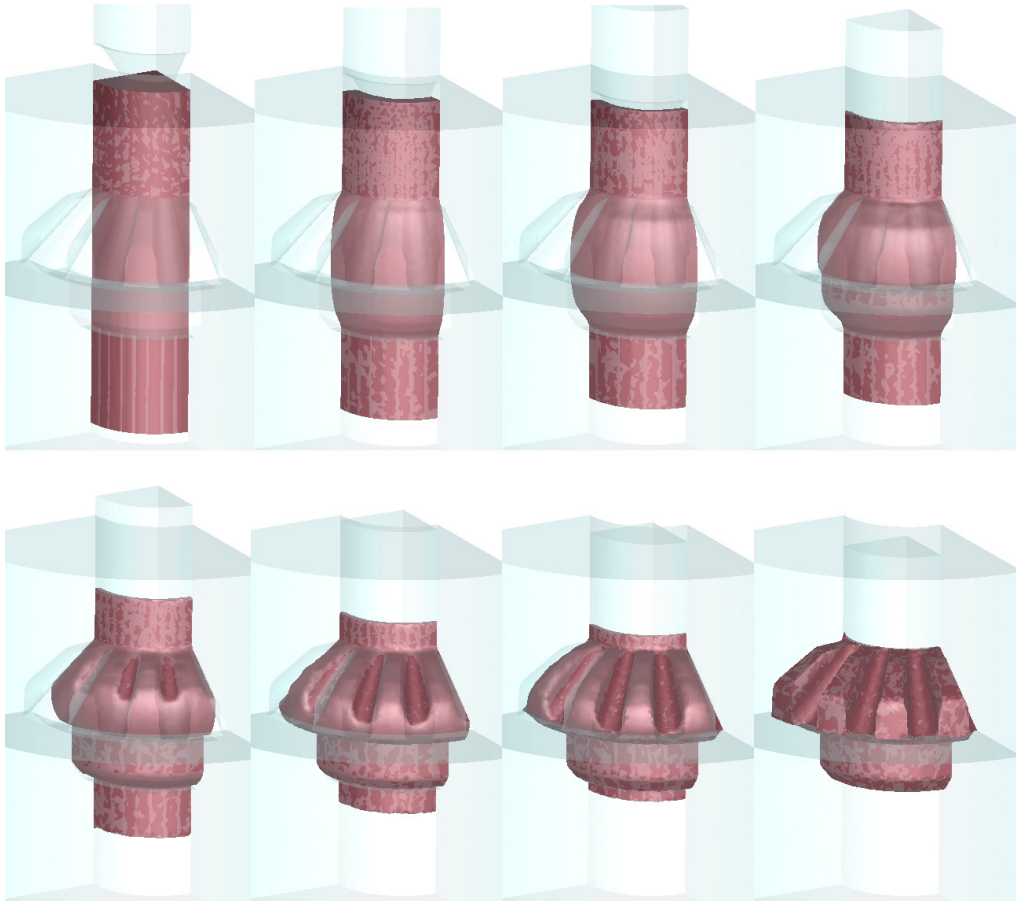
Rys. 3. Końcowy kształt odkuwki: a – otrzymany w wyniku symulacji metodą elementów skończonych (naniesiona siatka MES, kucie bez wypływki), b – fotografia podobnej odkuwki (z wypływką)

Fig. 3. Final forging shape: a – after finite element modeling (forging without flash), b – similar forging photo (forging with flash)

Tablica 1. Parametry przyjęte do obliczeń numerycznych procesu kucia koła zębatego

Table 1. Gear wheel forging process parameters used in simulations

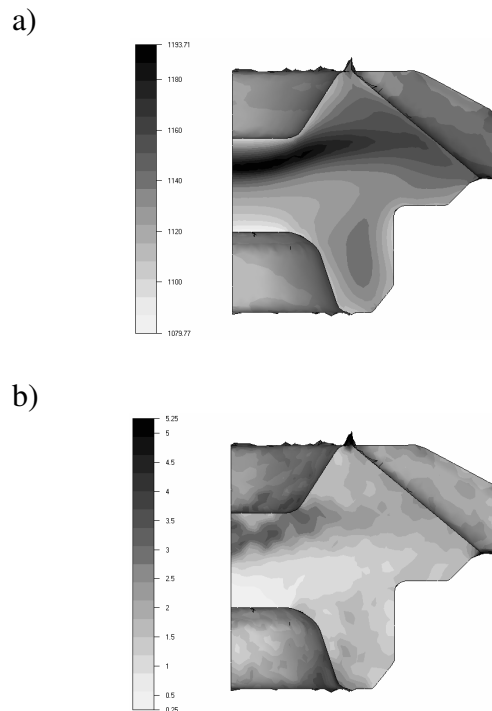
Wariant	Temperatura wsadu, °C	Temperatura narzędzi, °C	Wypływka
1	1100	800	Nie
2	300	150	
3	1100	800	Tak
4	300	150	

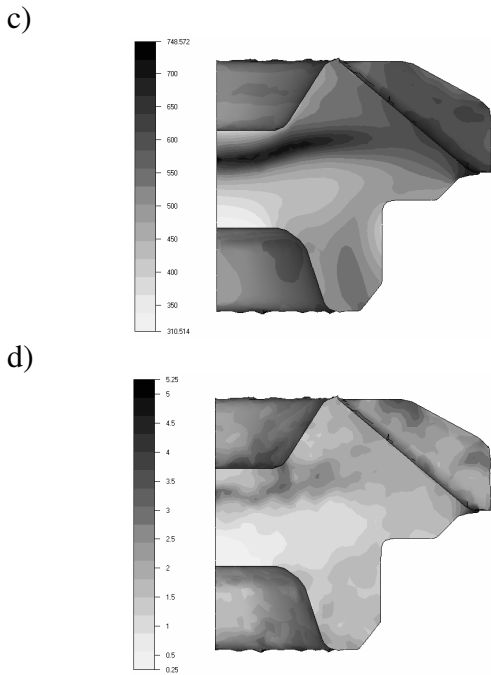


Rys. 4. Kształt odkuwki w kolejnych krokach procesu
 Fig. 4. The forging shape in subsequent process steps

Symulacje numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu FORGE3. Kształt materiału podczas formowania (matryce bez otworów na wypływkę) w poszczególnych chwilach procesu przedstawiony został na rysunku 4. Widoczny jest ruch narzędzi (stempli) oraz dokładne wypełnienie wykroju matrycy w końcowym etapie procesu. Zaobserwować również można niewielką wypływkę pojawiającą się przy krawędzi stempla w miejscu kontaktu z tuleją w matrycach, co związane jest z zapewnieniem odpowiedniego luzu technologicznego pomiędzy narzędziami.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady temperatury i odkształcenia w odkuwce, odpowiednio: rysunek 5a i 5b dla wsadu o temperaturze 1100 °C, rysunek 5c i 5d dla wsadu o temperaturze 300 °C.



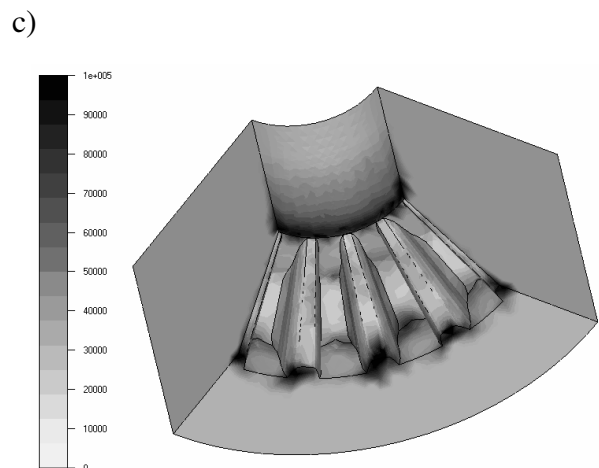
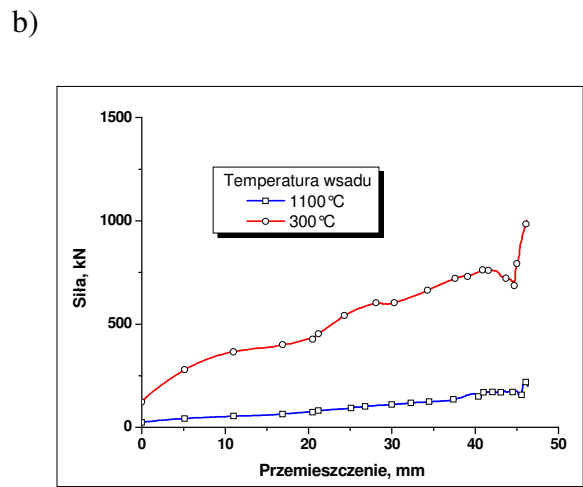
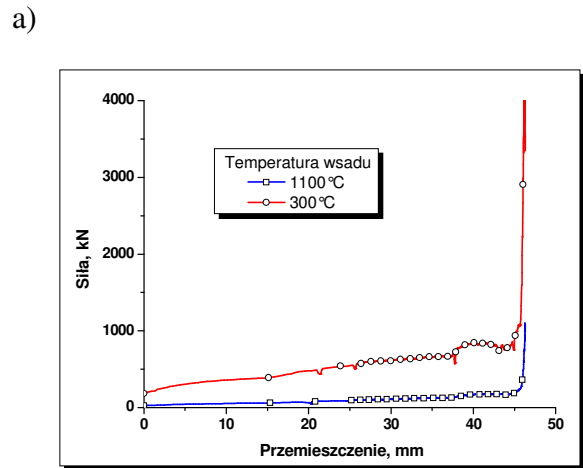


Rys. 5. Rozkłady temperatury (a i c) i odkształcenia (b i d) w odkuwce: a, b –wsad o temperaturze 1100°C, c, d – wsad o temperaturze 300°C

Fig. 5. Temperature (a and c) and strain distributions (b and d) in forging: a, b –ingot temperature 1100°C, c, d – ingot temperature 300°C

Jak wspomniano na wstępie, istotnym problemem w procesach kucia bezwypływkowego jest gwałtowny przyrost siły podczas końcowego etapu kucia. Powodem takiej sytuacji zwykle jest niezbyt dokładny dobór wymiarów materiału wsadowego. Sytuacja ta została dokładnie odzwierciedlona w wynikach symulacji komputerowej (rys. 6a). Po wprowadzeniu w matrycę, dodatkowych otworów na wypływkę, nastąpiła znaczna redukcja sił kucia (rys. 6b).

Występowanie znacznego przyrostu siły w końcowym etapie kucia ma niebagatelny wpływ na nadmierne zużycie matryc w związku z występowaniem dużych naprężeń średnich w materiale. Oprogramowanie komputerowe zezwala również na identyfikację obszarów na powierzchni narzędzi szczególnie narażonych na nadmierne zużycie podczas pracy w warunkach przemysłowych. Rysunek 6c pokazuje rozkład parametru określającego zużycie wykroju na przykładzie matrycy górnej. Obszary szczególnie narażone na uszkodzenia znajdują się przy krawędziach matrycy w pobliżu miejsc kontaktu z innymi narzędziami (matryca/matryca, matryca/stempel), oraz przy krawędziach zębów.



Rys. 6. Siły uzyskane podczas kucia w matrycy: a – bez wypływki, b – z wypływką, c – rozkład parametru określającego zużycie matrycy

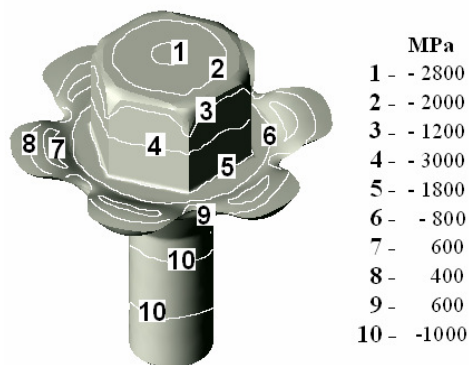
Fig. 6. Obtained forging loads for dies: a – without flash, b – with flash, c – die wear parameter distribution

3. MODELOWANIE KUCIA PRECYZYJNEGO NA ZIMNO

Przedmiotem modelowania jest proces kucia śruby z łbem sześciokątnym. W aktualnie stosowanej technologii kształt łba i trzonu uzyskiwany jest w trzech operacjach [5]. Po okrojeniu wypływki następują walcowanie gwintu (rys. 7). Kucie śruby odbywa się w matrycy otwartej, stąd w ostatnim etapie kształtowania łba powstaje wypływka, która mimo niewielkiej średnicy odkuwki osiąga grubość około 2 mm, stanowiąc znaczne straty materiałowe (rys. 9b).



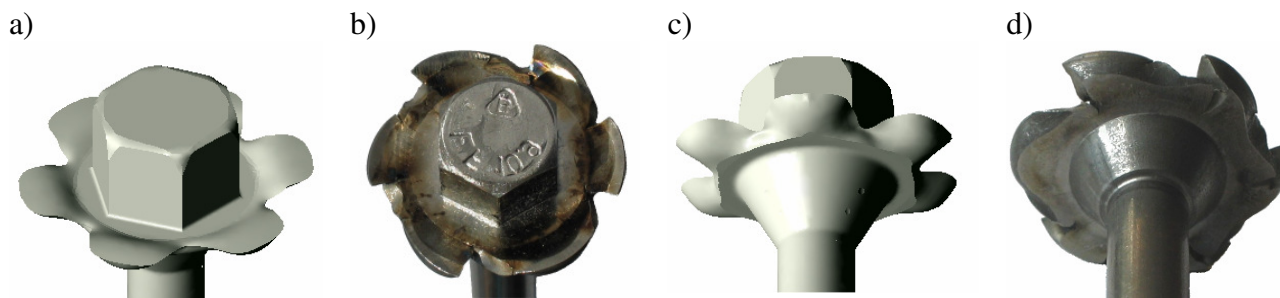
Rys. 7. Technologia kucia śrub sześciokątnych
Fig. 7. Hexagon-head bolts forging technology



Rys. 8. Rozkład naprężeń średnich
Fig. 8. Pressure distribution in forging

Ponadto przemieszczenie materiału względem powierzchni matrycy górnej podczas ścinania baryłkowej powierzchni powoduje szybkie zużywanie się krawędzi matrycy [6].

Powyższe niedoskonałości stosowanej technologii skłoniły do wprowadzenia zmian, które prócz podwyższenia żywotności narzędzi, umożliwią kucie bezwypływkowe. Ten problem rozwiązano przez zmianę kształtu przedkuwki. Kształt przedkuwki ustalono metodą modelowania numerycznego.



Rys. 9. Kształt łba śruby: a, c – model numeryczny, b, d – rzeczywisty
Fig. 9. Shape of bolt's head: a, c – numerical modeling, b, d – real

Tablica 2. Konstrukcje przedkuwek przyjęte do obliczeń numerycznych procesu kucia bezwypływkowego śruby
Table 2. Preforms dimensions used for calculations of bolt's forging

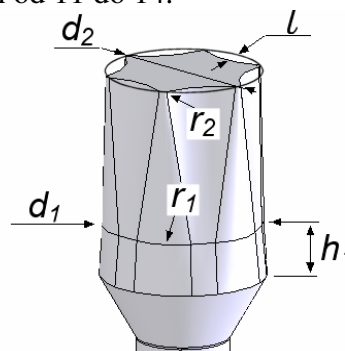
Wymiary	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
średnice przedkuwki	$d_2 = 0,8d$; $d_1 = 0,9d$	$d_2 = 0,88d$; $d_1 = 0,94d$	$d_2 = 0,5d$; $d_1 = 0,6d$	$d_2 = 0,55d$; $d_1 = 0,6d$
wysokość stożka	$h_1 = 0,5 h$	$h_1 = 0,2 h$	$h_1 = 0,3 h$	$h_1 = 0,3 h$
promienie zaokrąglenia	$r_1 = 0,3d$; $r_2 = 0,2r_1$	$r_1 = d_1$; $r_2 = 0,2r_1$	$r_1 = r_2 = 0,25d$	$r_1 = r_2 = 0,1d$

Obliczenia numeryczne wykonano programem komercyjnym QForm2D/3D. W celu stwierdzenia poprawności przyjętych warunków brzegowych [7] oraz zasadności metody modelowania, wykonano obliczenia numeryczne dla obecnie stosowanej technologii kucia śruby z wyplýwką. Stwierdzono zadowalające podobieństwo uzyskanych kształtów (rys. 9). Na rysunku 8 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład naprężeń średnich w łbie śruby w ostatnim etapie kucia z wyplýwką. Dodatnia wartość naprężeń występuje w obszarze pęknięcia wyplýwki. Kolejne etapy powstawania wyplýwki posłużyły do opracowania technologii kucia bezwyplýwkowego.

Zmianę kształtu przedkuwki przeprowadzono na podstawie analizy reologii płynięcia metalu w obszarze wyplýwki. Z uwagi, że największa objętość metalu przemieszcza się do wyplýwki w miejscach przy ścianach sześciokąta łba śruby, zaproponowano taki kształt przedkuwki, by całkowicie wyeliminować płynięcie metalu poza obszar ścian sześciokąta. Założono, iż odpowiednia kombinacja wymiarów i proporcji pochyleń części stożkowych oraz promieni zaokrągleń krawędzi i wklęśłości przedkuwki zapewni uzyskanie żądanej odkuwki z procesie kucia bezwyplýwkowego.

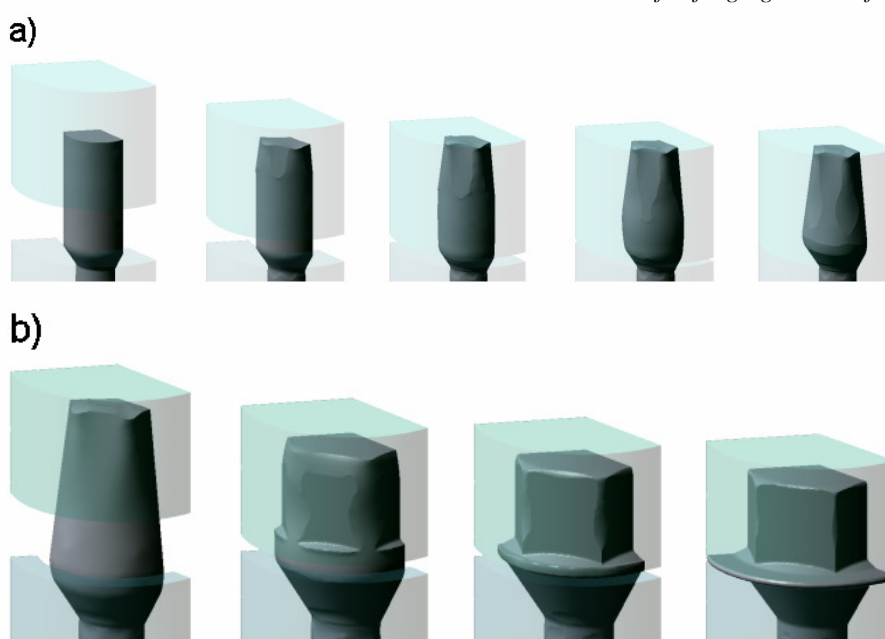
Przyjęto, że odpowiednie proporcje wymiarów przedkuwki (rys. 10), umożliwią wywołanie złożonego procesu spęczania i wyciskania w łbie śruby bez skłonności do płynięcia promieniowego poza obszar wykroju matrycy. Ponadto w ostatnim etapie procesu kształtowania łba śruby powinien dominować proces spęczania. Jest to warunek konieczny do zahamowania płynięcia metalu w rowek na wyplýwkę, bez nadmiernego zużycia krawędzi matrycy górnej [8]. Na podstawie powyższych założeń zaproponowano cztery warianty wymiarów przedkuwki (tablica 2). W kolejnych wariantach zmieniano proporcje średnic d_1 i d_2 , promieni r_1 i r_2 , wysokości h_1 i wklęślenia l .

Wyniki obliczeń numerycznych dla przyjętych konstrukcji przedkuwki przedstawiono na rysunkach od 11 do 14.

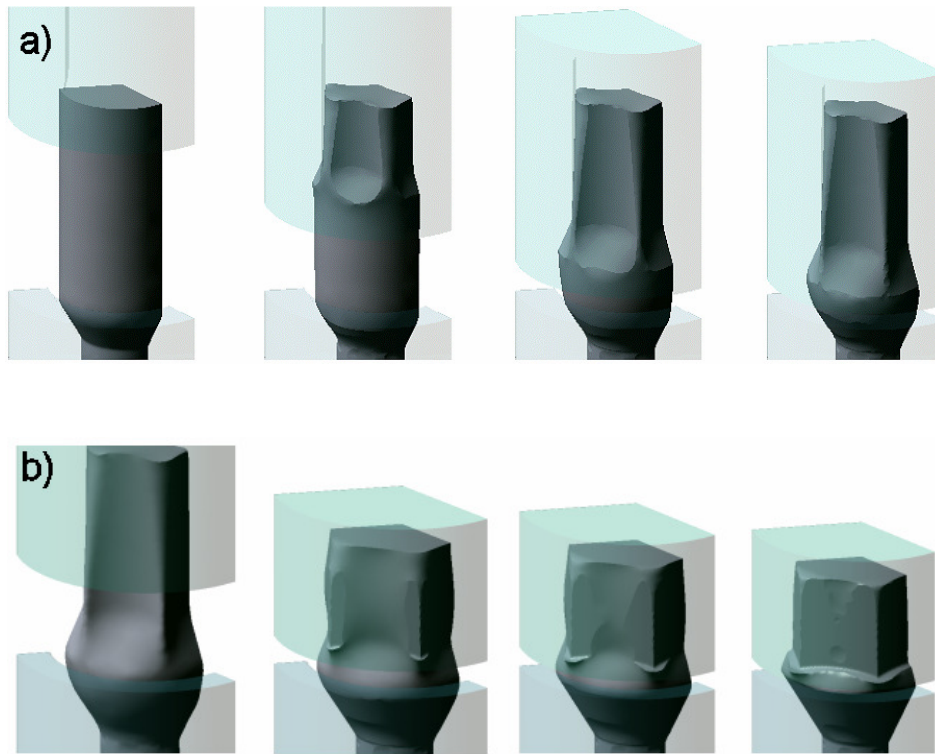


Rys. 10. Oznaczenie wymiarów charakterystycznych przedkuwki do kucia bezwyplýwkowego

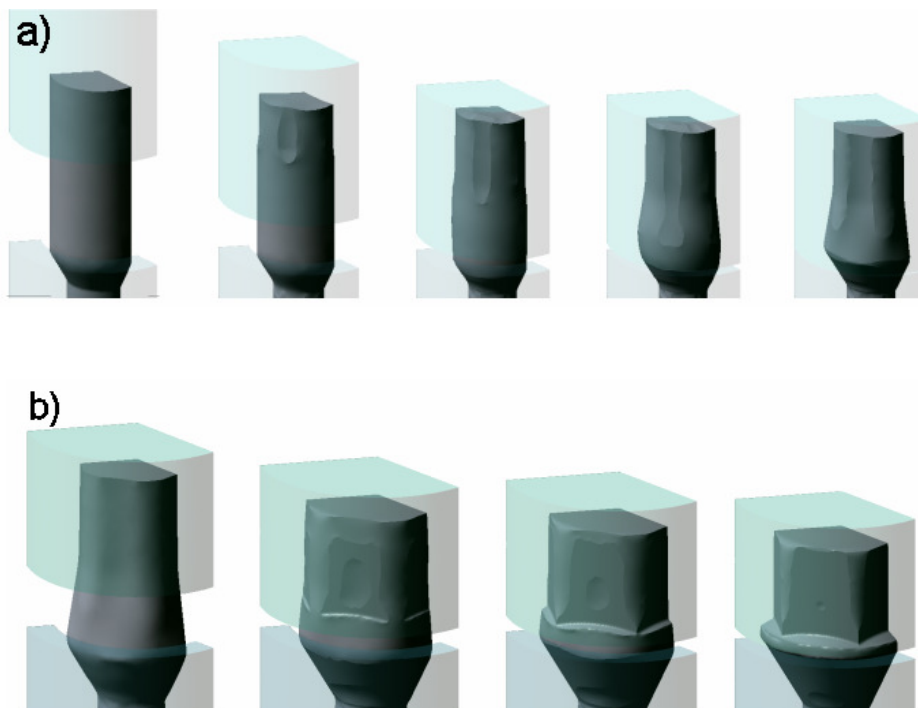
Fig. 10. Characteristic dimensions of preform for forging without flash



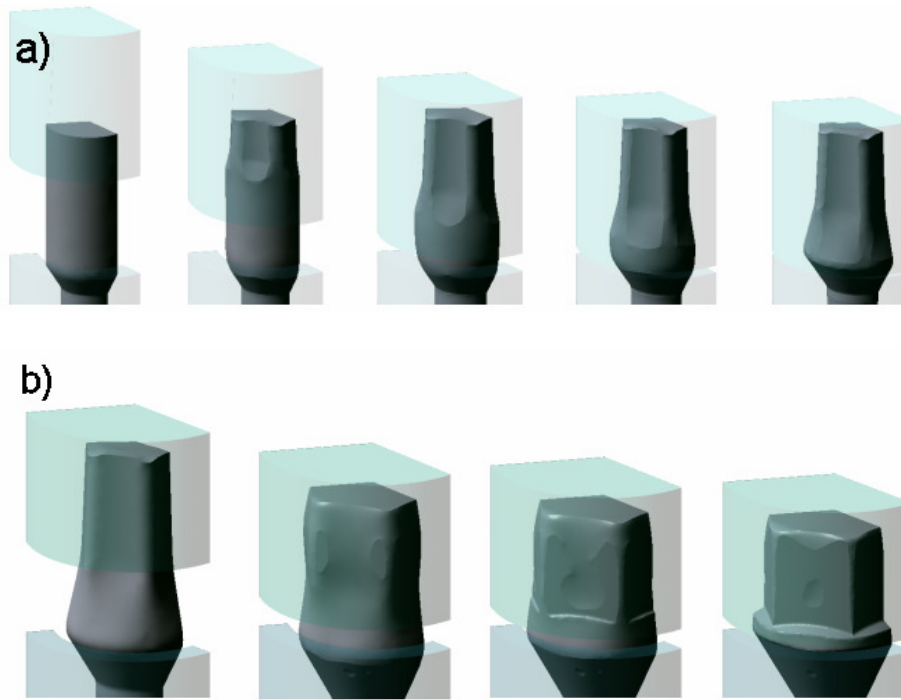
Rys. 11. Wariant 1: etapy wyciskania przedkuwki (a), matrycowania łba (b)
Fig. 11. Variant 1: preform extrusion (a) and head forging (b) subsequent steps



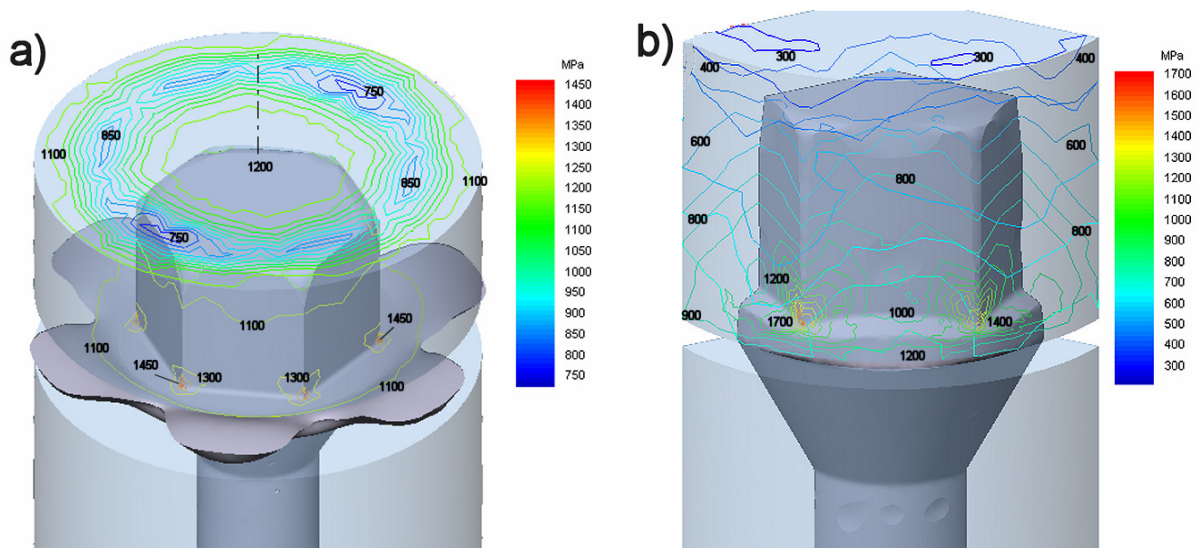
Rys. 12. Wariant 2: etapy wyciskania przedkuwki (a), matrycowania łba (b)
Fig. 12. Variant 2: preform extrusion (a) and head forging (b) subsequent steps



Rys. 13. Wariant 3: etapy wyciskania przedkuwki (a), matrycowania łba (b)
Fig. 13. Variant 3: preform extrusion (a) and head forging (b) subsequent steps

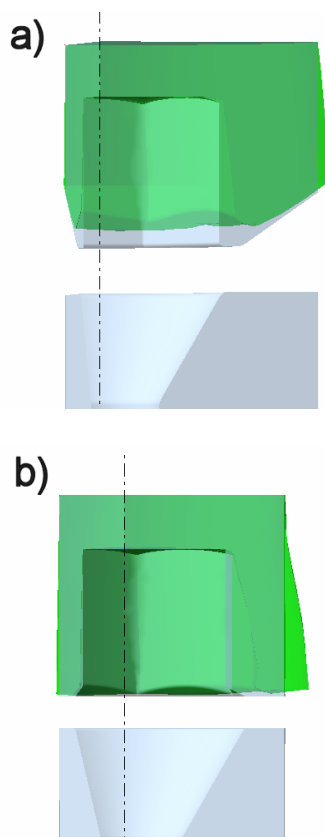


Rys. 14. Wariant 4: etapy wyciskania przedkuwki (a), matrycowania łba (b)
 Fig. 14. Variant 4: preform extrusion (a) and head forging (b) subsequent steps



Rys. 15. Rozkład intensywności naprężeń w matrycy górnej w ostatnim etapie kucia: a) z wypływką, b) bez wypływki
 Fig. 15. Stress distribution in upper die after last forging operation: a) forging with flash, b) forging without flash

Oprócz określenia schematu płynięcia materiału przy założonych kształtach narzędzi pozwalającego wyznaczyć optymalne parametry kształtu w poszczególnych etapach, jak również wyznaczenia rozkładów temperatury, naprężeń, odkształceń, przemieszczenia materiału w różnych obszarach i uwzględnienia odkształceń sprężystych przy modelowaniu numerycznym kucia na zimno, istotne jest określenie odkształcenia sprężystego matrycy. Ponieważ po kuciu łeb analizowanej śruby, podobnie jak wiele innych odkuwek drobnych kształtowanych na zimno, nie jest poddawany żadnej obróbce, musi mieścić się w wąskich tolerancjach wymiarowych. Precyzję kucia można prognozować obliczając odkształcenie sprężyste matrycy. Na rysunku 15 pokazano rozkład intensywności naprężeń w stemplu, a na rysunku 16, będące ich wynikiem, odkształcenie sprężyste narzędzi w ostatnim etapie kucia.



Rys. 16. Odkształcenie sprężyste matrycy górnej w ostatnim etapie kucia: a) z wypływką, b) bez wypływki. Skala 10:1

Fig. 16. Elastic deformation of upper die in 10:1 scale after last forging operation a) forging with flash, b) forging without flash

Przy kuciu bezwplywkowym stwierdzono wyższe naprężenia w matrycy górnej. Przekładają się one na większe odkształcenie sprężyste narzędzi, a przez to mniejszą dokładność wykonania łba śruby. Analiza obciążenia narzędzi podczas kucia wskazuje obszary matrycy, w których należy uwzględnić kompensację sprężystego ugięcia, a przez to uzyskanie wysokiej precyzji kucia.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki stanowią przykład wspomaganą komputerowo technologii projektowania ze szczególnym naciskiem na odpowiedni dobór warunków procesu wymaganych do uzyskania produktu wysokiej jakości (o oczekiwanym kształcie, bez konieczności dodatkowych zabiegów technologicznych), przy minimalnych kosztach (redukcja strat materiałowych). Rozważono przykład procesu kucia precyzyjnego na gorąco stożkowego koła zębatego oraz kucia precyzyjnego na zimno śruby o sześciokątnym łbie. Przeanalizowano odpowiedni dobór parametrów procesu i ich wpływ na efekt końcowy w postaci kształtu produktu (wypływka i wypełnienie matrycy przy kuciu śruby) oraz nakładów (wydatek energetyczny/siłowy oraz zużycie narzędzi w procesie kucia koła zębatego).

Obecnie dostępne programy do symulacji procesów kucia osiągnęły taki stopień zaawansowania, iż modelując sprężyste i cieplne zmiany wymiarów możliwa jest znaczna poprawa dokładności procesu kucia. Pozwala to bardziej zbliżyć się do finalnego kształtu wyrobu przy minimalnym zużyciu materiału. Mimo przedstawionych zalet obliczeń numerycznych, należy jednak pamiętać, że obliczenia w przestrzeni trójwymiarowej (3D) są ciągle jeszcze czasochłonne i mogą stanowić przeszkodę w szybkim procesie projektowania. Mimo wysokiej wiarygodności, programy do modelowania numerycznego nie zawsze w pełni mogą zastąpić tradycyjne metody projektowania technologii kucia, z których korzysta się określając parametry modeli geometrycznych do symulacji. Tradycyjne metody projektowania znajdują ciągle zastosowanie przy określaniu reologii i zachowania metalu podczas kucia

wyrobów, szczególnie z nowych materiałów, których charakterystyka nie jest w pełni znana.

LITERATURA

- [1] N. Biba, S. Stebounov, A. Lishiny: Cost effective implementation of forging simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) 34-39
- [2] A. N. Bramley, D. J. Mynors: The use of forging simulation tools. *Materials and Design* 21 (2000) 279-286
- [3] A. Żmudzki, S. Węglarczyk, T. Kondek, M. Pietrzyk, Numerical simulation of advanced metal processing, *Manufacturing systems development: industry expectations*, ed. Jerzy Jędrzejewski, *Machine Engineering*, Vol. 5, 3-4, 2005, 12-23.
- [4] M. Pietrzyk, Ł. Madej, A. Żmudzki, Komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa metali – analiza wieloskalowa, *Hutnik + Wiadomości Hutnicze*, 4, 2005, 238-246
- [5] W. L. Rudakov: Izgotovlenie boltov povyzhennoi prochnosti dlia rielsovych stikov železnogorożnogo puti. *Kuznecno-Stampovocnoe Proizvodstvo: obrabotka materialov davleniem*. Moskwa 2004 no. 3, 17–21
- [6] Y. Yung-Chang [i in.]: Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 82-91
- [7] M. Trzepak, J. Sińczak, P. Skubisz: Technologia bezwplywkowego kucia śrub z łbem sześciokątnym. Referaty laureatów XLII Sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego Akademii Górniczo-Hutniczej; STN. — Kraków: Wydawnictwo STN, 2005 (Zeszyty Studenckiego Towarzystwa Naukowego; nr 7). s. 277–284.
- [8] <http://www.qform3d.com/en/57.html> (24.04.2006)