

Modelowanie numeryczne procesu zużycia ściernego matryc do kucia na gorąco

Modeling of wear rate in hot forming dies

ZBIGNIEW GRONOSTAJSKI
SŁAWOMIR POLAK
JAKUB KRAWCZYK*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.5-6.198

Porównano rzeczywiste zużycie wkładek matrycowych, służących jako narzędzia do kucia na gorąco koła zębatego, z ich zużyciem wynikającym z analizy MES, w której posłużono się modelem zużycia ściernego Archarda. W celu określenia rzeczywistego zużycia wykorzystano laserowy skaner optyczny, którym zbadano stan powierzchni roboczej matryc po 4300 cyklach kucia.
SŁOWA KLUCZOWE: kucie, zużycie ściernie, modelowanie

Actual wear rate occurring to the gear wheel hot forging die inserts as determined by experiment is compared with that resulting from mathematical modeling (FEM) to the Archard's abrasive wear model. In order to determine real wear rate, working faces of the forging die inserts were inspected before and after 4300 forging cycles.

KEYWORDS: forging, abrasive wear, modeling

Mimo że wciąż pojawiają się nowe materiały narzędziowe i opracowuje się nowe metody inżynierii powierzchni, trwałość matryc rzadko przewyższa 20 000 odkuwek. Jak się szacuje, koszty narzędzi mogą obecnie stanowić nawet 8÷15% całkowitych kosztów produkcji. Jeśli zaś uwzględnimy czas potrzebny na wymianę zużytego oprzyrządowania oraz przypadki nieoczekiwane zniszczenia narzędzi, koszty te mogą wzrosnąć nawet do 30÷50% [1, 2].

Mechanizmy zużywania się matryc do kucia na gorąco

Zidentyfikowanie mechanizmów zużycia dla różnych procesów kucia oraz różnych stref na tej samej wkładce matrycowej następuje wiele problemów, ponieważ procesy te mają złożony charakter. Zakłada się jednak, że podstawowym mechanizmem niszczenia powierzchni roboczych wkładek matrycowych w procesach kucia jest zużycie ściernie – ok. 70% (pozostałe mechanizmy to odkształcenia plastyczne oraz zmęczenie cieplno-mechaniczne). Ze względu na dominujący wpływ zużycia ściernego na całkowite zniszczenie matryc podczas kucia, rozwiązanie tego zagadnienia jest kluczowe z punktu widzenia polepszenia trwałości narzędzi. W tym, a także w projektowaniu matryc o wyższej żywotności, może pomóc matematyczne modelowanie – oczywiście pod warunkiem dobrego doboru modeli [3, 4].

Do przewidywania wielkości zużycia ściernego stosuje się podstawowy lub zmodyfikowany model Archarda. Model ten został zaproponowany do określania zużycia miękkich materiałów w parze trącej, ale można się nim posłużyć również w przypadku materiałów twardych [5, 6].

Wykorzystanie metody elementów skończonych daje możliwość opisanie warunków, w jakich przebiegają procesy kucia, oraz prognozowania wielkości zużycia na podstawie dostępnych modeli numerycznych, przy czym bez porównania wyników MES z wynikami eksperymentalnymi nie ma pewności co do poprawności tych modeli. Celem pracy było

zweryfikowanie wielkości zużycia wynikającej z analizy MES, w której wykorzystano model Archarda (klasyczny – naprężenie normalne, model zużycia bazujący na pracy sił tarcia dla modelu tarcia Coulomba oraz SHEAR), przez jej porównanie z wielkością wyznaczoną eksperymentalnie [7].

Model zużycia ściernego opracowany przez Archarda

W celu predykcji zużycia z wykorzystaniem metody elementów skończonych zastosowano zaimplementowany w programie MSC.MARC bazowy model zużycia ściernego Archarda. Zgodnie z tym modelem zużycie w jednym cyklu opisane jest wzorem:

$$w(1) = \int \frac{k}{H} \sigma v_{rel} dt$$

a prędkość zużycia podczas kucia wynosi:

$$\dot{w}(1) = \frac{k}{H} \sigma v_{rel}$$

gdzie: w – wymiar zużycia [mm], k – bezwymiarowy współczynnik zużycia, H – twardość materiału matrycy [MPa], σ – naprężenie normalne [MPa], v_{rel} – prędkość względna tarcia [mm/s], t – czas.

Jeżeli zaś przyjmiemy, że twardość materiału podczas całego procesu nie ulega zmianie, a zależność wielkości zużycia w funkcji liczby cykli ma przebieg liniowy, to zużycie dla dowolnej liczby cykli kucia C można wyrazić za pomocą formuły:

$$w(C) = \sum_1^C \int \frac{k}{H} \sigma v_{rel} dt = C w(1)$$

Budowa modelu MES

Analizowany przemysłowy proces kucia na gorąco odkuwki koła czołowego jest wykonywany w kuźni Jawor S.A. jako proces składający się z trzech operacji:

- spęczania,
- kucia wstępnego,
- kucia wykończeniowego.

Proces jest realizowany na prasie korbowej o nacisku 2500 t, z prędkością 1 obr/s. Dzięki współpracy z kuźnią prowadzone są badania stanu narzędzi oraz ich zużycia dla różnej liczby wykonanych odkuwek. Dlatego możliwe jest również zidentyfikowanie zjawisk towarzyszących procesom zużywania się narzędzi.

Całkowite zużycie narzędzi po wykonaniu określonej liczby odkuwek określono na podstawie skanowania powierzchni roboczych za pomocą skanera optycznego GOM ATOS II. W wyniku otrzymano cyfrowe obrazy badanych obiektów w postaci chmury punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Dzięki programom do analizy obrazu można ocenić zmiany kształtu analizowanych powierzchni na dwa sposoby.

* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski (zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl), dr inż. Sławomir Polak (slawomir.polak@pwr.wroc.pl), mgr inż. Jakub Krawczyk (jakub.krawczyk@pwr.wroc.pl) – Politechnika Wroclawska

Pierwszy pozwala na porównanie zmian kształtu z modelem CAD, a drugi – na porównanie z zeskanowaną wcześniej powierzchnią narzędzia przed rozpoczęciem procesu kucia. Dla uniknięcia błędów wynikających z tolerancji matryc były one skanowane przed użyciem oraz po wykonaniu określonej liczby odkuwek. Na rys. 1 widać nierównomierne zużycie matryc. Pomiary i obserwacje wykazały, że najintensywniejsze zużycie, ograniczające trwałość, występuje dla operacji drugiej, tj. kucia wstępnego, dlatego ją wybrano do dalszej analizy. Zauważono, że po dłuższym czasie pracy oprócz zużycia ściernego widoczne są także efekty odkształceń plastycznych oraz zmęczenia cieplnego.

Dostarczona dokumentacja techniczna procesu kucia – zawierająca m.in. rysunki narzędzi, parametry prasy oraz zmierzone czasy kucia w poszczególnych operacjach – posłużyła do zbudowania w programie MSC.MARC modelu w osiowo-symetrycznym stanie odkształcenia. W modelu numerycznym założono, że narzędzia są odkształcalne. Zbudowane modele dla pierwszej i drugiej operacji kucia przedstawiono na rys. 2. Kuty materiał to stal 1.7147, a matryce wykonano ze stali o symbolu 1.4034, tj. stali narzędziowej do pracy na gorąco, obrabianej cieplnie i azotowanej. Dane materiałowe – tj. rozszerzalność cieplną, ciepło właściwe, przewodność cieplną, zależność przebiegu modułu Younga od temperatury, współczynnik Poissona (oprócz zależności naprężenia od odkształcenia, prędkości odkształcania i temperatury dla kęsa) – przyjęto z bazy materiałów MATILDA. Właściwości

materiału wstępniaka w stanie plastycznym wyznaczono w próbie spęczania, przeprowadzonej w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach na symulatorze GLEEBLE. Na podstawie wyników wstępnej symulacji MES określono, że prędkość odkształcania wsadu zmienia się od 0,1 do 100 s⁻¹, a temperatura – od 600 do 1200 °C. Badania na symulatorze prowadzono dla wartości temperatury 750, 850, 1050 i 1250 °C – przyjęto dla nich następujące prędkości odkształcania: 0,1; 1; 10; 100 s⁻¹. Matryce opisano sprężystym modelem materiału o module Younga równym 2×10^5 MPa.

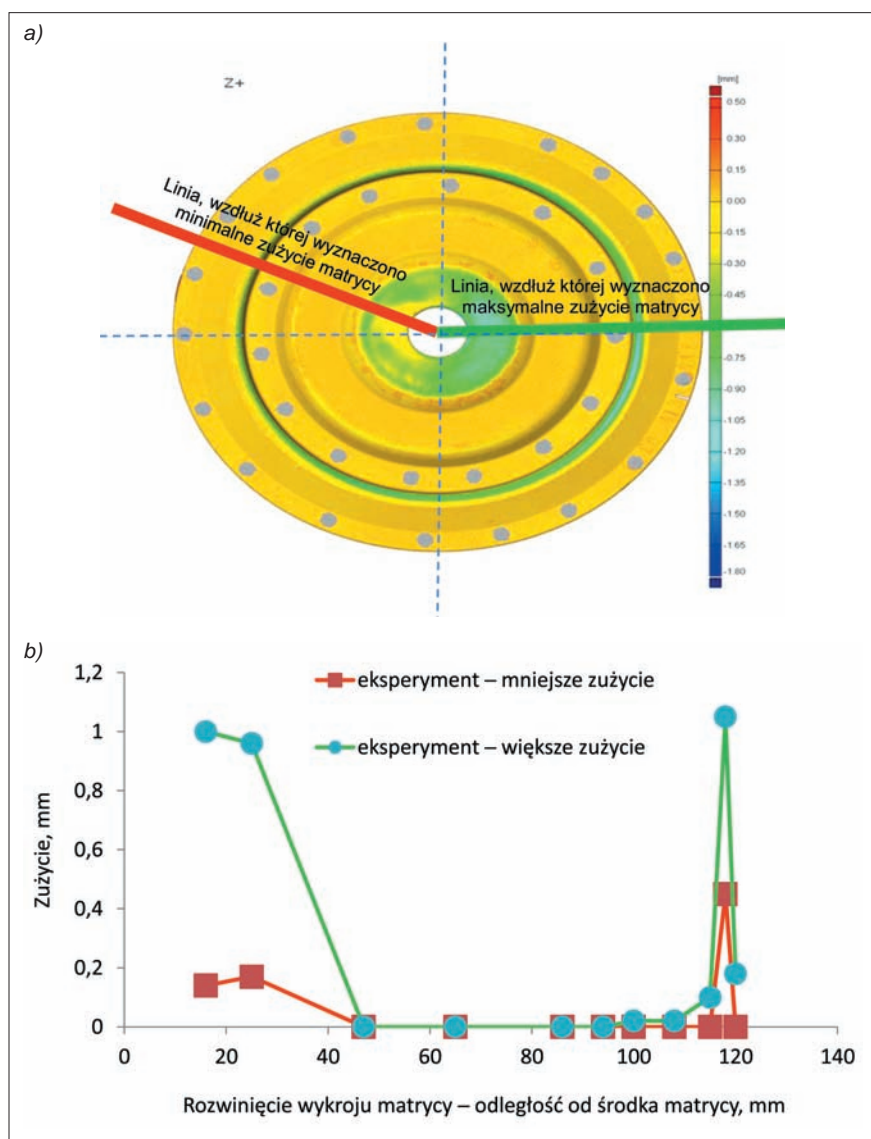
Temperaturę wstępniaka określono na 1160 °C, co wynikało z założeń technologicznych. Temperaturę narzędzi mierzono pirometrem (pomiar punktowy) oraz kamerą termowizyjną, dzięki czemu określono wartości temperatury w trakcie procesu kucia:

- 550 °C w pierwszej operacji,
- 250 °C w drugiej operacji,
- 270 °C w trzeciej operacji.

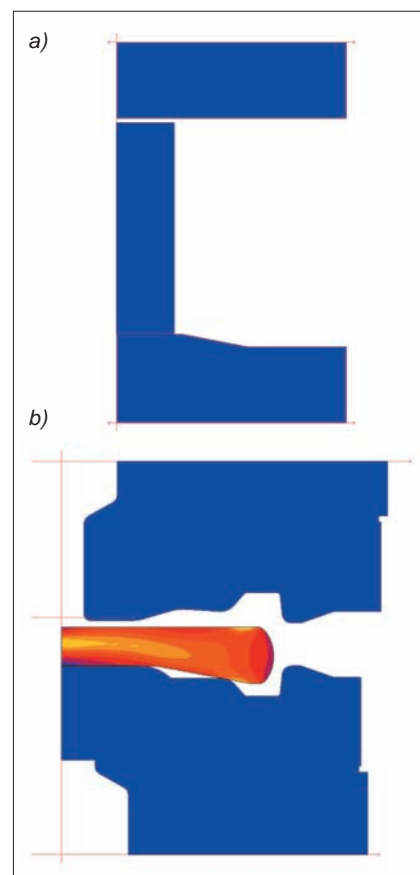
Czas kolejnych operacji wyznaczono za pośrednictwem aparatu CASIO, który umożliwia nagranie 300 klatek na sekundę. Zarejestrowany średni cykl kucia jednej odkuwki (w trzech operacjach) wynosił 12,5 s.

Współczynniki wymiany ciepła w kontakcie oraz z otoczeniem przyjęto odpowiednio: 25 000 i 35 W/m²K.

Analizowano m.in. wpływ modelu tarcia (również z uwzględnieniem pracy sił tarcia) na rozkład i wielkość zużycia narzędzi.



Rys. 1. Rozkład zużycia matrycy po odkuciu 4300 sztuk (a) oraz wyznaczone eksperymentalnie wartości minimalnego i maksymalnego zużycia wzdłuż linii zaznaczonych na rysunku (b)



Rys. 2. Modele procesu kucia: a) pierwszej operacji b) drugiej operacji

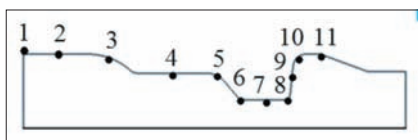
W symulacji posłużono się bilinearnym modelem tarcia typu SHEAR (o współczynniku tarcia 0,2) oraz modelem Coulomba (o identycznym współczynniku tarcia, tj. 0,2).

W modelu uwzględniono zmienną twardość materiału (patrz tablica) w poszczególnych obszarach przedstawionych na rys. 3.



TABLICA. Twardość matrycy w poszczególnych punktach pomiarowych dla narzędzi azotowanych po wykonaniu 1850 cykli

Obszar	Twardość HV
1	842
2	786
3	686
4	894
5	715
6	1177
7	1116
8	846
9	1080
10	692
11	692

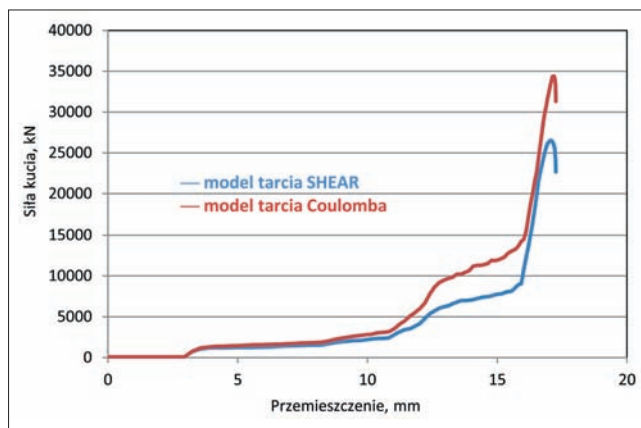


Rys. 3. Analizowane obszary matrycy, dla których wprowadzono twardość do modelu Archarda

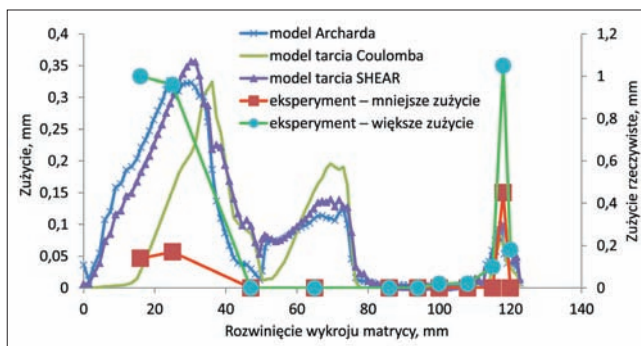
Wyniki badań

Porównanie kształtu odkuwek po pierwszej i drugiej operacji kucia przedstawiono na rys. 4. Na podstawie analizowanego rozkładu zanieczyszczeń na przekroju odkuwki oraz jej kształtu w kolejnych operacjach można stwierdzić, że opracowany model numeryczny procesu prawidłowo opisuje płynięcie materiału. Siła kucia w pierwszej operacji jest niewielka, natomiast w drugiej występuje pełne obciążenie prasy (rys. 5), co w przypadku modelu SHEAR jest zgodne z eksperymentem. Dla współczynnika tarcia 0,2 w modelu Coulomba siła przekracza o ok. 8000 kN możliwości rzeczywistej prasy.

Jednym z celów pracy było pokazanie problemów związanych z przyjętym modelem tarcia oraz jego wpływu na przewidywane zużycie matryc dla drugiej operacji kucia. Na rys. 6 przedstawiono wielkości przewidywanego zużycia dolnej matrycy w zależności od przyjętego modelu tarcia oraz rzeczywiste zużycie wzdłuż linii największego i najmniejszego zu-



Rys. 5. Siła kucia w drugiej operacji, wynikająca z analizy MES dla dwóch modeli tarcia

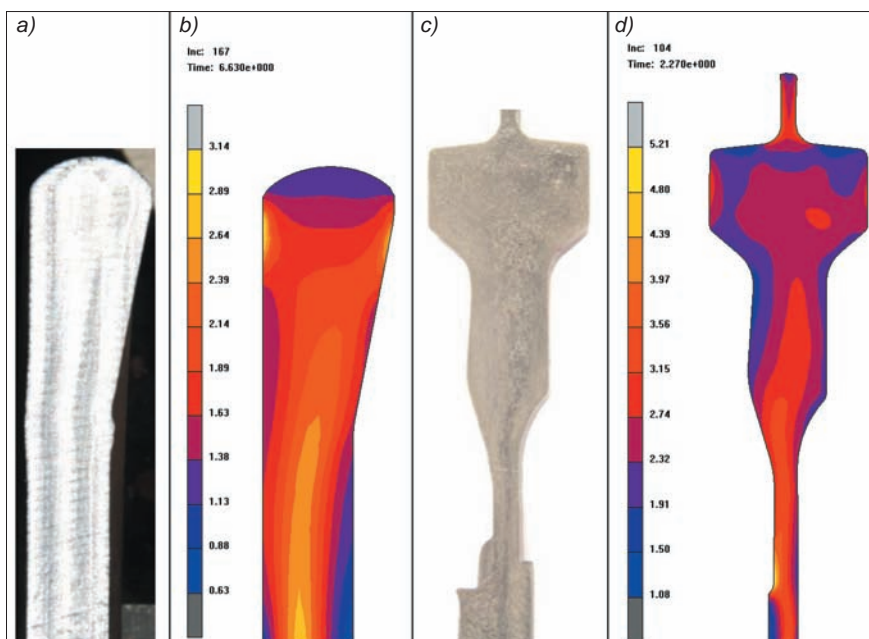


Rys. 6. Kształt przewidywanego zużycia matryc w zależności od przyjętych modeli zużycia i tarcia oraz wyniki eksperymentalne

życia. Zaobserwowano nieznaczne różnice między wynikami dla modelu zużycia Archarda i dla modelu zużycia uwzględniającego pracę sił tarcia z modelu SHEAR. Problem wynika głównie ze skalowania wielkości zużycia, co jest bezpośrednio związane z wyznaczaniem współczynnika zużycia. Z kolei model zużycia uwzględniający pracę sił tarcia z modelu Coulomba wykazuje największe różnice wartości w środkowej części matrycy. W przyjętych warunkach modelowania założono, że zużycie w każdym cyklu ma taką samą wartość.

Rzeczywiste zużycie (rys. 1) odbiegało kształtem od przewidywanego zużycia narzędzi, wynikającego z modelowania numerycznego. Rozbieżności pomiędzy modelowaniem a rzeczywistością spowodowały zainteresowanie się modelami bardziej rozbudowanymi (potęgowymi) – niestety, również one nie dość dokładnie opisują badany problem.

Analizując całą matrycę, można wyróżnić trzy obszary zużycia. Obszar pierwszy to część centralna matrycy, dla jej rozwinięcia od 0 do 50 mm, gdzie występuje największe zużycie – zarówno według MES, jak i w rzeczywistości. Dla tego obszaru wyniki uzyskane dla modelu numerycznego dobrze oddają rzeczywiste zużycie matrycy. W obszarze drugim – dla rozwinięcia matrycy od 50 do 80 mm – w analizie MES uzyskano zużycie znacznie większe niż rzeczywistość. W obszarze trzecim (mostka) – dla rozwinięcia matrycy od 110 do 120 mm – rzeczywiste zużycie jest porównywalne ze zużyciem w obszarze pierwszym, jednak w modelowaniu otrzymano znacznie mniejsze wartości.



Rys. 4. Odkuwki po kuciu: a) rozkład zanieczyszczeń – test Jacewicza po pierwszej operacji, b) rozkład odkształceń zastępczych po pierwszej operacji, c) rozkład zanieczyszczeń – test Jacewicza po drugiej operacji, d) rozkład odkształceń zastępczych po drugiej operacji

Przedstawione porównanie pokazuje, że model Archarda jest nieodpowiedni do prognozowania zużycia narzędzi w badanym procesie. Jako przyczyny można wymienić niedostosowanie modelu do analizy zużycia w procesach kucia lub wystąpienie innych niż zakładane mechanizmów zużycia.

Opisaną w artykule analizę przeprowadzono przy założeniu, że dominującym mechanizmem zużycia jest zużycie ściernie (przynajmniej dla niewielkiej liczby wykonanych odkuwek). Pomiary wskazują, że przyczyną tego jest wykruszenie się warstwy materiału. Wykruszone fragmenty mogą mieć formę dużych elementów ścierających powierzchnię matrycy, co zresztą sugerują bruzdy zaobserwowane na narzędziach. Wyniki pomiarów zużycia, wygląd powierzchni matryc oraz wyniki modelowania MES sugerują więc, że w zużyciu ściernym duże znaczenie mogą mieć zmęczenie cieplno-mechaniczne oraz wyrwane cząstki o dużych rozmiarach. Konieczne jest zatem szczegółowe zbadanie mechanizmów zużycia w rzeczywistych procesach kucia oraz poszukiwanie dla nich adekwatnych modeli.

Wnioski

- W pracy przedstawiono prognozę zużycia uzyskaną z wykorzystaniem klasycznego modelu zużycia Archarda oraz modeli bazujących na pracy sił tarcia dla modelu Coulomba i modelu SHEAR. Największe różnice w przebiegu zużycia wystąpiły w przypadku zastosowania modelu bazującego na pracy sił tarcia według modelu Coulomba.
- Dzięki wykorzystaniu informacji o maksymalnych wartościach sił w procesie kucia oraz o kształcie odkuwek po poszczególnych operacjach uzyskano dobrą zgodność modelu MES z rzeczywistością.
- Mimo że model matematyczny procesu kucia był poprawny, prognozowane wyniki dotyczące zużycia znacznie odbiegają rozkładem oraz wielkością od badań eksperymentalnych. Te

różnice z jednej strony wynikają z wpływu różnych mechanizmów zużycia, występujących od początku pracy matrycy, a z drugiej strony – z niedostatecznego dopasowania modelu Archarda do tak złożonego procesu zużycia narzędzi.

- Analiza przyczyn i zjawisk towarzyszących zużyciu matryc do kucia na gorąco pozwoli na opracowanie i optymalizację procesu kucia oraz kształtu, materiału i technologii wykonania matryc (z uwzględnieniem procesów obróbki cieplnej, cieplno-chemicznej itd.). Obecnie trwają zaawansowane badania makro- i mikrostrukturalne analizowanych narzędzi.

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki – projekt nr 2011/01/B/ST8/02056.

LITERATURA

1. Lavtar L. et al. "Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms". *Engineering Failure Analysis*. Vol. 18, Iss. 4 (2011): pp. 1143–1152. DOI:10.1016/j.engfailanal.2010.11.002.
2. Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Polak S., Zwierzchowski M. „Analiza procesu kucia obudowy przegubów homokinetycznych”. Raport wewnętrzny PWR, seria SPR 8. Wrocław 2008.
3. Kocańda A. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali”. W: *Informatyka w technologii metali*. Red. Piela A., Grosman F., Kusiak J., Pietrzyk M. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003: s. 213–256.
4. Gronostajski Z., Hawryluk M., Jaśkiewicz K., Niechajowicz A., Polak S., Walczak S., Woźniak A. "Application of physical and mathematical modelling to analysis of different forging processes of constant velocity joint body". *Computer Methods in Materials Sciences*. Vol. 7, No. 2 (2007): pp. 231–236.
5. Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Zwierzchowski M. "Analysis of forging process of constant velocity joint body". *Steel Research International*. Spec. ed. Vol. 1 (2008): pp. 547–554.
6. Archard J.F. "Contact and rubbing of flat surfaces". *Journal of Applied Physics*. Vol. 24 (1953): pp. 981–988.
7. Altan T. "Cold and hot forging. Fundamentals and application". Ohio: ASM International, 2005. ■