



Analiza zużycia wkładek do spęczania podczas kucia w warunkach przemysłowych

Wear analysis of upsetting inserts during forging under industrial conditions

(1) Zbigniew Gronostajski^{1*}, (2) Marcin Kaszuba¹, (3) Maciej Zwierzchowski¹, (4) Sławomir Polak¹,
(5) Bartłomiej Nowak²

¹ Politechnika Wrocławska, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

² Kuźnia Jawor S.A., ul. Kuziennicza 4, 59-400 Jawor, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 12.02.2015

Data recenzji: 4.02.2016

Data akceptacji: 22.03.2016

Wkład autorów

- (1) Koncepcja artykułu
- (2) Badania strukturalne
- (3) Badania zużycia
- (4) Opracowanie wyników
- (5) Nadzór nad badaniami eksperymentalnymi

Streszczenie

Intensywność zużycia narzędzi w procesach kucia na gorąco zależy głównie od warunków procesu oraz od materiału narzędzi. Duża ilość i różnorodność czynników wpływających na trwałość matryc oraz ich wzajemne oddziaływanie powoduje, że zagadnienie to jest bardzo trudne do analizy. W pracy opisano zjawiska zachodzące na powierzchni matryc do spęczania swobodnego na gorąco. Na skutek długotrwałej pracy narzędzia, niezależnie od ilości wytworzonych odkuwek, najbardziej intensywne zużycie zachodzi w miejscu najdłuższego kontaktu z kutym materiałem. Przeprowadzono analizę wymiarów za pomocą skanowania powierzchni roboczych narzędzi. Następnie z każdej matrycy pobrano wycinek do badań. Wybrane zostały charakterystyczne obszary na rozwinięciu profilu narzędzia wzdłuż promienia. W obszarach tych wykonano pomiar twardości oraz dokonano obserwacji mikrostruktury w warstwie wierzchniej, a także zmian powierzchni przy użyciu mikroskopu skaningowego. Niebezpiecznym sposobem zużycia narzędzi podczas kucia na gorąco jest odkształcenie plastyczne oraz zmęczenie cieplno-mechaniczne, które prowadzi do powstania małych pęknięć. Dalszy ich rozwój, uwarunkowany parametrami procesu, interakcją między matrycą a odkuwką, prędkością płynięcia materiału, prowadzi najczęściej do powstania wtórnej siatki pęknięć na całej powierzchni kontaktu. W świetle badań, ogólnie przyjęty pogląd, że dominującym mechanizmem zniszczenia matryc w procesie kucia na gorąco jest zużycie ściernie, jest dyskusyjny. Wykazano, że mechanizmy takie, jak: cieplno-mechaniczne pękanie, zużycie ściernie oraz odkształcenia plastyczne występują równocześnie od samego początku procesu i mogą być (w danych warunkach) mniej lub bardziej intensywne.

Słowa kluczowe: zużycie, kucie, trwałość narzędzi

Article info

Received: 12.02.2015

Reviewed: 4.02.2016

Accepted: 22.03.2016

Authors' contribution

- (1) The concept of the article
- (2) Structural research
- (3) Wearing tests
- (4) Development of results
- (5) Supervision of experimental research

Abstract

The intensity of tool wear in hot forging processes mainly depends on the conditions of the process and on the material from which a tool is made. The large number and variety of factors having an impact on die lifetime and their mutual interaction makes this a problem that is very difficult to analyze. This paper describes phenomena occurring on the surface of dies for hot open die upset forging. As an effect of long-term tool work, regardless of the number of produced forgings, the most intensive wear takes place at the point of longest contact with the forged material. Analysis of dimensions was conducted by scanning of tools' working surfaces. Next, a slice was collected for testing from each die. Characteristic areas were selected on the development of the tool's profile along its radius. Hardness measurement was performed in these areas, and the microstructure in the surface layer and changes in the surface were examined under a scanning electron microscope. Plastic defor-

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 71 320 21 73; Fax: +48 71 320 34 22; e-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 71 320 21 73; Fax: +48 71 320 34 22; e-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.wroc.pl

mation and thermomechanical fatigue are dangerous tool wear mechanisms during hot forging, which lead to the formation of small cracks. The further development of these cracks, conditioned by process parameters, interaction between the die and forging, and material flow rate, most often leads to the formation of a secondary network of cracks on the entire contact surface. In light of this study, the generally accepted view that the dominant mechanism of die destruction in hot forging processes is abrasive wear is called into question. It is shown that mechanisms such as: thermomechanical cracking, abrasive wear, and plastic deformations occur simultaneously from the very beginning of the process and may be (under specific conditions) of greater or lesser intensity.

Keywords: wear, forging, tool life.

1. WPROWADZENIE

Intensywność zużycia narzędzi w procesach kucia na gorąco zależy głównie od warunków, w jakich przebiega proces kucia, właściwości zastosowanego materiału i jakości wykonania narzędzi. Duża liczba czynników wpływających na trwałość matryc oraz ich wzajemne oddziaływanie powoduje, że zagadnienie to jest trudne do analizy. Prowadzone dotychczas badania wskazują, że w warstwie wierzchniej matryc występują następujące mechanizmy zużycia [1–3]:

- zużycie cierne, które jest wynikiem ubytku materiału, głównie poprzez oddzielenie się cząstek materiału z powierzchni (proces występuje, gdy w obszarach współpracujących elementów znajdują się luźne lub utwierdzone cząstki ścierniwa albo wystające nierówności twardszego materiału);
- zmęczenie cieplno-mechaniczne, w którym miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału są spowodowane zmęczeniem materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania naprężeń i temperatury w warstwach wierzchnich matryc (w obszarach spiętrzenia naprężeń tworzą się zmęczeniowe mikropęknięcia powierzchniowe, przechodzące następnie w makropęknięcia);
- zużycie adhezyjne występujące w mikroobszarach plastycznego odkształcenia warstwy wierzchniej, zwłaszcza w najwyższych wierzchołkach chropowatości (powstają wówczas lokalne szczipienia metaliczne powierzchni trących i niszczenie połączeń z odrywaniem cząstek metalu lub jego rozmazywaniem na powierzchniach tarcia);
- zużycie przez utlenianie będące procesem niszczenia warstwy wierzchniej elementów

1. INTRODUCTION

The intensity of tool wear in hot forging processes mainly depends on the conditions under which the forging process takes place, the properties of the applied material, and the quality of tool manufacturing. The large number of factors having an impact on die lifetime and their mutual interaction makes this a problem that is very difficult to analyze. Research conducted until now indicate that the following wear mechanisms take place in the surface layer of dies [1–3]:

- *abrasive wear, which is the result of the loss of material, mainly through the separation of particles of the material from the surface (this process occurs when loose or fixed particles of abrasive or protruding irregularities of harder material are found in the inter-operating areas of components);*
- *thermomechanical fatigue, in which local loss of cohesion and the material losses related to it are caused by material fatigue as a result of the cyclic action of stresses and temperatures in dies' surface layers (fatigue microcracks form on the surface in stress concentration areas and then become macrocracks);*
- *adhesive wear occurs in micro-areas of plastic deformation on the surface layer, particularly at the highest coarseness peaks (local metallic adhesions are formed between friction surfaces, and these adhesions are destroyed as metal particles are detached or spread over friction surfaces);*
- *oxidation wear is the process of destruction of the surface layer of metallic components as*

metalowych wskutek oddzielenia warstewek tlenków (ten rodzaj zużycia występuje wtedy, gdy intensywność tworzenia warstewek tlenków jest większa od intensywności niszczenia powierzchni przez ścieranie);

- zjawisko niszczące, jakim jest odkształcenie trwale wykrojów matryc i stempli, spowodowane przekroczeniem granicy plastyczności materiału [4–6].

Wpływ wymienionych czynników na trwałość matryc jest na ogół analizowany oddzielnie. Nie ma dokładnego opisu procesu zużycia uwzględniającego wszystkie zjawiska, gdyż ich intensywność zmienia się wraz ze zmianą parametrów procesu. Celem pracy było określenie podstawowych przyczyn zużycia matryc w operacji spęczania w procesie kucia matrycowego wielowykrojowego na gorąco odkuwki koła czołowego [7–9].

2. METODYKA BADAŃ

2.1. Opis procesu

Analizowany proces realizowany był na prasie korbowej o maksymalnej sile nacisku 25 MN w trzech operacjach: pierwszą było spęczanie, drugą kucie matrycowe wstępne, trzecią kucie wykańczające. Materiałem odkuwki była stal QS1920S0, odpowiednik stali 20HG. Materiał wsadowy miał kształt walca o średnicy $\varnothing 75$ mm i długości 138 mm. Wsad nagrzewany był nagrzewnicą indukcyjną do temperatury 1150–1180°C (temperatura kucia). Początkowa temperatura narzędzi wynosiła około 250°C. Potwierdziły to badania termowizyjne, jednakże ze względu na brak układu chłodzenia i smarowania w operacji spęczania temperatura narzędzi była wyższa i wynosiła około 550°C. Narzędzia nagrzewano do tej temperatury za pomocą gorącego materiału wsadowego ok. 1–1,5 godz. Odkuwki pomiędzy operacjami przenoszone były ręcznie; czas jednego cyklu wynosił 14–17 sekund.

Narzędzia wykonane ze stali WCLV (1.2344) poddawane były standardowej obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu i podwójnym odpuszczaniu. Dodatkowo narzędzia do drugiej i trzeciej operacji, po obróbce cieplnej, poddawano

a result of separation of oxide layers. This type of wear occurs when the intensity of oxide layer formation is greater than the intensity of surface destruction by abrasion.

- *another destructive phenomenon is permanent deformation of die impressions and punches, caused by exceedance of the material's yield point [4–6].*

The influence of the aforementioned factors on die lifetime is generally analyzed separately. There is no precise description of the wear process that would account for all phenomena, since their intensity changes as process parameters change. The objective of this study was to determine the basic causes of die wear in upset forging operations in the process of hot multiple-impression die forging of a face wheel [7–9].

2. RESEARCH METHODOLOGY

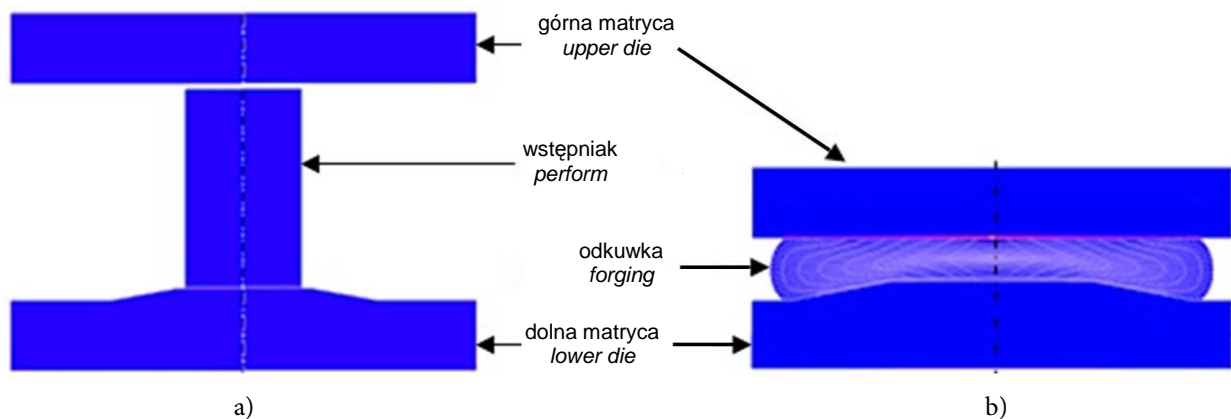
2.1. Description of the process

The analyzed process was performed on a crank press with a maximum pressing force of 25 MN in three operations: the first was upset forging, the second was preliminary die forging (roughing), and the third was finish forging. The material of the forging was QS1920S0 steel, the counterpart of 20HG steel. The stock material had a cylindrical shape with a diameter of $\varnothing 75$ mm and length of 138 mm. The stock was heated by an induction heater to a temperature of 1150–1180°C (forging temperature). The initial temperature of tools was approx. 250°C. This was confirmed by thermovisual tests, however, due to the lack of cooling and lubrication in the upset forging operation, the temperature of tools was higher, amounting to approx. 550°C. Tools were heated to this temperature by means of hot stock material for approx. 1–1.5 hours. Forging were transferred between operations manually; the time of a single cycle was 14–17 seconds.

Tools made of WCLV steel (1.2344) were subjected to standard heat treatment, based on hardening and double tempering. In addition, tools after the second and third operation, and after heat treatment, were subjected to nitri-

azotowaniu na twardość 1100–1200 HV; grubość warstwy azotowanej wynosiła około 0,2 mm. Średnie trwałości narzędzi w poszczególnych operacjach wynosiły: operacja I – około 30 000 szt. odkuwek, II – około 10 000 szt., III – 20 000 szt. Ocenie poddano zużycie narzędzia stosowanego w pierwszej operacji kucia (spęczanie). Na rys. 1 przedstawiono podglądowy schemat tej operacji.

ding to a hardness of 1100–1200 HV; the thickness of the nitrided layer was approx. 0.2 mm. Average tool lifetimes in individual operations were as follows: operation I – approx. 30,000 pcs. of forgings, II – approx. 10,000 pcs., III – 20,000 pcs. The wear of the tool used in the first forging operation (upsetting) was assessed. Fig. 1 shows a pictorial scheme of this operation

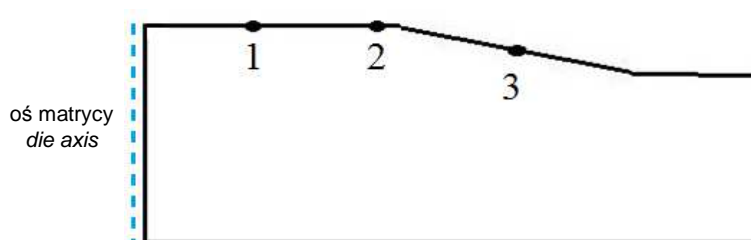


Rys. 1. Schemat operacji spęczania: a) przed kuciem, b) po kuciu

Fig. 1. Scheme of upsetting operation: a) before forging, b) after forging

W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację numeryczną procesu w celu określenia istotnych obciążeń cieplno-mechanicznych narzędzi. Następnie do badań wytypowano narzędzia po odkuciu 550, 6900, 9000 odkuwek. Dla narzędzi tych przeprowadzono analizę wymiarów metodą skanowania powierzchni roboczych narzędzi. Następnie wybrane zostały charakterystyczne obszary na profilu narzędzia, wzdłuż promienia (rys. 2). W tych miejscach wykonano pomiar twardości, a także dokonano obserwacji zmian na powierzchni oraz mikrostruktury warstwy wierzchniej przy pomocy mikroskopu skaningowego.

First, numerical simulation of the process was conducted in order to determine significant thermomechanical tool loads. Next, tools were selected for tests after forging of 550, 6900, and 9000 forgings. The dimensions of these tools were analyzed by scanning of their working surfaces. Next, characteristic areas were selected on the tool's profile along its radius (Fig. 2). Hardness was measured in these areas, and changes on the surface as well as the microstructure of the surface layer were examined under a scanning electron microscope.



Rys. 2. Przekrój matrycy z zaznaczonymi obszarami oceny mechanizmów zużycia

Fig. 2. Die cross-section with marked areas of assessment of wear mechanisms

3. WYNIKI BADAŃ

3.1 Symulacja numeryczna

Symulacja numeryczna procesu kucia koła czołowego została wykonana przy użyciu najnowszego oprogramowania MSC.MARC. Analizowana pierwsza operacja kucia została zamodelowana w osiowosymetrycznym stanie odkształcenia dla najbardziej złożonego modelu termomechanicznego z odkształcalnymi narzędziami. Geometria narzędzi oraz wstępniaka, a także pozostałe parametry technologiczne procesu zostały zaimplementowane do programu na podstawie oryginalnych modeli CAD i kart technologicznych dostarczonych przez Kuźnię Jawor S.A. Parametry geometryczne prasy korbowej oraz prędkość ruchu stempla, która jest zależna od położenia kąтового prasy, zostały przyjęte zgodnie z dokumentacją techniczną. Dane materiałowe materiału odkuwki i narzędzi zostały przyjęte z bazy materiałów Matilda. Zastosowano bilinearny model tarcia SHEAR, współczynniki tarcia między matrycami a materiałem odkształcanym przyjęte 0,4.

Analizę matrycy przy użyciu MES przeprowadzono w celu określenia rozkładu temperatury na matrycy oraz nacisków jednostkowych, gdyż – jak wiadomo – mają one decydujący wpływ na trwałość narzędzi.

Największe wartości temperatury (około 750°C) występują w miejscach najdłuższego kontaktu z gorącym kształtowanym materiałem (obszar 1). W pozostałych obszarach temperatura powierzchni roboczej matrycy jest znacznie niższa (rys. 3).

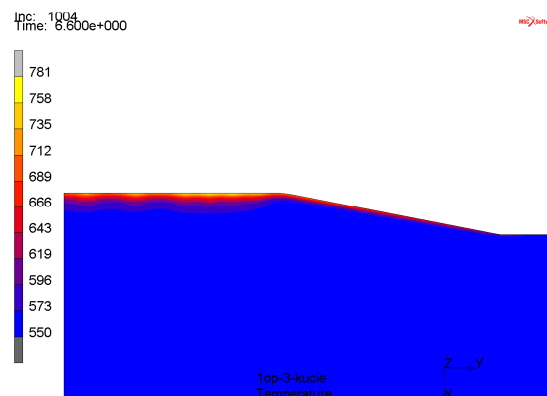
3. TEST RESULTS

3.1 Numerical simulation

Numerical simulation of the face wheel forging process was conducted using the latest MSC.MARC software. The first forging operation was modeled in an axially symmetrical deformation state for the most complex thermo-mechanical model with deformable tools. The geometry of the tools and the initial material, as well as the remaining technological parameters of the process were entered into the program on the basis of original CAD models and data sheets provided by Kuźnia Jawor S.A. The geometric parameters of the crank press and the speed of the punch's motion, which depends on the angular orientation of the press crankshaft, were adopted according to the technical documentation. The data of the material of the forging and tools was taken from the Matilda materials base. The SHEAR bilinear friction model was applied, and friction coefficients between dies and the deformed material were accepted to be 0.4.

FEM die analysis was conducted in order to determine: temperature distribution on the die and unit pressures, since it is known that they have a decisive influence on tool life.

The highest temperature values (approx. 750°C) occur at the points of longest contact with the hot material that is formed (area 1). In other areas, the temperature of the die's working surface is significantly lower (Fig. 3).

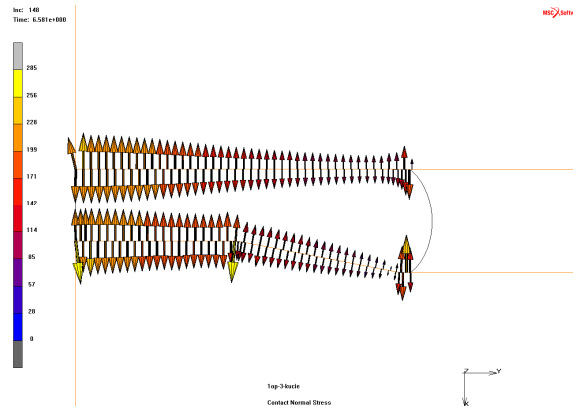


Rys. 3. Rozkład pola temperatury dla matrycy, powiększenie części łukowej matrycy

Fig. 3. Distribution of thermal fields on the die, enlargement of the die's arc section

Na rys. 4 przedstawiono rozkład maksymalnych nacisków jednostkowych na powierzchni matrycy. Widać wyraźnie, że najbardziej obciążona jest powierzchnia w pierwszym obszarze. Naciski w tym miejscu osiągają wartość ponad 280 MPa. Najmniejsze naciski występują w obszarze 3.

Fig. 4 presents the distribution of maximum unit pressures on the die's surface. It can clearly be seen that the surface in the first area is subjected to the greatest load. Pressures in this area reach a value of over 280 MPa. The lowest pressures are present in area 3.



Rys. 4. Rozkład maksymalnych nacisków jednostkowych na matrycy

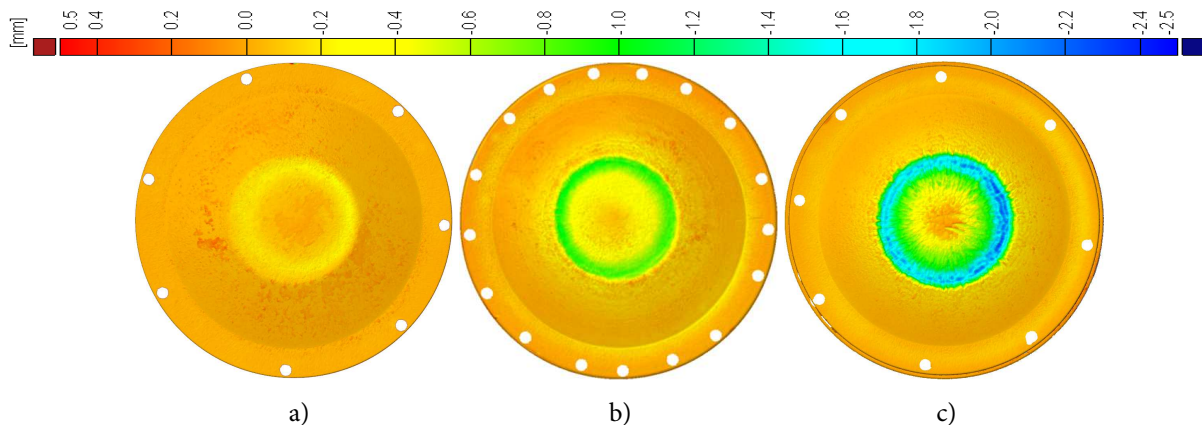
Fig. 4. Distribution of maximum unit pressures on the die

3.2. Skanowanie narzędzi

Do określenia zużycia narzędzi w poszczególnych obszarach użyto skanera optycznego ATOS GOM 3. Matryce zostały zeskanowane przed i po procesie kucia. Wyniki skanowania przedstawiono w postaci kolorowych map z zaznaczonymi odchyłkami względem wymiaru nominalnego, przed pracą (rys. 5). Dokładność zastosowanej metody pomiarowej wynosiła 0,05 mm.

3.2. Tool scanning

An ATOS GOM 3 optical scanner was used to determine tool wear in individual areas. Dies were scanned before and after the forging process. Scanning results have been presented in the form of color maps with marked deviations from the nominal dimensions, before work (Fig. 5). The accuracy of the applied method of measurement was 0.05 mm.



Rys. 5. Skany narzędzia obrazujące zużycie narzędzi po odkuciu: a) 550 szt., b) 6900 szt. oraz c) 9000 szt. odkuwek koła czołowego

Fig. 5. Tool scans imaging tool wear after forging of: a) 550 pcs., b) 6900 pcs. and c) 9000 pcs. of face wheel forgings

Niezależnie od liczby odkutych sztuk, największe zużycie we wszystkich matrycach występowało na powierzchni czołowej w obszarze 2 (rys. 2), w miejscu przejścia z płaskiej powierzchni w część stożkową. W tym obszarze, na matrycy po odkuciu 9000 szt., wynosiło ono około 2,5 mm. Po odkuciu 6900 szt. na powierzchni czołowej matrycy, w obszarach 1 i 2, można było zauważyć początek tworzenia się bruzd, rosnących ze wzrostem odkutych sztuk.

Zużycie było najmniejsze w obszarze 3, gdzie materiał narzędzia najkrócej kontaktował się z materiałem wstępniaka. Zauważono liczne naklejenia materiału odkuwki na powierzchni matrycy. Jak wykazały przeprowadzone symulacje numeryczne, w tym obszarze nacisk jednostkowy był najmniejszy (rys. 4), a czas kontaktu gorącego materiału z powierzchnią matrycy najkrótszy. Dopiero w końcowym etapie kształtowania dochodziło tu do kontaktu przy niewielkim udziale przemieszczenia [10].

3.3. Twardość warstwy wierzchniej

Pomiary mikrotwardości warstwy wierzchniej wykonano metodą Vickersa, przy obciążeniu 100g w miejscach zaznaczonych na rys. 2, na odcinku 0,3 mm od powierzchni roboczej w głąb narzędzia. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6.

Dla matryc po odkuciu 550 sztuk oraz 6900 na głębokości do 0,2 mm twardość mierzona w obszarze 1 i 2 była mniejsza niż twardość rdzenia; wynosiła odpowiednio: dla matrycy po odkuciu 550 odkuwek około 350 HV (rys. 6a), dla matrycy po odkuciu 6900 odkuwek około 300 HV (rys. 6b). Twardość rdzenia narzędzi wynosi około 600 HV. Twardość taka występowała w matrycach po odkuciu 550 i 6900 szt. w obszarze 3. W przypadku matrycy, na której wykonano 9000 odkuwek, spadek twardości występuje we wszystkich obszarach, do wartości około 300–450 HV (rys. 6c).

Największe spadki twardości w narzędziach miały miejsce w obszarach, w których materiał najdłużej kontaktował się z powierzchnią matrycy. Dochodziło do odpuszczania warstwy wierzchniej, w efekcie czego obniżona została odporność na zużycie ściernie. Ponadto, biorąc pod uwagę zużycie narzędzi w analizowanych obsza-

Regardless of the number of forged pieces, the greatest wear in all dies occurred on the face surface in area 2 (Fig. 2), at the point of transition from the flat surface to the conical part. In this area, on a die after forging of 9000 pcs., this wear amounted to approx. 2.5 mm. After forging of 6900 pcs. on the die's face surface, the beginning of furrow formation can be observed in areas 1 and 2, and these furrows grew as more pieces were forged.

Wear was lowest in area 3, where the tool's material had the shortest time of contact with the preform material. Numerous adhesions of the forging's material on the die surface were observed. As conducted numerical simulations showed, unit pressure was the lowest in this area (Fig. 4), and the time of contact between the hot material and the die surface was the shortest. Only at the final stage of forming did contact take place here, with a small degree of displacement [10].

3.3. Hardness of the surface layer

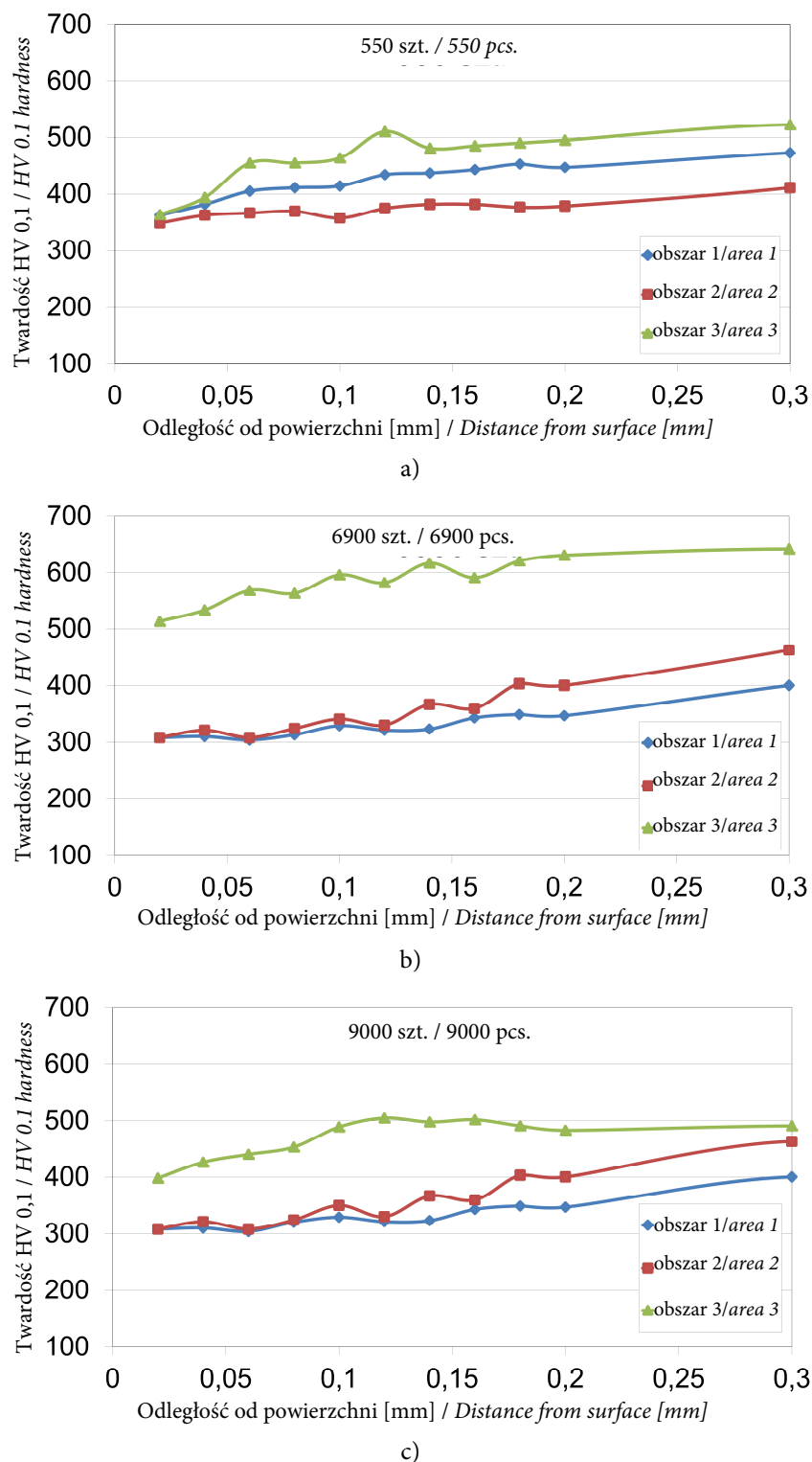
Microhardness measurements of the surface layer were performed using the Vickers method, under a load of 100g at the points marked in Fig. 2, over a 0.3 mm segment from the working surface into the tool. Obtained results are presented in Fig. 6.

For dies after forging of 550 pcs. and 6900 pcs., at a depth up to 0.2 mm, hardness measured in areas 1 and 2 was less than core hardness; hardness was, respectively: approx. 350 HV for the die after forging of 550 forgings (Fig. 6a), approx. 300 HV for the die after forging of 6900 forgings (Fig. 6b). The core hardness of tools amounts to approx. 600 HV. This hardness was observed in area 3 in dies after forging of 550 and 6900 pcs. In the case of the die having produced 9000 forgings, hardness reduction was observed in all areas, down to a value of approx. 300–450 HV (Fig. 6c).

The greatest reductions of tool hardness took place in areas in which the material had the longest contact with the die surface. Tempering of the surface layer took place, and in effect, its resistance to abrasive wear was reduced. Furthermore, considering tool wear in the analyzed areas, it can be presumed that hardness

rach, można przypuszczać, że spadek twardości występował pierwotnie na znacznie większej głębokości. Najmniejszy spadek twardości występował w obszarze 3, gdzie czas kontaktu z gorącym materiałem odkuwki był najkrótszy.

reduction initially occurred at a much greater depth. The lowest hardness reduction took place in area 3, where the time of contact with the hot material of the forging was shortest.



Rys. 6. Rozkład twardości w obszarach matryc po odkuciu: a) 550 szt., b) 6900 szt., c) 9000 szt.

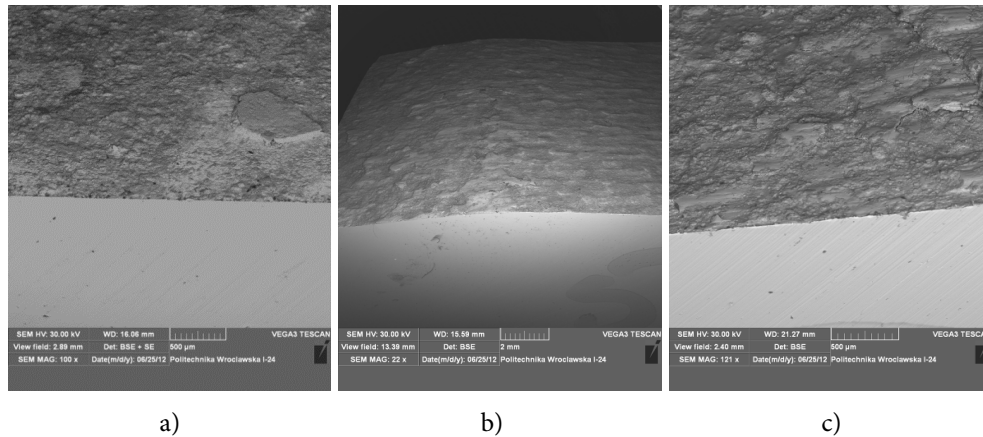
Fig. 6. Hardness distribution in die areas after forging of: a) 550 pcs., b) 6900 pcs., c) 9000 pcs.

3.4. Analiza powierzchni SEM

Po odkuciu 550 szt. na powierzchni matrycy nie zaobserwowano żadnych pęknięć. Praktycznie cała powierzchnia matrycy pokryta była grubą warstwą tlenków (rys. 7), podobnie po odkuciu 6900 szt.

3.4. SEM surface analysis

No cracks were observed on the surface of the die after forging of 550 pcs. The entire surface of the die was practically covered with a thick layer of oxides (Fig. 7), similarly as in the case of the die after forging of 6900 pcs.

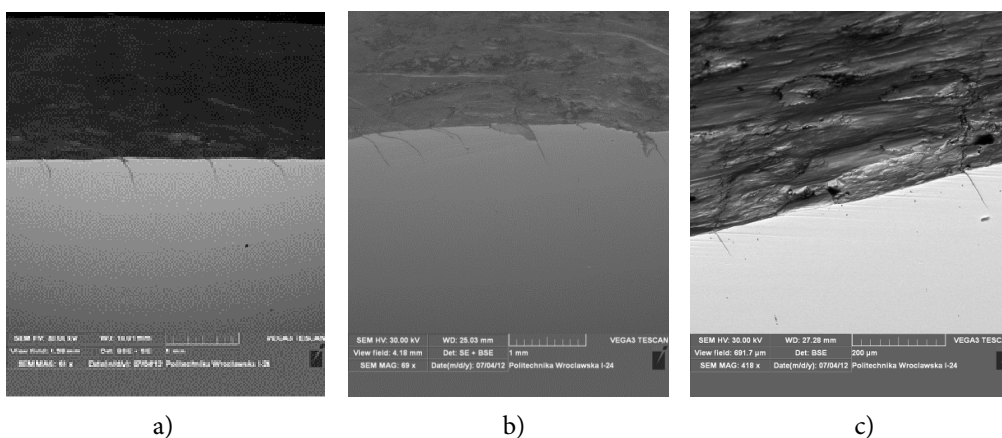


Rys. 7. Powierzchnia robocza matrycy po odkuciu 550 odkuwek w obszarach: a) 1, b) 2, oraz c) 3

Fig. 7. Die working surface after forging of 550 forgings in areas: a) 1, b) 2 and c) 3

Ponadto, po odkuciu 6900 szt. odkuwek, można dostrzec pęknięcia cieplno-mechaniczne. Pęknięcia te są lepiej widoczne na przekroju, gdzie w obszarze 1 i 2 zmieniają one swój kierunek, co świadczy o odkształceniach plastycznych warstwy wierzchniej. Pęknięcia mają głębokość około 500 µm (rys. 8a, 8b). W obszarze 3 pęknięcia są krótsze; mają głębokość około 100 µm i przebiegają w kierunku prostopadłym od powierzchni. Dodatkowo na powierzchni można dostrzec wykruszenia (rys. 8c).

Moreover, thermomechanical cracks can be observed after forging of 6900 pcs. These cracks are more visible on the cross-section where they change direction in areas 1 and 2, which indicates that plastic deformations of the surface layer took place. Cracks have a depth of approx. 500 µm (Fig. 8a, 8b). Cracks are shorter in area 3; they have a depth of approx. 100 µm and run perpendicularly to the surface. Spalling can also be observed on the surface (Fig. 8c).

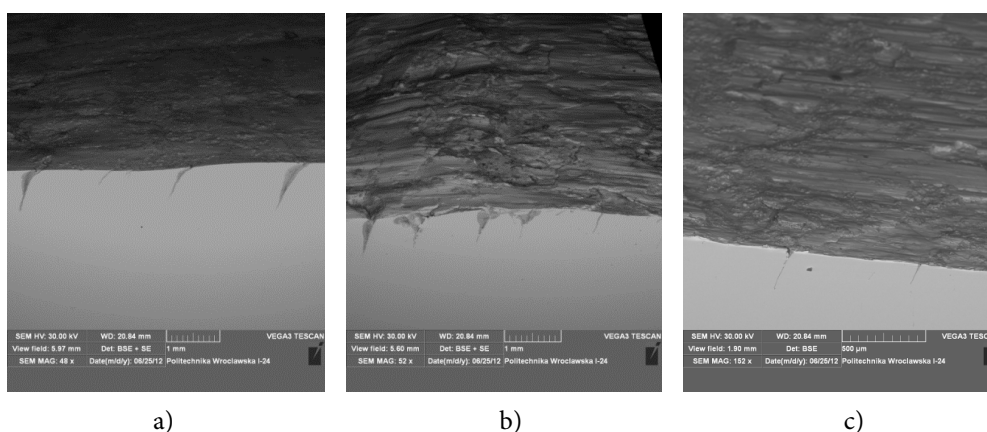


Rys. 8. Powierzchnia robocza matrycy po odkuciu 6900 odkuwek w obszarach: a) 1, b) 2 oraz c) 3

Fig. 8. Die working surface after forging of 6900 forgings in areas: a) 1, b) 2 and c) 3

Matryca po odkuciu 9000 szt. (rys. 9) była najdłużej narażona na działanie wysokiej temperatury, w efekcie czego doszło do obniżenia granicy plastyczności materiału przy powierzchni i doprowadziło do dużych odkształceń plastycznych w tym obszarze. Dodatkowo pęknięcia przy powierzchni intensywnie się utleniały, powiększając szerokość i tworząc szczeliny wypełnione tlenkami.

The die after forging of 9000 pcs. (Fig. 9) was exposed to the action of high temperature the longest, and in effect, the material's yield point was reduced near the surface, which led to high plastic deformations in this area. In addition, cracks near the surface oxidized intensively, increasing their width and forming crevices filled with oxides.



Rys. 9. Powierzchnia robocza matrycy po odkuciu 9000 odkuwek w obszarach: a) 1, b) 2 oraz c) 3

Fig. 9. Die working surface after forging of 9000 forgings in areas: a) 1, b) 2 and c) 3

4. PODSUMOWANIE

Najbardziej niebezpiecznym czynnikiem dla analizowanego procesu kucia na gorąco jest odkształcenie plastyczne oraz zmęczenie cieplno-mechaniczne, które prowadzi bardzo szybko do powstania małych pęknięć. Dalszy ich rozwój jest uwarunkowany parametrami procesu, interakcją między matrycą a odkuwką oraz prędkością płynięcia materiału. Oddziaływanie wysokiej temperatury materiału kutego powoduje obniżenie granicy plastyczności materiału przy powierzchni, co prowadzi do dużych odkształceń plastycznych, szczególnie w obszarze 2, w którym występują największe przemieszczenia materiału kutego względem narzędzia.

PODZIĘKOWANIA

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

4. SUMMARY

The most dangerous factors to the analyzed hot forging process are plastic deformation and thermomechanical fatigue, which lead to the formation of small cracks. The further development of these cracks is conditioned by the parameters of the process, interaction between the die and forging, and the material flow rate. The influence of the forged material's high temperature causes a reduction of the material's yield point near the surface, which leads to large plastic deformations, particularly in area 2, in which the largest displacements of the forged material relative to the tool take place.

ACKNOWLEDGEMENTS

Research has been financed by the National Science Centre, project no. 2011/01/B/ST8/02056.

LITERATURA

- [1] Lulkiewicz J., Pachutko B., Gąsioriewicz M., Szkudelski S., Garczyński Z., Ziółkiewicz S. 2015. „Wpływ zmęczenia cieplnego na udarność stali narzędziowej do pracy na gorąco Orvar Supreme”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (1): 21–32.
- [2] Holm R. 1946. *Electric Contacts*. Stockholm: Almqvist and Wiksells.
- [3] Archard J.F. 1953. „Contact and rubbing of flat surfaces”. *Journal of Applied Physics* 24: 981–988.
- [4] Gronostajski Z., Hawryluk M. 2008. „The main aspects of precision forging”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 8 (2): 39–56.
- [5] Altan T., Ngaile G., Shan G. 2005. *Cold and hot forging fundamentals and application*. Ohio: ASM International.
- [6] Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Zwierzchowski M. 2008. „Analysis of forging process of constant velocity joint body”. *Steel Research International* 79 (1): s. 547–554.
- [7] Kocańda A. 2003. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. W *Informatyka w Technologii Metali*, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [8] Ebara R., Kubota K. 2008. „Failure analysis of hot forging dies for automotive components Engineering”. *Failure Analysis* 15 (7): 881–893.
- [9] Kim T.H., Kim B.M., Choi J.C. 1997. „Prediction of die wear in the wiredrawing process”. *Journal of Materials Processing Technology* 65 (1-3): 11–17.
- [10] Gronostajski Z., Hawryluk M., Zwierzchowski M., Kaszuba M. 2011. „Zużycie matryc do kucia na gorąco odkuwki koła czołowego”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (11): 571–576.

REFERENCES

- [1] Lulkiewicz J., Pachutko B., Gąsioriewicz M., Szkudelski S., Garczyński Z., Ziółkiewicz S. 2015. „Wpływ zmęczenia cieplnego na udarność stali narzędziowej do pracy na gorąco Orvar Supreme”. *Obróbka Plastyczna Metali XXVI* (1): 21–32.
- [2] Holm R. 1946. *Electric Contacts*. Stockholm: Almqvist and Wiksells.
- [3] Archard J.F. 1953. „Contact and rubbing of flat surfaces”. *Journal of Applied Physics* 24: 981–988.
- [4] Gronostajski Z., Hawryluk M. 2008. „The main aspects of precision forging”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 8 (2): 39–56.
- [5] Altan T., Ngaile G., Shan G. 2005. *Cold and hot forging fundamentals and application*. Ohio: ASM International.
- [6] Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Zwierzchowski M. 2008. „Analysis of forging process of constant velocity joint body”. *Steel Research International* 79 (1): s. 547–554.
- [7] Kocańda A. 2003. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. In *Informatyka w Technologii Metali*, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [8] Ebara R., Kubota K. 2008. „Failure analysis of hot forging dies for automotive components Engineering”. *Failure Analysis* 15 (7): 881–893.
- [9] Kim T.H., Kim B.M., Choi J.C. 1997. „Prediction of die wear in the wiredrawing process”. *Journal of Materials Processing Technology* 65 (1-3): 11–17.
- [10] Gronostajski Z., Hawryluk M., Zwierzchowski M., Kaszuba M. 2011. „Zużycie matryc do kucia na gorąco odkuwki koła czołowego”. *Rudy i Metale Nieżelazne* 56 (11): 571–576.

