





## Analiza procesu kucia odkuwki typu rozwidlonego przy użyciu wyników symulacji numerycznej

### Analysis of forging process of the yoke type forging using the results of numerical simulation

(1) Marek Hawryluk\*  (2) Sławomir Polak  (3) Zbigniew Gronostajski  (4) Jacek Ziemia   
(5) Artur Barełkowski  (6) Paweł Jabłoński 

Politechnika Wrocławska, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.12.2018

Recenzja: 7.01.2019

Akceptacja: 29.03.2019

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja, założenia, metody badawcze, badania i analiza
- (2) Koncepcja, założenia, metody badawcze, badania i analiza
- (3) Metody badawcze, analiza
- (4), (5), (6) Badania

#### ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0002-9338-4327>
- (2) <https://orcid.org/0000-0003-4696-6006>
- (3) <https://orcid.org/0000-0002-3550-1003>
- (4) <https://orcid.org/0000-0002-3505-7555>
- (5) <https://orcid.org/0000-0002-2297-9286>
- (6) <https://orcid.org/0000-0003-0213-9279>

#### Article info

Received: 20.12.2018

Reviewed: 7.01.2019

Accepted: 29.03.2019

#### Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, methodology, testing and analysis
- (2) Concept, assumptions, methodology, testing and analysis
- (3) Methodology, analysis
- (4), (5), (6) Testing

#### ORCID iDs

- (1) <http://orcid.org/0000-0002-9338-4327>
- (2) <https://orcid.org/0000-0003-4696-6006>
- (3) <https://orcid.org/0000-0002-3550-1003>
- (4) <https://orcid.org/0000-0002-3505-7555>
- (5) <https://orcid.org/0000-0002-2297-9286>
- (6) <https://orcid.org/0000-0003-0213-9279>

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego procesu kucia matrycowego na gorąco odkuwki typu rozwidlonego stosowanej w układzie kierowniczym realizowanego na prasie korbowej. Głównym celem analizy było wykorzystanie modelowania numerycznego do analizy i poprawy przemysłowego procesu wytwarzania odkuwki. Termomechaniczny model kucia odkuwki z odkształcalnymi narzędziami opracowano przy użyciu oprogramowania Forge NX 2.0. Do zbudowania modeli narzędzi kuźniczych wykorzystano program Catia. W wyniku przeprowadzonego modelowania uzyskano, m.in.: rozkłady temperatur dla odkuwki i narzędzi oraz odkształceń plastycznych (uwzględniających zjawiska aktywowane cieplnie), a także zmiany wielkości ziarna oraz przebiegi sił kucia. Otrzymane wyniki pozwalają na pełną analizę procesu kucia, w tym: wpływu czasu i temperatury odkształcania na wielkość ziarna w materiale odkuwki, co w przyszłości może pozwolić na wykorzystanie ciepła kucia do planowanej obróbki cieplnej i uzyskania określonej mikrostruktury.

**Słowa kluczowe:** kucie matrycowe na prasie, modelowanie numeryczne, odkuwka typu rozwidlonego, mikrostruktura

#### Abstract

The paper presents the results of numerical modeling of the forging hot forging process of the yoke type forging used in the steering system realized on the crank press. The main purpose of the analysis was to use computer simulation to analyze and improve the industrial forging process. The thermomechanical model of forging process with deformable tools was developed using the Forge NX 2.0 software. Catia program was used to build models of forging tools. As a result of the modeling obtained, inter alia: temperature distributions and plastic deformations for the forging (taking into account thermally activated phenomena), as well as grain size changes and forging forces. The obtained results allow for a full analysis of the forging process, including: identification of potential forging defects (overlaps) and the influence of time and temperature of deformation on the grain size in the forging material, which in the future may allow using the forging heat for the planned heat treatment and obtaining a specific microstructure.

**Keywords:** die forging on press, numerical modelling, yoke type forging, microstructure

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 71 320 21 64; e-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 71 320 21 64; e-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

## 1. WSTĘP

W ostatnim okresie pojawiło się duże zapotrzebowanie na elementy dla przemysłu motoryzacyjnego. Powoduje to, że wciąż poszukuje się nowych technologii wytwarzania części i podzespołów, w tym odkuwek typu rozwidłonego stosowanych na odpowiedzialne części maszyn, m.in. na elementy przekładni kierowniczych, zarówno w samochodach osobowych, jak i wózkach widłowych. Odkuwki tego typu (o masie od 500 g do ponad 20 kg) są stosowane w układach napędowych tych pojazdów i stanowią kluczowe elementy przegubów. Obecnie w produkcji wielkoseryjnej stosuje się metodę wielozabiegowego kucia na gorąco na prasach w matrycach otwartych, po czym otrzymane odkuwki poddawane są okrawaniu wypłytki oraz dodatkowym zabiegom (chłodzenie, czyszczenie, obróbka cieplno-chemiczna, śrutowanie, obróbka wykańczająca skrawaniem, badania defektoskopowe i kontrola ostateczna). Odkuwki te często stanowią także ważny element bezpieczeństwa, dlatego wymaga się od nich wysokich właściwości wytrzymałościowych, dokładności wymiarowych, nieodwęglenia i poprawnego przebiegu włókien. Proces wytwarzania odkuwek typu rozwidłonego stanowi wciąż nie do końca rozwiązany problem, bowiem w procesach kucia matrycowego dużą rolę odgrywa dobór odpowiednich parametrów procesu. Ma to istotne znaczenie w przypadku, kiedy od odkuwek wymagana jest dodatkowo określona struktura oraz twardość, które uzyskuje się nie tylko w wyniku samego procesu kucia, lecz również odpowiedniej obróbki cieplnej [1, 2]. Do najważniejszych parametrów kucia wpływających na jakość odkuwek należy zaliczyć: ustawienia maszyny (cykl kucia, prędkość), kształt i jakość wykonania narzędzi, geometria wstępniaka i przedkuwki, a także parametry termiczne wstępniaka i narzędzi oraz warunki tribologiczne [3–6]. Duża liczba czynników wpływających na poprawność procesu kucia, zwłaszcza wieloetapowego, a także ich wzajemne oddziaływanie powoduje, że są one trudne do analizy oraz optymalizacji. W tym celu stosuje się bardzo często modelowanie numeryczne oparte o MES, jak również inne zaawansowane narzędzia inżynierskie i informatyczne (np. metody skanowania bezkontaktowego obiektów) [7–9].

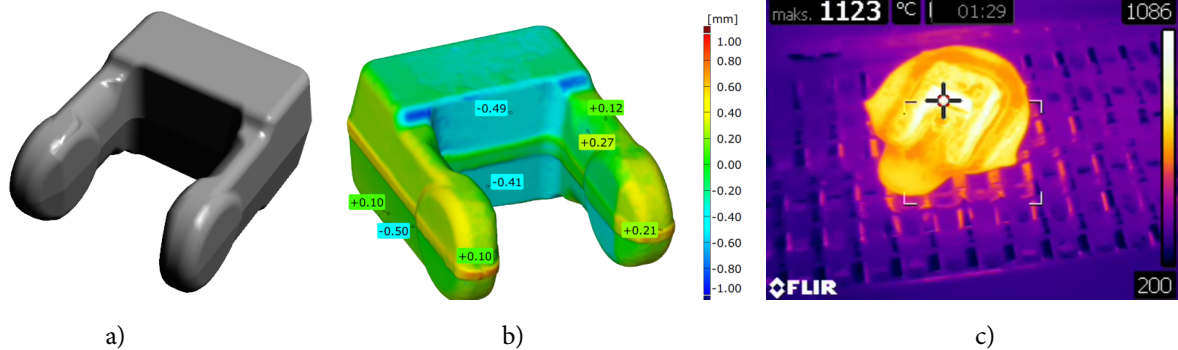
## 1. INTRODUCTION

*Recently, there has been a great demand for components for the automotive industry. This means that new technologies are still being sought for manufacturing parts and subassemblies, including forged forgings used for responsible machine parts, including for steering gear components, both in passenger cars and forklifts. Forgings of this type (weight from 500 g to over 20 kg) are used in the drive systems of these vehicles and are key elements of joints. Currently, in large-scale production, the multi-operation hot forging method is used on presses in open dies, after which forgings are subjected to flash cutting and additional treatments (cooling, cleaning, thermo-chemical treatment, shot blasting, machining, defectoscopy and final inspection). These forgings are often also an important element of safety, which is why they require high strength properties, dimensional accuracy, non-carbonation and correct fiber course. The manufacturing process of the yoke type forging is still not completely solved, because in the die forging, the selection of appropriate process parameters plays an important role. This is important in the case when from the forgings an additional structure and hardness are required, which is obtained not only as a result of the forging process, but also by appropriate heat treatment [1, 2]. The most important forging parameters affecting the quality of forgings include: machine settings (forging cycle, speed), shape and quality of the tools, geometry of the pre-shifter and forging, as well as thermal parameters of the prototype and tools as well as tribological conditions [3–6]. A large number of factors affecting the correctness of the forging process, especially multi-stage, as well as their interaction, make them difficult to analyze and optimize. For this purpose, numerical modeling based on FEM is often used, as well as other advanced engineering and IT tools (eg. non-contact objects scanning methods) [7–9].*

Celem pracy jest opracowanie modelu numerycznego wielozabiegowego procesu kucia odkuwki typu rozwidlonego, w tym określenie zmian mikrostruktury odkuwki w poszczególnych operacjach kucia, co posłuży do analizy i poprawy obecnego procesu wytwarzania.

## 2. PRZEDMIOT I METODYKA BADAŃ

W pracy analizie poddano element przegubu przedstawiony na rys. 1a jako model CAD, skan gotowej odkuwki po obróbce mechanicznej (rys. 1b) oraz zdjęcie gorącej odkuwki tuż po procesie kucia przeznaczonej do okrawania na gorąco (rys. 1c).



Rys 1. Widok: a) modelu CAD oraz b) skanu wyrobu po obróbce mechanicznej, c) termogram „gorącej” odkuwki z wypływką po procesie kucia na taśmociągu na linię BY do kontrolowanego chłodzenia

Fig. 1. View: a) CAD model and b) scan of the product after machining, c) thermogram of a “hot” forging with a flash after the forging process on the conveyor on the BY line for controlled cooling

Proces wytwarzania odkuwki realizowany był w Kuźni Jawor S.A. na prasie korbowej Massey o nacisku 1300 ton. Według klasyfikacji odkuwek należą one do grupy M1 (trudność materiałowa), S2 (zwartość kształtu), F1 (klasa dokładności) i są wykonywane w dokładności zgodnej z EN-10243-1:1999. Materiałem wejściowym jest pręt ze stali C45 w kształcie walca o średnicy 50 mm i długości 44 mm. Masa materiału wsadowego to około 700 g, a ciężar netto odkuwki to 470 g. Po cięciu materiału wsadowego jest on transportowany do nagrzewnicy indukcyjnej, w której jest nagrzewany do temperatury około 1120–1150°C i kuty (rys. 2a) w 4 zabiegach (3 operacjach kuźniczych (rys. 2a)). Wszystkie narzędzia podgrzewane są do temperatury ok. 250°C. W pierwszej operacji kucia materiał wsadowy jest spęczany, a następnie spłaszczany. Podczas pierw-

Aim of the study is to develop of numerical multioperation model of forging process of yoke type forging, including determining the changes in the microstructure of the forging in successive operations, which will be used to analyze and improve the industrial process.

## 2. SUBJECT AND METHODOLOGY OF RESEARCH

The work involved analysis of a joint element shown in Fig. 1a as a CAD model, a scan of a finished forging after machining (Fig. 1b) and a picture of a hot forging after the forging process intended for hot trimming (Fig. 1c).

The production process was carried out at Kuźnia Jawor SA on the Massey crank press with the pressure of 1,300 tons. According to the forgings classification, they belong to the group M1 (material difficulty), S2 (shape compactness), F1 (accuracy class) and are made in accordance with EN-10243-1: 1999. The input material is a C45 steel rod in the shape of a cylinder with a diameter of 50 mm and a length of 44 mm. The weight of the batch material is about 700 g and the net weight of the forging is 470 g. After cutting the input material, it is transported to an induction heater, where it is heated to a temperature of about 1120–1150°C and forged in 4 treatments (3 forging operations), and then the closing operations are carried out, namely: trimming on the press, straightening, shot blasting, etc. and then subjected to 3 operations of hot forging (Fig. 2a). All tools are heated to a tempe-

szej operacji spłaszczana zostaje część materiału z obszaru przyszłych widełek, część niespłaszczona wsadu stanowi wypełnienie dla tylnej części odkuwki o większym polu przekroju poprzecznego. Kolejne operacje kucia wstępnego i wykańczającego, realizowane we wkładkach matrycowych, nadają kształt gotowego wyrobu. Następnie schłodzoną odkuwkę poddaje się okrawaniu (rys. 2b), a więc oddzieleniu wypłytki od części użytkowej.



a)



b)

Rys. 2. Widok: a) proces kucia matrycowego, b) proces okrawania na zimno

Fig. 2. A view: a) die forging process, b) cold trimming process

Wkładki matrycowe w analizowanym procesie wykonane są ze stali WCL, a po ulepszeniu cieplnym, charakteryzują się twardością na poziomie 48–52 HRC. Narzędzia nie są azotowane. W celu zapewnienia możliwie równomiernego odkształcania się materiału w całej jego objętości stosuje się smarowanie wkładek matrycujących wstępnych i wykańczających wodnym roztworem grafitu. Po procesie kucia odkuwki wykonuje się operacje zamykające, czyli: kontrolowane chłodzenie na linii BY, okrawanie wypłytki na prasie, prostowanie, śrutowanie, obróbka mechaniczna, kontrola itp. Gotowa odkuwka jest poddawana kontroli ostatecznej (wizualnej i defektoskopowej), pakowana i wysyłana do klienta.

### 3. MODELOWANIE NUMERYCZNE

Symulacje numeryczne wielozabiegowego kucia na gorąco pod młotami przeprowadzono przy użyciu najnowszego oprogramowania Forge. Wstępne obliczenia dla ustalenia parametrów mo-

*perature of approx. 250°C. In the first operation of forging, the input material is upset and then flattened. During the first operation, a part of the material is flattened out of the area of the future fork, the non-flattened part of the input material is a fill for the back of the forging with a larger cross-sectional area. Subsequent pre- and finishing forging, implemented in die inserts, give shape to the finished product. Then the cooled forging is trimming (Fig. 2b), i.e. the separation of the flash from the usable part.*

*In the analyzed process die inserts are made of WCL steel, and after thermal improvement, they have a hardness of 48-52HRC. The tools are not nitrided. In order to ensure the uniform deformation of the material in the entire volume, is used lubrication inserts plated preliminary and finishing aqueous graphite. After the forging process of the forgings are controlled cooling on the BY line are performer. The finished forging is subjected to final control (visual and defectoscopic), packed and sent to the customer.*

### 3. THE NUMERICAL SIMULATION

*Numerical simulations of multi-gear hot forging on the press were carried out using the latest Forge software. Initial calculations for the determination of modeling parameters were made*

delowania wykonano na uproszczonych modelach mechanicznych ze sztywnymi narzędziami, następnie stopniowo rozbudowywano model obliczeniowy. Wszystkie symulacje zostały wykonane dla modeli 3D dla najbardziej złożonego modelu termomechanicznego z odkształcalnymi narzędziami.

### 3.1. Dobór materiałów i parametrów

W celu poprawnego przeprowadzenia symulacji konieczne jest odtworzenie parametrów danego procesu, czyli poprawne zdefiniowanie wszystkich warunków brzegowo-początkowych procesu. Geometria narzędzi, wstępniaka, a także pozostałe parametry technologiczne procesu zostały zaimplementowane do programu na podstawie oryginalnych modeli 2D i kart technologicznych.

Materiał stosowany jako wsad (C45) dobrano z bazy materiałowej programu, a na wkładki matrycowe zastosowano stal narzędziową do pracy na gorąco WCL/1.2343/X37CrMoV5-1, o module Younga około 200 GPa. Przyjęto prasę korbową (z bazy programu). Prędkość ruchu stempla była zależna od położenia kąтового prasy. Przedkawkę do pierwszej operacji nagrzano do 1150°C, a dla narzędzi przyjęto początkowe temperatury równe 200°C. Zarejestrowany przy użyciu szybko klatkowego aparatu średni cykl kucia jednej odkuwki (3 operacje) wynosił 12,5 sekundy. Przyjęto warunki tribologiczne w oparciu o model tarcia Treski dla współczynnika 0,4 dla wszystkich powierzchni roboczych narzędzi (w procesie przemysłowym stosuje się grafit z wodą). Współczynniki wymiany ciepła w kontakcie oraz z otoczeniem przyjęto odpowiednio 25 i 0,35 N/s/mm/°C.

### 3.2. Zmiany temperatury odkuwki

Na rys. 3. przedstawiono rozkłady temperatury dla kształtowanego materiału po operacji spęczenia, która ma na celu usunięcie zgorzeliny, powstającej wskutek intensywnego chłodzenia na powietrzu wsadu nagrzanego indukcyjnie do temperatury około 1150°C.

*on simplified mechanical models with rigid tools, then the calculation model was gradually expanded. All simulations were performed for 3D models for the most complex thermomechanical model with deformable tools.*

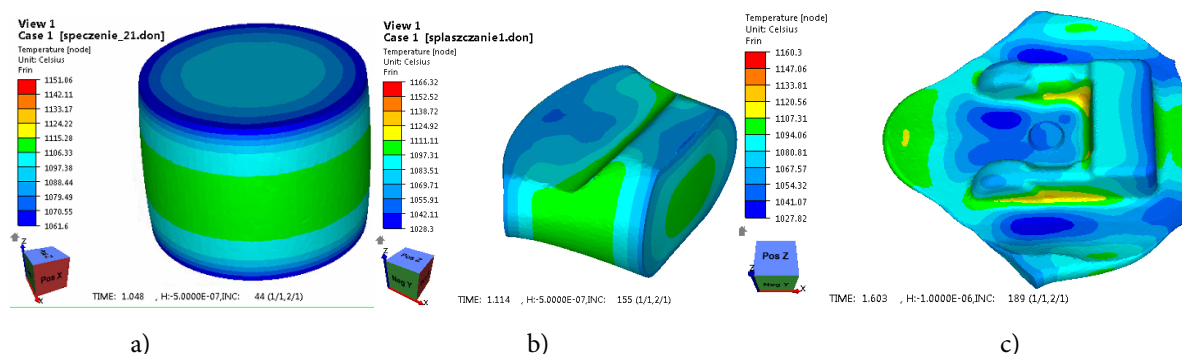
### 3.1. Selection of materials and parameters

*In order to correctly carry out the simulation, it is necessary to reconstruct the parameters of a given process, i.e. correctly define all boundary conditions of the process. The geometry tools, preform, as well as other technological parameters of the process have been implemented into the program based on the original 2D models and technological cards.*

*The material of forging (C45) was selected from the material base of the program, and the tool inserts used the hot work steel WCL/1.2343/X37CrMoV5-1, with the Young's modulus of about 200 GPa. The crank press was adopted (from the program database). The speed of movement of the slider was dependent on the angular position of the press. The input material for the first operation was heated to 1150°C, and for the tools, initial temperatures of 200°C were adopted. The average forging cycle of one forging (3 operations) recorded with the use of a quickly squirrel cage was 12.5 seconds. Tribological conditions were adopted based on the Tresca friction model for 0.4 coefficient for all tool working surfaces (in the industrial process graphite with water is used). The coefficients of heat transfer in contact with the environment and assumed to be 0.35 and 25 N/s/mm/°C.*

### 3.2. Temperature changes of the forging

*Fig. 3 presents the temperature distributions for the shaped material after the upsetting operation, in order to removing the scale formed as a result of intense cooling in the air of an induction heated up to about 1150°C.*



Rys. 3. Rozkłady temperatury odkształcanego materiału: a) po spęczaniu, b) po spłaszczaniu oraz c) po operacji kucia wstępnie matrycującego  
 Fig. 3. Temperature distributions of deformed material: a) after upsetting, b) after flattening and c) after preliminary forging

Podczas spęczania temperatura obniża się nieznacznie o 50–100°C (rys. 3a), najbardziej na powierzchniach walcowych spęczanego materiału, w wyniku kontaktu z chłodniejszymi narzędziami (200°C). W kolejnym zabiegu (rys. 3b), podczas spłaszczania temperatura materiału oscyluje w podobnym zakresie. Podobnie w operacji kucia wstępnego (rys. 3c) zmiany temperatury są niewielkie, największe wartości można zaobserwować w miejscach intensywnego płynięcia materiału na mostku do wypływki (około 1120–1140°C), a najniższe w wypływce, zwłaszcza w tych obszarach, które powstały najwcześniej (około 1050°C).

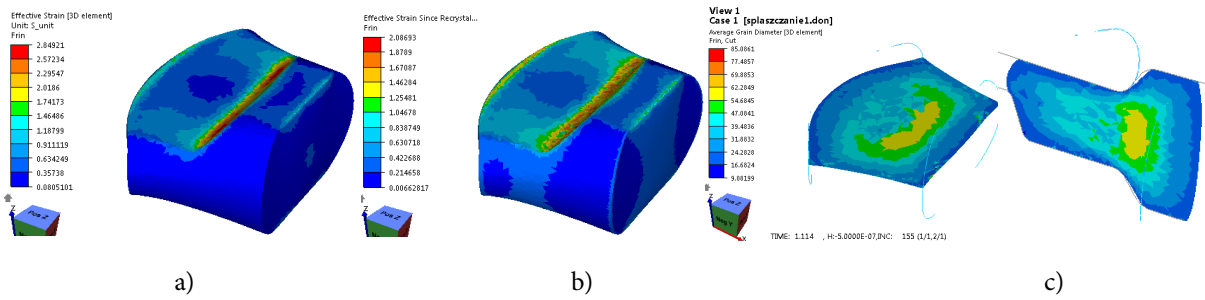
### 3.3. Rozkłady odkształceń plastycznych oraz wielkość ziarna w odkuwce

Oprogramowanie Forge pozwala na analizę odkształceń plastycznych zarówno z uwzględnieniem, jak i bez uwzględnienia rekrytalizacji. Na rys. 4a przedstawiono rozkłady odkształcenia dla kształtowanego materiału odkuwki po operacji spłaszczania, bez uwzględnienia dynamicznych procesów odbudowy mikrostruktury aktywowanych cieplnie (zdrowienie i rekrytalizacja), a na rys. 4b z uwzględnieniem rekrytalizacji statycznej (po około 1 s, od odkształcenia). Na rys. 4c przedstawiono przekroje dla tej przedkuwki z rozkładami ziarna.

During upsetting, the temperature slightly decreases by 50–100°C (Fig. 3a), most on cylindrical surfaces of upset material, as a result of contact with colder tools (200°C). In the next treatment (Fig. 3b), during the flattening the temperature of the material fluctuates in a similar range. Similarly, in the preliminary forging (Fig. 3c), the temperature changes are small, the highest values can be observed in the places of intensive material flow on the bridge to the flash (about 1120–1140°C) and the lowest in the flash, especially in those areas that were formed at the earliest (about 1050°C).

### 3.3. Plastic deformation distributions and grain size in the forging

Forge software allows you to analyze plastic strain both with and without recrystallization. Fig. 4a shows the deformation distributions for the shaped material of forging after the flattening operation, without the dynamic processes of heat-activated microstructure rebuilt (recovery and recrystallization), and Figure 4b including static recrystallization (after about 1 second, from deformation). In contrast, Fig. 4c shows cross-sections for this forging with grain distributions.



Rys. 4. Rozkłady odkształceń plastycznych po spłaszczeniu: a) bez uwzględnienia rekrytalizacji, b) przy uwzględnieniu rekrytalizacji statycznej c) widok w przekrojach z uwzględnieniem rekrytalizacji

Fig. 4. Distribution of plastic strains after flattening: a) without recrystallization, b) taking into account static recrystallization c) cross-section view including recrystallization

Po operacji spęczania, a następnie spłaszczenia odkształcenia plastyczne zlokalizowane są głównie we wnętrzu, w miejscu, gdzie górna wkładka spłaszczająca odkształciła materiał, przygotowując przedkuwkę do włożenia w wykrój wstępny. Wartości maksymalnych odkształceń w tych obszarach wynoszą odpowiednio: 2,8 bez uwzględnienia rekrytalizacji (rys. 3a) oraz 2,0 z uwzględnieniem częściowej rekrytalizacji (rys. 3b) po około 1s od odkształcenia. Początkową wielkość ziarna przyjęto na poziomie 80  $\mu\text{m}$ . W programie QForm średnia wielkość ziarna (jego średnica, w  $\mu\text{m}$ ) definiowana jest następująco:

$$d_{\mu\text{m}} = 1000 \cdot \sqrt{10^{-\frac{ASTM+2.95}{3.32}}} \quad (1)$$

gdzie: ASTM można odczytać z tabeli [10].

Przedstawione na rys. 4c rozkłady wielkości ziarna po operacji spłaszczenia w dwóch przekrojach wskazują, że rekrytalizacja w tym czasie zaszła w zewnętrznych obszarach odkształcanego materiału a średnia wielkość ziarna wynosi około 25–35  $\mu\text{m}$ . Natomiast wewnątrz średnia wielkość ziarna wynosi powyżej 60  $\mu\text{m}$ .

Na rys. 5a przedstawiono rozkłady odkształceń przy uwzględnieniu rekrytalizacji statycznej dla odkuwki (przekroju w płaszczyźnie podziału) po operacji kucia wstępnego. Rozkłady wielkości ziarna dla tej odkuwki po czasie 1s po odkształceniu pokazano na rys. 5b. Jak można zauważyć (rys. 5a) największe wartości odkształceń plastycznych po rekrytalizacji występują w okolicach ramion odkuwki oraz ich części łączącej i wynoszą

After the upsetting operation and then flattening, the plastic deformations are mainly located inside, in the place where the upper die insert deformed the material, preparing the preform for insertion into the preliminary cavity of die insert. The values of maximum deformations in these areas are respectively: 2.8 without recrystallisation (Fig. 3a) and 2.0 with partial recrystallisation (Fig. 3b) after about 1s from deformation. The initial grain size was assumed at 80  $\mu\text{m}$ . In QForm, the average grain size (its diameter, in  $\mu\text{m}$ ) is defined as follows:

$$d_{\mu\text{m}} = 1000 \cdot \sqrt{10^{-\frac{ASTM+2.95}{3.32}}} \quad (1)$$

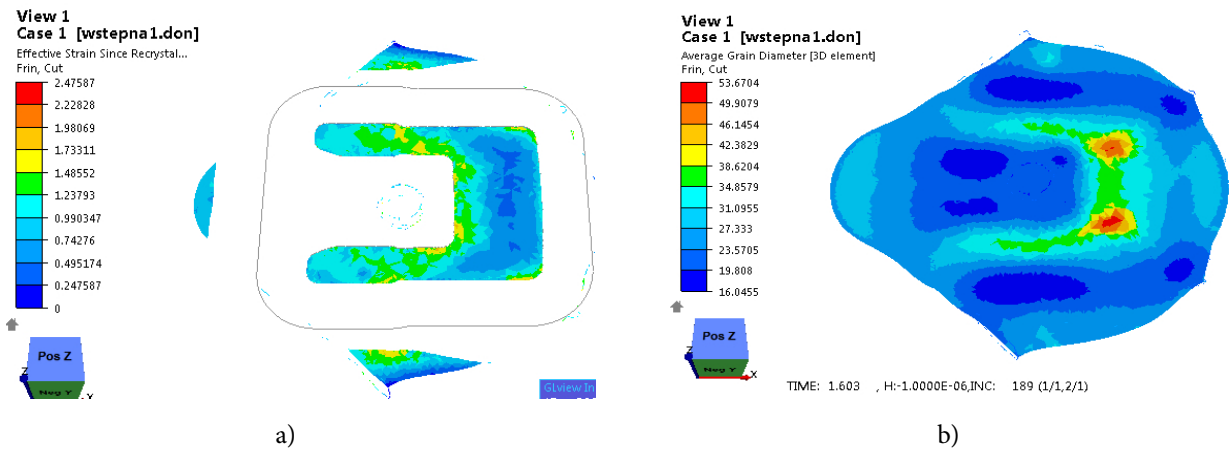
where: ASTM can be read from the table [10].

The grain size distributions presented in Fig. 4c after the flattening operation in two cross-sections indicate that the recrystallization at that time occurred in the external areas of the deformed material and the average grain size is about 25–35  $\mu\text{m}$ . However, inside the average grain size is above 60  $\mu\text{m}$ .

Fig. 5a shows the deformation distributions taking into account static recrystallization for the forging (section in the division plane) after the forging operation. The grain size distributions for this forging after 1s after deformation are shown in Fig. 5b. As can be seen (Fig. 5a), the largest values of plastic deformation after recrystallization occur in the vicinity of the forging arms and their connecting part and amount to approximately 1.7. The largest

około 1,7. Największe (prawdopodobnie niezrekrystalizowane) ziarna występują w części tylnej – trzonku odkuwki i ich średnia wielkość wynosi około  $50 \mu\text{m}$ , z kolei najmniejsze ziarna występują w okolicach wyplwki (rys. 5b).

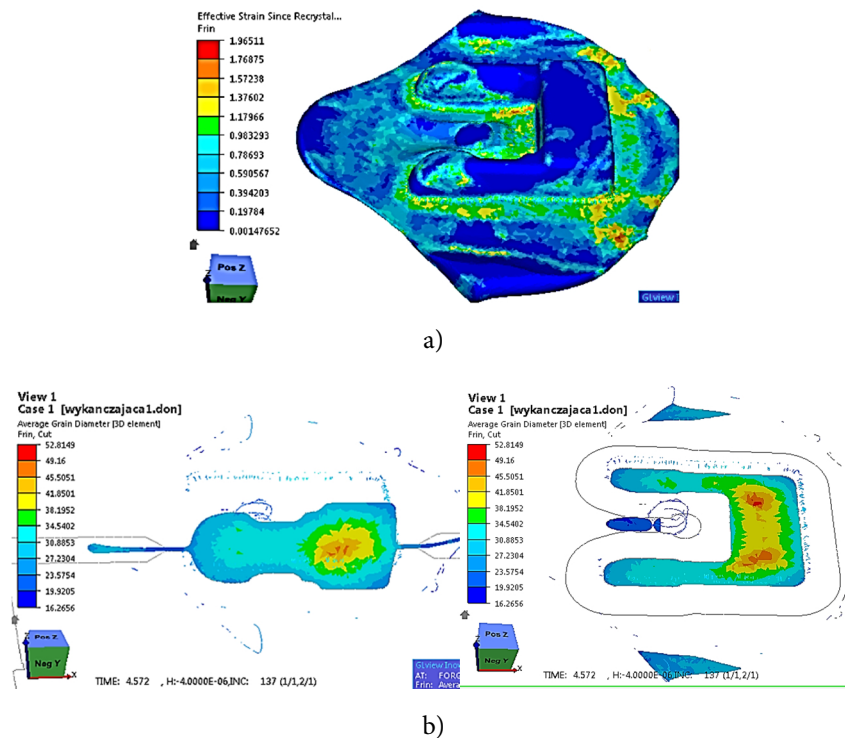
(probably not recrystallized) grains occur in the rear part – the forging stem and their average size is about  $50 \mu\text{m}$ , while the smallest grains are found near the flash (Fig. 5b).



Rys. 5. Rozkłady: a) odkształcenia plastycznego dla odkuwki po II operacji (przekrój w płaszczyźnie podziału), b) średniej wielkości ziarna  
 Fig. 5. Distributions: a) plastic deformation for the forging after the II operation (section in the division plane), b) average grain size

Rozkłady odkształceń przy uwzględnieniu rekrytalizacji statycznej dla odkuwki po operacji kucia wykańczającego przedstawiono na rys. 6a.

The deformation distributions, taking into account the static recrystallization for the forging after the finishing forging operation, are shown in Fig. 6a.

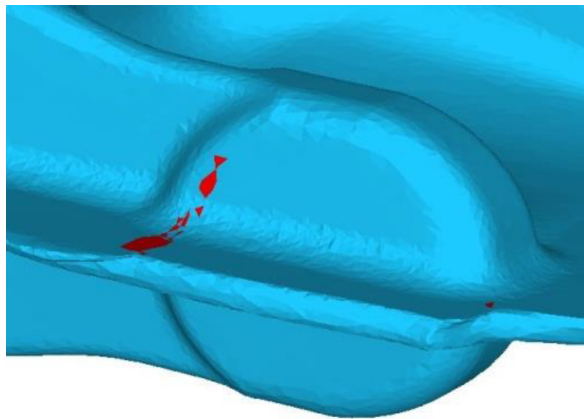


Rys. 6. Rozkłady: a) odkształcenia plastycznego dla odkuwki po III operacji, b) średniej wielkości ziarna odkuwki (przekroju przez ramię odkuwki oraz w płaszczyźnie podziału) po czasie 1s po odkształceniu  
 Fig. 6. Distributions: a) plastic deformation for the forging after the third operation, b) average size of the forging grain (cross-section through the forging arm and in the division plane) after 1 s after deformation

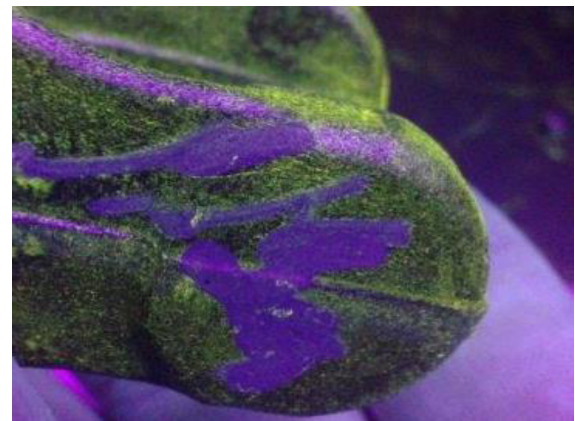


### 3.4. Defekty kuziennicze

Jednym z największych zagrożeń podczas procesu kucia takich elementów jak odkuwka typu rozwidlonego są defekty kuziennicze, z których najgroźniejszymi są przede wszystkim zakucia i zawinięcia materiałowe. Podczas płynięcia część materiału pozostaje pomiędzy matrycami tworząc zawinięcie, które w kolejnych operacjach może zostać wprasowywane w część odkuwki lub w wypływkę. Wykorzystanie specjalnych funkcji (m.in.: laps, folds, itp.), w programie do analizy numerycznej pozwala na zasymulowanie różnych wariantów ułożenia i wykrycie najbardziej narażonych na wady obszarów kształtowanego materiału. W analizowanym procesie kucia wstępnie matrycującego utrzymuje się tendencja wypływania takich obszarów poza kształt wykroju, przez co defekty nie wpływają na parametry produktu. W skrajnych przypadkach, na skutek niewłaściwie przygotowanego materiału wsadowego (ciężki po procesie łamania) oraz nieodpowiedniego uformowania przez kowala w operacji spłaszczania mogą powstawać niewielkie wady w bocznych obszarach ramion odkuwki (rys. 7).



a)



b)

Rys. 7. Przykładowe wyniki detekcji wad odkuwek: a) wykorzystanie funkcji „laps” w celu wykrycia potencjalnych obszarów zakucia, b) wyniki badań defektoskopowych – widoczne ślady zakucia [11]

Fig. 7. Sample results of the detection of the forgings' defects: a) using the laps function to detect potential areas of the overlaps, b) the results of defectoscopy – visible traces of overlap [11]

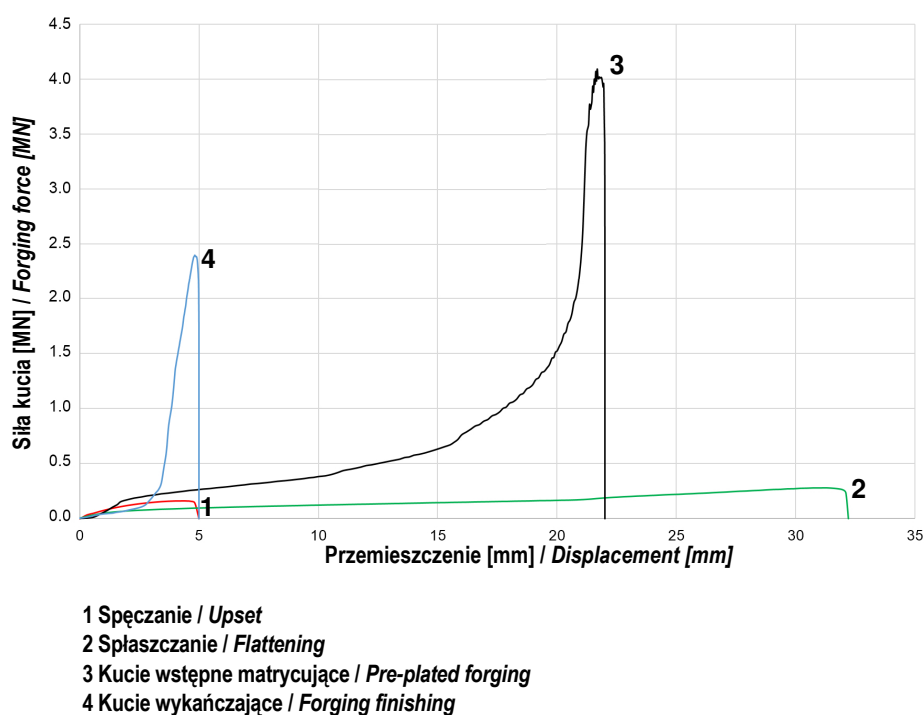
Podobne wady są obserwowane w innych przemysłowych procesach kucia odkuwek typu rozwidlonego, zwłaszcza w przypadku nieprzestrzegania technologii kucia, np. niewłaściwym ułożeniu przedkuwki lub złej długości wsadu.

Similar disadvantages are observed in other industrial processes of yoke type forging, especially in the case of failure to comply of the technology of forging, for example, incorrect placement of the slug or the wrong length of the input material.

### 3.5. Przebiegi sił kucia

Rys. 8 przedstawia przebieg sił kucia w funkcji przemieszczenia, do zakończenia ruchu - do końca siły w danym skoku prasy (zamknięcia wkładek matrycowych: górnych z dolnymi dla określonej grubości wyływki). W pierwszej operacji (spęczenie i spłaszczanie) maksymalna wartość sił jest stosunkowo niewielka osiągając poziom około 2 kN, w porównaniu do operacji kucia wstępnie matrycującego (2,5 MN) i wykańczającego (na poziomie ponad 4,0 MN).

W III operacji – kucia wykańczającego maksymalna siła wynosi niespełna 2,5 MN, lecz narasta bardzo raptownie, co jest spowodowane tym, że w ostatniej operacji dochodzi w zasadzie do kalibrowania, w celu uzyskania końcowej geometrii odkuwki.



Rys. 8. Przebieg sił kucia dla poszczególnych operacji w funkcji przemieszczenia

Fig. 8. The course of forging forces for individual operations in the displacement function

Największa siła występuje w II operacji kucia wstępnie matrycującego i wynosi ponad 4 MN, czyli nie przekracza dopuszczalnej siły prasy przemysłowej (prasa Massey 1300, o nominalnym nacisku 13 MN). Siła nie narasta tak gwałtownie, jak w przypadku trzeciej operacji (kucia wykańczającego), co świadczy o prawidłowym wypełnianiu wykroju przez kształtowany materiał.

### 3.5. The courses of forging force

Fig. 8 shows the course of forging forces as a function of displacement, until the end of motion – to the end of force in a given press stroke (closures of the die inserts: upper and lower for a given flash thickness). In the first operation (upset and flattening), the maximum force value is relatively small, reaching a level of about 2 kN, compared to a pre-forging (2.5 MN) and finishing (over 4.0 MN) forging operation.

In the 3rd operation – forging finishing the maximum force is less than 2.5 MN, but it grows very rapidly, which is due to the fact that in the last operation there is basically calibration, in order to obtain the final geometry of the forging.

The greatest force occurs in the second forging operation and pre-plated is more than 4.0 MN, i.e. does not exceed the strength of the industrial press (press Massey in 1300, with a nominal pressure of 13 MN). The force is not growing as rapidly as in the case of the third operation (forging finishing), which indicates the correct fulfillment of the cavity of shaped by material.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone modelowanie numeryczne procesu kucia odkuwki typu rozwidlonego dostarczyło wiele istotnych informacji dotyczących m.in.: rozkładu odkształceń plastycznych i zmiany wielkości ziarna (uwzględniających zjawiska aktywowane cieplnie), a także pola temperatur oraz przebiegów sił kucia. Uzyskane wyniki mają posłużyć do optymalizacji parametrów procesu oraz kształtu narzędzi ze względu na jakość odkuwki oraz trwałość narzędzi. Mogą one być także pomocne podczas projektowania obróbki cieplnej odkuwek, w kontekście uzyskanej wielkości ziarna odkuwki po procesie kucia i czasów międzyoperacyjnych wpływających na zmiany wielkości ziarna, wskutek rekrytalizacji statycznej. Dzięki temu możliwe staje się opracowanie procesu kucia w taki sposób, aby zminimalizować konieczność nagrzewania odkuwek do wysokiej temperatury i wykorzystać ciepło kucia do zakładanej obróbki cieplnej, i uzyskania określonej wielkości ziarna oraz struktury i odpowiedniej twardości. Planuje się, że kolejnym etapem prac badawczych będą zaawansowane badania mikrostrukturalne, m.in. w celu zweryfikowania wielkości ziarna w MES, po różnych warunkach odkształcenia w wielooperacyjnym procesie kucia.

#### PODZIĘKOWANIA

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Polska (grant nr: TECHMATSTRATEG1 / 348491/10/NCBR/2017).

#### LITERATURA

- [1] Gronostajski Zbigniew, Marek Hawryluk. 2008. „The main aspects of precision forging”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 7(2): 39-57.
- [2] Vazquez Victor, Taylant Altan. 2001. „New concepts in die design - physical and computer modeling applications”. *J. of Mat. Proc. Techn.* 98: 212-223.
- [3] Sińczak Jan. 2010. *Podstawy procesów przeróbki plastycznej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe. Akapit.
- [4] Kocańda Andrzej. 2003. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali”. W *Informatyka w Technologii Metali*, 213-256. Red. A. Piela, F. Grosman, J. Kusiak i M. Pietrzyk, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

#### 4. SUMMARY

*The numerical modeling of forging process of yoke type forging has provided a lot of relevant information concerning, among others: plastic deformation distribution and grain size change (taking into account thermally activated phenomena), as well as temperature fields and forging forces. Obtained results are to be used to optimize the process parameters and the shape of the tools due to the quality of the forgings and the durability of the tools. They can also be helpful when designing heat treatment of forgings, in the context of the obtained forging grain size after the forging process and inter-operative times affecting grain size changes, as a result of static recrystallization. As a result, it becomes possible to develop the forging process in such a way as to minimize the need to heat the forgings to high temperatures and use the forging heat for the assumed heat treatment, and to obtain a certain grain size and structure and adequate hardness. It is planned that the next stage of research will be advanced microstructural research, including in order to verify grain size in FEM, after various deformation conditions in a multiple-operation forging process.*

#### ACKNOWLEDGEMENTS

*The work was financed by The National Centre for Research and Development, Poland (grant no.: TECHMATSTRATEG1 / 348491/10/NCBR/2017).*

#### REFERENCES

- [1] Gronostajski Zbigniew, Marek Hawryluk. 2008. „The main aspects of precision forging”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 7(2): 39-57.
- [2] Vazquez Victor, Taylant Altan. 2001. „New concepts in die design - physical and computer modeling applications”. *J. of Mat. Proc. Techn.* 98: 212-223.
- [3] Sińczak Jan. 2010. *Podstawy procesów przeróbki plastycznej*. Kraków: Wydawnictwo Naukowe. Akapit.
- [4] Kocańda Andrzej. 2003. „Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali”. W *Informatyka w Technologii Metali*, 213-256. Red. A. Piela, F. Grosman, J. Kusiak i M. Pietrzyk, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

- [5] Gronostajski Zbigniew, Marek Hawryluk, Karol Jaśkiewicz, Adam Niechajowicz, Sławomir Polak, Sławomir Walczak., Adam Woźniak. 2007. „Application of physical and mathematical modelling to analysis of different forging processes of constant velocity joint body”. *Computer Methods in Materials Sciences*. 7(2): 231-236.
- [6] Gronostajski Zbigniew, Hawryluk Marek, Kaszuba Marcin, Zwierzchowski Maciej. 2008. „Analysis of forging process of constant velocity joint body”. *Steel Research International*. Spec. ed. 1:547-554.
- [7] Gronostajski Z., Kaszuba M., Hawryluk M., Nowak B. 2015. „Trwałość narzędzi w procesach kucia”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26(3): 255-270.
- [8] Lange K., Cser L., Geiger M., Kals J.A.G.: 1993. „Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming”. W *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 207: 223-239.
- [9] Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Ziemia J. 2016. „Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18(2): 194-200.
- [10] <http://www.transvalor.com/en/cmspages/forge-nxt.32.html>
- [11] Hawryluk M., Jakubik J. 2016 „Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes”. *Engineering Failure Analysis* 59: 396-409.
- [5] Gronostajski Zbigniew, Marek Hawryluk, Karol Jaśkiewicz, Adam Niechajowicz, Sławomir Polak, Sławomir Walczak., Adam Woźniak. 2007. „Application of physical and mathematical modelling to analysis of different forging processes of constant velocity joint body”. *Computer Methods in Materials Sciences*. 7(2): 231-236.
- [6] Gronostajski Zbigniew, Hawryluk Marek, Kaszuba Marcin, Zwierzchowski Maciej. 2008. „Analysis of forging process of constant velocity joint body”. *Steel Research International*. Spec. ed. 1:547-554.
- [7] Gronostajski Z., Kaszuba M., Hawryluk M., Nowak B. 2015. „Trwałość narzędzi w procesach kucia”. *Obróbka Plastyczna Metali* 26(3): 255-270.
- [8] Lange K., Cser L., Geiger M., Kals J.A.G.: 1993. „Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming”. W *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 207: 223-239.
- [9] Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Ziemia J. 2016. „Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18(2): 194-200.
- [10] <http://www.transvalor.com/en/cmspages/forge-nxt.32.html>
- [11] Hawryluk M., Jakubik J. 2016 „Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes”. *Engineering Failure Analysis* 59: 396-409.