



Zastosowanie wyników symulacji numerycznej do analizy i poprawy przemysłowego procesu wytwarzania odkuwki zaworu

Application of numerical modelling results to analyze and improve the industrial process of valve forging production

(1) Marek Hawryluk^{1*}  (2) Jakub Krawczyk¹ (3) Maciej Zwierzchowski¹  (4) Marta Janik²
(5) Jerzy Jaruzel²

¹ Politechnika Wrocławska, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

² MAHLE Polska Sp. z o.o., ul. Mahle 6, 63-700 Krotoszyn, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 31.07.2019

Recenzja: 1.10.2019

Akceptacja: 20.12.2019

Wkład autorów

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

ORCID iD

- (1) <http://orcid.org/0000-0002-9338-4327>
- (3) <http://orcid.org/0000-0003-4502-1334>

Streszczenie

Artykuł dotyczy wykorzystania wyników modelowania numerycznego do wielowariantowej symulacji procesu wytwarzania odkuwki zaworu ze stali chromowo-niklowej przeznaczonej dla silników samochodów ciężarowych. Odkuwka tego typu wytwarzana jest w dwóch operacjach: wyciskania współbieżnego długiego trzonka, a następnie kucia wykańczającego głowy zaworu. Głównym problemem w tym procesie jest stosunkowo niska trwałość narzędzi; w pierwszej operacji wyciskania obserwowane jest przedwczesne zużycie matrycy, a w drugiej operacji niska trwałość stempla, co związane jest z intensywnym zużyciem ściernym oraz adhezją materiału odkuwki do narzędzi. Modelowanie numeryczne przeprowadzono przy użyciu pakietu obliczeniowego Forge 2.0, w celu analizy wpływu zmian warunków temperaturowych oraz tarcia. Szczegółowej analizie poddano drugą operację kształtowania – kucie na gorąco głowy zaworu, gdyż w przemysłowym procesie, ze względu na niewystarczającą kontrolę kluczowych parametrów technologicznych, mogą wystąpić niewielkie zmiany warunków tribologicznych, co wpływa na poprawność całego procesu. Przeprowadzona wielowariantowa analiza procesu kucia z wykorzystaniem modelowania numerycznego dostarczyła wielu cennych informacji dotyczących zmian kluczowych parametrów trudnych do uzyskania podczas analizy procesu przemysłowego oraz ich wzajemnego wpływu na siebie, takich jak: rozkłady pól temperatury, nacisków oraz parametrów określających zużycie, a także przebiegów sił kucia. Na tej podstawie możliwe jest wprowadzenie bez większych obaw istotnych zmian w procesie przemysłowym, w celu uzyskania jego stabilności i powtarzalności oraz zwiększeniu trwałości oprzyrządowania kuźniczego.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, kucie matrycowe na gorąco, odkuwka zaworu

Article info

Received: 31.07.2019

Reviewed: 1.10.2019

Accepted: 20.12.2019

Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, methodology, testing and analysis
- (2) Assumptions, testing and analysis

Abstract

The article discusses the application of the results of numerical modelling for a multi-variant simulation of the process of producing a chromium-nickel steel valve forging designed for truck engines. A forging of this type is manufactured in two operations: coextrusion of a long shaft, followed by finishing forging of the valve head. The main problem in this process is a relatively low tool durability; in the first extrusion operation, we observe premature wear of the die, whereas in the second operation, a low durability of the punch can be noticed, which is connected with the intense abrasive wear as well as adhesion of the material of the forging to the tools. The numerical modelling was carried out with the use of the Forge 2.0 calculation packet in order to analyze the effect

* 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

- (3) *Microstructural testing and analysis*
 (4) *Assumptions, testing and analysis*
 (5) *Testing*

ORCID iDs

- (1) <http://orcid.org/0000-0002-9338-4327>
 (3) <http://orcid.org/0000-0003-4502-1334>

of the temperature conditions and friction. A detailed analysis was performed on the second forming operation – hot forging of a head valve, as, in the industrial process, due to insufficient control of the key technological parameters, slight changes of the tribological conditions might occur, which affect the properness of the whole process. The multi-variant analysis of the forging process with the use of numerical modeling provided a lot of valuable information regarding changes in key parameters difficult to obtain during the analysis of the industrial process and their mutual influence on each other, such as: distribution of temperature fields, pressures and parameters determining wear, as well as forging force courses. On this basis, it is possible to introduce without major worry significant changes in the industrial process in order to obtain its stability and repeatability, and increase the durability of forging equipment.

Keywords: numerical modelling; hot die forging; valve forging

1. WSTĘP

Zawory wydechowe silników spalinowych w pojazdach ciężarowych są zwykle eksploatowane przy temperaturze 700–850°C, przy czym w ostatnich latach, w celu zwiększenia sprawności i wydajności silników, temperatura ich pracy jest stale podnoszona [1]. Podczas pracy takiego silnika, wysokie ciśnienie powoduje, że zawór wydechowy poddawany jest cyklicznym obciążeniom termicznym oraz mechanicznym [2, 3]. Zawory silnikowe najczęściej wykonywane są metodą przeróbki plastycznej na gorąco ze stali austenitycznych wysokoniklowych, chromowo-niklowych lub nadstopów niklu typu Nimonic (zaw. ok. 80% Ni) [4]. Materiały te charakteryzują się dużą odpornością na korozję w gazach spalinowych, twardością, odpornością na ścieranie przy wysokiej temperaturze i żarowytrzymałością [4].

Obecnie w procesach wytwarzania zaworów najczęściej stosowane są dwie technologie, oparte o przeróbkę plastyczną na gorąco. Pierwsza, jednocześnie najchętniej stosowana, polega na lokalnym nagrzewaniu materiału wsadu ze stali zaworowej w postaci pręta o małej średnicy, a następnie lokalnym spęczaniu w celu uzyskania poprawnego kształtu tzw. talerzyka [6]. Druga, rzadziej stosowana technologia, składa się z dwóch operacji: wyciskania współbieżnego na gorąco długiego trzonka zakończonego wstępnie uformowanym elementem zwanym „gruszką”, a następnie kucia wykańczającego głowy zaworu [7, 8]. Pierwsza z technologii jest dość dobrze opanowana, lecz stosunkowo mniej opłacalna ze względu na koszt materiału wsadowego, bowiem pręty o małych średnicach uzyskiwane metodą ciąg-

1. INTRODUCTION

Exhaust valves of combustion engines in heavy goods vehicles usually operate at the temperatures of 700–850°C, while, in the recent years, in order to improve the engine efficiency, their working temperatures have been constantly raised [1]. During the operation of such an engine, the high pressure exposes the exhaust valve to periodical thermal and mechanical loads [2, 3]. Engine valves are usually made by the method of hot plastic working from high nickel and chromium-nickel steels as well as nickel superalloys, of the Nimonic type (about 80% Ni content) [4]. These materials characterize in high corrosion resistance in combustion gases, hardness, abrasive resistance at high temperatures as well as high temperature creep resistance [4].

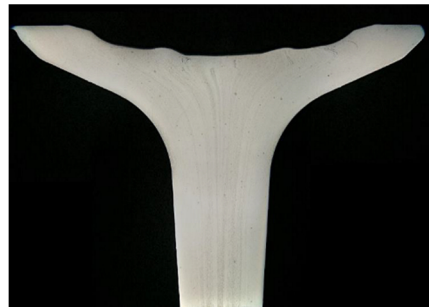
At present, the valve production processes usually involve the application of two technologies based on hot plastic processing. One of them, the most frequently used, consists in local up-setting in order to obtain the proper shape of the so-called tray [6]. The other one, more rarely applied, consists of two operations: hot coextrusion of a long shaft tipped with a pre-formed element called “bulb”, followed by finishing forging of the valve head [7, 8]. The first technology is quite well-mastered yet relatively less cost-effective, due to the cost of the charge material, as small diameter bars obtained by the method of drawing or extrusion from the wire rod are much more expensive (compared to the larger diameters obtained by hot rolling). Also, the products obtained according to the first technology charac-

nienia lub wyciskania z walcówki są znacznie droższe (w stosunku do większej średnicy uzyskiwanej w procesie walcowania na gorąco). Ponadto wyroby uzyskiwane zgodnie z pierwszą technologią charakteryzują się niższymi właściwościami mechanicznymi. Największymi wadami odkuwek uzyskiwanych pierwszą technologią są zmiany strukturalne w miejscu lokalnego nagrzewania (strefa wpływu ciepła, duże gradienty temperatury) podczas spęczania, powodujące pęknięcia na profilu, przegrzania i zakucia talerza odkuwki (rys. 1a). W przypadku stosowania drugiej technologii (kucia z wstępnym wyciskaniem, rys. 1b), uzyskane wyroby charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi (wyższą twardością) i jakością powierzchni [9].

racterize in lower mechanical properties. The biggest flaws of the forgings obtained by the first method are structural changes in the area of local heating (heat-affected zone, high temperature gradients) during the upsetting, causing cracks on the profile section, overheatings and laps of the forging tray (Fig. 1a). In the case of the use of the second technology (forging with pre-extrusion, Fig. 1b), the obtained goods characterize in better mechanical properties (higher hardness) as well as surface quality [9].



a)



b)

Rys. 1. Przebieg włókien w zaworach wytwarzanych: a) I technologią, b) II technologią [10]

Fig. 1. Arrangement of the fibres in valves produced by way of: a) technology I, b) technology II [10]

Druga technologia niestety jest rzadko stosowana, gdyż jest to proces kucia w matrycach zamkniętych jest bardzo trudny do opanowania, gdyż wymaga się w nim przygotowania odpowiedniej masy wsadu, z dokładnością do ok. 1%, utrzymania stałych i powtarzalnych warunków temperaturowych i smarnych, a także zaprojektowania odpowiednich kształtów matryc i stempli, aby nastąpiło dobre wypełnienie wykrojów. Trwałość narzędzi ze stali do pracy na gorąco jest głównym problemem w przypadku kształtowania odkuwek ze stali zaworowych. Średnia trwałość narzędzi wykonanych ze stali narzędziowych wynosi ok. 1000 sztuk odkuwek, ze stali stopowych ok. 3000 sztuk, a ze stali niskowęglowych ponad 5000 odkuwek [10].

W przypadku stosowania drugiej technologii, podczas kucia występują bardzo duże naciski, które znacząco wpływają na obniżenie trwa-

The second technology is, unfortunately, rarely used, as the process of forging in closed dies is very difficult to master, requiring the preparation of the appropriate mass of the charge, with the accuracy of up to about 1%, as well as the maintaining of constant and repeatable temperature and lubrication conditions, and also designing the proper shapes of the dies and punches, in order to ensure good filling of the impressions. The durability of tools assigned for hot operations is the main problem in the case of forgings formed from valve steels. The average durability of tools made from tool steels equals about 1000 forgings, from alloy steels – about 3000 forgings and from low-nickel steels – over 5000 forgings [10].

In the case of the use of the second technology, during the forging process, we observe only

łości narzędzi kuźniczych (w skrajnych przypadkach odkuwanych jest tylko kilkanaście dobrych odkuwek) i powstawanie wadliwych wyrobów. Jednym z największych problemów jest zwiększona adhezja materiału wsadowego stali niklowo-chromowej (o zawartości niklu od 25–35% oraz chromu około 15–20%) do podłoża narzędzi (w przypadku pierwszej operacji: wyciskania – do matrycy, a w drugiej operacji: kucia – do stempla) wykonanych ze stali narzędziowej W360. Wynika to z trudności w kształtowaniu stali z dużą zawartością niklu i złym dobraniem parametrów procesu. Wskutek wysokich nacisków przy wysokiej temperaturze, a także na skutek długiej drogi tarcia dochodzi do blokowania się wyciskanego materiału w oczku matrycy [10]. Istotne jest prawidłowe dobranie odpowiednich parametrów technologicznych, m.in. warunków tribologicznych (odpowiedniej temperatury wsadu i narzędzi oraz środków smarnochłodzących), jak również optymalnego kształtu narzędzi kształtujących, co powinno wpłynąć zarówno na mniejsze siły podczas kształtowania, jak i na zminimalizowanie odkształceń resztkowych.

Obecnie do analizy i optymalizacji przemysłowych procesów kucia wykorzystuje się szereg informatycznych narzędzi inżynierskich oraz metody numeryczne bazujące na MES, często połączone z badaniami mikrostrukturalnymi, a także pomiarami termowizyjnymi, czy też analizę wymiarową z wykorzystaniem skanerów laserowych [11, 12, 13]. Zdaniem autorów najwięcej informacji można uzyskać z modelowania numerycznego, gdyż tego typu pakiety obliczeniowe pozwalają na wyznaczenie wielu trudnych lub wręcz niemożliwych do wyznaczenia w sposób doświadczalny wielkości fizycznych i innych parametrów technologicznych [14].

2. PRZEDMIOT I METODYKA BAAŃ

W pracy przeprowadzono analizę przemysłowego procesu wytwarzania na gorąco odkuwki zaworu ze stali chromowo-niklowej. Odkuwka tego typu jest kluczowym elementem silnika w samochodach ciężarowych i dlatego wymaga się od niej wysokich właściwości eksploatacyjnych, co związane jest głównie z zapewnieniem poprawnego płynięcia materiału odkuwki

high pressures, which significantly lower the forging tool durability (in extreme cases, only a dozen or so of good forgings are produced) as well as the production of faulty goods. One of the biggest problems is the increased adhesion of the charge material made of nickel-chromium steel (nickel content of 25–35%, chromium content of 15–20%) to the base of the tools (in the case of the first operation, i.e. extrusion – to the die, in the second operation, i.e. forging – to the punch) made from tool steel W360. This results from the difficulties in the forming of steel with a high nickel content and the inappropriately selected process parameters. As a result of high pressures with high temperatures as well as a long path of friction, we observe blocking of the extruded material in the eye of the die [10]. It is crucial to properly select the technological parameters, e.g. the tribological conditions (proper temperature of the charge and the tool, as well as proper cooling and lubricating agents), and also the optimal shape of the forming tools, which should lower the force during the forming process as well as minimize the residual strains.

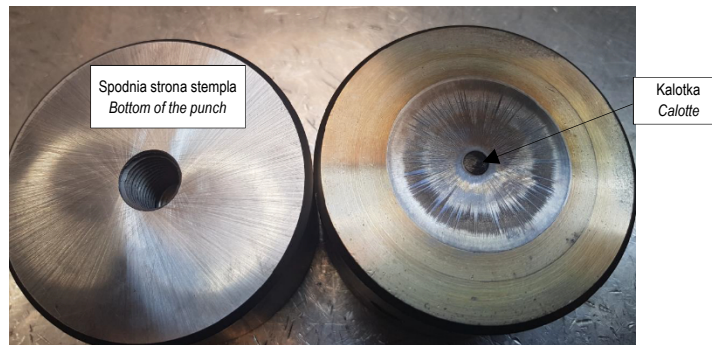
At present, for the analysis and optimization of the industrial forging processes, a range of IT engineering tools as well as numerical methods based on MES are applied, which are often combined with microstructural tests and thermovision measurements, or a dimensional analysis with the use of laser scanners [11, 12, 13]. In the opinion of the authors, the most information is provided by numerical modelling, as calculational packets of this type make it possible to determine many difficult or even impossible to experimentally determine physical quantities as well as other technological parameters [14].

2. RESEARCH SUBJECT AND METHODOLOGY

The study performs an analysis of the industrial hot process of producing a valve forging from chromium-nickel steel. A forging of this type is the key element of a heavy goods vehicle engine and so it is required to possess high operational properties, which is mainly connected with ensuring the proper forging material during the forming process, the lack of surface and internal

podczas kształtowania, brakiem wad powierzchniowych i wewnętrznych oraz dużej jakości i dokładności wymiarowo-kształtowej. Odkuwka zaworu wykonywana jest dwuetapowo. Najpierw z pręta nagrzanego do temperatury 1040°C w procesie wyciskania współbieżnego uzyskuje się tzw. „gruszka”. Następnie, w drugim etapie następuje kucie głowy zaworu (rys. 1b). Narzędzia w analizowanym procesie wykonane są ze stali narzędziowej do pracy na gorąco W360. Szczegółową analizę przeprowadzono dla stempla kuźniczego stosowanego w II operacji – kucia wykańczającego, ze względu na jego stosunkowo niską trwałość, w szczególności w okolicach kalotki (rys. 2), wskutek zwiększonej adhezji materiału wsadowego do podłoża narzędzi.

defects as well as high quality and shape-dimensional accuracy. A valve forging is produced in two stages. First, a bar heated to 1040°C undergoes the process of coextrusion to obtain the so-called bulb. Next, in the second stage, forging of the valve head is performed (Fig. 1b). The tools in the analyzed process are made of tool steel W360 for hot operations. A detailed analysis was performed on the forging punch used in operation II, i.e. finishing forging, because of its relatively low durability, especially in the vicinity of the calotte (Fig. 2), as a result of the increased adhesion of the charge material to the tool base.



Rys. 2. Stempel kuźniczy: po lewej część mocująca, po prawej część robocza (wyeksploatowana), z wyraźnymi śladami zużycia ściernego

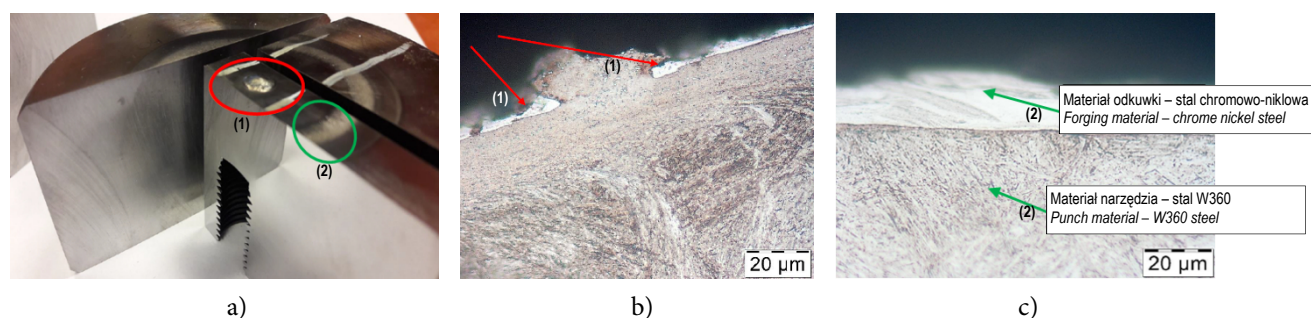
Fig. 2. Forging punch: left – the fastening part, right – the working part (worn), with visible traces of abrasive wear

Na rys. 3 przedstawiono elementy stempla z zaznaczonym obszarem kalotki oraz fragment obszaru leżącego przy jej obwodzie, dla którego zaobserwowano największe ślady zużycia i adhezji. Na podstawie wstępnych badań metalograficznych stwierdzono, że na powierzchni roboczej wyeksploatowanego stempla, w szczególności w wybranych, charakterystycznych obszarach można zauważyć wyraźne ślady adhezji (przyklejania się materiału odkuwki), jak również pęknięcia narzędzi i odrywania się większych fragmentów, co z kolei skutkuje śladami zużycia ściernego oraz cieplno-mechanicznego. Przeprowadzone wnikliwe obserwacje oraz zaawansowane badania mikrostrukturalne wykazały, że kluczowa jest adhezja materiału odkuwki do powierzchni narzędzia oraz odpuszczanie ma-

Fig. 3 shows the elements of the punch, marking the area of the calotte and a fragment of the area located at its circumference, for which the largest traces of wear and adhesion have been observed. Based on the preliminary metallographic tests, it was established that, on the working surface of the worn punch, especially in selected characteristic areas, we can observe clear traces of adhesion (sticking of the forging material), as well as cracking of the tools and tearing off of larger fragments, which, in turn, result in traces of abrasive and thermo-mechanical wear. The performed in-depth observations as well as advanced microstructural studies showed that the key factors are the adhesion of the forging material to the surface of the tool and the upsetting

teriału narzędzia w obszarze szyjki i jego przemieszczenie zgodnie z kierunkiem kształtowania nogi odkuwki. To z kolei powoduje, że pojawiają się naprzemiennie bruzdy oraz zadziory z materiałem narzędziowym i odkuwki w obszarze szyjki matrycy, co skutkuje blokowaniem się odkuwki podczas jej wypychania (w kierunku przeciwnym do wyciskania). Przyczyną tego może być nie do końca opanowana technologia wytwarzania odkuwki zaworu. Ponadto na podstawie licznych obserwacji i analiz przemysłowego procesu stwierdzono jego niestabilność, wynikającą najprawdopodobniej z przyjęcia nieodpowiednich parametrów technologicznych, m.in. temperatury wsadu oraz temperatury pracy narzędzi.

of the tool material in the area of the neck as well as its displacement in the direction of the formation of the forging's leg. This, in turn, causes the presence of grooves and flashes with the tool and forging material in the area of the die's neck, which results in the forging being blocked while it is being pushed out (in the direction opposite to that of the extrusion). A cause of this may be the not fully mastered technology of producing a valve forging. Also, based on the numerous observations and analyses of the industrial process, the latter's instability was stated, resulting most probably from the inappropriately assumed technological parameters, e.g. the charge temperature and tool operation temperature.



Rys. 3. a) Stempel wraz z zaznaczonymi obszarami do badań; b) SEM z obszaru kalotki stempla [czerwony – (1)] w obszarze bruzd i nalepień; c) SEM z wybranego obszaru [zielony – (2)] – widoczne nalepienia materiału odkuwki

Fig. 3. a) Punch with the marked test areas; b) SEM from the punch calotte area [red – (1)] in the zone of grooves and adhesions; c) SEM from the selected area [green – (2)] – visible adhesions of the forging material

W tym celu przeprowadzono wielowariantową analizę numeryczną dla obecnie realizowanej technologii (dla II operacji) dla najbardziej prawdopodobnych, mogących wystąpić w warunkach przemysłowych, wariantów symulacji komputerowych, uwzględniających zmiany temperatury narzędzi, wsadu oraz warunków tarcia.

Takie podejście jest uzasadnione, bowiem w wyniku modelowania numerycznego można wyznaczyć, bądź określić takie wielkości i parametry, których uzyskanie w inny sposób nie jest możliwe. Ponadto prowadzenie badań i testów w warunkach przemysłowych dla różnych wariantów mogłoby powodować spore utrudnienia i przestoje w bieżącej produkcji.

To that end, a multi-variant numerical analysis was performed for the currently realized technology (operation II), with the consideration of the most probable, possible to occur under industrial conditions, computer simulation variants, taking into account the tool and charge temperature changes as well as the friction conditions.

Such an approach is justified, because, owing to numerical modelling, it is possible to determine or describe those quantities and parameters which are otherwise impossible to obtain. Also, performing investigations and tests under industrial conditions for different variants could cause major difficulties and shut-downs in the current production.

3. ZAŁOŻENIA I WARUNKI BRZEGOWO-POCZĄTKOWE MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

W celu określenia wpływu temperatury i warunków tribologicznych na przebieg procesu kucia przeprowadzono symulacje numeryczne w programie FORGE 2.0 metodą elementów skończonych. Podstawowe dane przyjęte do symulacji:

- temperatury nominalne: wsad – 1040°C, narzędzia – 200°C, otoczenie – 30°C;
- prasa Metal Pres 700 E (charakterystyka dobrana z bazy programu);
- model tarcia wg Treski: $f = 0,4$;
- współczynnik przewodzenia ciepła w kontakcie – 10 kW/m²·x°K (oznaczony w programie jako medium) oraz współczynnik przewodzenia ciepła narzędzi i wsadu z otoczeniem – 15 W/m²·x°K;
- przyjęto 2s jako czas transportu odkuwki z pierwszej operacji do drugiej łącznie z czasem oczekiwania na moment kucia.

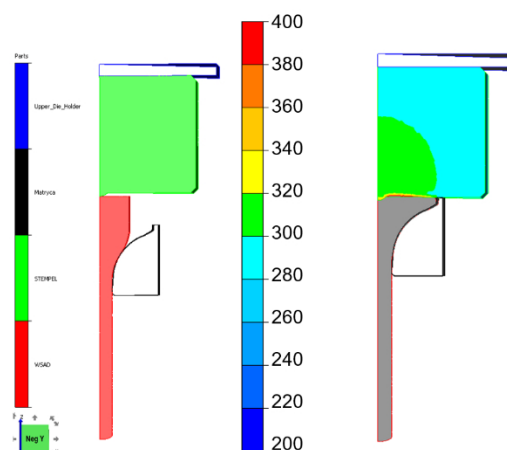
W symulacji kucia zaworu w drugiej operacji z przedkuwki w kształcie tzw. „gruszki” zastosowano model osiowosymetryczny z odkształcalnymi narzędziami–stemplami, natomiast matryce oraz popychacz przyjęto jako nieodkształcalne. Dla każdego z rozważanych wariantów symulacji pozyskano wszystkie wyniki z pierwszej operacji kucia. Jako materiał odkuwki zastosowano stal 1.4981 (X8CrNiMoNb16-16), który według strony www.totalmateria.com posiada podobne właściwości mechaniczne do materiału wsadowego używanego w procesie rzeczywistym. Jako materiał stempla użyto stali WCL (tak jak w procesie kucia). Na rys. 4 pokazany został ogólny widok modelu przed i po symulacji II operacji kucia.

3. ASSUMPTIONS AND BOUNDARY-INITIAL CONDITIONS OF NUMERICAL MODELING

In order to determine the effect of the temperature and the tribological conditions on the course of the forging process, numerical simulations were carried out in the FORGE 2.0 program by the finite element method. The basic data assumed for the simulation were as follows:

- *nominal temperatures: charge – 1040°C, tools – 200°C, environment – 30°C;*
- *Metal Pres 700 E press (characteristics selected from the program database);*
- *Treska’s friction model: $f = 0,4$;*
- *thermal conductivity coefficient in the contact – 10 kW/m²·x°K (denoted as the medium in the program) and thermal conductivity coefficient of the tools and the charge with the environment – 15 W/m²·x°K;*
- *2s was assumed as the time needed to transport the forging from the first to the second operation, including the time of waiting for the moment of forging.*

In the simulation of the process of forging a valve in the second operation from a preform in the shape of the so-called bulb, an axisymmetric model with deformable tools-punches was applied, whereas the dies and the pusher were assumed as non-deformable. For each considered simulation variant, all the results from the first forging operation were obtained. Steel 1.4981 (X8CrNiMoNb16-16) was used as the forging material, which, according to www.totalmateria.com, exhibits similar mechanical properties to those of the charge material used in the actual process. Steel WCL was used as the punch material (as in the forging process). Fig. 4 shows a general view of the model before and after the simulation of forging operation II.



Rys. 4. Układ narzędzi na początku (po lewej) oraz na koniec procesu (po prawej) w drugiej operacji (dla wszystkich wariantów wyniki do symulacji zostały zaimplementowane z pierwszej operacji kucia)

Fig. 4. Tool arrangement at the beginning (left) and towards the end of the process (right) in the second operation (for all the variants, the results for the simulation were implemented from the first forging operation)

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

Ostatecznie zdecydowano się na przeprowadzenie analizy numerycznej dla pięciu różnych wariantów drugiej operacji kucia (do symulacji zaimplementowano z pierwszej operacji dla procesu nominalnego):

I – zakładany zgodnie z technologią proces, czyli temperatura wsadu wynosząca 1040°C, narzędzi 200°C, tarcie według Treski: $f = 0,2$;

II – obniżona temperatura wsadu do 940°C, pozostałe wielkości przyjęto jak dla procesu zgodnego z technologią (I wariant);

III – podniesiona temperatura narzędzi do 300°C, pozostałe wielkości jak w I wariacie;

IV – proces zakładany zgodnie z technologią, lecz zwiększono czynnik tarcia do $m = 0,6$;

V – zwiększona temperatura wsadu do 1140°C oraz zwiększony czynnik tarcia do $m = 0,6$.

Szczegółowej analizie poddano rozkłady temperatury, sił kucia oraz całkowitego zużycia dla wytypowanych pięciu wariantów, odnosząc wyniki do obecnie realizowanej technologii – wariantu I.

4.1. Rozkłady temperatury

Na rys. 5 przedstawiono przykładowe warianty z rozkładami temperatury na początku pro-

4. DISCUSSION OF RESULTS

Ultimately, it was decided that a numerical analysis for five variants of the second forging operation would be performed (for the simulation, the results from the first operation were implemented for the nominal process):

I – process assumed according to the technology, that is the charge temperature of 1040°C, the tool temperature of 200°C and Treska's friction: $f = 0.2$;

II – charge temperature lowered to 940°C, the remaining quantities were assumed as for the process in accordance with the technology (variant I);

III – tool temperature increased to 300°C, the remaining quantities – as in variant I;

IV – process assumed according to the technology, with the coefficient of friction, however, increased to $m = 0.6$;

V – charge temperature increased to 1140°C and coefficient of friction increased to $m = 0.6$.

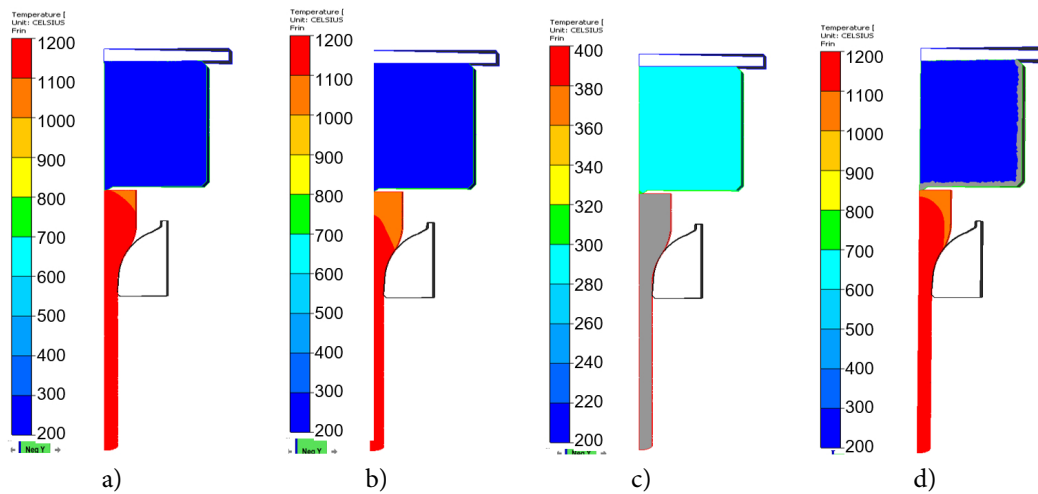
A detailed analysis was performed on the distribution of temperatures, friction forces and total wear for the five selected variants, referring the results to the currently realized technology – variant I.

4.1. Temperature distributions

Fig. 5 shows exemplary variants with the temperature distributions at the beginning of the for-

cesu kucia, uwzględniając (importując) wyniki dotyczące historii odkształcenia z I operacji procesu.

ging process, taking into account (importing) the results referring to the history of deformation from operation I of the process.

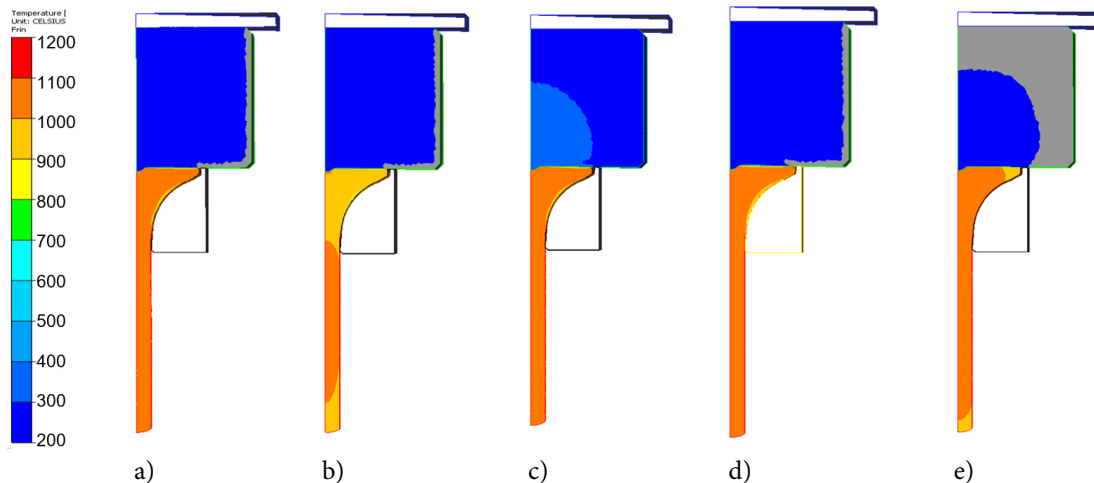


Rys. 5. Rozkłady temperatury w narzędziach i odkawkach na początku procesu kucia dla wybranych wariantów symulacji: a) I – proces zgodny z zakładaną technologią, b) II, c) III, d) IV

Fig. 5. Temperature distributions in tools and forgings at the beginning of the forging process for the selected simulation variants: a) I – process in accordance with the technology, b) II, c) III, d) IV

Na rys. 6 przedstawiono rozkłady temperatury dla wybranych wariantów w końcowym etapie procesu kucia (II operacji).

Fig. 6 shows the temperature distributions for the selected variants in the final stage of the forging process (operation II).



Rys. 6. Rozkłady temperatury dla wybranych wariantów w końcowym etapie procesu wyciskania

Fig. 6. Temperature distributions for the selected variants at the final stage of the extrusion process

Na podstawie przedstawionych wyników z rozkładów temperatury dla stempla można zaobserwować, że we wszystkich przypadkach, poza zwiększoną temperaturą dla narzędzi do 300°C, zewnętrzne powierzchnie pozostałych stempli uległy wychłodzeniu poniżej 200°C, do ok. 180°C. Z kolei dla wariantu III ze zwiększoną

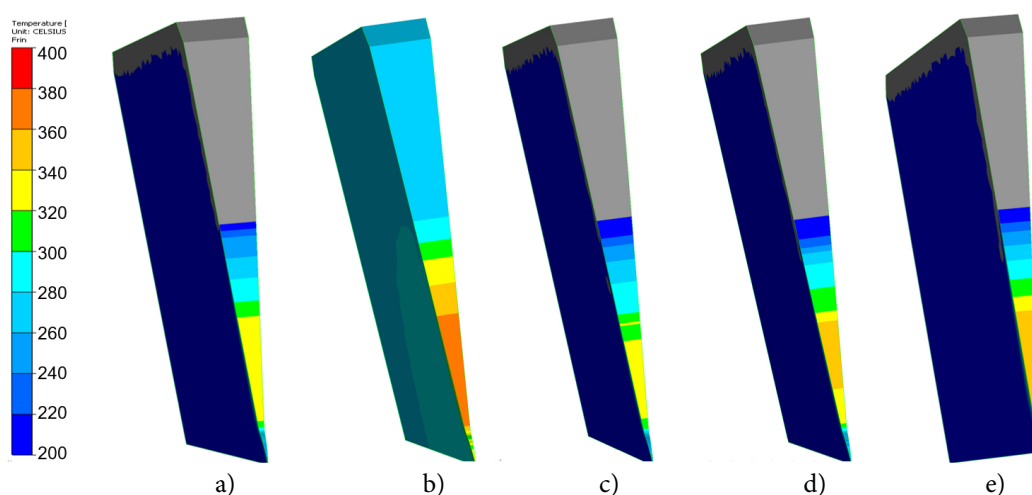
Based on the presented results referring to the temperature distributions for the punch, we can observe that, in all the cases, except for the tool temperature increased to 300°C, the external surfaces of the punches underwent cooling below 200°C, to about 180°C. In turn, for variant III, with the increased temperature of the punch,

temperaturą stempla można dodatkowo zaobserwować podniesienie temperatury w części środkowej od strony kontaktu z odkuwką do ok. 400°C. Natomiast w przypadku rozkładów temperatury w odkuwkach po tej operacji można zauważyć, że dla wszystkich wariantów, poza obniżoną temperaturą wsadu do 940°C, średnia temperatura w odkuwce wynosi około 1100°C. Natomiast dla V wariantu, zarówno dla stempla, jak i odkuwki, można zaobserwować obniżenie temperatury. Prawdopodobną przyczyną mogło być zwiększone tarcie, co spowodowało utrudnione płynięcie materiału odkuwki w obrębie części talerzyka, a w konsekwencji dłuższy kontakt ze stemplem, który odebrał więcej ciepła z „cieplejszej” odkuwki. Ponadto na podstawie uzyskanych wyników z MES można wnioskować, że niewielkie zmiany parametrów temperaturowych, które mogą wystąpić w procesie przemysłowym, mogą spowodować spore zmiany w rozkładach temperatur, co może mieć daleko idące konsekwencje.

Na rys. 7 przedstawiono rozkłady temperatury na wycinku stempla od strony kontaktu z odkuwką (częścią talerzyka) dla poszczególnych wariantów (fragment co 10 stopni z układu z układu osiowosymetrycznego) pod koniec procesu kucia, w celu lepszej analizy zmian temperatury w kontakcie.

we can additionally observe a temperature increase in the central part on the side of the contact with the forging to about 400°C. In the case of the temperature distributions in the forgings after this operation, we can notice that, for all the variants, except for the charge temperature lowered to 940°C, the average temperature in the forging equals about 1100°C. In turn, for variant V, both in the case of the punch and the forging, we can observe a decrease of the temperature. A probable reason may have been increased friction, which inhibited the flow of the forging material in the area of the tray, and in consequence, a longer contact with the punch, which received more heat from the “warmer” forging. Also, based on the results obtained from MES, we can infer that the slight changes of the temperature parameters which may take place in the industrial process can cause significant changes in the temperature distributions, which, in turn, may have far-reaching consequences.

Fig. 7 shows the temperature distributions on the section of the punch on the side of the contact with the forging (the tray) for the particular variants (a fragment every 10 degrees from the axisymmetric system) towards the end of the forging process, for the purpose of a better analysis of the temperature changes in the contact.



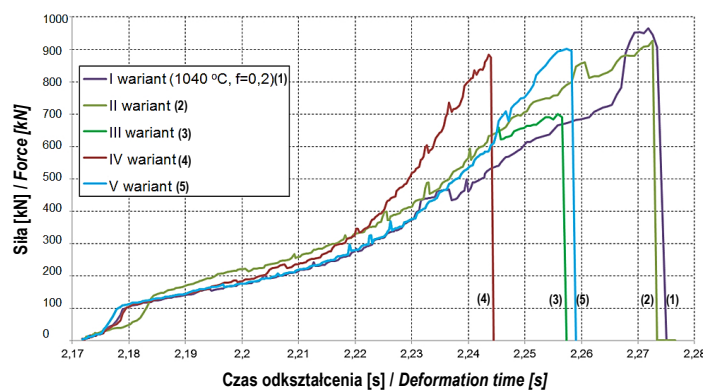
Rys. 7. Rozkłady temperatury na wycinku stempla (fragment co 10 stopni z układu osiowosymetrycznego) dla wybranych wariantów procesu dla wariantów: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Fig. 7. Temperature distribution of the section of the punch (a fragment every 10 degrees from the axisymmetric system) for the selected variants of the process: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Analizując pola rozkładu temperatury, można stwierdzić, że poza stemplem, dla którego zwiększono temperaturę do 300°C, w pozostałych przypadkach nie widać istotnych różnic. Natomiast należy zwrócić uwagę, że podczas analizy zmian pola temperatury w trakcie procesu można było zauważyć pewne różnice, np. że dla stempla w procesie ze zwiększonym tarcie dużo dłuższy czas kontaktu ze zwiększoną temperaturą miał miejsce w okolicy kalotki. W przypadku V wariantu można zauważyć, że obszar od kalotki do miejsca występowania intensywnego zużycia ściernego i adhezji ma najwyższą temperaturę około 250°C w stosunku do pozostałych, oczywiście poza wariantem III (wyższa temperatura początkowa stempla).

4.2. Przebiegi sił kucia podczas odkształcenia

W celu pełniejszej analizy oraz wpływu wprowadzonych zmian temperatury i warunków tarcia w poszczególnych wariantach, na rys. 8 przedstawiono przebiegi sił kucia w funkcji czasu odkształcenia.



Rys. 8. Przebiegi sił wyciskania w funkcji czasu odkształcenia

Fig. 8. Courses of the extrusion forces in the function of the deformation time

Na podstawie przedstawionych przebiegów widać, że najwyższe wartości sił w końcowym etapie kucia uzyskano dla wariantów: I – nominalny proces oraz II – obniżona temperatura wsadu do 940°C. Natomiast najniższe wartości (maksymów sił) uzyskano dla wariantu III – zwiększona temperatura narzędzi do 300°C oraz dla wariantu IV – zwiększone tarcie do 0,6. Dla wariantu V maksymalna wartość siły oscyluje na poziomie 900 kN. W przypadku wariantów

In the analysis of the temperature distributions, we can state that, except for the punch, for which the temperature was increased to 300°C, no significant changes can be observed. In turn, it should be pointed out that, during the analysis of the changes in the temperature field during the process, it was possible to notice certain differences. For example, for the punch, in the process with increased friction, a much longer time of contact with the increased temperature was observed in the vicinity of the calotte. In the case of variant V, we can see that the area from the calotte to the zone of intensive abrasive wear and adhesion has the highest temperature, about 250°C, in respect of the remaining ones, except of course for variant III (higher initial temperature of the punch).

4.2. Course of forging forces during deformation

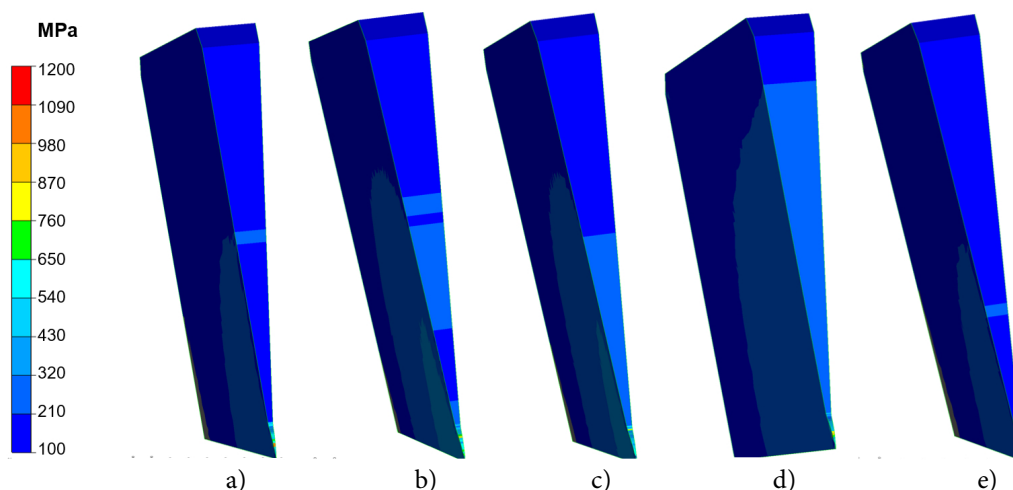
For a more thorough analysis of the effect of the introduced changes on the temperature distributions and friction conditions in the particular variants, Fig. 8 shows the courses of the forging forces in the function of the deformation time.

Based on the presented courses, we can see that the highest force values at the final stage of the forging process were obtained for variants: I – nominal process and II – charge temperature lowered to 940°C. In turn, the lowest values (force maxima) were obtained for variant III – tool temperature increased to 300°C and variant IV – friction increased to 0.6. For variant V, the maximal force value oscillates at the level of 900kN. In the case of variants III and IV, the lowered ma-

III i IV obniżenie maksymalnej siły w stosunku do procesu nominalnego (wariant I) oraz w przypadku obniżenia początkowej temperatury narzędzi (wariant II) można tłumaczyć nieco innym sposobem odkształcania się materiału odkuwki w drugiej operacji wskutek zmienionych warunków tribologicznych. Można także zaobserwować, że dla wariantu IV oraz V koniec maksymalnych sił następuje szybciej w stosunku do procesu nominalnego, na co wpływa zapewne zwiększone tarcia, które utrudnia płynięcie materiału. Podobną sytuację można zauważyć dla wariantu III, gdzie wyższa temperatura początkowa stempla (300°C) powoduje zwiększenie tarcia.

4.3. Rozkłady naprężeń zastępczych dla stempli

Na rys. 9 przedstawiono rozkłady naprężeń zastępczych dla analizowanych wariantów.



Rys. 9. Rozkłady naprężeń von Missesa (zastępczych) w końcowym etapie odkształcania dla poszczególnych wariantów: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Fig. 9. Distribution of Mises (reduced) stresses at the final deformation stage for the particular variants: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Przedstawione wyniki są do siebie zbliżone i korelują z przebiegami sił dla poszczególnych wariantów. Natomiast można zauważyć, że we wszystkich przypadkach największe wartości naprężeń występują w środkowej części stempla, w miejscu kształtowania kalotki. Również w tym przypadku, na podstawie przedstawionych wyników MES, można zaobserwować, jakie konsekwencje mogą przynieść stosunkowo niewielkie (mogące mieć miejsce również w procesie przemysłowym) zmiany parametrów.

ximal force in respect of the nominal process (variant I) as well as the lowered initial tool temperature (variant II) can be explained by a slightly different manner of deformation of the forging material in the second operation as a result of the changed tribological conditions. We can also observe that, for variant IV and V, the end of the maximal forces takes place faster than in the nominal process, which is probably caused by the increased friction, inhibiting the flow of the material. A similar situation can be noticed for variant III, where a higher initial temperature of the punch (300°C) causes increased friction.

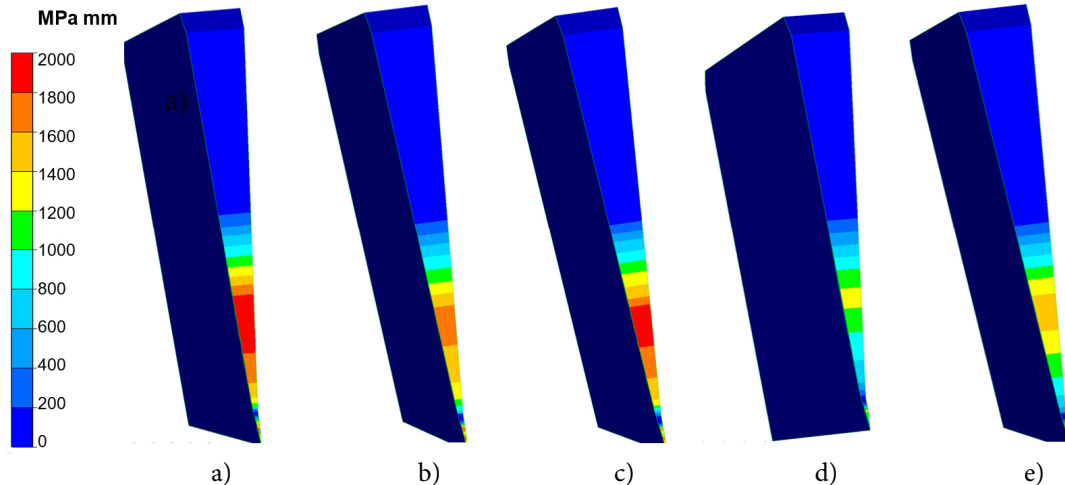
4.3. Distribution of reduced stresses for punches

Fig. 9 shows the distributions of reduced stresses for the analyzed variants.

The presented results are similar and correlate with the force courses in the particular variants. In turn, we can notice that, in all the cases, the highest stress values are present in the central part of the punch, in the area of calotte formation. Also in this case, based on the presented MES results, we can observe the consequences which might be brought by relatively small parameter changes (which may occur in the industrial process).

4.4. Rozkłady zużycia ściernego dla stempli

Na rys. 10 przedstawiono rozkłady całkowitego zużycia ściernego na narzędziach dla wybranych wariantów symulacji.



Rys. 10. Rozkłady całkowitego zużycia ściernego stempli dla wybranych wariantów symulacji: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V
 Fig. 10. Distributions of the total abrasive wear of the punches for the selected simulation variants: a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Na podstawie przedstawionych wyników zużycia ściernego stempli można zauważyć, że największe całkowite zużycie ściernie narzędzia wystąpiło dla wariantu z podwyższoną temperaturą na stemplu do 300°C. W przypadku wystąpienia takich warunków w przemysłowym procesie może to powodować, że dla materiału odkuwki przejmującego więcej ciepła w kontakcie od stempla obniża się granica plastyczności, co prawdopodobnie sprzyja lepszemu płynięciu materiału odkuwki po narzędziu, a to z kolei powoduje jego zwiększone zużycie. Dla pozostałych wariantów rozkłady są zbliżone. Jedynie dla wariantów narzędzia ze zwiększonym tarciem, zużycie ściernie jest nieco niższe, co może być spowodowane utrudnionym płynięciem materiału po stemplu i tym samym jego mniejsze zużycie. Największe wartości zużycia obserwowane są na kalotce oraz w pewnej odległości od osi stempla w kierunku promieniowym (na zewnątrz materiału) tam, gdzie podczas badań makro zaobserwowano zwiększone zużycie ściernie i adhezję.

4.4. Distribution of abrasive wear for punches

Fig. 10 shows the distributions of the total abrasive wear on the tools for the selected simulation variants.

Based on the presented results referring to the abrasive wear of the punches, we can notice that the highest total abrasive wear of the tool took place for the variant with the temperature on the punch increased to 300°C. In the case of the occurrence of such conditions in the industrial process, it may happen that, for the forging material accepting more heat in the contact from the punch, the yield point lowers, which probably favours a better flow of the forging material along the tool, and this, in turn, causes increased wear. For the remaining variants, the distributions were similar. Only for the variants of the tool with the increased friction is the abrasive wear slightly lower, which may be caused by the inhibited flow of the material along the punch and thus its lower wear. The highest wear values are observed on the calotte and at a certain distance from the punch axis in the radial direction (outside of the material) – in the area where increased abrasive wear and adhesion were observed during the macro-tests.

5. WNIOSKI

Przeprowadzona wielowariantowa analiza przemysłowego procesu kucia odkuwki zaworowej przeznaczonej dla silników samochodów ciężarowych z wykorzystaniem modelowania numerycznego dostarczyła wielu cennych informacji trudnych do uzyskania podczas analizy procesu przemysłowego, takich jak m.in. rozkładu pól temperatury, nacisków oraz parametrów określających zużycie dla zmiennych warunków, a także przebiegów sił kucia. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano, wyszczególnione poniżej, najważniejsze wnioski szczegółowe:

1. uwzględniając wyniki z modelowania numerycznego, a następnie wprowadzając na tej podstawie ewentualne korekty w procesie przemysłowym możliwe jest polepszenie/usprawnienie, a nawet zoptymalizowanie obecnej technologii w kierunku zwiększenia trwałości narzędzi, a także uzyskania poprawnego pod względem wymiarowo-kształtowym oraz jakościowym wyrobu;
2. przeprowadzone symulacje komputerowe potwierdziły wyniki obserwacji makroskopowych wskazujących na newralgiczne obszary zużycia narzędzi;
3. uzyskane wyniki symulacji komputerowych wykazały, że stosunkowo niewielkie zmiany kluczowych parametrów tribologicznych, takich jak: temperatura wsadu i narzędzi oraz smarowanie, istotnie wpływają na końcowe wartości tych i innych parametrów oraz mogą mieć swoje dalsze konsekwencje, w tym mogą być przyczyną przedwczesnego zużycia się narzędzi;
4. dlatego aktualnie w warunkach przemysłowych weryfikowane są parametry termiczne związane z przestrzeganiem technologii prawidłowego nagrzewania narzędzi i wsadu, a także zmian sposobu smarowania, włączając zmianę środka smarnego, bowiem – jak wykazały prezentowane wyniki badań – są to istotne parametry, których nieprawidłowy dobór może mieć daleko idące niekorzystne konsekwencje.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykorzystując obecnie metody numeryczne (obejmujące wielowariantową ana-

5. CONCLUSIONS

The multi-variant analysis performed on the industrial process of producing a valve forging assigned for heavy goods vehicles with the use of numerical modelling has provided a lot of valuable information, difficult to obtain during an analysis of the industrial process, such as: the distribution of the temperature fields, the pressures and the parameters determining the wear for varying conditions, as well as the courses of the forging forces. On the basis of the implemented studies, the following detailed conclusions have been drawn:

1. *by considering the results of numerical modelling and then introducing possible corrections into the industrial process based on the former, it is possible to improve/rationalize or even optimize the currently applied technology in order to increase tool durability as well as to obtain a proper product in respect of the shape and dimensions as well as quality;*
2. *the performed computer simulations confirmed the results of the macroscopic observations pointing to the crucial tool wear areas;*
3. *the obtained computer simulation results demonstrated that relatively small changes of the key tribological parameters, such as: the charge and tool temperature as well as lubrication, significantly affect the final values of these and other parameters, and can also have their further consequences, such as premature tool wear;*
4. *that is why, currently, under industrial conditions, a verification is being performed of the thermal parameters, in respect of the agreement with the technology of properly heating the tools and the charge, and also possible changes in the manner of lubrication, including a change of the lubricating agent, because, as it has been demonstrated by the presented investigation results, they are the crucial parameters, whose inappropriate selection may have far-reaching negative consequences.*

Based on the performed studies, we can establish that by applying the current numerical methods (including a multi-variant analysis) com-

lizę) w połączeniu z badaniami mikrostruktury oraz wspomagając się innymi technikami, możliwe jest zaprojektowanie, a także weryfikacja i ulepszenie technologii wytwarzania. Wyniki te mogą także posłużyć do optymalizacji wybranych parametrów podobnych procesów kucia i wyciskania ze względu na jakość odkuwki oraz trwałość narzędzi.

Obecnie trwają dalsze prace związane z usprawnieniem przedstawionej technologii, uwzględniające modelowanie numeryczne z kolejnymi wariantami zmian parametrów tribologicznych, w celu wyboru najbardziej optymalnych parametrów w kierunku zwiększenia trwałości oprzyrządowania kuźniczego. W przyszłości planuje się także zastosowanie warstw hybrydowych oraz zmiany parametrów warstwy wierzchniej narzędzi lub zmiany materiału narzędziowego.

PODZIĘKOWANIA

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Polska (grant nr: POIR.01.01.01-00-0034/19).

LITERATURA

- [1] Forsberg Peter, Patrik Hollman, Staffan Jacobson. 2001. "Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines". *Wear* 271 (9–10): 2477–2484.
- [2] Elo Robin, Jannica Heinrichs, Staffan Jacobson. 2017. "Wear protective capacity of tribofilms formed on combustion engine valves with different surface textures". *Wear* 376–377 (Part B): 1429–1436.
- [3] Priest Martin, Christopher Mark Taylor. 2000. "Automobile engine tribology — approaching the Surface". *Wear* 241 (2): 193–203.
- [4] Jeong Ho-Seung, Jongrae Choa, Ho-Ceou Park. 2005. "Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging". *Journal of Materials Processing Technology* 162–163: 504–511.
- [5] Wang Youta Sei, Srinivasa Narasimhan et al. 1998. "Wear and Wear Mechanism Simulation of Heavy-Duty Engine Intake Valve and Seat Inserts". *Journal of Materials Engineering and Performance* 7 (1): 53–65.
- [6] Yuanzhia Zhu, Yin Zhimin, Xu Jiangpin. 2011. "Microstructural mapping in closed die forging process of superalloy Nimonic 80a valve head". *Journal of Alloys and Compounds* 509 (20): 6106–6112.

combined with microstructural tests and supported by other techniques, it is possible to design or verify and improve the production technology. These results can also be used for the optimization of selected parameters in similar forging and extrusion processes in respect of the quality of the forging and the durability of the tools.

At present, further studies are being performed on the rationalization of the presented technology, with the consideration of numerical modelling with other variants of tribological parameter changes, in order to select the most optimal parameters and thus improve the durability of the forging instrumentation. In the future, there are also plans to apply hybrid layers as well as to change the parameters of the surface layer of the tools or to change the tool material.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was financed by The National Centre for Research and Development, Poland (grant no.: POIR.01.01.01-00-0034/19).

REFERENCES

- [1] Forsberg Peter, Patrik Hollman, Staffan Jacobson. 2001. "Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines". *Wear* 271 (9–10): 2477–2484.
- [2] Elo Robin, Jannica Heinrichs, Staffan Jacobson. 2017. "Wear protective capacity of tribofilms formed on combustion engine valves with different surface textures". *Wear* 376–377 (Part B): 1429–1436.
- [3] Priest Martin, Christopher Mark Taylor. 2000. "Automobile engine tribology — approaching the Surface". *Wear* 241 (2): 193–203.
- [4] Jeong Ho-Seung, Jongrae Choa, Ho-Ceou Park. 2005. "Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging". *Journal of Materials Processing Technology* 162–163: 504–511.
- [5] Wang Youta Sei, Srinivasa Narasimhan et al. 1998. "Wear and Wear Mechanism Simulation of Heavy-Duty Engine Intake Valve and Seat Inserts". *Journal of Materials Engineering and Performance* 7 (1): 53–65.
- [6] Yuanzhia Zhu, Yin Zhimin, Xu Jiangpin. 2011. "Microstructural mapping in closed die forging process of superalloy Nimonic 80a valve head". *Journal of Alloys and Compounds* 509 (20): 6106–6112.

- [7] Morii Hirokazu, Hyoji Yoshimura. 2012. "Method for producing hollow engine valve". US Patent No.8881391 B2.
- [8] Hongchao Ji, Liu Jinping, Wang Baoyu, Fu Xiaobin, Xiao Wenchao, Hu Zhenghuan. 2017. "A new method for manufacturing hollow valves via cross wedge rolling and forging: Numerical analysis and experiment validation". *Journal of Materials Processing Technology* 240: 1–11.
- [9] Mahle Polska. 2018. Raport wewnętrzny. Porównanie zaworów wyciskanych i spęczanych, Krotoszyn.
- [10] ASM Metals Handbook Vol. 14, Forming and Forging. 9th Edition. 1988.
- [11] Hawryluk Marek, Zbigniew Gronostajski et al. 2018. „Wear mechanisms analysis of dies used in the process of hot forging a valve made of high nickel steel”. *Archives of Metallurgy and Materials* 63 (4): 1963–1974.
- [12] Hawryluk Marek. 2016. "Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes". *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 16: 845–866.
- [13] Kocańda Andrzej. 2003. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. W *Informatyka w Technologii Metali*, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [14] Vazquez Victor, Talyan Altan. 2000. "Die design for flashless forging of complex parts". *Journal of Materials Processing Technology* 98: 81–89.
- [15] Hawryluk Marek, Joanna Jakubik. 2016. "Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes". *Engineering Failure Analysis* 59: 396–409.
- [7] Morii Hirokazu, Hyoji Yoshimura. 2012. "Method for producing hollow engine valve". US Patent No.8881391 B2.
- [8] Hongchao Ji, Liu Jinping, Wang Baoyu, Fu Xiaobin, Xiao Wenchao, Hu Zhenghuan. 2017. "A new method for manufacturing hollow valves via cross wedge rolling and forging: Numerical analysis and experiment validation". *Journal of Materials Processing Technology* 240: 1–11.
- [9] Mahle Polska. 2018. Raport wewnętrzny. Porównanie zaworów wyciskanych i spęczanych, Krotoszyn.
- [10] ASM Metals Handbook Vol. 14, Forming and Forging. 9th Edition. 1988.
- [11] Hawryluk Marek, Zbigniew Gronostajski et al. 2018. „Wear mechanisms analysis of dies used in the process of hot forging a valve made of high nickel steel”. *Archives of Metallurgy and Materials* 63 (4): 1963–1974.
- [12] Hawryluk Marek. 2016. "Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes". *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 16: 845–866.
- [13] Kocańda Andrzej. 2003. Określenie trwałości narzędzia w obróbce plastycznej metali. W *Informatyka w Technologii Metali*, 213–256. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [14] Vazquez Victor, Talyan Altan. 2000. "Die design for flashless forging of complex parts". *Journal of Materials Processing Technology* 98: 81–89.
- [15] Hawryluk Marek, Joanna Jakubik. 2016. "Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes". *Engineering Failure Analysis* 59: 396–409.