



Analiza zużycia narzędzi kuźniczych przy wykorzystaniu ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem laserowym

Analysis of forging tool wear with the application of a measuring arm integrated with a laser scanner

(1) Marek Hawryluk*, (2) Jacek Ziemia, (3) Mateusz Skwarski

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

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 22.06.2017

Recenzja: 17.07.2017

Akceptacja: 29.09.2017

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji i założeń oraz metod badawczych, autor przeprowadzonych badań i ich analiz
- (2) Autor koncepcji i założeń oraz metod badawczych, autor przeprowadzonych badań i ich analiz
- (3) Autor przeprowadzonych badań i ich analiz

Streszczenie

Praca dotyczy możliwości wykorzystania technik skanowania 3D do kontroli zmian geometrii warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych w oparciu o pomiar zmian geometrycznych odkuwek cyklicznie pobieranych z procesu. Do badań wytypowano proces kucia odkuwki pokrywy stosowanej jako uszczelniacz wału korbowego w samochodach ciężarowych. Szczegółowej analizie poddano zużywanie się narzędzia – wypełniacza, stosowanego w drugiej operacji kucia (w górnym zestawie narzędzi). Badania zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszym etapem była analiza zużycia narzędzi na podstawie bezpośredniego skanowania ich powierzchni, a następnie opracowania krzywej zużycia – ubytku materiału w zależności od liczby odkuwek. W drugim etapie przeprowadzono skanowanie wybranej powierzchni cyklicznie pobieranych odkuwek i na tej podstawie dokonywano analizy postępującego przyrostu materiału, co jednocześnie stanowiło ubytek materiału na narzędziach. Następnie wyznaczono charakterystykę zmian geometrii odkuwek i porównano z krzywą zużycia dla narzędzi. Uzyskane analizy wykazały dużą zgodność, co wskazuje na możliwość wykorzystania pośredniej metody skanowania odwrotnego 3D (na podstawie pomiarów powierzchni odkuwek) do analizy zmian geometrii warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych, bez konieczności ich demontażu z agregatu kuźniczego. Zaproponowane przez autorów innowacyjne podejście do oceny aktualnego stanu narzędzia kuźniczego pozwala na podejmowanie decyzji o przedłużeniu bądź skróceniu czasu jego eksploatacji na podstawie rzeczywistego (bieżącego) zużycia, a nie na podstawie sztywno ustalonej trwałości (maksymalnej liczby wykonanych odkuwek). Wykazane w pracy wady i zalety opracowanej metody z wykorzystaniem skanowania 3D pozwalają na wydłużenie czasu eksploatacji oprzyrządowania kuźniczego, a tym samym na wymierne obniżenie kosztów produkcji.

Słowa kluczowe: zużycie, trwałość narzędzi kuźniczych, skanowanie ramieniem pomiarowym

Article info

Received: 22.06.2017

Reviewed: 17.07.2017

Accepted: 29.09.2017

Authors' contribution

- (1) Author of concept, assumptions and research methods, author of conducted research and its analysis

Abstract

The study discusses the possibilities of the application of 3D scanning techniques to control the changes in the geometry of the forging tool surface layer on the basis of a measurement of the geometrical changes of the forgings periodically collected from the process. For the investigations, the process of producing a forging of a lid used as a crankshaft seal in motor trucks was selected. A detailed analysis was performed on the wear of the tool – a filler used in the second forging operation (in the upper tool set). The studies were divided into two stages. The first stage was an analysis of the tools' wear based on direct scanning of their surface, followed by the elaboration of the wear curve – material loss depending on the number of forgings. The second stage involved scanning of the selected surface of the periodically collected forgings and, based on it, an analysis of the proceeding material growth, which simultaneously constituted a ma-

* 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

- (2) *Author of concept, assumptions and research methods, author of conducted research and its analysis*
- (3) *Author of conducted research and its analysis*

terial loss on the tools. Next, the characteristics of the geometry change of the forgings were determined and compared with the wear curve for the tools. The obtained analyses were in a good agreement, which suggests the possibility of using the indirect method of 3D reverse scanning (based on the forging surface measurements) for the analysis of the geometry changes of the forging tool surface layer, without the necessity to disassemble the tools from the forging aggregate. The innovative approach to the assessment of the current state of a forging tool proposed by the authors makes it possible to make decisions about a prolongation or shortening of its operation time based on the actual (present) wear, rather than on the basis of a predetermined, hardcoded durability (maximal number of produced forgings). The pros and cons of the elaborated method with the use of 3D scanning presented in the paper make it possible to prolong the operation time of forging instrumentation, thus measurably lowering the production costs.

Keywords: *wear, forging tool durability, scanning with a measuring arm*

1. WSTĘP

Digitalizacja obiektów rzeczywistych ma zasadnicze znaczenie w różnych dziedzinach nauki i przemysłu. Procesy przemysłowe takie, jak montaż czy wytwarzanie wyrobów są skomplikowane, wysoce zautomatyzowane i zazwyczaj oparte na danych CAD. Dlatego optymalne działanie takich procesów jest możliwe przez zastosowanie różnych systemów zapewnienia kontroli jakości. Dotyczy to zarówno maszyn i urządzeń, a także narzędzi i samego produktu. W szczególności geometria wytworzonego wyrobu musi zostać gruntownie sprawdzona w celu zapewnienia posiadania odpowiednich wymiarów oraz spełnienia innych parametrów jakościowych. Może to być zapewnione poprzez skuteczny pomiar i analizę kształtu przy użyciu statycznych i mobilnych skanerów 3D oraz coraz częściej ramion pomiarowych ze zintegrowanymi skanerami 3D [7, 12].

Obecnie zastosowanie skanerów 3D znaleźć można w wielu gałęziach przemysłu, m.in: w budownictwie i inżynierii lądowej do pomiarów i dokumentacji budynków, w przemyśle odlewniczym [23], w medycynie do uchwycenia kształtu na potrzeby tworzenia protez [16] lub implantów stomatologicznych [1, 15], w koordynowaniu projektowania produktu, używając części z wielu źródeł, w szerokim aspekcie inżynierii odwrotnej, a także w zapewnieniu jakości w metrologii przemysłowej [1, 15, 16]. Zwłaszcza ten ostatni obszar zastosowań znajduje coraz większe uznanie, np. w kontroli geometrii narzędzi kuźniczych oraz odkuwek.

Procesy kucia matrycowego należą do jednych z najtrudniejszych w realizacji procesów wytwarzania, a dodatkowo zużywanie się narzę-

1. INTRODUCTION

The digitalization of real objects has a basic significance in many branches of science and industry. Industrial processes such as the assembly or production of goods are complicated, highly automated processes, usually based on the CAD data. That is why the optimal operation of such processes is possible through the application of various systems of providing quality control. This refers to both machines and devices, as well as tools and the product itself. In particular, the geometry of the manufactured product has to be thoroughly verified in order to ensure the appropriate dimensions and fulfill other quality parameters. This can be provided through an effective measurement and analysis of the shape with the use of static and mobile 3D scanners as well as (more and more often) measuring arms with integrated 3D scanners [7, 21].

Currently, 3D scanners are applied in many industrial branches, e.g.: in the building and civil engineering industry for the measurements and documentation of buildings, in the casting industry [23], in medicine to capture the shape for the manufacture of stomatological prostheses [16] and implants [1, 15], in the coordination of the product design with the use of parts from many sources, in a broad aspect of reverse engineering, as well as to ensure the quality in industrial metrology [1, 15, 16]. The last mentioned area of application in particular is increasingly popular e.g. for the control of the geometry of forging tools and forgings.

The die forging processes are in the group of the most difficult production processes in the aspect of their implementation. Additionally, the

dzi kuźniczych powoduje zmianę geometrii wytworzonego wyrobu oraz sprawia, że wszelkie wady powierzchniowe narzędzi (pęknięcia, ubytki) odwzorowują się na kuty wyrobie, wpływając na jakość gotowego wyrobu [6].

Do głównych i zarazem najczęstszych mechanizmów niszczących zaliczyć można: zmęczenie ścierne, pękanie mechaniczne, odkształcenie plastyczne oraz zmęczenie cieplne i cieplno-mechaniczne [10, 11]. Ze względu na koszty produkcji narzędzi kuźniczych spowodowane skomplikowanym kształtem kutych wyrobów można zauważyć pojawienie się wzmożonego zainteresowania przemysłu badaniami związanymi ze zwiększeniem trwałości narzędzi kuźniczych poprzez pomiar i analizę postępu ich zużycia, przy wykorzystaniu bezkontaktowych technik pomiarowych wykorzystujących ramiona pomiarowe i skanery 3D [12].

Skanery 3D na ramionach pomiarowych służą do wykonywania precyzyjnych skanów i pomiarów. Idealnie sprawdzają się w inspekcji i porównaniach chmury punktów do danych CAD, szybkiego prototypowania, inżynierii odwrotnej czy modelowania 3D [24]. Osadzone są na sztywnych ramionach wykonanych z mocnych i wytrzymałych materiałów jak aluminium, tytan czy włókno węglowe oraz na rotacyjnych enkoderach o wysokiej dokładności. W początkowym okresie skanery tego typu służyły wyłącznie jako ramiona pomiarowe, wykorzystując sondy do pomiarów kontaktowych, lecz z czasem ich zakres możliwości został znacząco poszerzony o nowe możliwości, m.in.: skanowanie bezkontaktowe, co sprawiło, że z powodzeniem są wykorzystywane w inżynierii odwrotnej. Skanowanie 3D może odbywać się z użyciem wielu różnych technologii, każda z nich posiada swoje ograniczenia oraz mocne strony. Przykładowo technologie optyczne mają utrudnione skanowanie obiektów połyskliwych lub przezroczystych. Problem ten można rozwiązać poprzez pokrycie obiektu środkiem matującym. Dobrze ugruntowana klasyfikacja [2] dzieli technologie cyfrowego pozyskiwania kształtu obiektu trójwymiarowego na dwie kategorie: kontaktowe i bezkontaktowe. Bezkontaktowe rozwiązania mogą być podzielone na dodatkowe dwie kategorie: aktywne i pasywne. Obecnie ramiona pomiarowe ze zintegrowanymi skanerami 3D są wyposażane

wear of forging tools causes a change in the geometry of the manufactured product, which makes all the surface defects (cracks, losses) being reflected on it, thus affecting its end quality [6].

The main and most common destruction mechanisms include: abrasive wear, mechanical cracking, plastic deformation as well as thermal and thermo-mechanical fatigue [10, 11]. Due to the production costs of forging tools with complicated shapes, one can notice an increased interest of the industry in the research related to increasing their durability, assessed through a measurement and analysis of the progress of their wear, with the use of non-contact measuring techniques applying measuring arms and 3D scanners [12].

3D scanners on measuring arms are used to perform precise scans and measurements. They are perfectly effective in the inspection and comparison of clouds of points with the CAD data, fast prototyping, reverse engineering and 3D modeling [24]. They are fixed on rigid arms made of strong and durable materials, such as aluminium, titanium or carbon fiber, as well as on high accuracy rotational encoders. At the beginning, scanners of this type were used exclusively as measuring arms applying contact measurement probes, yet, in time, the scope of their capabilities was significantly expanded, e.g. by non-contact scanning, which caused their successful application in reverse engineering. 3D scanning can be performed with the use of many various technologies, each of which has their limitations and benefits. For example, optical technologies face difficulties in scanning glossy or transparent objects. This problem can be solved by way of covering the object with a mattifying agent. A well-consolidated classification [2] divides the technologies of digital acquisition of the shape three-dimensional objects into two categories: contact and non-contact. The non-contact solutions can be further divided into two categories: active and passive. At present, measuring arms with integrated 3D scanners are equipped with white, red, and recently also blue lights, as well as scanning heads applying laser scanning, or scanning with the use of structured light, which makes it possible to capture the three-dimensional

w światła białe, czerwone, a ostatnio nawet niebieskie, a także w głowice skanujące wykorzystujące albo skanowanie laserowe, albo skanowanie z wykorzystaniem światła strukturalnego, co pozwala przechwycić trójwymiarowy obraz całego obiektu. Skanowanie przy użyciu światła strukturalnego jest wciąż bardzo aktywnym obszarem badań z nowymi artykułami naukowymi publikowanymi każdego roku [3, 5, 13, 22].

W przypadku procesów kucia matrycowego pomiary z wykorzystaniem bezstykowych technik, w tym przy zastosowaniu ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem, są najczęściej stosowane do dwóch grup obiektów: zarówno odkuwek i gotowych wyrobów kutech, jak i do pomiaru narzędzi oraz oprzyrządowania kuźniczego. Skanowanie 3D przy użyciu skanerów wykorzystywane jest głównie do kontroli jakości końcowej wyrobów [19, 22], a zdecydowanie rzadziej do oceny stanu narzędzi wytwarzających dany produkt lub podobnych temu zastosowań [19, 17, 18, 20]. Pomiary te bazują najczęściej na ocenie błędów kształtu wyznaczonego konturu i powierzchni [15]. Przykładem takiej aplikacji metody skanowania 3D jest analiza błędów kształtów wyznaczonej powierzchni do oceny zużycia narzędzi kuźniczych azotowanych lub pokrywanych warstwami hybrydowymi [8, 9]. Zainteresowanie to skłania do przeanalizowania technik skanowania pod względem możliwości ich wykorzystania i rozwoju w przemyśle kuźniczym, m.in.: do analizy zmiany geometrii narzędzi w procesie kucia, a także do ciągłej oceny stanu narzędzia kuźniczego na podstawie cyklicznie pobieranych i skanowanych odkuwek oraz do bardziej zaawansowanych analiz i zastosowań.

Celem pracy jest opracowanie i rozwój bezstykowej metody pomiarowej – skanowania przestrzennego do analizy i oceny zużycia narzędzi kuźniczych przy użyciu ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem liniowym.

2. METODA POMIARU I OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Do badań w celu wykorzystania bezkontaktowej metody pomiarowej skanowania narzędzi oraz odkuwek w trakcie procesu kucia wybrano ramię pomiarowe ROMER Absolute ARM 7520si

image of the whole object. Scanning with the use of structured light is still a very active field of studies, with new scientific papers published each year [3, 5, 13, 22].

In the case of die forging processes, measurements with the use of non-contact techniques, including those applying measuring arms with integrated scanners, are usually performed on two groups of objects: forgings and ready products, as well as forging tools and instrumentation. 3D scanning with the use of scanners is mainly used to control the end quality of a product [19, 22], while its use is significantly more limited in the case of assessing the state of the tools used to manufacture a given product as well as in other applications of this kind [19, 17, 18, 20]. These measurements are usually based on the assessment of the form deviations of the determined contour and surface [15]. An example of the application of a 3D scanning method is the analysis of the form deviation of the determined surface for the assessment of the wear of the forging tools, nitrided or coated with hybrid layers [8, 9]. This interest justifies analyzing the scanning techniques in respect of the possibilities of their use and development in the forging industry, e.g. for the analysis of the tool geometry changes in the forging process, as well as for a continuous assessment of the state of the forging tool on the basis of periodically collected and scanned forgings and for more advanced analyses and uses.

The aim of the study is the elaboration and development of a non-contact measuring method – spacial scanning – for the analysis and evaluation of the forging tool wear with the use of a measuring arm with an integrated linear scanner.

2. MEASUREMENT METHOD AND DESCRIPTION OF MEASURING POSITION

For the studies, with the aim to use a non-contact method of scanning tools and forgings during the forging process, the measuring arm ROMER Absolute ARM 7520si integrated with

ze zintegrowanym skanerem RS3 wraz z oprogramowaniem Polyworks pozwalające na skanowanie w technologii *Real Time Quality Meshing*. Urządzenie pozwala na prowadzenie pomiarów z wykorzystaniem skanera laserowego RS3 zintegrowanego z ramieniem, które daje możliwość zbierania do 460 000 punktów/s dla 4600 punktów na linii z częstotliwością liniową 100 Hz. Natomiast dokładność systemu skanowania SI według normy B89.4.22 wynosi 0,058 mm. Test ten polega na pomiarze matowej, szarej sfery za pomocą 5 różnych odchyżeń ramienia. W każdym odchyleniu ramienia sfera jest skanowana z 5 różnych kierunków tak, aby przeważająca część powierzchni sfery znajdowała się w zasięgu obszaru skanowanego. Wynikiem jest maksymalna odległość 3D od środka do środka 5 sfer.

W celu dokonania pomiarów na potrzeby opracowanej technologii pomiaru zbudowano laboratoryjne stanowiska pomiarowe prezentowane na rys. 1.

the RS3 scanner as well as the Polyworks software for scanning in the Real Time Quality Meshing technology were selected. The device makes it possible to perform measurements with the use of the laser scanner RS3 integrated with the arm, which gives the possibility to collect up to 460 000 points/s for 4600 points on the line with the linear frequency of 100 Hz. The accuracy of the SI scanning system according to the standard B89.4.22 equals 0.058 mm. The test consists in measuring a grey mat sphere by means of 5 different arm deflections. In each arm deflection, the sphere is scanned in 5 different directions in a way so that most of the sphere surface can be scanned. The result is the maximal 3D distance from the measurements made from the centre to the centre of the 5 spheres.

In order to perform the measurements for the purposes of the elaborated measuring technology, a laboratory measuring position was constructed, presented in Fig. 1.



Model <i>Model</i>	Zakres pomiarowy <i>Measuring range</i>	Powtarzalność punktu <i>Probing point repeatability</i>	Dokładność przestrzenna stykowa <i>Probing volumetric accuracy</i>	Dokładność systemu skanowania <i>Scanning system accuracy</i>
7520SI	2.0 m <i>6.6 ft.</i>	± 0.023 mm <i>0.0009 in.</i>	± 0.033 mm <i>0.0013 in.</i>	± 0.029 mm <i>0.0012 in.</i>
<i>Zintegrowany laser liniowy RS3 / Integrated Scanner RS3</i>				
Max. tempo zbierania punktów / <i>Max. point acquisition rate</i>			460 000 punktów/s / <i>460 000 Points/s</i>	
Liczba punktów w linii / <i>Points per line</i>			4600	
Częstotliwość liniowa / <i>Linear frequency</i>			100 Hz	
Szerokość linii / <i>Line width</i>			46 - 85 mm	
Odsunięcie / <i>Offset</i>			150 mm ± 50 mm	
Min.odstęp między punktami / <i>Min. distance between points</i>			0.014 mm	
Sterowanie mocą lasera / <i>Laser power control</i>			W pełni automatyczne / <i>Fully-automatic</i>	

Rys. 1. Stanowisko do pomiarów z ramieniem pomiarowym ROMER Absolute Arm 7520si ze zintegrowanym skanerem laserowym RS3 do pomiarów matryc i odkuwek

Fig. 1. Measuring position with the measuring arm ROMER Absolute Arm 7520si and the integrated laser scanner RS3, for measurements of dies and forgings

3. METODYKA BADAWCZA

Do badań z wykorzystaniem ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem laserowym wytypowano proces kucia na gorąco odkuwki pokrywy (rys. 2a). Proces ten realizowano w trzech operacjach na prasie P-1800T. Tyimi operacjami były kolejno: spęczanie, kucie wstępne i kucie wykańczające. Materiałem kutym

3. TEST METHODOLOGY

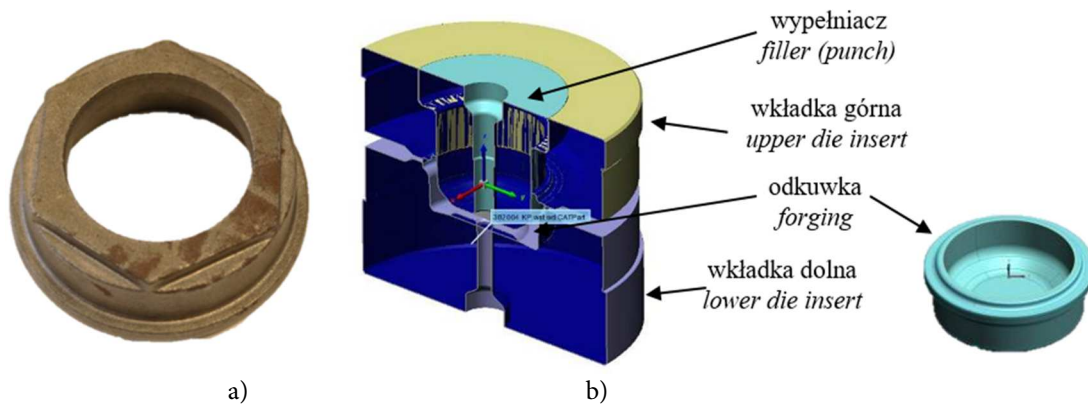
For the tests with the use of a measuring arm integrated with a laser scanner, the hot forging process of producing a forging of a lid was selected (Fig. 2a). The process is realized in three operations on the P-1800T press. The consecutive operations are: upsetting, roughing and finishing forging. The forged material was steel C45 with the

była stal C45 o wymiarach kęsów: średnica 55 mm, długość 95 mm, waga 1,77 kg. Początkowa temperatura materiału wsadowego wynosiła 1150°C. Narzędzia w analizowanym procesie wykonano ze stali 1.2343. Po obróbce cieplnej narzędzia do operacji drugiej i trzeciej poddawano azotowaniu.

W prowadzonych badaniach skoncentrowano się na drugiej operacji kucia (kucie wstępne). Szczegółowej analizie geometrycznej poddano wypełniacz wkładki górnej, którego trwałość w analizowanym procesie jest najniższa (rys. 2b).

billet dimensions: diameter 55 mm, length 95 mm, mass 1.77 kg. The initial temperature of the charge material equals 1150°C. In the analyzed process, the tools are made of steel 1.2343. After the thermal treatment, the tools used in the second and third operation are subjected to nitriding.

The focus of the performed investigations was the second forging operation (roughing). A detailed geometrical analysis was performed on the upper insert filler, the durability of which is the lowest in the analyzed process (Fig. 2b).



Rys. 2. a) Wytwarzany element – gotowa odkuwka po okrawaniu i dziurowaniu, b) schemat operacji kucia wstępnego dla wytwarzanego elementu

Fig. 2. a) Manufactured element – a forging after trimming and punching, b) tools used in the roughing operation for the produced element and the forging

Badania prowadzono w celu analizy postępu zużycia wybranego narzędzia w dwóch etapach. Pierwszym etapem była analiza zużycia narzędzi na podstawie bezpośredniego skanowania ich powierzchni roboczych po zwiększającej się liczbie odkuwek i następnie na tej podstawie opracowanie krzywej zużycia – ubytku materiału w zależności od liczby odkuwek. W drugim etapie przeprowadzono skanowanie wybranej powierzchni cyklicznie pobieranych odkuwek i na tej podstawie dokonywano analizy postępującego przyrostu materiału, co jednocześnie stanowiło ubytek materiału na narzędziach. Następnie wyznaczono charakterystykę zmian geometrii odkuwek (przyrostu materiału) i porównano ją z charakterystyką krzywej zużycia wyznaczonej na podstawie bezpośredniego skanowania narzędzi.

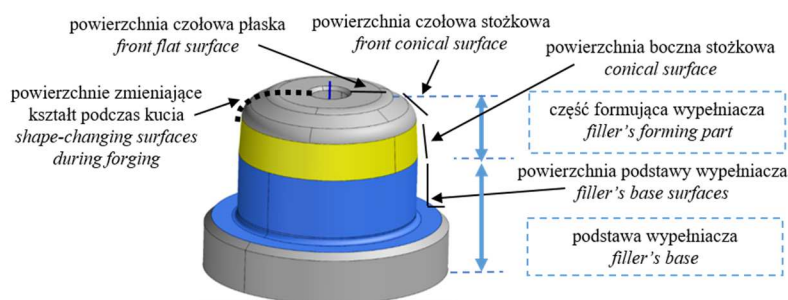
In order to perform an analysis of the wear of the selected tool, the research was conducted in two stages. The first stage was an analysis of the tool wear on the basis of direct scanning of the tools' working surfaces after an increasing number of forgings, and next, on this basis, an elaboration of the wear curve – the material loss depending on the number of forgings. In the second stage, scanning of the selected surface of periodically collected forgings was performed. On this basis, an analysis was made of the proceeding material growth, which simultaneously constituted a material loss on the tools. Next, the characteristics of the forging geometry changes (material growth) were determined and compared with the characteristics of the wear curve determined based on direct scanning of the tools.

4. WYBÓR POWIERZCHNI BAZOWANIA

W celu określenia możliwości aplikacji systemu skanowania 3D w badaniach zmiany geometrii narzędzi w analizowanym procesie, konieczne było określenie optymalnych fragmentów powierzchni dla procesu wyrównania danych pomiarowych uzyskanych ze skanowania wypełniaczy przed i po pracy. Dobranie optymalnych fragmentów powierzchni miało pozwolić na uzyskanie poprawnej metody wyrównania danych, a tym samym na zapewnienie najdokładniejszych wyników pomiarów dla poszukiwanej zmiany objętości. W procesie dopasowania danych wykorzystywana jest metoda *best-fit* wykorzystująca algorytm dopasowania wg Gaussa i polegająca na obliczeniu elementu średniego. Podczas obliczeń wykorzystywana jest zasada najmniejszej sumy kwadratów odchyłek punktów nominalnych od obliczonych. Taki sposób działania metody *best-fit* może spowodować, że przy wyborze nieodpowiedniej powierzchni dla procesu dopasowania, zwłaszcza przy znacznych błędach kształtu, wyniki mogą być obciążone dużym błędem. O tym, jak istotną rolę odgrywa wybór powierzchni bazowania, więcej informacji znaleźć można w pracach [4, 14]. Analizowany wypełniacz można podzielić na część formującą i podstawę (rys. 3).

4. SELECTION OF LEVELLING SURFACE

In order to determine the possibilities of applying the 3D scanning system in the studies of the tool geometry changes in the analyzed process, it was necessary to determine the optimal surface fragments for the process of levelling the measurement data obtained from scanning the filler before and after its operation. The selection of the optimal surface fragments aimed at obtaining the appropriate data levelling method, thus ensuring the most accurate measurement results for the desired volume change. In the process of data matching, the best-fit method is used, which applies the Gausse matching algorithm, consisting in calculating the mean element. The calculations apply the principle of the least square sum of the deviations of the nominal points from the calculated points. The way in which this method works causes the results to be burdened with a large error when an inappropriate surface is selected for the matching process, especially in the case of significant form deviations. Some more information on the significance of the proper selection of the levelling surface can be found in the studies [4, 14]. The analyzed filler can be divided into the forming part and the base (Fig. 3).



Rys. 3. Podział funkcjonalny powierzchni wypełniacza z zaznaczonymi powierzchniami, które zmieniają kształt w procesie kucia
Fig. 3. Functional division of the filler surface with the marked surfaces which change their shape in the forging process

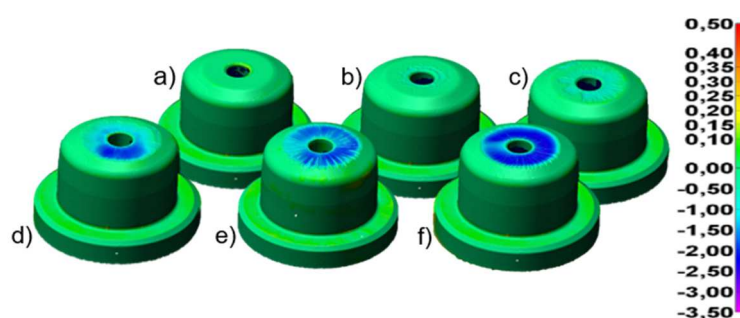
Podstawa wypełniacza jest odpowiedzialna za prawidłowe bazowanie powierzchni kształtujących odkuwkę względem pozostałych części składanego narzędzia kuzniczego. Powierzchnie kształtujące odkuwkę należące do części formującej wypełniacza (czołowa płaska, czołowa stożkowa, boczna stożkowa) zmieniają kształt geometrii wraz z ilością wytworzonych odkuwek i są

The base of the filler is responsible for the proper levelling of the surfaces shaping the forging with respect to the other parts of the assembled forging tool. The surfaces shaping the forging, which belong to the forming part of the filler (front flat, front conic, side conic), change the geometry shape with the number of the produced forgings and are responsible for fulfilling the

odpowiedzialne za spełnienie cech geometrycznych końcowego produktu procesu kucia w drugiej operacji.

4.1. Analiza zużycia narzędzi

W zależności od możliwości dostępu do wytypowanych narzędzi w Kuźni Jawor starano się wybrać wypełniacze po różnej, zwiększającej się eksploatacji (liczbie odkuwek). Na rys. 4 przedstawiono wyniki porównania skanów wyeksploatowanych narzędzi z obrazem zeskanowanego nowego narzędzia (przed pracą – procesem kucia).



Rys. 4. Wyniki skanowania wybranych wypełniaczy po odkuciu różnej liczby odkuwek:
a) 1000, b) 2500, c) 3000, d) 7000 e) 9000, f) 12 500

Fig. 4. Scanning results for selected fillers after producing different numbers of forgings:
a) 1000, b) 2500, c) 3000, d) 7000, e) 9000, f) 12 500

Przedstawione wyniki (rys. 4) nałożenia obrazów wyeksploatowanych narzędzi (po zwiększającej się liczbie odkuwek) wskazują na postępujące zużycie. W początkowym okresie dla wypełniacza po małej liczbie odkuwek do 3000 sztuk, w zasadzie nie zaobserwowano ubytku materiału. Natomiast od 7000 odkuwek można zaobserwować wyraźnie zużycie w części środkowej. Ze względu na brak narzędzi z zakresu 3000–7000 odkuwek trudno jest określić, w którym momencie (przy jakiej liczbie odkuwek) następuje intensyfikacja zużycia. Dla wypełniacza po wykonaniu 12 500 odkuwek ubytek na czole wyniósł ponad 2,5 mm. Przy czym widać, że dla większości narzędzi zużycie na czole wkładki jest wyraźnie niesymetryczne. Prowadzone badania wykazały, że przyczyną jest różne ukierunkowanie podawania środka smarnocządnącego oraz nawiew powietrza za plecami operatora w celu nieodpryskiwania zgorzeli na niego od przodu podczas kucia.

geometrical features of the end product of the second operation forging process.

4.1. Tool wear analysis

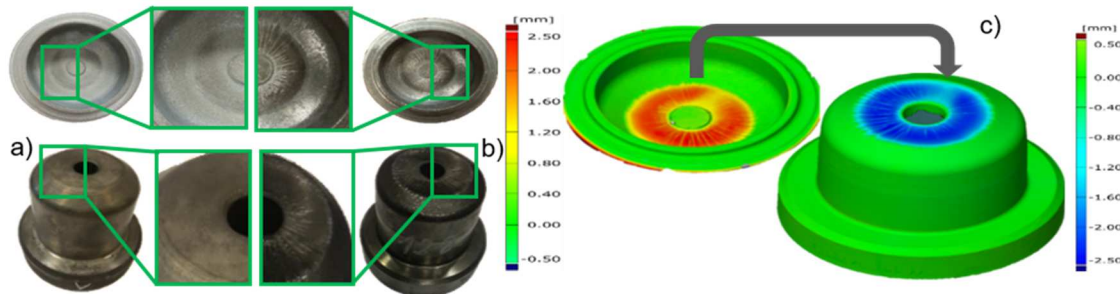
Depending on the possible access to the selected tools at the Jawor Foundry, efforts were made to select the fillers at different stages of their operation (number of produced forgings). Based on Fig. 4, a comparison of the scans of worn tools and a new tool (before the operation – a forging process) were presented.

The presented results (Fig. 4) of superimposing the images of the worn tools (after an increasing number of forgings) point to a proceeding wear. In the initial period, for the filler after a small number of forgings – up to 3000 items – no loss of material was basically observed. In turn, from 7000 forgings up, one can observe a clear wear in the central part. Due to the lack of tools from the range of 3000–7000 forgings, it is difficult to determine the moment (the number of forgings) when the intensification of wear occurs. For the filler after 12500 forgings, the loss on the front equaled over 2.5 mm, whereas it can be seen that, for most of the tools, the wear on the insert front is clearly asymmetrical. The conducted research showed that the cause of this is a non-uniform application of the cooling and lubricating agent and the air blow behind the operator, activated to remove the scale.

4.2. Aplikacja metody skanowania odwrotnego 3D

Kolejnym etapem badań było wykorzystanie metody skanowania 3D do budowy charakterystyki zużycia narzędzia z wykorzystaniem skanowania odwrotnego.

Jej aplikacja polega na wykorzystaniu zaobserwowanego podobieństwa (odbicia) powierzchni roboczej narzędzia na wybranej powierzchni odkuwki, w którym ubytek materiału narzędzia równy jest przyrostowi materiału na odkuwce. Metoda ta pozwala na uniknięcie konieczności ingerencji w prowadzony proces kucia i polega na pomiarze (mierzeniu) przy użyciu skanera postępującego zużywania się narzędzia kuźniczego na podstawie zmian kształtu, cyklicznie pobieranych z procesu odkuwek (w postaci przyrostu materiału odkuwki). Na rys. 5a i 5b przedstawione są powierzchnia wybranego narzędzia przed i po eksploatacji wraz z odpowiadającymi im powierzchniami odkuwek.



Rys. 5. Analizowany wypełniacz wkładki górnej: a) nowy – przed pracą wraz z odkuwką z początku pracy analizowanego narzędzia, b) zużyty – po odkuciu 13 000 odkuwek wraz odkuwką z końca eksploatacji narzędzia, c) porównanie skanów matrycy i ostatniej odkuwki w postaci zmiany kształtu wyznaczonej powierzchni

Fig. 5. Analyzed upper insert filler: a) new – before beginning of operation, with a forging from the beginning of tool operation, b) worn – after producing 13 000 forgings with a forging from the end of tool operation, c) comparison of scans of the die and the last forging, in the form of a shape change of the selected surface

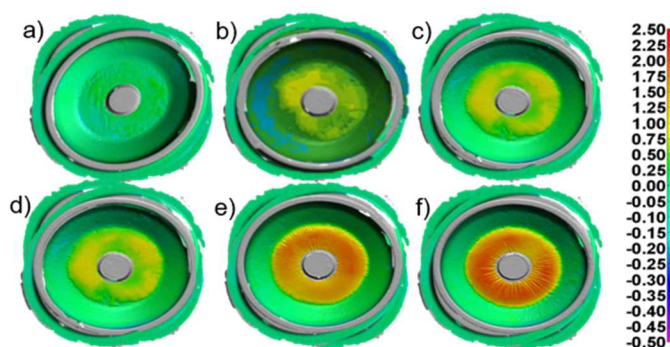
Na rys. 6 przedstawiono analizę skanowania cyklicznie pobranych przykładowych odkuwek, dzięki wykorzystaniu „odbicia obrazu narzędzia na powierzchni kolejnych odkuwek” i ich porównaniu do obrazu „niezużytej” 100 odkuwki.

4.2. Application of 3D reverse scanning method

The following stage of research was the use of the 3D reverse scanning method for the construction of tool wear characteristics with the application of reverse scanning.

Its application consists in applying similarity (reflection) of the tool's working surface on the selected forging surface, on which the tool's material loss is equal to the material growth on the forging. The method makes it possible to avoid interference in the conducted forging process and consists in a measurement, with the use of a scanner, of the proceeding wear of the forging tool on the basis of the shape changes of the forgings periodically collected from the process, in the form of a material growth of the forging. Fig. 5a and 5b present the surfaces of the selected tool before and after its operation with their corresponding surfaces of the forgings.

Fig. 6 shows an analysis of the scans of periodically collected exemplary forgings, owing to the use of “a reflection of the tool image on the surface of the consecutive forgings” and their comparison with the image of the “unworn” 100th forging.



Rys. 6. Porównanie skanów wewnętrznej części odkuwek w postaci ilościowych zmian ich kształtu po: a) 2000, b) 4000, c) 6000, d) 8000, e) 10 000, f) 12 500 sztuk

Fig. 6. Comparison of the scans of the forgings' inner part, in the form of quantitative changes in their shape after producing: a) 2000, b) 4000, c) 6000, d) 8000, e) 10 000, f) 12 500 forgings

Przedstawione wyniki analizy przyrostu materiału na rys. 6 dla zwiększającej się liczby odkuwek wskazują jednocześnie na postępujące zużywanie się narzędzia (ubytku materiału). Zużycie lokalizuje się w środkowej części, w okolicy otworu pod wypychacz w obszarze czoła odkuwki i jest w początkowej fazie procesu kucia nieregularne. Pod koniec procesu żywotności matrycy widoczne są promieniowe bruzdy na głębokim pierścieniu (rys. 6).

Prezentowane wyniki w postaci błędów kształtu odkuwek pobieranych cyklicznie pozwalają jedynie na przeprowadzenie uproszczonej analizy. Pozwala ona na określenie obszarów matrycy, w której powstaje zużycie oraz miejsc o maksymalnym ubytku materiału. Takie odtworzenie przebiegu zużycia pozwala na przeprowadzenie analizy z interwałem równym częstości pobieranych odkuwek, czyli opracowanie krzywej zużycia dla narzędzia na podstawie odkuwek. Było to jednak mocno utrudnione dla narzędzi ze względu na przerywanie i ingerowanie w produkcję.

4.3. Porównanie krzywej zużycia wyznaczonej na podstawie skanowanych narzędzi oraz skanowania odwrotnego 3D

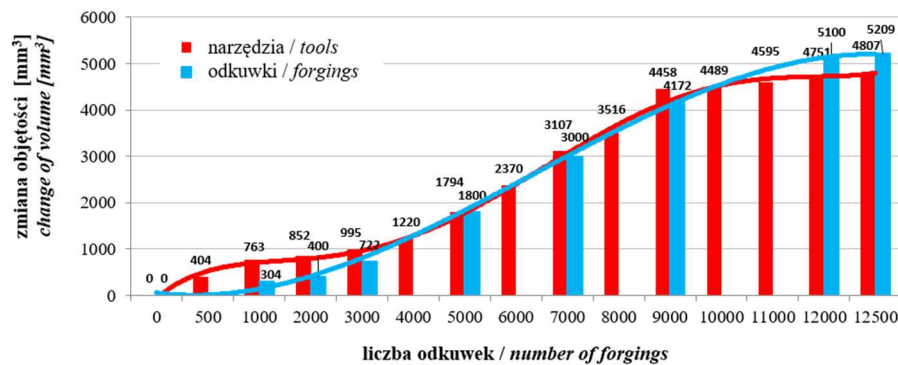
Na rys. 7 przedstawiono porównanie krzywej zużycia wyznaczonej na podstawie skanowanych narzędzi po zwiększającej się eksploatacji (rys. 4) oraz na podstawie metody skanowania odwrotnego 3D poprzez pomiar systematycznie pobieranych odkuwek (ich skany przedstawiono na rys. 6).

At the same time, the presented results of the material growth analysis (Fig. 6) for an increasing number of forgings point to a proceeding wear of the tool (material loss). The wear is localized in the central part, in the vicinity of the ejector opening in the area of the forging's front and is irregular in the initial phase of the forging process. Towards the end of the process of die wear, radial grooves are visible on a deep radius.

The results presented as the form deviation of periodically collected forgings enable only a simplified analysis. The latter makes it possible to determine the die areas where the wear occurs as well as the areas with the maximal material loss. Such a recreation of the course of wear makes it possible to perform an analysis at the interval equal to the frequency of collecting the forgings, that is to elaborate the tool wear curve based on the collected forgings. This was made significantly difficult, due to the interruption and interference in the production process.

4.3. Comparison of the wear curve determined based on the scanned tools and 3D reverse scanning

Fig. 7 shows a comparison of the wear curve determined on the basis of the tools scanned after an increasing operation time (Fig. 4) and the 3D reverse scanning method through a measurement of the systematically collected forgings (scans shown in Fig. 6).



Rys. 7. Porównanie krzywych zużycia na podstawie skanowania narzędzi i odkuwek w funkcji liczby odkuwek
 Fig. 7. Comparison of the wear curves determined based on the scanned tools and based on the number of forgings

Przedstawione na rys. 7 porównanie obu metod pozwalających na wyznaczenie zależności opisujących zużycia narzędzi w czasie kucia (określenia ich trwałości) wskazuje na dużą zbieżność. Należy wyraźnie zaznaczyć, że pomiar ostatniej odkuwki jest weryfikowany z pomiarem objętości narzędzia o największej liczbie odkuwek (w tym przypadku 12 000 odkuwka z wypełniaczem po 12 500 odkuwek). Największe rozbieżności można zaobserwować na samym początku, tj. od 0 do 2500 odkuwek oraz w zakresie od 9000 do 13 000 odkuwek. Różnice w początkowym zakresie wynikają najprawdopodobniej ze stabilizowania się procesu (całego układu), czyli z ustaleniem właściwej temperatury pracy narzędzi oraz ustaleniem optymalnych warunków smarowania i chłodzenia – warunków tribologicznych. Natomiast duże różnice w końcowym etapie eksploatacji można tłumaczyć tym, że dla tego okresu rzeczywisty ubytek narzędzia jest większy niż przyrost materiału na odkuwce. Prowadzone przez autorów badania i obserwacje wykazały, że w celu utrzymania geometrii odkuwki w dopuszczalnym zakresie tolerancji, kowale – technolodzy dokonywali świadomej korekcji wielkości zamknięcia pomiędzy górnym a dolnym narzędziem. Inną przyczyną niewielkich rozbieżności pomiędzy obiema krzywymi może być fakt, że odkuwki do wyznaczenia krzywej zużycia były pobierane (co 1000 sztuk) z dokładnie jednego procesu kucia, dla którego średnia trwałość wynosi 13 000 odkuwek. Natomiast narzędzia wybierane do określenia zużycia były wzięte z kilku takich samych procesów, lecz po zwiększającej się liczbie wykutych odkuwek. Było to podyktowane zachowaniem podobnych warunków technolo-

The comparison presented in Fig. 7 of the methods enabling the determination of the dependences describing the tool wear during forging (determination of their durability) points to their high convergence. It should be noted that the measurement of the last forging is verified with the measurement of the volume of the tool with the highest number of forgings (in this case, 12 000 forgings with the filler after forging 12 500 items). The highest discrepancies can be observed at the very beginning, i.e. from 0 to 2500 forgings, as well as in the range over 9000 forgings. The differences in the initial range probably result from the stabilization of the process (the whole system), that is the determination of the appropriate temperature of tool operation and the optimal conditions of lubrication and cooling – the tribological conditions. In turn, the big differences in the final stage of operation can be explained by the fact that, in this period, the actual material loss of the tool is higher than the material growth on the forging. The research performed by the authors and the observations showed that, in order to maintain the geometry of the forging in the acceptable scope of tolerance, the blacksmiths – technologists performed a conscious correction of the size of the closing between the upper and lower tool. Another cause of the slight discrepancies between the curves can be the fact that the forgings selected for the determination of the wear curve were collected (every 1000) from one forging process, for which the mean value equaled 13 000 forgings. In turn, the tools chosen to determine the wear were selected from a few similar processes, yet after an increasing number of forgings. This was dictated by the necessity of main-

gicznych (wyeliminowanie studzenia narzędzia do analizy skanowania i jego ponownego nagrzewania do dalszego procesu produkcji). Mniej istotnymi przyczynami wpływającymi na minimalne rozbieżności może być dokładność pomiarowa samego skanera oraz wynikająca z faktu utlenienia i pokrycia zgorzeliną mierzonych odkuwek, które przed pomiarem były oczyszczane, a także błędy wynikające z algorytmu obliczeniowego w analizie objętości.

5. PODSUMOWANIE

W pracy zaprezentowano nowatorską metodę pozwalającą na odtworzenie postępu zużycia narzędzi kuźniczych na podstawie pomiaru zmiany geometrii cyklicznie pobieranych odkuwek. Przedstawiona metoda umożliwia prowadzenie pośredniej kontroli jakości oraz zmian geometrii narzędzi kuźniczych (bez konieczności ich demontażu) poprzez bezpośredni pomiar zmian geometrii cyklicznie pobieranych odkuwek. Analiza przyrostu objętości materiału kolejnych odkuwek pozwala na precyzyjne określenie ubytku materiału narzędzia kuźniczego w kolejnych fazach jego eksploatacji.

Otrzymane wyniki badań potwierdzają, że uzyskana na podstawie pomiaru (skanowania) odkuwek charakterystyka zużycia jest porównywalna z krzywą uzyskiwaną na podstawie skanów narzędzi. Pozwala to na praktyczne wykorzystanie opracowanej technologii pomiaru pośredniego na podstawie skanowania do analizy postępu zużycia i tym samym bieżącej kontroli stanu oprzyrządowania kuźniczego. Przedstawione porównanie potwierdza, że wyznaczanie zużycia na podstawie skanowania odkuwek cyklicznie pobieranych w trakcie procesu produkcyjnego (bez konieczności zakłócenia procesu) jest metodą skuteczną i uzasadnioną ekonomicznie. Z kolei wyznaczanie zużycia na podstawie skanowania narzędzi wydaje się być metodą mało praktyczną, powodującą niejednokrotnie utrudnienia w ciągłości produkcji, jej przerywanie, zmianę warunków technologiczno-tribologicznych. To wszystko będzie miało swoje przełożenie na wymierne korzyści finansowe wynikające z braku przestojów wskutek nieprzewi-

taining similar technological conditions (eliminating the cooling of the tool for the scanning analysis and its repeated heating for the further production process). Some less important reasons for the discrepancies can be the measurement accuracy of the scanner and the imprecision resulting from the fact that the measured forgings are oxidized and covered with scale, the fact of the forgings being cleaned before the measurement, as well as the errors caused by the calculation algorithm in the volume analysis.

5. CONCLUSIONS

The study discusses an innovative method of recreating the progress of the forging tool wear based on the measurement of the geometry change of periodically collected forgings. The presented method enables an indirect control of the quality as well as geometry changes of the forging tools (without the necessity of their disassembly) through a direct measurement of the geometry changes of the periodically collected forgings. The analysis of the material growth of the consecutive forgings enables a precise determination of the material loss of the forging tool in the successive phases of its operation.

The obtained results demonstrated that the wear characteristics achieved based on the measurement (scanning) of the forgings is comparable with the curve obtained on the basis of the tool scans. This makes it possible to practically apply the elaborated technology of a scanning-based indirect measurement for the analysis of the progress of wear and thus for a current control of the state of the forging instrumentation. The presented comparison confirms that the determination of wear on the basis of the scans of the forgings periodically collected during the production process (without the necessity of interrupting the process) is an effective and economically justified method. In turn, the determination of wear on the basis of tool scans seems impractical, as it often causes difficulties in the continuity of the production process, its interruption as well as a change in the technological and tribological conditions. The mentioned factors translate to measurable financial benefits resulting from the lack of shut-downs because of unexpected break-

dzianej awarii oprzyrządowania kuźniczego oraz podejmowania szybkich decyzji o ewentualnej wymianie zużytego narzędzia kuźniczego.

Wykazane w pracy wady i zalety zaproponowanego, nowego podejścia do analizy danych z wykorzystaniem skanowania 3D z pewnością pozwalają na stworzenie nowych możliwości dla opisu zjawisk zużycia w procesie kucia matrycowego, a także pozwoli na skrócenie czasu projektowania wkładek matrycowych o zwiększonej odporności na zużycie.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR); projekt POIG.01.03.01-02-063/12.

LITERATURA

- [1] Bills P.J., R. Racasan, et al. 2012. „Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty”. *Wear* 274–275: 212–219.
- [2] Curless B. 2000. „From Range Scans to 3D Models”. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 33 (4): 38–41. DOI:10.1145/345370.345399.
- [3] Derejczyk K., K. Siemiński. 2016. „Analiza dokładności metod optycznego skanowania 3D”. *Mechanik* 4: 312–313.
- [4] Dworzak Ł., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. „Analysis of the approximation of data obtained from scanning of a forging tool by instrument measuring arm under production conditions”. W mat. konf. *IV Manufacturing Conference & 95th Anniversary of the Faculty of Mechanical Engineering and Management: IV International Scientific Technical Conference MANUFACTURING 2014, Poznan, Poland, 8-10 December 2014*, 23–34. Poznań: Poznan University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Management.
- [5] Gąska A., M. Olszewska. 2011. „Ocena odwzorowania kształtu za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę optyczną”. *Postępy Nauki i Techniki* 7: 37–43.
- [6] Gronostajski Z., M. Hawryluk, J. Jakubik, M. Kaszuba, G. Misiun, P. Sadowski. 2015. „Solution examples of selected issues related to die forging”. *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (4): 2767–2775.
- [7] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. „Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape

downs of the forging instrumentation as well as the lack of the necessity of making fast decisions about a possible replacement of a worn forging tool.

The pros and cons of the proposed approach to the data analysis with the use of 3D scanning demonstrated in the study provide new possibilities for the description of the wear phenomena in the die forging process and for the shortening of the time of designing die inserts of an increased wear resistance.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research has been financed by the National Centre of Research and Development (NCBiR); project no. POIG.01.03.01-02-063/12.

REFERENCES

- [1] Bills P.J., R. Racasan, et al. 2012. “Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty”. *Wear* 274–275: 212–219.
- [2] Curless B. 2000. “From Range Scans to 3D Models”. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 33 (4): 38–41. DOI:10.1145/345370.345399.
- [3] Derejczyk K., K. Siemiński. 2016. “Analiza dokładności metod optycznego skanowania 3D”. *Mechanik* 4: 312–313.
- [4] Dworzak Ł., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. “Analysis of the approximation of data obtained from scanning of a forging tool by instrument measuring arm under production conditions”. In conf. proceed. of *IV Manufacturing Conference & 95th Anniversary of the Faculty of Mechanical Engineering and Management: IV International Scientific Technical Conference MANUFACTURING 2014, Poznan, Poland, 8-10 December 2014*, 23–34. Poznań: Poznan University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Management.
- [5] Gąska A., M. Olszewska. 2011. “Ocena odwzorowania kształtu za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę optyczną”. *Postępy Nauki i Techniki* 7: 37–43.
- [6] Gronostajski Z., M. Hawryluk, J. Jakubik, M. Kaszuba, G. Misiun, P. Sadowski. 2015. “Solution examples of selected issues related to die forging”. *Archives of Metallurgy and Materials* 60 (4): 2767–2775.
- [7] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, J. Ziemia. 2016. „Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape

- changes of forging instrumentation during production”. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18 (2): 194–200. DOI: 10.17531/ein.2016.2.6.
- [8] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, P. Widomski, J. Ziemia. 2017. „The application of the reverse 3D scanning method to evaluate the wear of forging tools divided on two selected areas”. *International Journal of Automotive Technology* 18 (4): 653–662.
- [9] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, M. Marciniak, M. Zwierzchowski, A. Mazurkiewicz, J. Smolik. 2015. „Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers”. *Metallurgy* 54 (4): 687–690.
- [10] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, M. Zwierzchowski. 2014. „A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (4): 528–539.
- [11] Gronostajski Z., M. Kaszuba, S. Polak, M. Zwierzchowski, A. Niechajowicz, M. Hawryluk. 2016. „The failure mechanisms of hot forging dies”. *Materials Science and Engineering: A Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing* 657: 147–160.
- [12] Hawryluk M., J. Ziemia. 2017. „The possibility of using scanning techniques in forging applications”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 39–58.
- [13] Juras B., D. Szewczyk. 2011. „Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym”. *Postępy Nauki i Techniki* 7: 29–36.
- [14] Kawalec A., M. Magdziak. 2012. „Wpływ metody dopasowania na wyniki pomiarów pióra łopatki”, XI Forum Inżynierskie ProCAX, część II, Kraków, 16-18 października 2012 r.
- [15] Kuś A. 2009. „Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications”. *Sensors* 9 (3): 1967–1979.
- [16] Lord J.K., D.J. Langton, A.V.F. Nargol, T.J. Joyce. 2011. „Volumetric wear assessment of failed metal-on-metal hip resurfacing prostheses”. *Wear* 272 (1): 79–87.
- [17] Lulkiewicz J., S. Szkudelski, B. Pachutko. 2015. „Kompleksowe badania matryc kuźniczych”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 3 (90): 16–19.
- [18] Macháček P., J. Tomíček. 2010. „Application of laser scanning in reverse engineering and prototype manufacturing”. *WTP* 1 (21): 35–44.
- [19] Marton E., F. Pizzolon. 2010. „Dimensional control during forging. Innovative 3d laser measuring systems”. *Forge Applications* 1 (23): 35–44.
- [20] Pachutko B., S. Ziółkiewicz. 2012. „Investigation of the wear processes of dies for forging building anchors basing on metallographic examinations”. *Obróbka Plastyczna Metali* 23 (4): 277–293.
- [21] Ratajczyk E. 2008. „Współrzędnościowe ramiona pomiarowe i ich testy dokładności”. *Przegląd Elektrotechniczny* 5: 181–185.
- changes of forging instrumentation during production”. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 18 (2): 194–200. DOI: 10.17531/ein.2016.2.6.
- [8] Gronostajski Z., M. Hawryluk, M. Kaszuba, P. Widomski, J. Ziemia. 2017. “The application of the reverse 3D scanning method to evaluate the wear of forging tools divided on two selected areas”. *International Journal of Automotive Technology* 18 (4): 653–662.
- [9] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, M. Marciniak, M. Zwierzchowski, A. Mazurkiewicz, J. Smolik. 2015. “Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers”. *Metallurgy* 54 (4): 687–690.
- [10] Gronostajski Z., M. Kaszuba, M. Hawryluk, M. Zwierzchowski. 2014. “A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (4): 528–539.
- [11] Gronostajski Z., M. Kaszuba, S. Polak, M. Zwierzchowski, A. Niechajowicz, M. Hawryluk. 2016. “The failure mechanisms of hot forging dies”. *Materials Science and Engineering: A Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing* 657: 147–160.
- [12] Hawryluk M., J. Ziemia. 2017. “The possibility of using scanning techniques in forging applications”. *Obróbka Plastyczna Metali* 27 (1): 39–58.
- [13] Juras B., D. Szewczyk. 2011. “Dokładność pomiarów realizowanych skanerem optycznym”. *Postępy Nauki i Techniki* 7: 29–36.
- [14] Kawalec A., M. Magdziak. 2012. „Wpływ metody dopasowania na wyniki pomiarów pióra łopatki”, XI Forum Inżynierskie ProCAX, part II, Kraków, 16-18 October 2012.
- [15] Kuś A. 2009. “Implementation of 3D optical scanning technology for automotive applications”. *Sensors* 9 (3): 1967–1979.
- [16] Lord J.K., D.J. Langton, A.V.F. Nargol, T.J. Joyce. 2011. “Volumetric wear assessment of failed metal-on-metal hip resurfacing prostheses”. *Wear* 272 (1): 79–87.
- [17] Lulkiewicz J., S. Szkudelski, B. Pachutko. 2015. “Kompleksowe badania matryc kuźniczych”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 3 (90): 16–19.
- [18] Macháček P., J. Tomíček. 2010. “Application of laser scanning in reverse engineering and prototype manufacturing”. *WTP* 1 (21): 35–44.
- [19] Marton E., F. Pizzolon. 2010. “Dimensional control during forging. Innovative 3d laser measuring systems”. *Forge Applications* 1 (23): 35–44.
- [20] Pachutko B., S. Ziółkiewicz. 2012. “Investigation of the wear processes of dies for forging building anchors basing on metallographic examinations”. *Obróbka Plastyczna Metali* 23 (4): 277–293.
- [21] Ratajczyk E. 2008. “Współrzędnościowe ramiona pomiarowe i ich testy dokładności”. *Przegląd Elektrotechniczny* 5: 181–185.

-
- [22] Weckenmann A., J. Weickmann. 2006. „Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation”. *Metrology and Measurement Systems* 13(4): 321–334.
- [23] Wieczorowski M., M. Ruciński, R. Koterias. 2010. „Application of optical scanning for measurements of castings and cores”. *Archives of Foundry Engineering* 10: 265–268.
- [24] Wszolek A. 2014. „Dokładność skanera 3D”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 5: 12.
- [22] Weckenmann A., J. Weickmann. 2006. “Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation”. *Metrology and Measurement Systems* 13(4): 321–334.
- [23] Wieczorowski M., M. Ruciński, R. Koterias. 2010. “Application of optical scanning for measurements of castings and cores”. *Archives of Foundry Engineering* 10: 265–268.
- [24] Wszolek A. 2014. “Dokładność skanera 3D”. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 5: 12.

