

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski

Department of Mechanical Engineering
Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.edu.pl

dr inż. Marek Hawryluk

Department of Mechanical Engineering
Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

dr inż. Marcin Kaszuba

Department of Mechanical Engineering
Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: marcin.kaszuba@pwr.edu.pl

dr inż. Jacek Ziemia

Department of Mechanical Engineering
Wrocław University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: jacek.ziemia@pwr.edu.pl

Zastosowanie ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem laserowym do analizy zmian kształtu oprzyrządowania kuźniczego w trakcie produkcji

Słowa kluczowe: *skanowanie narzędzi kuźniczych, trwałość, mechanizmy niszczące*

Abstrakt: W artykule autorzy przedstawili innowacyjne podejście polegające na analizie zużywania się (zmian kształtu) jednego z narzędzi kuźniczych bezpośrednio w trakcie produkcji przy wykorzystaniu skanera laserowego, bez konieczności ich demontażu z agregatu kuźniczego. Badania polegały na bezpośrednich pomiarach zmian kształtu cyklicznie pobieranych odkuwek podczas procesu kucia (co 1000szt), a następnie na podstawie postępującego zużywania dokonywana była w sposób pośredni analiza zmian kształtu wykroju wybranego narzędzia - wypełniacza. Natomiast w momencie krótkich przerw technologicznych w procesie przeprowadzano bezpośrednie pomiary samego (analizowanego) narzędzia w celu weryfikacji wyników pomiaru odkuwek w stosunku do rzeczywistych zmian narzędzia. Przeprowadzone analizy wykazały dużą zgodność pomiędzy geometrią powierzchni (wybranych odkuwek odzwierciedlających zużywanie się narzędzia), a ubytkiem geometrycznym wykroju roboczego narzędzia na podstawie bezpośrednich pomiarów podczas produkcji. Uzyskane rezultaty pozwoliły na dokonanie szybkiej analizy trwałości narzędzia kuźniczego pod względem jakościowym i ilościowym (ubytku materiału), co w konsekwencji prowadzi do znacznych oszczędności. Zaproponowana przez autorów metoda pozwala na podejmowanie decyzji o czasie eksploatacji narzędzi na podstawie ich rzeczywistego zużycia, a nie, jak to ma miejsce obecnie w kuźniach, po określonej maksymalnej ilości wykonanych odkuwek lub zaobserwowanego w tym okresie przedwczesnego uszkodzenia narzędzia.

1. Wprowadzenie

Duża konkurencja na rynku dostawców wyrobów kutych sprawia że poza ceną która głównie jest brana pod uwagę coraz częściej parametrem decydującym o wyborze dostawcy jest jakość oferowanych przez niego odkuwek. Szczególnie istotne jest to kiedy odbiorcami wyrobów jest przemysł samochodowy i lotniczy gdzie wymagania te są na najwyższym poziomie. Proces kucia

matrycowego należy do jednych z najtrudniejszych w realizacji procesów wytwarzania. Pomimo, iż technologia ta jest stosunkowo dobrze poznana to prawidłowe wykonanie szczególnie odkuwek o skomplikowanym kształcie, które będą spełniały wymagania dotyczące dokładności i jakości stawiane przez odbiorców, wymaga od technologów i operatorów dużego doświadczenia. Na każdym z poszczególnych etapów procesu kucia istnieje potencjalne ryzyko wystąpienia błędu powodującego obniżenie jakości wytwarzanych odkuwek. Jednym z podstawowych czynników wpływającym na jakość odkuwek jest trwałość stosowanych narzędzi, ponieważ ich zużycie powoduje zmianę kształtu wytworzonego wyrobu, a wszelkie wady powierzchniowe narzędzi (pęknięcia, ubytki) odwzorowują się na kuty wyrobie. Dlatego bardzo ważną podczas produkcji jest szczegółowa kontrola jakości. Obecnie najczęściej kontrole takie polegają na wizualnej ocenie jakości wytwarzanego elementu oraz pomiarze w wybranych punktach kontrolnych przy użyciu tradycyjnych urządzeń pomiarowych lub z wykorzystaniem prostych sprawdzianów kształtu. Metody te nie pozwalają jednak na szybką i kompleksową ocenę jakości i kształtu całego elementu, dlatego coraz częściej stosuje się inne metody pomiaru, np. przy wykorzystaniu współrzędnościowej techniki pomiarowej [3,7,9,10].

Współrzędnościowa technika pomiarowa daje duże możliwości dla rozwoju nowoczesnej myśli metrologicznej [12,16,27]. W przemysłowej metrologii współrzędnościowej można zauważyć nowe trendy. Najbardziej widoczną zmianą jest konieczność wykorzystywania modeli 3D podczas pomiarów zgodnych z normami łańcucha pomiarowego GPS (ang. Geometrical Product Specifications) [26,10,11,21]. Innym istotnym trendem jest zwiększanie ilości punktów pomiarowych, koniecznych do wyznaczenia analizowanych cech geometrycznych. Jedną z takich cech jest objętościowy parametr zużycia, który wykorzystany może być także do analizy zmian kształtu narzędzi kuźniczych, w celu prognozowania ich procesu zużycia. Parametr ten wykorzystywany jest m.in. w medycynie. Przykładowo w pracach [1,17,18] autorzy prezentują wykorzystanie współrzędnościowej maszyny pomiarowej wyposażonej w stykową głowicę pomiarową do analizy objętościowych parametrów zużycia powierzchni kulistych protez stawowych. Natomiast w pracy [15] autorzy rozszerzają badania dotyczące analizy wpływu zmiany licznych parametrów skanowania wykorzystując stykową głowicę pomiarową skanującą. Z kolei w pracach [2,18,25] autorzy analizują „korzystny” wpływ zwiększenia ilości punktów zbieranych podczas pomiarów na dokładność wyznaczanych parametrów objętościowych.

Obecnie coraz większym zainteresowaniem przemysłu cieszą się mobilne urządzenia pomiarowe. Do urządzeń takich niewątpliwie należą ramiona pomiarowe wyposażone w liniowe skanery laserowe z dedykowanym specjalistycznym oprogramowaniem. Ramiona pomiarowe poprzez swoją mobilność i uniwersalność są alternatywą dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych w aplikacjach dopuszczających mniejszą dokładność pomiaru [14,20]. Przykładowo dokładność mobilnego ramienia pomiarowego rozpatrywano w pracy [4], w której autorzy przeprowadzili badania polegające na ocenie odwzorowania nominalnego kształtu za pomocą ramienia oraz maszyny współrzędnościowej. Technika skanowania 3D również przy użyciu ramion pomiarowych wykorzystywana jest głównie do kontroli jakości końcowej wyrobów [14,22,28]. Pomiaru te bazują najczęściej na ocenie błędów kształtu wyznaczonego konturu i powierzchni [5,14]. W dostępnej literaturze coraz częściej można znaleźć zastosowanie tego typu metod do pomiaru, kontroli i oceny stanu narzędzi kształtujących. Przykładem takiej aplikacji metody skanowania 3D jest [13,23] wykorzystanie skanera optycznego do określenia błędów kształtu wyznaczonej powierzchni, a następnie na podstawie uzyskanych danych określenie specyfikacji geometrycznej dla procesu napawania regeneracyjnego. Innym zastosowaniem metody skanowania 3D przy użyciu skanerów [5, 6, 8, 19,24] jest wykorzystanie analizy błędów kształtów wyznaczonej powierzchni do oceny zużycia narzędzi kuźniczych azotowanych lub pokrywanych warstwami hybrydowymi. Analizy te polegały na porównaniu uzyskanych podczas skanowania obrazów (nowego narzędzia kuźniczego przed pracą, bądź referencyjnego modelu CAD a następnie tego samego narzędzia po kuciu) poprzez wyznaczenie błędów kształtu analizowanej powierzchni.

Celem pracy jest wykazanie możliwości zastosowania ramienia pomiarowego ze zintegrowanym skanerem laserowym do kontrolowania i analizy procesu zużycia wybranego narzędzia kuźniczego - wypełniacza górnego (stosowanego w drugiej operacji kucia matrycowego) na podstawie pomiaru zmian kształtu cyklicznie pobieranych odkuwek, bezpośrednio podczas produkcji.

2. Przedmiot badań

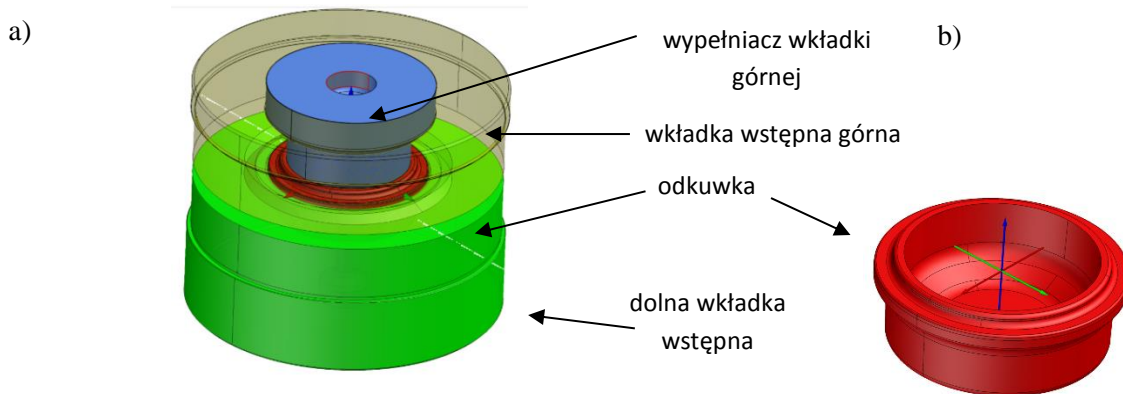
W przemysłowym procesie produkcyjnym kontrola jakości i stanu stosowanych narzędzi jest dość trudna i kłopotliwa, gdyż często wiąże się to z koniecznością ich demontażu, a przez to z długimi przerwami w produkcji. Ciągła analiza jakości i trwałości narzędzi bezpośrednio na produkcji jest istotna ze względu na fakt, że wszelkie pojawiające się na narzędziu wady są „automatycznie” przenoszone na odkuwkę. Często nawet niewielkie uszkodzenie lub zużycie narzędzia w pierwszych operacjach kucia wielooperacyjnego (w kuciu wstępnym), powoduje, że w ostatniej operacji-kuciu wykańczającym (kalibrującym) trudno jest uzyskać odkuwkę spełniającą wszystkie wymogi [7]. Dlatego przydatnym rozwiązaniem może być możliwość oceny zmiany kształtu wykrojów narzędzi w poszczególnych operacjach dokonywana na podstawie ich cyklicznej kontroli (pomiaru poprzez skanowanie), bez konieczności ich demontażu z prasy kuźniczej (rys. 1).



Rys. 1. Widok prasy wraz z zabudowanymi narzędziami kuźniczymi do kucia pokrywy oraz dokonywany bezpośrednio na produkcji pomiar skanowaniem wypełniacza z wykorzystaniem ramienia pomiarowego

Do analizy wybrano przemysłowy proces kucia matrycowego na gorąco odkuwki pokrywy (rys. 2) skrzyni biegów, stosowanej do jednej z marek samochodów osobowych. Element ten jest montowany na wyjściu wału napędowego ze skrzyni biegów. Proces ten realizowany jest w trzech operacjach na prasie P-1800T. Kolejne operacje to spęczanie, kucie wstępne i kucie wykańczające. Materiałem kutym jest stal C45 o wymiarach kęsów: średnica 55cm, długość 95 mm, waga 1,77 kg. Początkowa temperatura kęsa wynosi 1150 °C. Narzędzia kuźnicze w procesie wykonane zostały ze stali narzędziowej do pracy na gorąco – WCL (1.2343). Po obróbce cieplnej narzędzia do operacji drugiej i trzeciej poddawane są dodatkowo obróbce cieplno-chemicznej (azotowaniu), w celu zwiększenia ich odporności na zużycie ściernie. Narzędzia te podczas pracy poddawane są bardzo dużym, cyklicznym obciążeniom cieplnym (od 80 do 600°C) oraz mechanicznym (0-800 MPa). W wyniku tak ekstremalnych warunków pracy, narzędzia te ulegają szybkiemu zużyciu.

Szczegółowej analizie poddano jedno z narzędzi stosowanych w drugiej operacji kucia – wypełniacz wkładki górnej (rys. 2a). Narzędzia stosowane w drugiej operacji kucia (kucie wstępne) są najbardziej obciążone ze względu na to, że w tej operacji w największym stopniu formowana jest odkuwka. Dla wytypowanego wypełniacza prowadzono badania w celu określenia jego trwałości bezpośrednio na produkcji (bez jego demontażu z prasy kuźniczej), na podstawie pomiarów zmian kształtu odkuwek w trakcie procesu kucia (rys. 2b) poprzez ich skanowanie. Natomiast w momencie krótkich przerw technologicznych w procesie przeprowadzano bezpośrednie pomiary samego (analizowanego) narzędzia w celu weryfikacji wyników pomiaru odkuwek w stosunku do rzeczywistych zmian narzędzia (rys. 3).



Rys. 2. Schemat operacji kucia wstępnego dla wytwarzanego elementu: a) zestaw narzędzi, b) odkuwka

Średnia trwałość wypełniacza jest stosunkowo niska i wynosi około 6700 odkuwek, co jest związane z występowaniem wielu mechanizmów destrukcyjnych jednocześnie. Natomiast średnia trwałość dla pozostałych narzędzi w tym procesie wynosi około 9000 sztuk.



Rys. 3. Analizowany wypełniacz wkładki górnej: a) nowy – przed pracą wraz z odkuwką z początku pracy, b) zużyty – po odkuciu 12 500 odkuwek wraz odkuwką z końca eksploatacji narzędzia

Do najczęstszych uszkodzeń tego narzędzia można zaliczyć: odkształcenia plastyczne, mikropęknięcia mechaniczne, mikropęknięcia termiczne, zużycie przez ścieranie, pękanie i wykruszanie części narzędzi. W czasie całego procesu produkcyjnego zmiany kształtu postępują z różną intensywnością na poszczególnych etapach eksploatacji, co dodatkowo komplikuje analizę trwałości oraz czynności związane z samym pomiarem [9].

3. Opis narzędzia i metody pomiarowej

Do pomiarów zmian kształtu odkuwek i wypełniacza wykorzystano ramię pomiarowe ROMER Absolute ARM 7520si (rys. 4) wraz z oprogramowaniem Polyworks 2014 i technologią Real Time Quality Meshing. Ramię pomiarowe wyposażone jest w siedem osi obrotowych. W każdej osi znajduje się enkoder absolutny mierzący kąt obrotu pary kinematyczne niewymagający inicjalizacji i nagrzewania. Ramię umożliwia pomiary dotykowe, jak również pomiary optyczne. Do badań wybrano bezdotykową metodę pomiaru z wykorzystaniem zintegrowanego z ramieniem systemem skanowania laserowego RS2. Zintegrowany skaner RS2 charakteryzuje się możliwością zbierania do 50000 punktów/s dla 1000 punktów na linii z częstotliwością liniową 50 Hz.

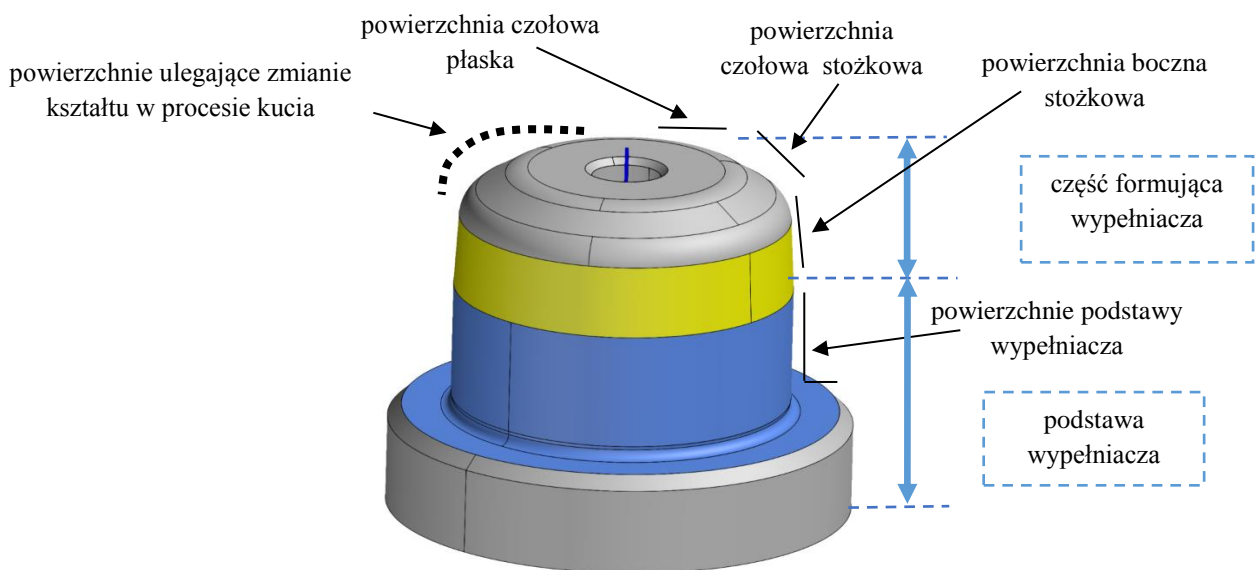


Rys. 4. Stanowisko pomiarowe do badań laboratoryjnych odkuwek z ramieniem pomiarowym ROMER Absolute ARM 7520si wyposażonym w zintegrowany skaner laserowy

W celu określenia możliwości aplikacji systemu skanowania 3D w badaniach zmiany kształtu 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 kształtu.

W procesie aproksymacji danych stosowana jest przez aplikację metoda best-fit wykorzystująca algorytm dopasowania wg Gaussa polegający na obliczeniu elementu średniego. Podczas obliczeń wykorzystywana jest zasada najmniejszej sumy kwadratów odchylek 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. Autorzy analizowali także wpływ wybranej powierzchni odniesienia podczas skanowania na uzyskanie wyników najbardziej odpowiadających rzeczywistej wartości zużycia. W tym celu przeprowadzono weryfikację wyników pomiarów skanerem laserowym (w wybranych punktach) poprzez walidację (pomiar) na maszynie współrzędnościowej. Przeprowadzona weryfikacja pozwoliła na potwierdzenie możliwości uzyskania deklarowanej dokładności pomiaru skanera liniowego RS2 na poziomie mniejszym od 0.058 [mm].

Analizowany wypełniacz można podzielić na część formującą i podstawę (rys. 5). Podstawa wypełniacza jest odpowiedzialna za prawidłowe bazowanie powierzchni kształtujących odkuwkę względem pozostałych części składanego narzędzia kuzniczego.



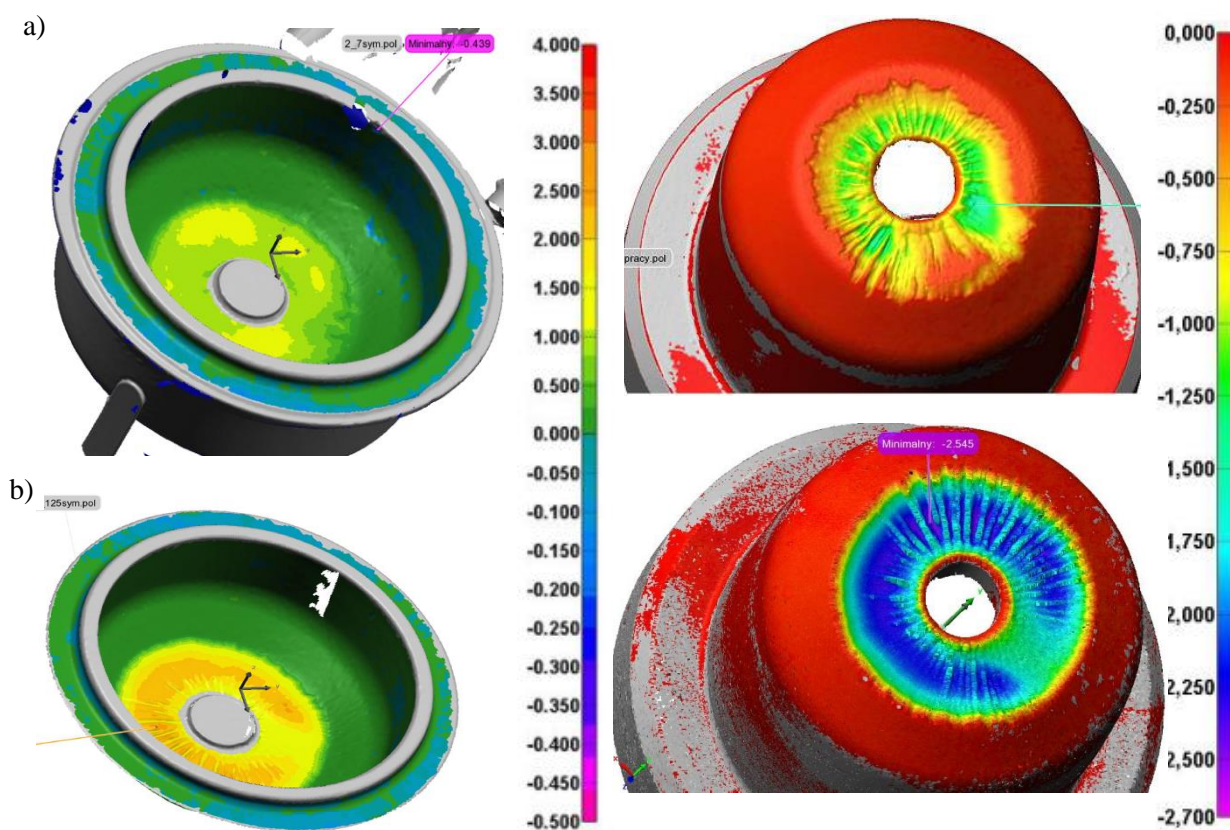
Rys. 5. Podział funkcjonalny powierzchni wypełniacza z zaznaczonymi powierzchnie które zmieniają kształt w procesie kucia

Powierzchnie kształtujące odkuwkę należące do części formującej wypełniacza (czołowa płaska, czołowa stożkowa, boczna stożkowa), które są odpowiedzialne za spełnienie cech geometrycznych końcowego produktu procesu kucia w drugiej operacji na skutek postępującego zużycia zmieniają kształt wraz z ilością wytworzonych odkuwek.

4. Weryfikacja zaproponowanej metody analizy zużycia wypełniacza

W pierwszej kolejności przeprowadzono proces skanowania z wykorzystaniem technologii Real Time Quality Meshing. Rezultatem poszczególnych pomiarów wykorzystania technologii skanowania 3D jest chmura punktów. Następnie na podstawie otrzymanej chmury punktów program tworzył powierzchnię poligonalną złożoną z elementarnych trójkątów, odzwierciedlając kształt mierzonego obiektu.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie zmian kształtu odkuwek po określonej ilości cykli oraz zużyciu wypełniacza dla którego w celu weryfikacji zaproponowanej metody dokonano pomiarów ramieniem wraz ze skanerem w trakcie krótkich przerw technologicznych w procesie kucia. Przedstawione (rys. 6) porównanie skanów odkuwek i odpowiadających im narzędzi wybrano w połowie i na pod koniec procesu kucia (eksploatacji wypełniacza), w celu zobrazowania powiększania się obszarów podlegających zużyciu.



Rys. 6. Porównanie skanów wewnętrznej części odkuwek oraz odpowiadających im narzędzi, w postaci ilościowych zmian kształtu w stosunku do modeli CAD nominalnej odkuwki i narzędzia, po: a) 6000, b) 12500 sztuk

Analizując przyrost objętości w przypadku odkuwek oraz jej ubytek w przypadku narzędzia można przyjąć że są one na zbliżonym poziomie. Dla zestawu odkuwka-wypełniacz po 6000 sztuk maksymalny przyrost materiału w kierunku normalnym dla odkuwki wynosi około +1,5mm, a dla narzędzia ubytek jest na poziomie około 1,4mm. Z kolei dla zestawu po 12500 sztuk maksymalne różnice w kierunku normalnym wynoszą odpowiednio: dla odkuwki +2,3mm, dla wypełniacza – 2,4mm. Pewne różnice w otrzymanych wynikach mogą być spowodowane dokładnością pomiarową skanera oraz warunkami temperaturowymi skanowanych elementów (temp. wypełniacza około 120-150°C, dla odkuwki temp. otoczenia).

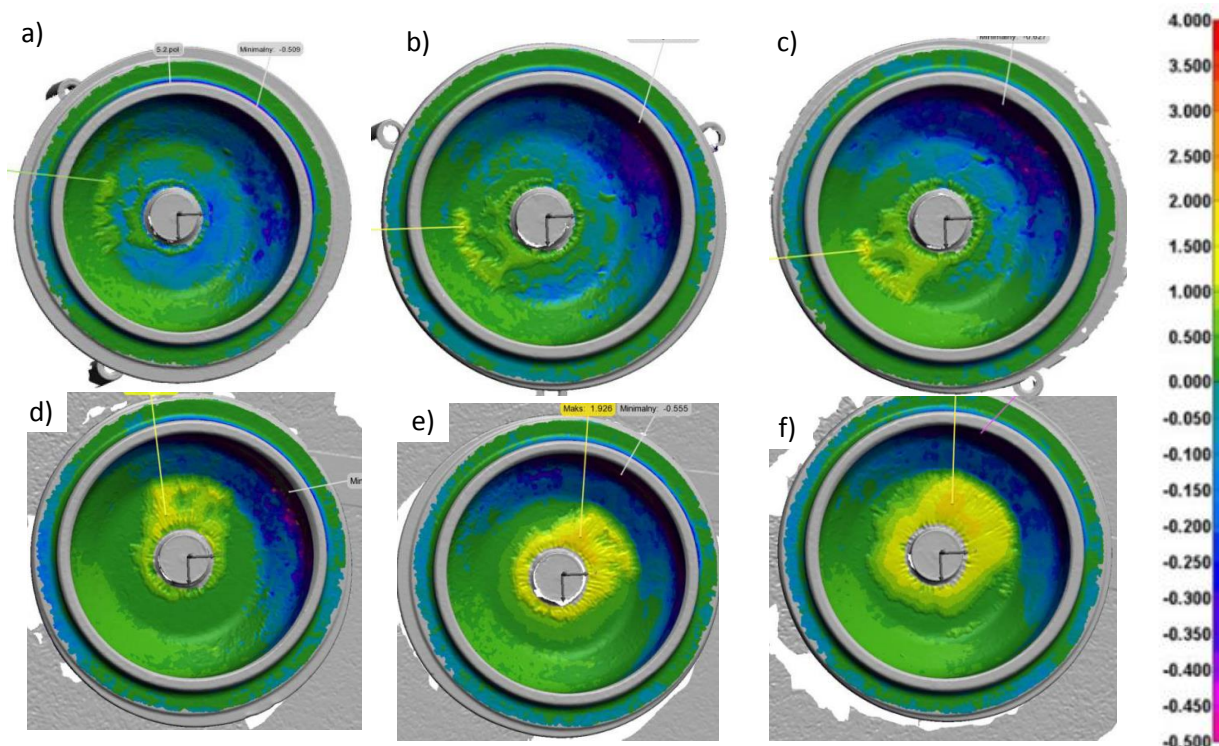
5. Wyniki badań

W celu pełniejszej analizy zużywania się wypełniacza na podstawie pomiarów zmian kształtu odkuwek dokonano skanowania dla serii odkuwek (co 1000szt), wykonanych przez analizowany wypełniacz w łącznej ilości ponad 12500 sztuk odkuwek. Ze względu na fakt, że odkuwka po operacji kucia posiada temperaturę około 1000°C, co uniemożliwia ich znakowanie w celu późniejszej identyfikacji zastosowano specjalnie przygotowany pojemnik z przegrodami (rys. 7), gdzie były składowane odpowiednio przez operatora.



Rys. 7. Skrzynka do odkładania odkuwek

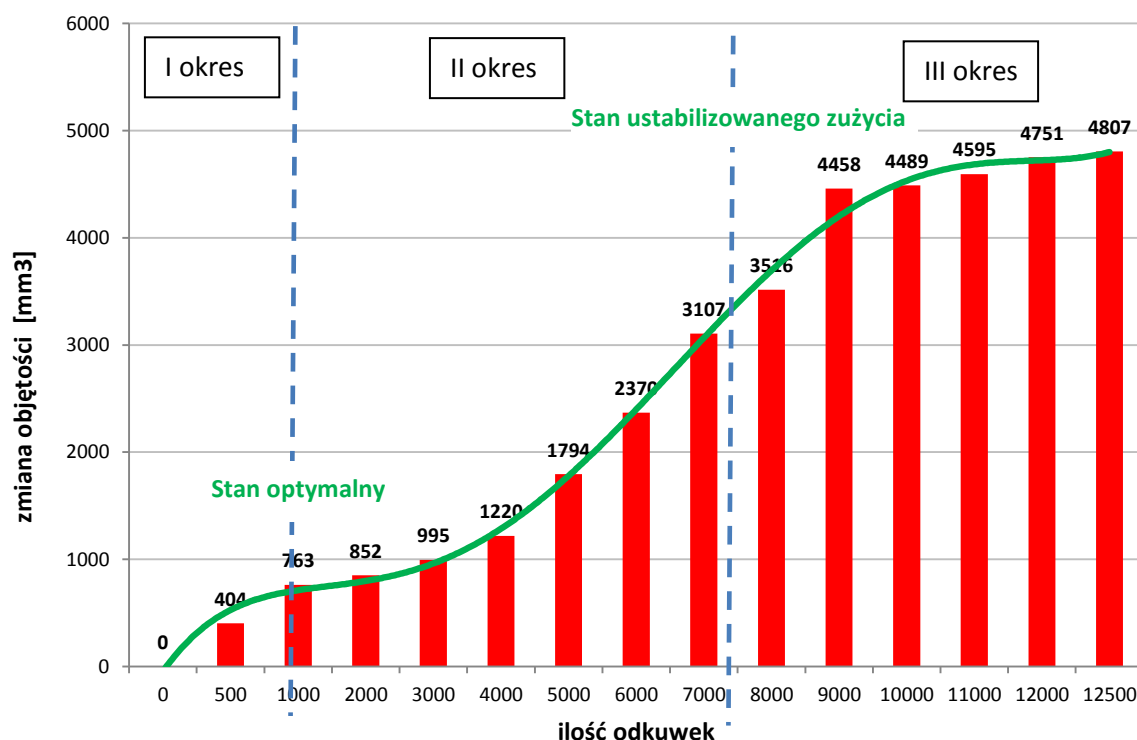
Na rys. 8 przedstawiono porównanie wybranych skanów wewnętrznej części odkuwek, w postaci ilościowych zmian ich kształtu w stosunku do modelu CAD nominalnej odkuwki.



Rys. 8. Porównanie skanów wewnętrznej części odkuwek, w postaci ilościowych zmian ich kształtu w stosunku do modelu CAD nominalnej odkuwki, po: a)2000, b) 3000, c) 4000, d)5000, e) 7000, f) 8000 sztuk

Tak, jak można było oczekiwać obrazy ze skanami dla zwiększającej się ilości odkuwek wskazują na postępujące zużywanie się narzędzia – wypełniacza. Zużycie (na podstawie zmiany objętości) lokalizuje się w środkowej części, w okolicy otworu pod wypychacz (szary okrąg) i jest nieregularne. Wynika to najprawdopodobniej ze sposobu dostarczania środka smarująco-chłodzącego (nieodpowiedniego ustawienia dysz smarujących). W związku z tym, proponowana metoda pozwoliłaby na wczesne wychwycenie tego typu niekorzystnych zmian w procesie smarowania oraz odpowiednie skorygowanie ustawienia dysz smarujących, co z pewnością przełożyłoby się na wydłużenie żywotności narzędzi.

Rys. 9. przedstawia wykres z porównaniem ubytku materiału (zmian objętości) z wypełniacza na podstawie zmian objętości (adekwatnie przyrostu) dla kolejnych odkuwek w danej serii.

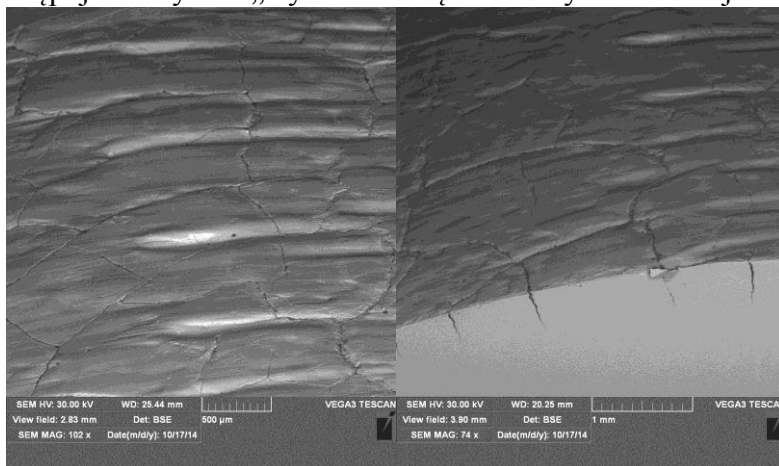


Rys. 9. Porównanie ubytku materiału (zmian objętości) z wypełniacza na podstawie zmian objętości na powierzchni kolejnych odkuwek

Na podstawie przedstawionego wykresu (rys. 9), przypominającego klasyczną krzywą zużycia (Lorenza) można zaobserwować ciekawe zależności i wyróżnić kilka zakresów (okresów) zużycia. Mianowicie zużycie analizowanego wypełniacza na podstawie analizy skanów odkuwek rośnie bardzo szybko na początku procesu kucia do około 1000 sztuk odkuwek (I okres). Jest to związane z dopasowywaniem się całego układu, w którym następuje przekształcenie początkowego stanu warstw wierzchnich docieranych elementów wypełniacza z odkuwką w **stan optymalny**. Po osiągnięciu stanu optymalnego, czyli powyżej 2000 sztuk rozpoczyna się stan tzw. **normalnej eksploatacji** (II okres), charakteryzujący się w przybliżeniu ustabilizowanym poziomem intensywności wymienionych wcześniej zjawisk niszczących, który w analizowanym przypadku dochodzi do około 8000 sztuk. Zmiana objętości dla tego przedziału odkuwek wynosi od 900 do 3516mm³, natomiast dla ilości od 8000sztuk do końca eksploatacji narzędzia (ponad 12500 szt.) zmiana objętości wynosi zaledwie 350mm³. Na tej podstawie można wnioskować, że stan ustabilizowanego zużycia można przyjąć od 7000-8000 odkuwek, co można przyjąć jako początek III okresu zużycia. Stan ten dla analizowanego narzędzia występuje aż do maksymalnej eksploatacji, czyli 12500sztuk i kończy się w wyniku przekroczenia dopuszczalnej zmiany kształtu narzędzia, z powodu jego wycofania z dalszej produkcji. Klasyczna krzywa Lorenza pod koniec okresu normalnej eksploatacji przechodzi zazwyczaj w stan przyspieszonego zużycia, czego nie można niestety zaobserwować w analizowanym przypadku. Można to tłumaczyć zmniejszającymi się naciskami na narzędziach wskutek postępującego zużywania się powierzchni kontaktu narzędzi i kształtowaną odkuwką.

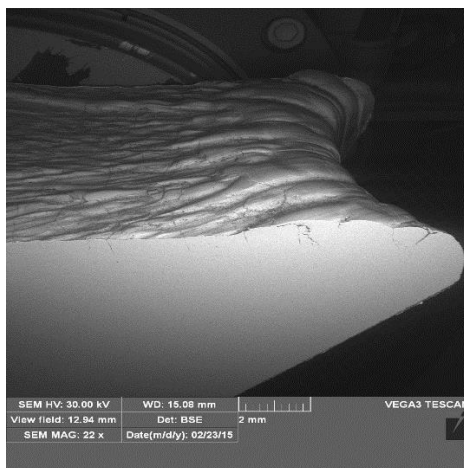
W celu identyfikacji zjawisk i mechanizmów destrukcyjnych dotyczących narzędzi kuźniczych autorzy prowadzili szereg badań laboratoryjnych. W wyniku cyklicznego oddziaływania wysokich obciążeń cieplno-mechanicznych w całym okresie eksploatacji narzędzia poddawane są wielu zjawiskom destrukcyjnym, występującym z różną intensywnością i częstotliwością. Na podstawie badań okazało się, że w początkowym okresie procesu kucia (około 400-1000szt.) na analizowanych narzędziach wskutek zmęczenia cieplnego pojawia się

pierwotna, a wraz ze zwiększaniem się ilości odkuwek wtórna siatka pęknięć zmęczeniowych (rys. 10). Efektem czego jest stosunkowo duży ubytek (zmiana objętości na poziomie 404mm^3 , po około 400-500 odkuwkach) materiału narzędzia. Co więcej wyniki badań dotyczących właściwości warstwy azotowanej dla tego typu narzędzi wykazały, że w przypadku zużycia ściernego, jako dominującego mechanizmu destrukcyjnego, w początkowym okresie (400-500 odkuwek) następuje b. szybkie „wycieranie się” warstwy azotowanej.



Rys. 10. Obszar wypełniacza (po 500 odkuwkach) z pierwotną i wtórna siatką pęknięć wskutek zmęczenia cieplnego, pow. 60x, elektronowy mikroskop skaningowy TESCAN VEGA3

Z kolei przy większej ilości odkuwek (rys. 11) po osiągnięciu wspomnianego ustabilizowanego zużycia widoczne są liczne bruzdy (w okolicach otworu pod wypełniacz) oraz mniejsze i większe pęknięcia, trudno natomiast zaobserwować charakterystyczną siatkę pęknięć pochodzących od zmęczenia cieplnego.



Rys. 11. Obszar wypełniacza w okolicach otworu pod wypełniacz (po 9000 odkuwkach) z widocznymi bruzdami (wmywaniem materiału) oraz mikropęknięciami, pow. 22x, elektronowy mikroskop skaningowy TESCAN VEGA3

Prawdopodobnie wartość ustabilizowanego zużycia dla analizowanego narzędzia (do 7000sztuk) związana jest z zintensyfikowanym zużyciem ściernym wspomaganym dodatkowo poprzez odrywające się twarde cząstki (azotki z warstwy azotowanej oraz tlenki materiału narzędzia) w warstwie wierzchniej narzędzia pracujące jak ścierniwo.

Natomiast dla zakresu od 8000 do 12500 odkuwek niemalże stała wartość zużycia na poziomie około 4440 do 4800mm^3 związana jest ze zmniejszonymi naciskami występującymi na wyeksploatowanych narzędziach (w porównaniu do nowych), co zostało potwierdzone przez modelowanie numeryczne procesu kucia

Aktualnie autorzy prowadzą badania dotyczące analizy występowania wspomnianego poziomu nasycenia przy określonej ilości wykutych odkuwek dla narzędzi kuzniczych stosowanych w innych procesach kucia matrycowego na gorąco.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem ramienia wraz ze zintegrowanym skanerem laserowym do analizy zużywania się wypełniacza na podstawie pomiarów zmian kształtu kolejnych odkuwek (bezpośrednio na produkcji) wykazały zasadność użytkowania nowych technologii pomiarowych w celu bezpośredniej analizy, jakości i zmiany kształtu narzędzi (bez demontażu oprzyrządowania z agregatu kuźniczego). Dzięki temu analiza taka była możliwa bezpośrednio podczas produkcji.

Analiza przyrostu objętości kolejnych odkuwek na podstawie pomiarów pozwala na dokładne określenie ubytku materiału narzędzia kuźniczego w kolejnych fazach jego eksploatacji. Świadczy o tym pełna korelacja pomiędzy wynikami pomiarów zmian objętości serii zwiększającej się ilości wykonanych odkuwek a narzędzia w połowie i pod koniec jego pracy.

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 ilości wykonanych odkuwek). Pozwala to na optymalne wykorzystanie danego narzędzia przy utrzymaniu najwyższej jakości wytwarzanych odkuwek.

Metoda ta umożliwi wyeliminowanie czynnika ludzkiego w procesie podejmowania decyzji poprzez określenie tolerancji geometrycznych dla zmieniającej się kształtu narzędzi powiązanej z tolerancjami i kształtem odkuwek.

Ponadto proponowana metoda pozwoliłaby na wczesne zauważenie pojawiających się w trakcie procesu kucia niekorzystnych zmian, np.: nieodpowiednie smarowanie, czy też przedwczesne pęknięcie narzędzia, a tym samym pozwoliłaby na szybkie zareagowanie, czyli odpowiednie skorygowanie ustawienia dysz smarujących, lub natychmiastowe wycofanie narzędzia z produkcji i przezbrojenie.

Wykazane w pracy zalety zaproponowanego nowego podejścia do analizy stanu narzędzia na podstawie pomiarów zmian kształtu odkuwek przy wykorzystaniu skanera laserowego przełożyłoby się z pewnością na wydłużenie żywotności oprzyrządowania kuźniczego i znaczne obniżenie kosztów produkcji.

References

1. Bills P.J, Racasan R, Underwood R.J, Cann P, Skinner J, Hart A.J, Jiang X, Blunt L. Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty. *Wear* 2012; 274–275: 212-219.
2. Carmignato S, Spinelli M, Affatato S, Savio E. Uncertainty evaluation of volumetric wear assessment from coordinate measurements of ceramic hip joint prostheses. *Wear* 2011; 270(9-10): 584-590.
3. Farooqui S.A, Morse E.P. Methods and artifacts for comparison of scanning CMM performance. *J. Comput. Inf. Sci. Eng* 2007; 7(1): 72-80.
4. Gąska A, Olszewska M. Ocena odwzorowania kształtu za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego wyposażonego w głowicę optyczną. *Postępy Nauki i Techniki* 2011; 7: 37-43.
5. Gronostajski Z, Hawryluk M, Kaszuba M, Niechajowicz A, Polak S, Walczak S, Jabłoński D. Die profile optimization for forging constant velocity joint casings. *Archives of Metallurgy and Materials* 2011; 56(2): 551-558.
6. Gronostajski Z, Hawryluk M, Niechajowicz A, Zwierzchowski M, Kaszuba M, Będza T. Application of the scanning laser system for the wear estimation of forging tools. *Computer Methods in Materials Science* 2011; 11(2): 425-431.
7. Gronostajski Z, Hawryluk M. The main aspects of precision forging. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 8(2): 39-55.
8. Gronostajski Z, Kaszuba M, Hawryluk M, Marciniak M, Zwierzchowski M, Mazurkiewicz A, Smolik J. Improving durability of hot forging tools by applying hybrid layers. *Metallurgy* 2015; 54(4): 687-690.
9. Gronostajski Z, Kaszuba M, Hawryluk M, Zwierzchowski M. A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2014; 14(4): 528-539.
10. ISO GPS 10360-4:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 4: CMMs used in Scanning Measuring Mode. Norma.

11. Kawalec A, Magdziak M. Metoda obliczania krzywej offset. *Przegląd Mechaniczny* 2011; 70(7-8): 26-30.
12. Kawalec A, Magdziak M. Wpływ metody dopasowania na wyniki pomiarów pióra łopatką, XI Forum Inżynierskie ProCAx, 2012; 2.
13. Kontrola jakości odkuwek i matryc - archiwizacja i regeneracja matryc. Materiały informacyjne: ITA-polska; <http://www.ita-polska.com.pl>.
14. Kuś A. Implementation of 3d optical scanning technology for automotive applications. *Sensors* 2009; 9: 1967-1979.
15. Langton D.J, Sidaginamale R.P, Holland J.P, Deehan D, Joyce T.J, Argol A.F, Meek R.D, Lord J.K. Practical considerations for volumetric wear analysis of explanted hip arthroplasties. *Bone Joint Res* 2014; 3: 60-68.
16. Li F. X, Longstaff A, Fletcher S, Myers S. Integrated tactile and optical measuring systems in three dimensional metrology. *Computing and Engineering Researchers' Conference*, University of Huddersfield, Mar 2012; 1-6.
17. Lord J.K, Langton D.J, Nargol A.V.F, Joyce T.J. Volumetric wear assessment of failed metal-on-metal hip resurfacing prostheses. *Wear* 201; 272(1): 79-87.
18. Lu Z1, McKellop HA. Accuracy of methods for calculating volumetric wear from coordinate measuring machine data of retrieved metal-on-metal hip joint implants. *Proc Inst Mech Eng H*. 2014; 228(3): 237-49.
19. Lulkiewicz J, Szkudelski S, Pachutko B. Kompleksowe badania matryc kuźniczych. *Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie* 2015; 3(90):16-19.
20. Macháček, P, Tomicek J. Application of laser scanning in reverse engineering and prototype manufacturing. *WTP* 2010; 1(21): 35-44.
21. Magdziak M. Metoda pomiaru powierzchni swobodnych na obrabiarkę sterowaną numerycznie. Praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2012.
22. Marton E, Pizzolon F. Dimensional control during forging. *Innovative 3d laser measuring systems, Forge Applications* 2010; (1).
23. Measurement of a forging die for tooling corrections. Materiały informacyjne: AICON_3D_SYSTEM; http://www.aicon3d.com/fileadmin/user_upload/produkte/en/breuckmann_Scanner/01_PDF_IuT/Forging_die_measurement_Web.pdf.
24. Pachutko B, Ziółkiewicz S. Investigation of the wear processes of dies for forging building anchors basing on metallographic examinations. *Obróbka Plastyczna Metali* 2012; 23(4): 277-293.
25. Peng X., Wang L., Yang W., Zhao Y., Li D., Jin Z., Fan B., Dong S., Zhang S.: Optimized adaptive control for evaluation of artificial hip joint volumetric wear by coordinate measuring. *Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University* 2014; 48(8): 128-135.
26. Salah Hame, R. A. Influence of fitting algorithm and scanning speed on roundness error for 50 mm standard ring measurement using CMM. *Metrology and Measurement Systems* 2008; 15(1): 33-53.
27. Ulatowski K. Ramiona pomiarowe – rynek i zastosowania. *Magazyn Przemysłowy* 2013; <http://www.magazynprzemyslowy.pl/zarzadzanie-i-rynek/Ramiona-pomiarowe-rynek-i-zastosowania>.
28. Weckenmann A, Weickmann J. Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation. *Metrology and Measurement Systems* 2006; 13(4): 321-334.