

Sebastian MOŁEK¹, Jacek PEZDA²

ANALIZA ZUŻYCIA MATRYC DO KUCIA CZOPA PÓŁOSI

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę zużycia narzędzi w procesie kucia matrycowego z wykorzystaniem techniki skanowania 3D. Elementem podlegającym analizie była matryca przeznaczona do wielowykrojowego kucia czopa półosi. Na podstawie wyników pomiarów precyzyjnie określono ubytek materiałowy narzędzia kuźniczego po wykuciu określonej partii odkuwek.

Słowa kluczowe: kucie matrycowe, skanowanie 3D, zużycie narzędzia

WEAR ANALYSIS OF A DIES TO FORGING OF HALFSHAFT SPIGOT

Summary: In the study is presented wear analysis of a tools in course drop forging process, made with use of 3D scanning technique. The analysis concerned a forging die destined to multi-die forging of halfshaft spigot. The analysis performed on the base of measurement results allows for precise assessment of material loss of forging tool after forging of a predetermined batch of forgings.

Keywords: drop forging, 3D scanning, wear of tool

1. Wstęp

Kucie ma wyjątkową pozycję wśród procesów produkcyjnych. Można je stosować do prawie wszystkich metali, stopów i elementów uzyskiwanych poprzez metalurgię proszków. Ponadto jest jedynym procesem pozwalającym nie tylko na nadanie nowego kształtu, ale również na zmianę właściwości mechanicznych elementu. Dokładność wymiarów jak i powierzchni spełnia współczesne wymagania, a jednocześnie wytrzymałość i ciągliwość ulegają znacznej poprawie.

Podstawą rozwoju przemysłu jest ciągłe doskonalenie produktów i ich jakości przy jednoczesnej redukcji kosztów produkcji, co pośrednio wiąże się ze skróceniem czasu pomiaru podczas bardzo skomplikowanych procedur pomiarowych. W przemysłowej metrologii współrzędnościowej obserwuje się nowe trendy związane z wykorzystaniem bezkontaktowych technik pomiarowych. Jest to możliwe dzięki

¹ inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, sebastian.molek@onet.eu

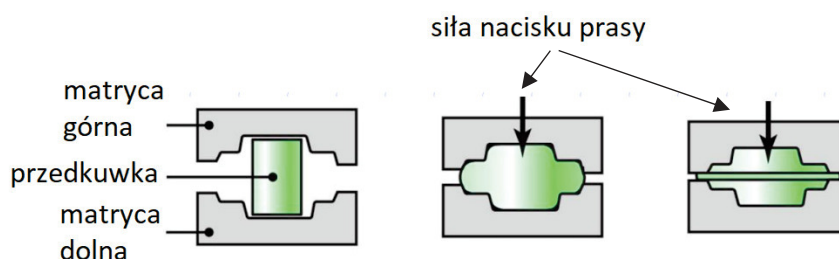
² dr hab. inż., prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, jpezda@ath.bielsko.pl

ciągłemu doskonaleniu technik pomiarowych oraz wprowadzaniu nowych urządzeń i metod pomiarowych, takich jak szybkie metody skanowania połączone z systemami CAD/CAM/FEM. Stwarza to konieczność stosowania numerycznych modeli 3D do wyznaczania wartości nominalnych podczas pomiarów. Wiąże się to z nowoczesnym podejściem wymiarowym ISO GPS oraz integracją oprogramowania urządzeń pomiarowych z numerycznymi modelami CAD. Dodatkowo, ze względu na prostotę ich zastosowania i poprawę dokładności pomiaru, urządzenia mobilne są obiektem coraz większego zainteresowania przemysłu. W odpowiedzi na zapotrzebowanie rynku można zaobserwować ciągłe doskonalenie dokładności pomiarowej przemysłowych skanerów optycznych oraz liniowych skanerów laserowych, co wraz z ich mobilnością znacząco zwiększa ich konkurencyjność w stosunku do klasycznych CMM.

2. Kucie matrycowe

Kucie to proces formowania metalu, w którym następuje odkształcenie plastyczne w wyniku naprężeń ściskających. Szeroka gama stopów i rozmiarów detali w połączeniu z właściwościami mechaniczno - fizycznymi sprawiły, że odkuwki są idealnym wyborem dla prawie wszystkich obszarów produkcji. Najczęstsze zastosowania to motoryzacja, lotnictwo, energetyka, rolnictwo oraz górnictwo.

Kucie zamknięte lub inaczej kucie matrycowe (rys. 1) to kształtowanie na gorąco wsadu całkowicie w ścianach lub wnękach matrycy, które łączą się, aby zamknąć obrabiany ze wszystkich stron detal. Zamknięte matryce składają się z górnej i dolnej matrycy, które łączą komponent na płaszczyźnie podziału. Płaszczyzna podziału znajduje się na największym przekroju przedmiotu obrabianego [1].



Rysunek 1. Kucie matrycowe

Większość odkówek wymaga więcej niż jednego etapu kucia ze względu na ograniczenia procesu. W związku z tym może być konieczne kucie, w którym półfabrykat ma kształt z góry określony. Rozmiar i kontur przed kolejnymi operacjami kucia matrycowego ma na celu zaoszczędzenie materiału i ilości uderzeń w kolejnych kuciach na matrycach zamkniętych.

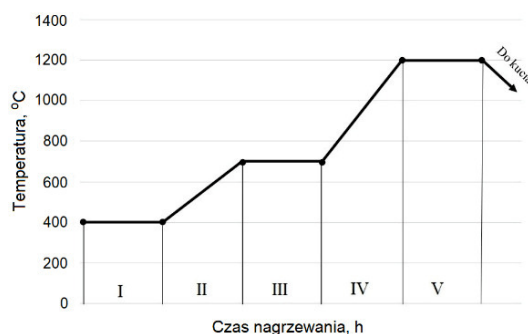
Części kute, choć wymagane są w wielu sektorach przemysłowych to kluczową rolę odgrywają w przemyśle motoryzacyjnym. Większość nośnych elementów konstrukcyjnych jak i również elementy krytyczne dla bezpieczeństwa są wytwarzane za metodą kucia. Wynika to głównie z stosunku wytrzymałości do masy oraz dokładności wymiarowej, która umożliwia ich późniejsze zamontowanie w różnego rodzaju podzespołach. Szybsza produkcja skomplikowanych kształtów przy jak

najmniejszych stratach materiału to tylko niektóre z innych korzyści. Jakość elementów kutych jest znacznie większa w porównaniu do powszechnie znanych metod obróbki metalu. Idealnym tego przykładem jest metoda odlewania metalu, która charakteryzuje się wykonaniem wyrobu o bardziej złożonych kształtach niż te, które można uzyskać za pomocą kucia, niemniej jednak jakość detalu w procesie odlewania jest znacznie mniejsza pod względem własności mechanicznych niż te, które można uzyskać w kuciu matrycowym [2].

2.1. Matryce kuźnicze

Matryce kuźnicze podczas pracy są narażone na działanie wysokiej temperatury i dynamicznie zmieniających się naprężeń. Wskutek tego narzędzia do kucia muszą być wykonane ze stali o wysokich własnościach mechanicznych, pozbawionych wad wewnętrznych i powierzchniowych. Matryce do urządzeń takich jak prasy, bądź kuźniarki charakteryzują się pracą o mniejszych naprężeniach dynamicznych, za to naprężenia termiczne są tutaj znacznie większe, co skutkuje mniejszą odpornością na ścieranie narzędzia oraz szybszym zużyciem wykoju [3]. Narzędzia kuźnicze powinny cechować się zwiększoną wytrzymałością na rozciąganie ($R_m > 900 \text{ MN/m}^2$), dużym oporem odkształcenia przy nagraniu poszczególnych części matrycy powyżej temperatury odpuszczania, twardością w skali Brinell'a na powierzchni wykoju od 300 - 500 HB (w stanie odpuszczonym), dobrą obrabialnością, wysoką odpornością na ścieranie oraz dużą udarnością [4].

Bloki matrycowe tworzy się z tzw. wlewków, które posiadają przekrój okrągły lub ośmiokątny. Wlewki przeznaczone do kucia nagrzewa się (rys. 2) w piecu o budowie dwukomorowej lub jednym przepychowym posiadającym funkcję regulacji temperatury od 300° do 1200°C na całej długości trzonu pieca.



Rysunek 2. Wykres nagrzewania wlewków do kucia [2]

Aby wlewki zostały równomiernie nagrzane stosuje się mechanizm osiowego obrotu [2]. Po uprzednim nagraniu się wlewk zostaje przekuty na tzw. kęsiska o stopniu przekucia nie mniejszym niż 3. Po otrzymaniu odpowiedniej wielkości kęsiska odpad jest cięty i dzielony na części odpowiadające blokom matrycy. Następnie podzielone części poddaje się ponownemu nagraniu i spęcza się o 1/3 wysokości tworząc kostkę o żądanych wymiarach. Odkształcone bloki schładza się w ziemi okrzemkowej lub w piecu węglowym [2]. Formowanie bloków do produkcji matryc jest drogie, stąd w celu zniwelowania kosztów stosuje się wlewki o przekroju okrągłym lub

kwadratowym i masie nie większej niż 600kg dla małych bloków na wkładki matrycowe czy stemple [2].

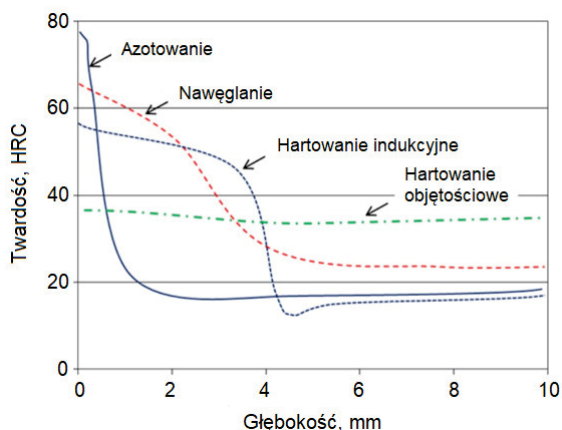
Istnieje kilka technologii obróbki matryc do kucia:

- obróbka cieplna \Rightarrow obróbka skrawaniem \Rightarrow wykańczanie ręczne,
- wstępna obróbka skrawaniem \Rightarrow obróbka cieplna \Rightarrow obróbka wykańczająca, obróbka skrawaniem \Rightarrow wykańczanie ręczne,
- obróbka skrawaniem \Rightarrow obróbka cieplna \Rightarrow wykańczanie ręczne.

Obróbka cieplno - chemiczna matryc dzieli się na:

- dyfuzyjne chromowanie wykrojów, które charakteryzuje się przenikaniem powierzchni wykroju matrycy chromem. Proces ten przebiega bardzo wolno, wymaga długich czasów oraz wysokich temperatur (900-1200°C). Matryce poddane temu zabiegowi umieszcza się w skrzynce metalowej wypełnionej suchym proszkiem o składzie: 65% - żelazo - chrom wysokowęglowy (ok. 4% C), 0,5% - chlorek amonu NH_4Cl (aktywator) lub jodek amonu NH_4I , 34,5% - kaolin (zapobieganie spiekaniu się proszku). Badanie eksploatacyjne potwierdzają średni wzrost trwałości zużycia wykroju o ok. 50÷200% [5].
- azotowanie matryc polega na nasyceniu powierzchni atomami azotu, prowadzi do wydzielenia azotków i węglikoazotków, a co za tym idzie znacznej poprawy twardości i odporności na ścieranie wykroju. Proces ten przebiega w temperaturze 500÷560°C i w czasie ok. 1 godziny uzyskuje grubość warstwy nasyconej w przedziale 0,02÷0,05 mm. Najlepsze warunki do azotowania mają stale wysokostopowe, odpuszczone po hartowaniu w temperaturze ponad 500°C, jak np. WWN1, WWS, WNL, WCL. Powszechnie znane jest azotowanie gazowe w atmosferze zdysocjowanego amoniaku. Intensywność dysocjacji amoniaku powinien wynieść 40÷50% w temperaturze ok. 540±520°C przy azotowaniu matryc do kucia. W przypadku niższej dysocjacji otrzymuje się zbyt kruche warstwy, a przy wyższej - zbyt niską twardość. Metoda ta jest stosunkowo łatwa i czysta [5].

Wpływ azotowania na twardość powierzchni pod względem wartości maksymalnej i głębokości penetracji w porównaniu z innymi metodami obróbki cieplnej i cieplno - chemicznej przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Profile głębokości - twardości dla wybranych obróbek cieplnych i cieplno - chemicznych [5]

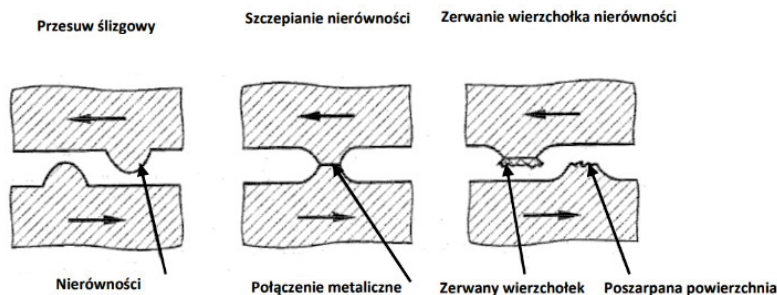
2.2. Mechanizmy zużycia matryc

Narzędzia do kucia stają się niezdadne do dalszej eksploatacji przeważnie w wyniku naturalnego ich zużycia, czyli wtedy gdy zmiany geometrii wykrojów wykraczają poza dopuszczalne odchyłki. Najczęściej następuje to na skutek działania temperatury, tarcia lub siły odkształcenia [6].

Podczas kucia narzędzie nagrzewa się do temperatury ok. 400°C od odkształconego detalu, którego temperatura wynosi 1000 - 1200°C. Przy kuciu ciągłym temperatura matryc może wzrosnąć nawet do 600°C. W miejscach chwilowego stykania się materiału wsadowego z matrycą temperatura jest znacząco wyższa. Po wyjęciu odkuwki z matrycy temperatura powierzchniowych warstw wykroju szybko się obniża. W celu uniknięcia przegrzania się narzędzi stosuje się wszelakiego rodzaju smary np. roztworu soli w wodzie, zawiesiny koloidalnego grafitu w wodzie.

Proces kucia matrycowego niesie za sobą również niepożądane skutki. Zjawisko rozszerzania się i kurczenia metalu w górnych warstwach części roboczej matrycy stwarza prawdopodobieństwo do powstawania pęknięć cieplnych, które tworzą się w miejscu styku wykroju z metalem. W powstałe wgłębienia zostaje wtłoczony materiał odkuwki, który zwiększa ryzyko wcześniejszego zużycia wykroju [7].

Zużycie na skutek adhezji polega na przyleganiu czystych powierzchni nieutlenionych w miejscu styku metalu z wykrojem. Materiał w lokalnych złączach metalicznych ulega częściowemu utwardzeniu i z działaniem siły tarcia zostaje wyrwany z materiału podłoża, co powoduje wady w postaci wyrwań oraz pęknięć cieplnych, w które zostaje wprasowana zgorzelina (rys. 4). Część robocza matrycy w tych miejscach przybiera postać wielowarstwowego placka [8].



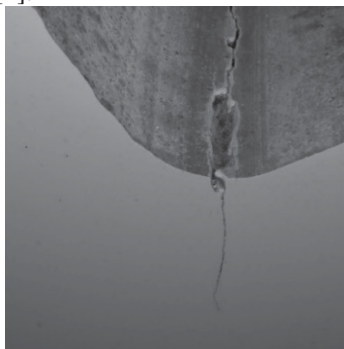
Rysunek 4. Mechanizm zużycia adhezyjnego[9]

Zużycie na skutek ścierania powstaje, gdy między dwoma stykającymi się powierzchniami wykroju matrycy znajduje się ciało trzecie (wsad). Odkształcony materiał „płyynie” pod wpływem nacisku prasy i żłobi tzw. kanały. Zaobserwować można, że najczęstsze zużycie obserwuje się w miejscu wypływania metalu na wypływkę, czyli na obrysie wykroju [4].

Zużycie na skutek korozji występuje wtedy, gdy zarodek korozji wytwarza na powierzchniach trących produkty reakcji chemicznych, które w późniejszym procesie usuwane są pod wpływem siły tarcia. Przyczyną wywołującą taki stan mogą być niektóre substancje zawarte w smarze np. pary powstałe na skutek spalania się olejów lub pary wodne. Na powierzchnię matryc oprócz substancji gazowych mogą również

działać substancje w stanie płynnym tj. roztwór soli w wodzie czy różnego rodzaju oleje. Działanie tych substancji może przyczynić się do zjawiska korozji powierzchniowej i przyspieszyć proces zużycia wykroju [8].

Brak wyeliminowania wad powstałych w procesie obróbki skrawaniem (powstałe rysy), jest częstym powodem koncentracji naprężeń prowadzących do przekroczenia zmęczeniowej granicy wytrzymałości materiału, które sprzyjają powstawaniu pęknięć. Spiętrzenie się naprężeń w pewnej części wykroju może doprowadzić do licznych pęknięć (rys. 5) [4].



Rysunek 5. Pęknięcie na skutek zmęczenia materiału w narożu matrycy[7]

Również masa detalu wywiera ogromny wpływ na trwałość matryc. Wraz ze wzrostem masy odkuwki trwałość matryc maleje, np. dla odkuwek o wadze 0,5kg trwałość wynosi 15000 sztuk, a dla odkuwek o masie 7,5÷10kg trwałość wynosi 6700 sztuk. Kształt i wielkość odkuwki również ma wpływ na trwałość matrycy np. odkuwki wydłużone i cienkie znacznie ją skracają [2].

Konstrukcja narzędzi do kucia opiera się głównie na analizie kształtu oraz wymiarów rowka na wypływkę i wielkość wewnętrznych promieni wykroju, gdyż od nich w dużym stopniu zależy trwałość matrycy i jakość wyrobu końcowego. Zastosowanie zbyt małych promieni wewnętrznych prowadzi do przedwczesnych mikropęknięć wykroju. Małe promienie również utrudniają płynięcie metalu w narożach wykroju tworząc niewypełnione części odkuwki w tym miejscu [7].

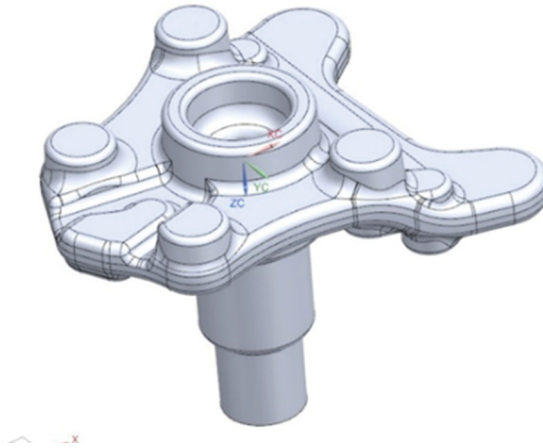
Matryce powinno się nagrzać do temperatury 250°÷350°C, ponieważ może dojść do wysokiej kumulacji naprężeń własnych, które powodują pękanie narzędzi. Stosuje się również dogrzewanie matryc w przypadku, gdy przerwa w pracy jest dłuższa. Przy produkcji wielkoseryjnej narzędzie narażone jest na ciągłe nagrzewanie się i w wyniku tego spada twardość, dlatego należy stosować odpowiednie chłodzenie części roboczej matrycy oraz intensywne smarowanie [2].

Trwałość powierzchni wykrojów matryc można znacząco polepszyć poprzez zastosowanie nowoczesnych technologii tj. kucie, wyciskanie na zimno, obróbka elektroiskrowa. W celu zwiększenia żywotności stosuje się również napawanie twardymi materiałami wykrojów oraz obróbkę cieplno - chemiczną jak np. azotowanie [10].

3. Obiekt badań

Obiektem badań były matryce do kucia czopa półosi (rys. 6) udostępnione przez firmę Kuźnia Polska SA, których komplet złożeniowy składa się z wkładki dolnej oraz

górnej. Zastosowana technologia regeneracji opiera się na wcześniejszym frezowaniu wykroju w celu zlikwidowania wszystkich pęknięć, a następnie napawaniu (matryca górna) oraz obróbce skrawaniem (matryca dolna).



Rysunek 6. Model CAD odkuwki czopa półosi

Podczas regeneracji matryc napawanie przebiega tylko na wkładkach górnych drutem proszkowym EnDotec DO*341 firmy Castolin Eutectic dającym stopiwo o strukturze drobnoziarnistego martenzytu z wydzieleniami węglików (nie tworzy żużla). Stopiwo na bazie FeCrMoNiVTi o charakterze stali do pracy na gorąco charakteryzuje się wysoką odpornością na pękanie, również w przypadku wykonywania napoin wielowarstwowych. Jest odporne na długotrwałe naciski oraz ścieranie do temperatury 550°C. Ponadto stopiwo można obrabiać przy użyciu standardowych narzędzi z wkładkami z węgla. Wkładki dolne po uprzednim oczyszczeniu (piaskowaniu) są trasowane i obniżane na tyle, aby wykroj po obróbce spełniał wszystkie wymogi geometrii. Rodzimy materiał WCL 1.2343, z którego wykonane są wkładki dolne charakteryzuje się dobrą ciągliwością, dobrą przewodnością cieplną, odpornością na pęknięcia w wysokich temperaturach oraz niepodatnością na chłodzenie i szok termiczny.

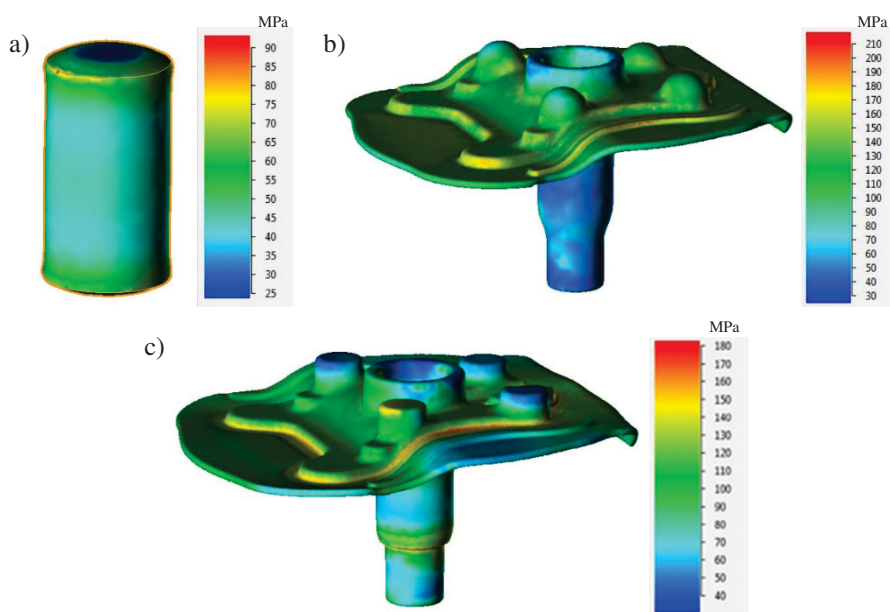
3.1. Przebieg procesu kucia

Kucie detalu odbywa się na prasie korbowej LZK 2500 typu Maxi firmy SMERAL (rys. 7) o nominalnej sile formującej 25000 kN i skoku suwaka prasy 320 mm.



Rysunek 7. Prasa LZK 2500 typu MAXI firmy SMERAL

Proces kucie czopa półosi przebiega w trzech operacjach: spęczania, kucia wstępnego oraz kucia na gotowo. Na rysunku 8 przedstawiono rozkład naprężeń rzeczywistych w oparciu o symulacje formowania odkuwki w programie QForm3D.



Rysunek 8. Naprężenia rzeczywiste: a) po spęczaniu wsadu, b) po kuciu wstępnym odkuwki, c) po kuciu na gotowo odkuwki

W procesie odkształcania metal znajdujący się w recypencie jest pod działaniem zespołu sił aktywnych i biernych: siły nacisku stempla, siły tarcia zewnętrznego i siły reakcji nieruchomych ścian narzędzia. Jedne z tych sił odkształcają metal, a drugie przeciwnie – utrudniają przemieszczenie się cząstek metalu względem siebie i względem ścian narzędzia. Pod działaniem tych sił metal znajduje się w stanie naprężenia. Po wykonaniu analizy za pomocą programu QForm3D można zauważyć, że przy spęczaniu wsadu największe naprężenia występują na krawędziach i utrzymują się w granicach 60 – 65 MPa. Jest to wynikiem założeń technologicznych,

aby spęczanie (rys. 8a) miało na celu tylko załagodzenie ostrych krawędzi jak i zbitcie zgorzeliny. Natomiast jeśli chodzi o kucie wstępne (rys. 8b) jak i kucie na gotowo (rys. 8c) to naprężenia kształtują się w zakresie 120 - 130 MPa. Widoczne jest to najbardziej na płaszczyznach matrycy, gdzie zgniot wsadu jest największy.

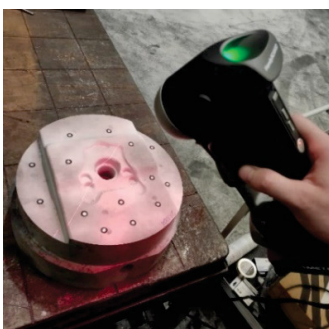
Symulacja w programie QForm3D umożliwiła wstępne rozpoznanie stref, gdzie mogą pojawić się liczne zużycia wykroju matryc. Zwiększone naprężenia rzeczywiste występują głównie w punkcie wypływania materiału na wypływkę (promień obrysu wykroju) i są proporcjonalne do odkształceń plastycznych. Również na wałku odkuwki można zauważyć zwiększone naprężenia, co może doprowadzić do tzw. rozbić geometrii wykroju matryc.

3.2. Skanowanie 3D

Działanie skanera 3D przebiega w sposób bezdotykowy. Projekcja światła laserowego lub strukturalnego na skanowany przedmiot pozwala wbudowanej kamerze rejestrować jego współrzędne w przestrzeni. Zebrane w ten sposób informacje umożliwiają odtworzenie tekstury i geometrii przedmiotu w postaci cyfrowej. Skaner nie wymaga żadnych dodatkowych urządzeń pozycjonujących. Wykorzystując metodę triangulacji skaner odnajduje swoją pozycję w przestrzeni. Układ odniesienia związany jest ze skanowanym obiektem, na który przyklejone są punkty referencyjne. Możliwe jest również poruszanie częścią w trakcie skanowania.

Wykorzystane stanowisko wyposażone w skaner 3D wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem zostało uruchomione w Kuźni Polska SA w celu weryfikacji zużycia matryc kuźniczych. Głównym elementem tego stanowiska jest skaner HandySCAN model 700 firmy Creaform wraz z oprogramowaniem Vxelements. Całe stanowisko pomiarowe jest mobilne i umożliwia skanowanie matryc w miejscu ich składowania.

Przed skanowaniem matryc do kucia należy oczyścić (wypiąskować) cały element z pozostałości roztworu grafitowego po kuciu. Pozostawienie matryc nieoczyszczonych od grafitu skutkuje błędnymi wynikami pomiaru podczas skanowania. W takim przypadku można spodziewać się dużych odchyłek maksymalnych na wykroju (naddatki). W celu lepszego pomiaru skanerem zaleca się nałożenie na powierzchnię matującej powłoki. Niezbędne jest również naklejenie punktów referencyjnych na skanowany obiekt. Położenie skanera względem matrycy podczas skanowania oraz widok zmatowionej powierzchni matrycy pokazano na rys. 9.



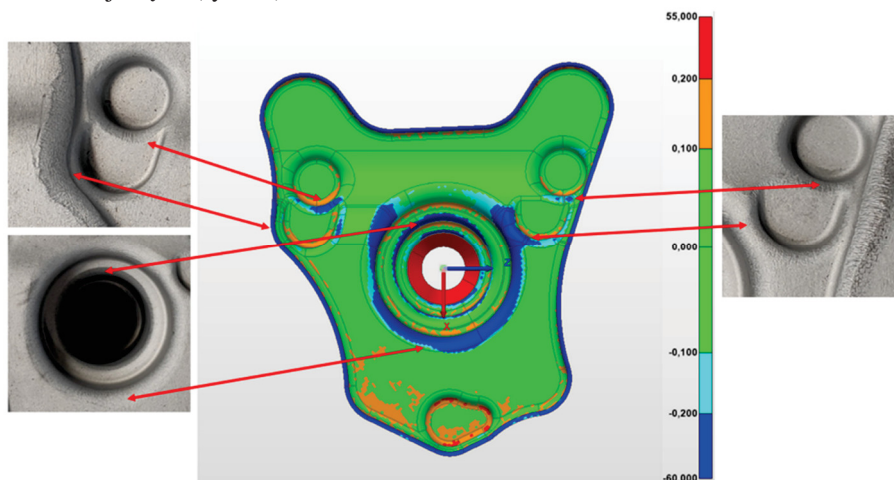
Rysunek 9. Przebieg procesu skanowania matrycy z wykorzystaniem skanera HandySCAN 700 firmy Creaform

4. Analiza zużycia matryc do kucia za pomocą skanowania 3D

Najczęściej stosowaną metodą analizy zużycia matryc do kucia jest skanowanie 3D wykorzystywane w celu określenia degradacji powierzchni roboczej matrycy. Zużycie narzędzi do kucia analizowane jest na podstawie danych uzyskanych z pomiarów przeprowadzonych w drodze skanowania matrycy przed i po operacji na stanowisku badawczym. Dane są porównywane przez oprogramowanie PolyWorks z funkcją najlepszego dopasowania danych tzw. „best-fit”. Wynikiem analizy jest kolorowa mapa odchyłek rozłożonych na powierzchni skanu, przedstawiająca wartość odchylenia wykroju od wymiaru nominalnego.

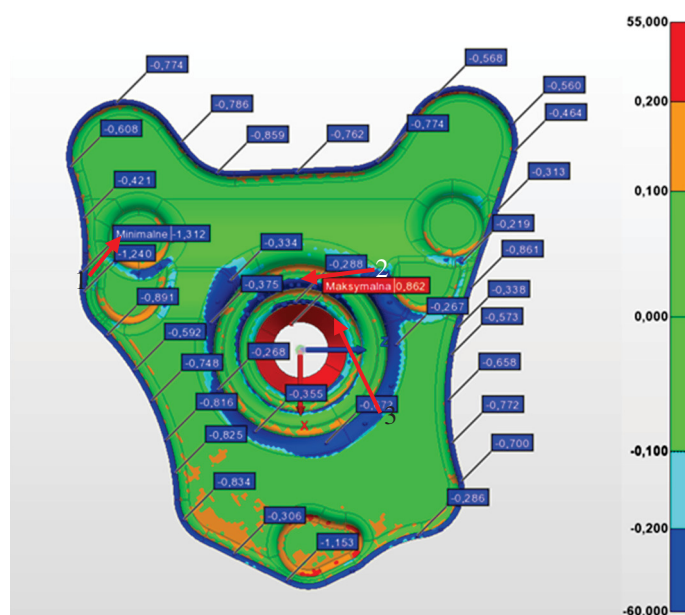
4.1. Zużycie matrycy dolnej do kucia czopa półosi

Porównując skan matrycy dolnej przed kuciem do stanu matrycy po kuciu (rys. 10) można od razu zauważyć, że największe zużycie wykroju występuje w środkowej części roboczej matrycy. Projektując narzędzia do kucia, w głównej mierze zwraca się uwagę na dobór odpowiednich promieni zaokrągleń. W matrycach do kucia wstępnego stosuje się większe promienie niż te, które można zaobserwować na matrycach do kucia na gotowo [9]. Przejście materiału wsadowego po uformowaniu odkuwki wstępnie na matryce do kucia na gotowo ma na celu zmniejszenie promieni zaokrągleń przy jednoczesnym prostowaniu odkuwki, dlatego największe zużycie wykroju widoczne jest na promieniach obrysu wykroju przy wypływie oraz środkowej części (rys. 10).



Rysunek 10. Skan powierzchni wykroju matrycy dolnej po kuciu

Wykorzystane oprogramowanie metrologiczne PolyWorks umożliwia użytkownikowi oznaczenie tzw. chorągiewek w celu zbadania odchyłek. Wartość odchyłek minimalnych kształtuje się w granicach 0,2 - 1,3 mm (rys. 11).



Rysunek 11. Matryca dolna po kuciu lewego czopa półosi (mapa odchyłek)

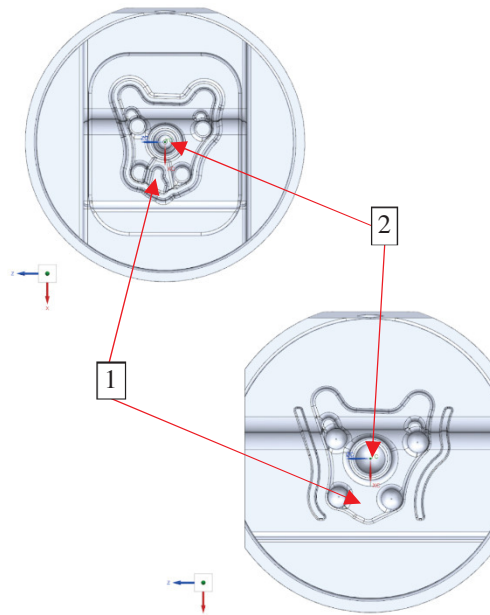
Minimalna odchyłka widoczna jest na promieniu wypływania materiału na wypływkę (rys. 11 - pkt. 1), a jej wartość wynosi 1,31 mm, natomiast maksymalna (rys. 11 - pkt. 2) widnieje na fazowaniu otworu pod wyrzutnik (rys. 11 - pkt. 3) i wynosi 0,86 mm, przy czym wynik ten może być wskazaniem błędnym, gdyż skanery laserowe docelowo przeznaczone są do elementów płaskich, a głębokie otwory generują błędy w uzyskanej chmurze punktów.

Można również rozważyć pomyłkę operatora drążarki. Jednak niewydrążenie odpowiedniej głębokości fazowania pod wyrzutnik skutkowałoby zmniejszeniem wysokości (długości) odkuwki, a przy takim błędzie wykluczono by dalsze kucie detalu.

4.2. Zużycie matrycy górnej do kucia czopa półosi

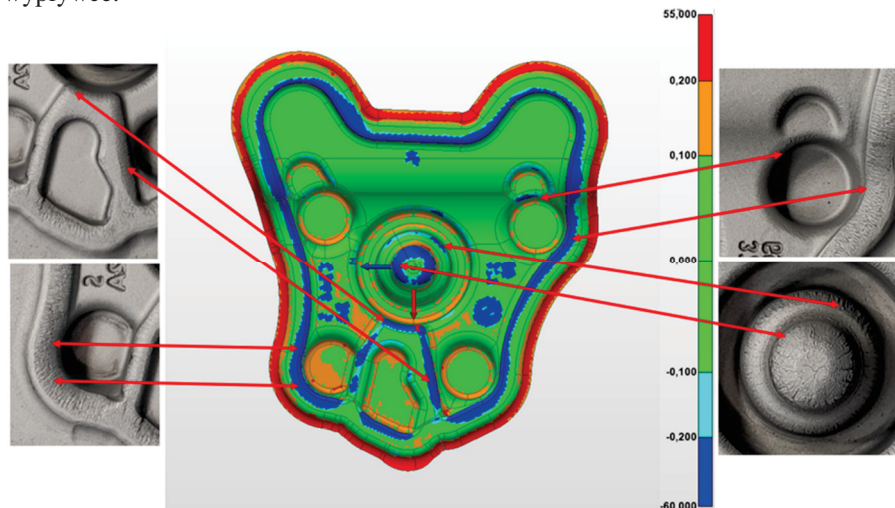
Ograniczona geometria wykroju na kuciu wstępnym powoduje zużycie wykroju wykańczającego (rys. 12):

- brak elementu geometrii na matrycy górnej do kucia wstępnego przekłada się na znaczne zużycie wykroju na matrycy górnej do kucia na gotowo (rys. 12 - pkt. 1),
- znacząco różniący się kształt czopa na matrycy górnej do kucia wstępnego przekłada się na wzrost odkształcenia plastycznego na matrycy górnej do kucia na gotowo (rys. 12 - pkt. 2).



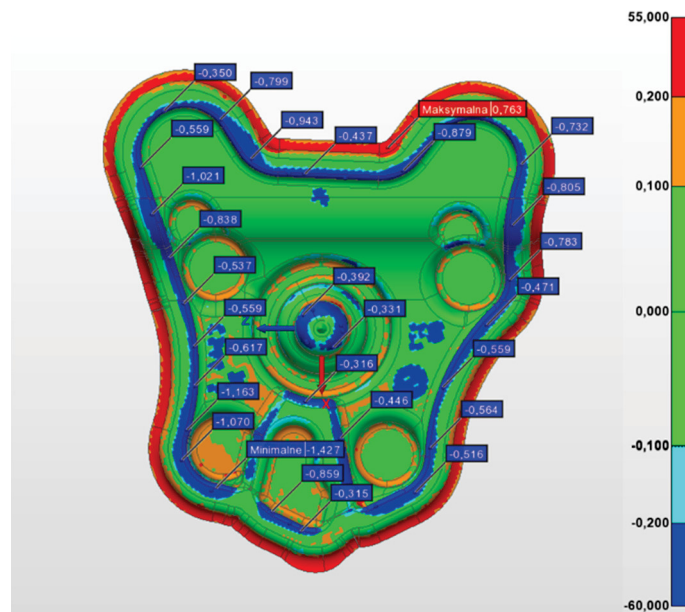
Rysunek 12. Porównanie matrycy do kucia na gotowo i kucia wstępnego

Porównując skan matrycy górnej przed kuciem ze skanem matrycy po kuciu (rys. 13) można zauważyć, że największe zużycie wykroju następuje na obrysie figury przy wypływcie.



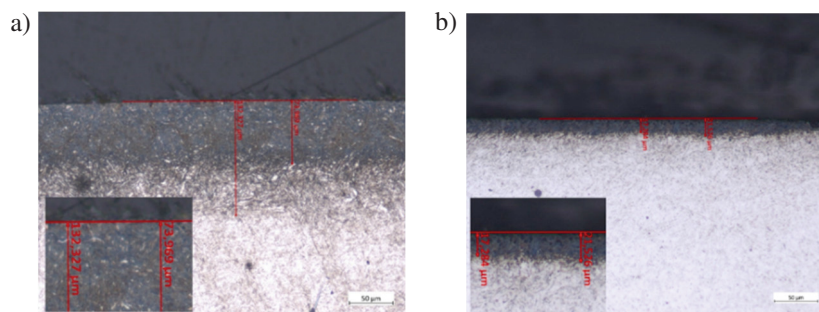
Rysunek 13. Skan powierzchni wykroju matrycy górnej po kuciu

Wartość odchyłek minimalnych kształtuje się w granicach 0,3 - 1,4 mm (rys. 14). Minimalna odchyłka widoczna jest na promieniu wypływania materiału na wypływkę, a jej wartość wynosi 1,42 mm, natomiast maksymalna widnieje poza mostkiem wykroju matrycy i wynosi 0,76 mm (rys. 14).



Rysunek 14. Matryca dolna po kuciu lewego czopa półosi (mapa odchyłek)

Biorąc pod uwagę fakt, że promień poza mostkiem wykroju matrycy jest większy w porównaniu do modelu nominalnego, to mimo wszystko musi być w tym miejscu zastosowane zaokrąglenie. Zakładając, że zamiast promienia byłoby przejście ścianki w płaszczyznę pod kątem 90° , mogłoby dojść do zakleszczania się odkuwki w górnej matrycy, co skutkowałoby znacznym spowolnieniem procesu formowania bądź odkucia dwóch odkuwek naraz. Często operatorzy pras pod wpływem monotonnej pracy nie są w stanie zauważyć zakleszczania się odkuwek w górnych wykrojach matrycy. Nakładając kolejny materiał wsadowy na matrycę dolną może dojść do pęknięcia narzędzia, a przy tym ciężkiego urazu operatora. Jednak najczęściej dochodzi do „zamrożenia” wkładek – brak możliwości oddzielenia złożonych matryc. W wyniku tego narzędzia są wypalane, a co za tym idzie ulegają całkowitemu zniszczeniu i złomowaniu.



Rysunek 15. Głębokość warstw azotowanych: a) matryca dolna (stal WCL 1.2343), b) matryca górna (napawana drutem proszkowym EnDOtec DO*341)

Mniejsza głębokość warstwy azotowanej dla stopiwa na bazie FeCrMoNiVTi przekłada się na mniejszą twardość i zwiększenie zużycia geometrii wykroju. Jest to związane z różną głębokością warstw azotowanych (rys. 15). Na matrycy do kucia czopa półosi wykuto 3547 z 5000 sztuk (norma do zużycia narzędzi), co wynika z stosunkowo niskiej twardości narzędzia, która 60 μm od powierzchni zewnętrznej dla górnej matrycy wynosiła 552 a dla dolnej 633 HV_{0,5} i wraz z wzrostem odległości (150 μm) od powierzchni malała do 482- 484 HV_{0,5} dla obu matryc.

5. Wnioski

Oprogramowanie QForm3D umożliwiło wstępne ustalenie stref, gdzie może pojawić się zużycie wykroju matryc. Zwiększone naprężenia rzeczywiste w punkcie wypływania materiału na wypływkę (promień obrysu wykroju) są proporcjonalne do występujących tam odkształceń plastycznych odkuwki. Również na wałku odkuwki zauważalne jest zwiększenie naprężeń rzeczywistych, co może doprowadzić do tzw. rozbić geometrii wykroju matryc.

Przeprowadzone badania wykazały możliwości wykorzystania nowych, bezkontaktowych technologii pomiarowych do bezpośredniej oceny zmian kształtu narzędzia. Przeprowadzona analiza na podstawie wyników pomiarów pozwala precyzyjnie określić ubytek materiałowy narzędzia kuźniczego po wykuciu określonej partii odkuwek. Optymalne wykorzystanie danego narzędzia przy zachowaniu najwyższej jakości produkowanych odkuwek pozwala na wydłużenie czasu pracy oprzyrządowania kuźniczego oraz znaczne obniżenie kosztów produkcji.

LITERATURA

1. SKUBISZ P.: Kucie swobodne i półswobodne. Arbor FP, Kraków 2011.
2. WASINIUK P.: Kucie matrycowe. WNT, Warszawa 1975.
3. SIŃCZAK J.: Podstawy procesów przeróbki plastycznej. Wydawnictwo AKAPIT, Kraków 2010.
4. GIERZYŃSKA M.: Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej. WNT, Warszawa 1983.
5. BURAKOWSKI T., WIERZCHOŃ T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
6. LIPSON C., COLWELL L.V.: Handbook of Mechanical Wear. The University of Michigan Press, 1961.
7. HAWRYLUK M.: Metody analizy oraz zwiększania trwałości narzędzi kuźniczych stosowanych w procesach kucia matrycowego na gorąco. Monografia, seria wydawnicza „Problemy Eksploatacji i Budowy Maszyn”, Wydawnictwo Naukowe ITE - PIB, Radom 2016.
8. SOLSKI P.: Zagadnienia odporności stali na ścieranie. Zagadnienia tarcia, zużycia i smarowania. Wydawnictwo PAN, Warszawa 1965.
9. GRONOSTAJSKI Z., KASZUBA M., HAWRYLUK M., NOWAK B.: Trwałość narzędzi w procesach kucia. Obróbka Plastyczna Metali, **26**(2015)3, 255-270.
10. LISOWSKI Z.: Zużycie. Zagadnienia tarcia, zużycia i smarowania. **6**(1970), PWN, Warszawa.