

Dr hab. inż. Marek Hawryluk, prof. Uczelni
Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
E-mail: marek.hawryluk@pwr.edu.pl

Mgr inż. Piotr Kondracki
Kuźnia Jawor S.A.
Ul. Kuziennicza 4, 59-400 Jawor, Polska
E-mail: piotrkondracki@kuznia.com.pl

Dr inż. Jakub Krawczyk
Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
E-mail: jakub.krawczyk@pwr.edu.pl

Mgr inż. Marcin Rychlik
Kuźnia Jawor S.A.
Ul. Kuziennicza 4, 59-400 Jawor, Polska
E-mail: marcinrychlik@kuznia.com.pl

Dr inż. Jacek Ziemia
Wydział Mechaniczny, Katedra Obróbki Plastycznej
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
E-mail: jacek.ziemia@pwr.edu.pl

ANALIZA WPŁYWU ZUŻYCIA NARZĘDZI DO KUCIA I OKRAWANIA NA DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO-KSZTAŁTOWĄ ODKUWEK UZYSKIWANYCH W PROCESIE WYTWARZANIA ELEMENTÓW DLA PRZEMYSŁU MOTORYZACYJNEGO

W pracy przedstawiono wyniki analizy procesu wytwarzania odkuwki typu rozwidłonego dla przemysłu motoryzacyjnego z wykorzystaniem modelowania numerycznego oraz technik skanowania 3D przy uwzględnieniu sukcesywnego zużywania się zarówno narzędzi do kucia, jak i do okrawania w celu określenia wzajemnego wpływu ich eksploatacji na dokładność wymiarową odkuwek. Przeprowadzona analiza obejmowała 4 warianty najczęściej występujące w procesie przemysłowym, czyli dla kombinacji nowych i częściowo wyeksploatowanych wkładek matrycowych (stosowanych podczas kucia na gorąco) oraz nowych i częściowo zużytych narzędzi okrojonych wykorzystywanych do okrawania na zimno. W pierwszym etapie zamodelowano proces kucia matrycowego na gorąco. Następnie uzyskane wyniki zaimplementowano do drugiego etapu modelowania, w którym zasymulowano proces okrawania na zimno wypływki przy zastosowaniu znormalizowanego kryterium pęknięcia Cockrofta-Lathama z uwzględnieniem eliminacji elementów, dla których została przekroczona wartość pęknięcia. Uzyskane wyniki zostały zweryfikowane za pomocą studium przypadku w warunkach przemysłowych dla najmniej korzystnych warunków eksploatacji obu rodzajów narzędzi oraz ich wpływu na dokładność wymiarowo-kształtową odkuwki. Uzyskane wyniki pozwoliły na pełniejszą analizę procesu okrawania dla różnych warunków eksploatacyjnych oraz potwierdzenie poprawności przeprowadzonego modelowania numerycznego, a tym samym możliwości jego wykorzystania do komputerowego wspomaganego rozwiązywania procesów wytwarzania. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na wybór optymalnych warunków realizacji procesów kucia i okrawania ze względu na ich eksploatację w celu zapewnienia wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej odkuwek.

Słowa kluczowe: proces okrawania; symulacje numeryczne; jakość geometryczna odkuwek; zużycie narzędzi

Wprowadzenie

Kucie matrycowe jest konkurencyjną metodą produkcji, w stosunku do innych technologii wytwarzania, głównie elementów eksploatacyjnych takich jak tłoki, wałki korbowe, koła zębate i przekładnie wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym, od których wymaga się wysokich właściwości użytkowych. Wyroby uzyskiwane tą technologią charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi, a także dużą dokładnością wymiarowo-kształtową przy minimalizacji ilości odpadów materiałowych i całkowitym koszcie wytwarzania. Dodatkowo uzyskana struktura materiału w wyniku kształtowania predysponuje je do stosowania na odpowiedzialne, pracujące w trudnych warunkach eksploatacyjnych części maszyny. Jednakże kucie tego typu komponentów jest zwykle osiąganym za pomocą wieloetapowego procesu wytwarzania, a nie pojedynczej operacji. Steffens i Wilhelm [35] przeprowadzili przegląd zmian jakie zaszły w szeroko rozumianej jakości i dokładności geometrycznej wytwarzania wyrobów kutek na poszczególnych etapach całego procesu kucia ze szczególnym wykorzystaniem komputerowych symulacji tych procesów. Podobnie w pracach Gronostajskiego i Hawryluka [12,13] przeprowadzono analizy całego ciągu technologicznego dla typowych procesów kucia matrycowego oraz zaproponowano metody ich poprawy i optymalizacji. Obecnie do najczęściej stosowanych metod analizy i optymalizacji procesów wytwarzania wykorzystywane są symulacje komputerowe przy użyciu modelowania numerycznego. W obecnej praktyce główne etapy operacji kucia, preformowania, kucia matrycowego, dalszego ich transportu i chłodzenia, mogą być skutecznie symulowane za pomocą pakietów obliczeniowych opartych o MES/MOS [18]. Metody oparte o MES/MOS są najszerzej stosowane do oceny płynięcia materiału, analizy stanu naprężeń/ odkształcenia i

rozkładu temperatury oraz do walidacji projektu procesu. Jednakże w tych procedurach symulacyjnych wciąż największe trudności sprawia poprawne rozwiązanie operacji okrawania oraz dziurowania kutyh części realizowanych bezpośrednio po usunięciu z narzędzi kuźniczych [3,6,21].

Eksploatacja jest nieodzownym zjawiskiem towarzyszącym produkcji wyrobów i związana jest najczęściej z maksymalnym wykorzystaniem maszyny/systemu/narzędzia w określonym czasie, po którym kończy się wraz z częściowym lub całkowitym ich zużyciem. Dlatego w literaturze technicznej zagadnieniu eksploatacji poświęca się wiele miejsca i prowadzi się szereg badań dotyczących wyznaczenia istotnych parametrów wpływających na to zjawisko, jak również badań przemysłowych oraz prac rozwojowych pozwalających na zwiększenie czasu eksploatacji [20,25,29]. W przypadku przemysłu kuźniczego pomimo poczynionego dużego rozwoju w tym obszarze technologii, tak aby proces produkcji był dokładny, niezawodny i wydajny [5], nadal kluczową kwestią jest trwałość oprzyrządowania, czyli czas eksploatacji określany najczęściej liczbą wyprodukowanych poprawnych odkuwek. Jak wiadomo, czas procesu formowania (kucia) materiału w jednym etapie/operacji wynosi około 0,08 do 0,2 s, co sprawia, że w tak krótkim okresie bardzo trudno jest śledzić lub obserwować i dokładnie analizować proces [34]. Ponadto eksploatowane narzędzia kuźnicze są złożone i trudne do analizy ze względu na wzajemne oddziaływanie wielu, często przeciwstawnych czynników i mechanizmów, w szczególności podczas procesu kucia na gorąco [1]. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej, jeżeli pod uwagę zostaną wzięte kolejne etapy ciągu technologicznego (jak np: okrawanie po procesie kucia), na końcu którego powstaje prawidłowy pod względem geometrycznym, jakościowym i użytkowym produkt – odkuwka [2].

Także sam proces wykrawania (cięcia) jest złożony geometrycznie i fizycznie. Polega on na pokonaniu spójności materiału dzięki koncentracji naprężeń wzdłuż linii cięcia. Można to uzyskać poprzez wywarcie na materiał nacisków za pomocą narzędzi (zamontowanych w przyrządach zwanych okrojnikami) dostosowanych do rodzaju okrawanych wyrobów oraz do wymaganej dokładności cięcia. Proces cięcia składa się z czterech faz występujących kolejno ze wzrostem siły tnącej. W pierwszej fazie występują odkształcenia sprężyste oraz nieznaczne wyginanie się ciętej powierzchni. Gdy naprężenia stają się dostatecznie duże, powodują miejscowe uplastycznienie materiału. Z tą chwilą rozpoczyna się druga faza procesu cięcia – nazywana sprężysto-plastyczną. Wraz z dalszym wzrostem naprężeń, granica obszaru uplastycznionego przesuwa się w głąb materiału, a metal płynie plastycznie w otoczeniu powierzchni ścinania (faza plastycznego płynięcia). W ostatniej fazie następuje utrata spójności i pęknięcie materiału, gdy naprężenia osiągają wartość krytyczną. Pęknięcie zaczyna się w miejscach maksymalnej koncentracji naprężeń (przy krawędziach stempla i płyty tnącej). Jeżeli luz pomiędzy narzędziami jest optymalny, to pęknięcia od obu krawędzi tnących spotykają się tworząc powierzchnię o zarysie zbliżonym do litery „S”. W celu zapewnienia, stopniowego przebiegu procesu cięcia krawędzie na współpracujących narzędziach powinny mieć położenie skośne, a ukosowanie nie powinno być jednokierunkowe. Aby uzyskać dużą dokładność po procesie okrawania krawędzie tnące nie powinny być stępione a luzy pomiędzy współpracującymi powierzchniami narzędzi utrzymane w ściśle określonych tolerancjach wymiarowych. Im większy luz tym silniejsze zaganienie brzegów okrawanej wypłytki oraz powstawanie dużej niekorzystnej strefy stożkowej i matowej (faza pęknięcia). Duży luz sprzyja również pojawianiu się gratu na ciętych powierzchniach. Zbyt małe luzy są także niekorzystne, bowiem mogą spowodować zaklinowywanie się metalu pomiędzy narzędziami oraz są przyczyną nadmiernego zużywania się narzędzi okrojnych. Dlatego niebagatelną rolę odgrywa eksploatacja narzędzi stosowanych w procesach cięcia, co przy uwzględnieniu dodatkowo poprzedzającego procesu wytwarzania-kucia matrycowego, powoduje, że określenie zarówno aktualnego stanu narzędzi oraz ich odpowiedni dobór w całym procesie produkcji staje się kluczowy dla jakości wyrobów [2,36].

Obecnie możliwe jest symulowanie procesu wykrawania 2D lub 3D prostej części przy użyciu komercyjnych funkcji oprogramowania MES. Niestety symulowanie numeryczne procesu cięcia i okrawania odkuwek o skomplikowanej geometrii komponentu wymaga długiego czasu obliczeniowego [18,31,32]. Jest to spowodowane koniecznością minimalizacji wielkości elementów skończonych, a tym samym zwiększenia liczby elementów zdyskretyzowanych modeli. Ponadto przeprowadzenie szczegółowej symulacji operacji okrawania wyrobu o złożonym kształcie jest trudne ze względu na złożoność mechanizmów ścinania lub mechanizmów pęknięcia ciągliwego materiałów [3,9]. W literaturze sporo miejsca poświęca się matematycznym modelom pęknięcia, które następnie są implementowane do modelowania numerycznego procesów cięcia i okrawania [37]. Przykładowo na uwagę zasługuje praca Hamblia i Reszika [14], gdzie autorzy zaproponowali podejście odwrotne do zbadania wielu różnych modeli uszkodzeń dla procesów wykrawania. W pracy [8] Cockcroft i Latham zaproponowali model, który podkreśla znaczenie podstawowego naprężenia rozciągającego w inicjacji pęknięcia. Oyane i in. [30] uznali naprężenie hydrostatyczne za najważniejszy czynnik wzrostu pustek i koalescencji w procesie pęknięcia. Korzystając z tych modeli, operacje cięcia i wykrawania mogą być skutecznie symulowane w przypadku 2D. Goijaerts i in. [11] badali zastosowanie zlokalizowanego modelu pęknięcia plastycznego przy wykrawaniu dokładnym różnych materiałów. Dużym problemem w przypadku numerycznego modelowania procesów okrawania oraz cięcia są algorytmy odnoszące się do oddzielania i usuwania elementów podczas procesu [10]. Należy wspomnieć także, że podczas symulacji numerycznych wciąż trudnym do rozwiązania jest

problem remeshingu, czyli przebudowy siatki elementów skończonych [4,7,33]. W literaturze przedmiotu znaleźć można wiele badań dotyczących analizy okrawania za pomocą metod analitycznych [19,24] i eksperymentalnych [15,17,23], a także symulacje numeryczne [3,16], które pozwoliły na bardziej szczegółową ocenę procesów cięcia i okrawania dla różnych materiałów i w różnych warunkach operacyjnych [22]. W pracy Lu i inni [26,27] opracowali prostą metodę symulacji okrawania dla wieloetapowo kutyh elementów. Na uwagę zasługuje również praca [28], w której autorzy przedstawili kompleksowe podejście do procesów okrawania wyływki po procesie kucia matrycowego dla odkuwki ostrza pławca. Pomimo, że w dostępnej literaturze omówiono wiele kluczowych zagadnień związanych z modelowaniem cięcia, to trudno znaleźć praktyczne aplikacje modelowania numerycznego, w szczególności do analizy przemysłowych procesów okrawania, które byłyby przydatne np.: dla inżynierów w rozwiązywaniu problemów produkcyjnych. Dlatego mimo znaczącego wkładu przedstawionych badań w tym obszarze niezwykle uzasadnione i interesujące jest przeanalizowanie wpływu postępującego zużycia narzędzi okrawających na jakość okrawania wyływki i dokładność wymiarowo-kształtową odkuwek po tych operacjach, także z uwzględnieniem eksploatacji narzędzi kuźniczych formujących odkuwkę z wyływką.

Celem pracy jest analiza procesu okrawania odkuwki typu rozwidłonego uwzględniająca postępujące zużycie narzędzi okrojczych oraz efektów procesu kucia (postępujące zużycie narzędzi kuźniczych) z wykorzystaniem modelowania numerycznego oraz skanowania 3D.

2. METODYKA BADAWCZA

Badania zostały podzielone na dwa główne etapy: modelowanie numeryczne procesu kucia matrycowego na gorąco i okrawania na zimno, a następnie przeprowadzenie pomiarów geometrii narzędzi okrojczych oraz odkuwek po okrawaniu przy użyciu technik skanowania 3D dla wybranych wariantów i ich porównaniu z wynikami modelowania numerycznego.

2.1. Opis analizowanego przemysłowego procesu kucia i okrawania

Proces kucia odkuwki widłaka realizowany jest na prasie Massey o nacisku nominalnym 13 MN (rys. 1a). Wszystkie narzędzia podgrzewane są do temperatury ok. 200-250 °C. Wkładki matrycowe w analizowanym procesie wykonane są ze stali WCL. W celu zapewnienia możliwie równomiernego odkształcania się materiału w całej jego objętości stosuje się smarowanie wkładek matrycujących wstępnych i wykańczających wodnym roztworem grafitu. Odkuwki typu rozwidłonego są ważnym elementem bezpieczeństwa w samochodzie (wchodzi w skład przekładni kierowniczej) i wymagają szczególnego nadzoru oraz uwagi w trakcie produkcji oraz rozwinięcia zaawansowanych technik ich wytwarzania w celu zapewnienia ich powtarzalności (rys. 1).

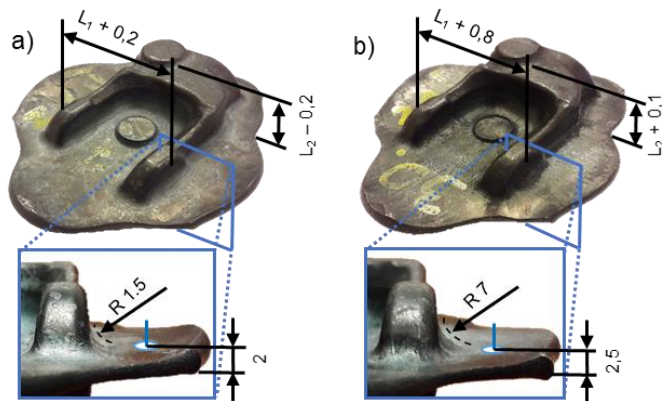


Rys. 1. Widok: a) dolnych wkładek matrycowych wraz z przedkawką umieszczoną przed kuciem wykańczających w wykroju wkładki, b) przykładowa odkuwka typu rozwidłonego z wyływką, c) gotowy detal - po obróbce mechanicznej, d) fragment kolumny kierowniczej z widłakami

Analizowane odkuwki typu widłak wykonywane są ze stali C45. Masa netto wynosi 0,32 kg. Po pocięciu pręta na odpowiednie wymiary, materiał wsadowy nagrzewany jest do temperatury 1120 °C - 1150 °C, a następnie poddawany 3 operacjom kucia na gorąco.

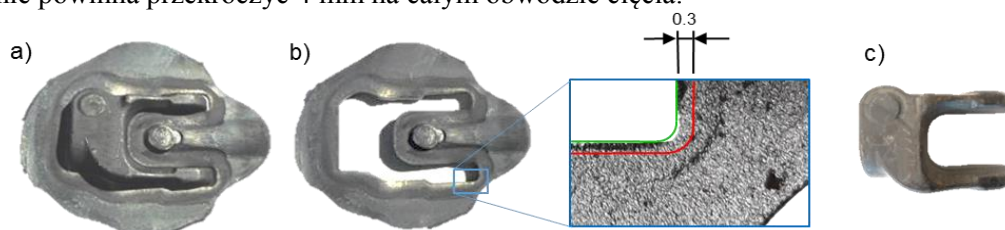
W przypadku procesu okrawania po wcześniejszym schłodzeniu odkuwek do temperatury otoczenia, procesie okrawania realizowany jest na zimno i polega na oddzieleniu wyływki od części użytkowej. Wówczas zabieg okrawania w przypadku takich odkuwek realizowany jest jako oddzielny element procesu produkcji. Taki sposób okrawania zapobiega krzywieniu się ramion odkuwek widłaka oraz zapewnia dobrą jakość powierzchni po okrawaniu. W analizowanym przypadku okrawanie odkuwek odbywa się na prasie korbowej dwupunktowej Wilkins & Mitchell o konstrukcji ramowej o nacisku nominalnym 2 MN.

Średnia trwałość narzędzi kuźniczych dla tej odkuwki w zależności od zastosowanego materiału narzędziowego oraz obróbki cieplno-chemicznej wynosi około 6000 sztuk. Natomiast w przypadku narzędzi do okrawania średnia trwałość wynosi około 16000 odkuwek. Należy zaznaczyć, że wraz z postępującą eksploatacją i zużywaniem się narzędzi kuźniczych dochodzi do powiększania się wykrojów roboczych (ubytek materiału narzędziowego oraz występowanie innych mechanizmów destrukcyjnych) a także zwiększania promieni wkładek, w szczególności w obszarze przejścia materiału do wyływki oraz zwiększania grubości wyływki (rys. 2). Natomiast konsekwencją zużywania się narzędzi do okrawania jest zwiększanie się wykroju w płycie tnącej oraz obwodowe zmniejszanie się linii krawędzi cięcia stempla.



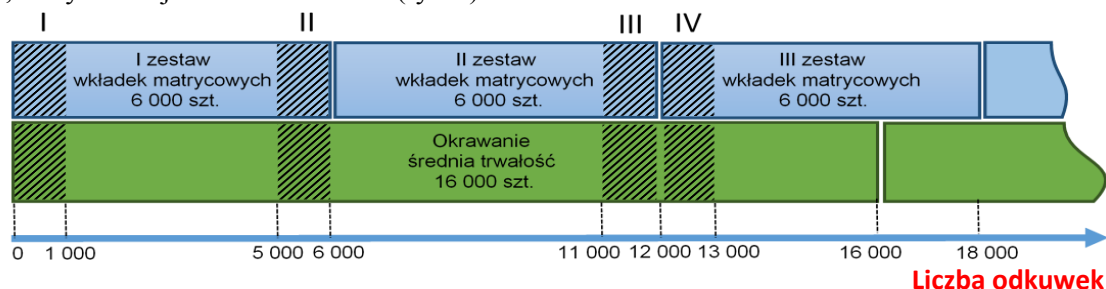
Rys. 2. Widok odkuwek po procesie kucia: a) początkowa faza procesu kucia –niezużyte narzędzia, b) końcowa faza procesu kucia (wyeksploatowane wkładki matrycowe) – powiększone wymiary narzędzia i odkuwki

To powoduje, że wyeksploatowane narzędzia do okrawania posiadają zwiększoną szczelinę pomiędzy nimi (duży luz). Może to skutkować w przypadku okrawania odkuwek pochodzących z narzędzi kuźniczych o różnym stopniu eksploatacji powstawaniem produktu końcowego o wymiarach poza tolerancją wymiarową. Konsekwencją używania się narzędzi do kucia jest fakt, że sama odkuwka (bez wypływki) staje się nieznacznie większa (powiększa się objętość odkuwki w wykroju), a jej wypływka zmniejsza powierzchniowo, lecz staje się nieznacznie pogrubiona (przy tej samej, stałej objętości odkuwki z wypływką-materiałem wsadowym). W przypadku procesu okrawania istotną kwestią stają się zwiększone promienie przejścia materiału do wypływki, bowiem skutkuje to zwiększeniem szerokości linii cięcia (rys. 2), co powoduje znaczne problemy w prawidłowym okrojeniu wypływki i utrzymaniu wymiarów w założonych tolerancjach wymiarowych. Dodatkowym problemem jest postępujące zużycie narzędzi okrojczych, co znacząco komplikuje uzyskanie poprawnej, mieszczącej się w zakładanej tolerancji wymiarowej odkuwki po okrawaniu (rys. 3). W przyjętym do analizy przypadku okrawania maksymalna odchyłka w kierunku poziomym od linii cięcia, patrząc na przykładową odkuwkę po okrawaniu z góry nie może przekroczyć +0,3 mm na zewnątrz. Jednocześnie nie dopuszcza się do sytuacji, kiedy w linii podziału odchyłka jest w ujemnej tolerancji wymiarowej (do wewnątrz) – tworząc miejscowy ubytek materiału w płaszczyźnie podziału matryc (rys. 3b). Natomiast szerokość linii cięcia wynika z wielkości promienia przejścia materiału do wypływki oraz jej grubości i nie powinna przekroczyć 4 mm na całym obwodzie cięcia.



Rys.3. Widok odkuwki: a) z wypływką przed okrawaniem, b) wypływki po okrojeniu, c) odkuwki po okrojeniu

W przykładowym (analizowanym) procesie produkcyjnym, przyjmując średnią trwałość wkładek 6000 sztuk oraz średnią trwałość narzędzi do okrawania 16000, istotne jest odpowiednie dobranie trwałości narzędzi kujących i okrojczych, tak, aby uzyskiwać poprawnie geometrycznie odkuwki bez wypływki (zgodne z tolerancją wymiarową). Jeżeli proces wytwarzania „startuje” od początku, to przyjmując powyższe wartości trwałości narzędzi, wydaje się, że niewralgicznym momentem będzie sytuacja (oznaczona jako numer IV na rys. 4) kiedy wyeksploatowane zostaną dwa komplety narzędzi do kucia, czyli po produkcji 12000 odkuwek i rozpocznie się proces kucia na 3 komplecie wkładek, a w procesie okrawania nadal będzie pracować zestaw narzędzi, który okroił już 12000 odkuwek (rys. 4).



Rys.4. Schemat procesu wytwarzania w aspekcie eksploatacji narzędzi kuźniczych i okrojczych

Można zatem przyjąć, że w tym szczególnym przypadku trwałość oznacza dopuszczalną zmianę geometrii dla obu rodzajów narzędzi, która podczas poszukiwania maksymalnej ich wydajności lub nieodpowiedniego doboru nowych, bądź częściowo wyeksploatowanych narzędzi do kucia i okrawania (jak ma to miejsce w procesie produkcyjnym) może być przyczyną powstawania braków produkcyjnych. Można zatem przyjąć, że przedstawiony na rys. 4 schemat procesu wytwarzania jest typowym, jak na warunki przemysłowe, zagadnieniem eksploatacyjnym, z którym muszą się zmierzyć technolodzy i inżynierowie, a które należy rozwiązać.

Dlatego kompleksowej analizie poddano 4 następujące (najczęściej występujące w procesie przemysłowym) przypadki (warianty):

- wariant I (rys. 4) - nieużyte narzędzia do okrawania oraz nieużyte - nowe wkładki matrycowe do kucia, widłak z wypływką o grubości do 2 mm (jako punkt odniesienia)
- wariant II (rys. 4) - nieużyte narzędzia do okrawania oraz wkładki matrycowe (około 5000 odkuwek) w końcowej fazie eksploatacji, powodujące na uzyskanie odkuwki z większą wypływką o grubości ponad 2,2 mm
- wariant III (rys. 4) - częściowo zużyte narzędzia do okrawania (około 11-12 tys. odkuwek) oraz wkładki matrycowe (około 5000 odkuwek) w końcowej fazie eksploatacji, pozwalające na uzyskanie odkuwki z większą wypływką o grubości ponad 2,2 mm.
- wariant IV (rys. 4) - zużyte narzędzia do okrawania (około 12-13 tys. odkuwek) oraz nieużyte - nowe wkładki matrycowe do kucia, widłak z wypływką o grubości do 2mm.

Uzyskane wyniki powinny pozwolić na pełniejszą analizę procesu okrawania dla różnych warunków eksploatacyjnych narzędzi do kucia i okrawania oraz wybór optymalnych warunków realizacji procesów kucia i okrawania, co powinno przyczynić się do zwiększenia trwałości narzędzi okrojczych oraz zapewnienia wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej odkuwek.

2.2. Modelowanie numeryczne procesu kucia i okrawania

Pierwszy etap został podzielony na dwa podetapy: modelowanie numeryczne procesu kucia oraz modelowanie procesu okrawania dla 4 różnych wariantów wraz z analizą uzyskanych wyników. Symulacje numeryczne dla kucia i okrawania przeprowadzono przy użyciu pakietu obliczeniowego Forge Nxt 2.0.

W przypadku procesu kucia zbudowano termomechaniczny model 3D ze sztywnymi narzędziami (wkładki matrycowe – elementy z wymianą ciepła). Geometria narzędzi, wstępniaków, a także pozostałe parametry technologiczne procesu zostały zaimplementowane do programu na podstawie oryginalnych modeli 3D i kart technologicznych. Prędkość przesuwu matryc górnych została przyjęta zgodnie z parametrami kinematycznymi zastosowanych pras korbowych (do kucia i okrawania) była zależna od położenia kąтового korby. Zastosowano bilinearny model tarcia uwzględniający zastosowany środek smarny w postaci wodnego roztworu grafitu. Temperatury narzędzi, które zostały zmierzone za pomocą pirometru oraz kamery termowizyjnej, wynosiły 250 °C, a materiału wsadowego 1150 °C. Czasy kolejnych operacji wyznaczono za pośrednictwem aparatu z możliwością nagrywania 300 klatek na sekundę. Zarejestrowany średni cykl kucia jednej odkuwki (3 operacje) wynosił 19 sekund. Przyjęto warunki trybologiczne określone przez model tarcia Treski z czynnikiem 0,35 dla wszystkich powierzchni roboczych narzędzi. Program Forge korzysta z następującego równania w przypadku rozbudowanego modelu tarcia wg Treski:

$$\vec{\tau} = \bar{m} \frac{\sigma_0 \Delta \vec{v}}{\sqrt{3} \|\Delta \vec{v}\|} \quad (2.1)$$

gdzie:

\bar{m} – jest czynnikiem tarcia w zakresie od 0 do 1;

σ_0 – naprężenie wg von Missesa;

$\Delta \vec{v}$ – relatywna prędkość w kontakcie.

Współczynniki wymiany ciepła w kontakcie pomiędzy materiałem wsadowym a narzędziowym oraz z otoczeniem przyjęto odpowiednio 25 i 0,35 kW/m²K.

Oprogramowanie Forge korzysta z lepkoplastycznego prawa plastycznego płynięcia Nortona-Hoffa, jako równania konstytutywnego. Ogólna postać tego prawa jest następująca:

$$\sigma = 2K(\sqrt{3}\dot{\epsilon}_1)^{m-1} \dot{\epsilon} \quad (2.2)$$

Współczynnik m może przyjmować następujące wartości:

- $m = 1$ odpowiada cieczy Newtonowskiej z lepkością $\eta = K$,
- $m = 0$ daje prawo plastycznego płynięcia dla materiału spełniającego kryterium plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego

- $0 < m < 1$ odpowiada warunkom odkształcania metali na gorąco.

Dla większości metali m jest w przedziale 0.1 - 0.2. Model materiału stali C45 został pobrany z bazy program Forge "FPD Base 1.3" jako równanie Spittel'a, w postaci (2.3):

$$\sigma_f = A e^{m_1 T} T^{m_9} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5} e^{m_7 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_3} \dot{\varepsilon}^{m_8 T} \quad (2.3)$$

Gdzie poszczególne współczynniki dla warunków na gorąco i zimno przedstawiono na rys. 5.

Rys. 5. Porównanie wartości parametrów równania Spittel'a: a) na gorąco (kucie), b) na zimno (okrawanie)

Modelowanie samego procesu kucia przeprowadzono dla nowych (nominalny model CAD narzędzi) i zużytych narzędzi kuźniczych (model CAD zużytych narzędzi uzyskany na podstawie ich skanowania 3D). W ten sposób uzyskano dwie odmienne wymiarowo i kształtowo geometrie odkuwek z wypływką, które zaimplementowano do procesu okrawania. Dodatkowo uzyskane geometrie „wirtualnych” odkuwek z wypływkami porównano ze skanami rzeczywistych odkuwek dla odpowiadających im warunków eksploatacyjnych narzędzi. Uzyskane wyniki porównania geometrii uzyskanej z MES zarówno dla nowych, jak i zużytych narzędzi z rzeczywistymi odkuwkami potwierdziły dużą zgodność dla wybranych cech geometrycznych (odchyłki w nieznacznie powyżej dokładności skanera, na poziomie ± 0.05 mm). Z wyników uzyskanych z modelowania procesu kucia do dalszych etapów związanych z okrawaniem wyeksportowano jedynie geometrie odkuwek (bez pozostałej historii odkształcania), ze względu na to, że w obecnej technologii proces okrawania jest realizowany na zimno. Natomiast obecnie prowadzone są już pierwsze prace na zrobotyzowanym stanowisku, na którym proces okrawania jest realizowany na gorąco. Warunki brzegowo-początkowe oraz pozostałe parametry procesu zostały określone na podstawie rzeczywistych warunków przemysłowych. Trójwymiarowy model geometryczny został utworzony w całości (odkuvka jest niesymetryczna). W symulacjach matryce utworzono jako ciała nieodkształcalne, w celu skrócenia czasu obliczeń. Odkuvka oraz narzędzia w operacji wykrawania miały temperaturę 20°C. Przyjęty model obliczeniowy uwzględniał grawitację. Współczynnik wymiany ciepła w kontakcie wynosił 10000 W/m²·K.

W symulacji okrawania przyjęto stałą prędkość prasy 220 mm/s (z powodu nieznanności dokładnej charakterystyki prasy). W celu dokładnej analizy procesu, w symulacjach MES każdy krok zapisywany był co 0.1 mm przesuwny stempla. Remeshing odbywał się co 20 kroków obliczeniowych, czyli co 2 mm.

W przypadku okrawania na zimno przyjęto model tarcia Coulomba o współczynniku równym 0,4 (zgodnie zaleceniami oprogramowania). Program Forge NxT umożliwia symulowanie procesu rozdzielania materiału wg dwóch kryteriów pęknięcia: Oyane oraz Cockrofta – Lathama. W symulacjach procesu okrawania wypływkę wykorzystano znormalizowane kryterium Cockrofta – Lathama, które wyraża się wzorem the following formula [8]:

$$C = C_o + \int_0^{\bar{\varepsilon}} \Sigma d\bar{\varepsilon} \quad (2.4)$$

oraz:

$$\Sigma = \frac{\sup(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)}{\sigma_i} \quad (2.5)$$

gdzie:

C_o - początkowa wartość kryterium Cockrofta – Lathama.

Wartość znormalizowanego kryterium Cockrofta – Lathama, decyduje o kształcie i profilu pęknięcia, maksymalnej sile oraz lokalnej deformacji może być ustawiona w granicach 0 – 1 (przy czym dla procesów cięcia na zimno rekomendowana przez program Forge jest wartość z zakresu 0,4 do 0,5). Na podstawie

przeprowadzonych wielu symulacji potwierdzonych obserwacjami w warunkach przemysłowych przyjęto, że dla analizowanego procesu okrawania najlepsze rezultaty uzyskano dla kryterium Cocrofta Lathama przyjętego dla wartości 0,5 wraz z dostosowaniem pozycji węzłów w pobliżu linii przycięcia i mapowania zmiennych stanu z oryginalnej siatki do nowej siatki. Ze względu na dokładność uzyskiwanych wyników w symulacjach procesów oddzielania materiału istotną kwestią jest, aby elementy na linii cięcia były jak najmniejsze, zapewnia to dobre odwzorowanie powierzchni cięcia, lecz diametralnie wydłuża czas obliczeń. W tym celu zwiększono zagęszczenie siatki elementów skończonych w kluczowych dla obliczanego procesu obszarach, wykorzystując tzw. „meshboxy”, które służą do lokalnego zagęszczenia siatki. Na rys.7c przedstawiono fragment zmeshowanego modelu odkuwki z siatką zagęszczoną na linii cięcia (wielkość elementów w zagęszczeniu – 0,1 mm, pozostałe elementy – 0,5 mm). W modelowaniu zastosowano elementy typu Tetra, których średnia liczba dla całej odkuwki (uwzględniając zwiększone lokalne zagęszczenie) wynosiła dla każdego z modelowanych wariantów około 627 000 elementów. Średni czas obliczeń na 4 procesorowej licencji na standardowej stacji roboczej PC wynosił około 160 h.

Symulacje komputerowe procesu okrawania przeprowadzono dla 4 różnych wariantów opisanych powyżej, tj.: zmienne wymiary wypływki odkuwki po procesie kucia wskutek zużywania się narzędzi kuźniczych oraz nowe i zużyte narzędzia do okrawania.

2.3. Pomiary geometrii odkuwek

Drugi etap badań obejmował pomiary odkuwek po okrawaniu. Do badań wykorzystano ramię pomiarowe ROMER Absolute ARM 7520si ze zintegrowanym skanerem RS3 wraz z oprogramowaniem Polyworks pozwalające na skanowanie w technologii Real Time Quality Meshing (rys. 6a). W celu dokonania pomiarów na potrzeby opracowanej technologii pomiaru zbudowano laboratoryjne stanowiska pomiarowe prezentowane na rys. 6.

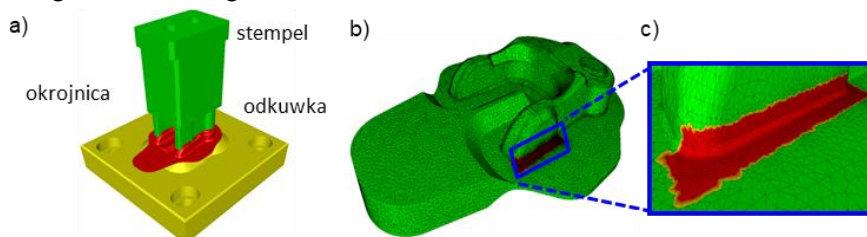


Rys. 6. Stanowisko do pomiarów z ramieniem pomiarowym ROMER Absolute Arm 7520si ze zintegrowanym skanerem laserowym RS3 do pomiarów: a) zdjęcie ramienia ze skanerem, b) skanowanie narzędzi do okrawania, c) skanowanie odkuwki

Zastosowane ramię umożliwia prowadzenie pomiarów kontaktowych z wykorzystaniem dotykowej sondy pomiarowej oraz bezkontaktowych z wykorzystaniem liniowego skanera laserowego RS3 zintegrowanego z ramieniem. 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 0.053 mm.

3. DYSKUSJA WYNIKÓW

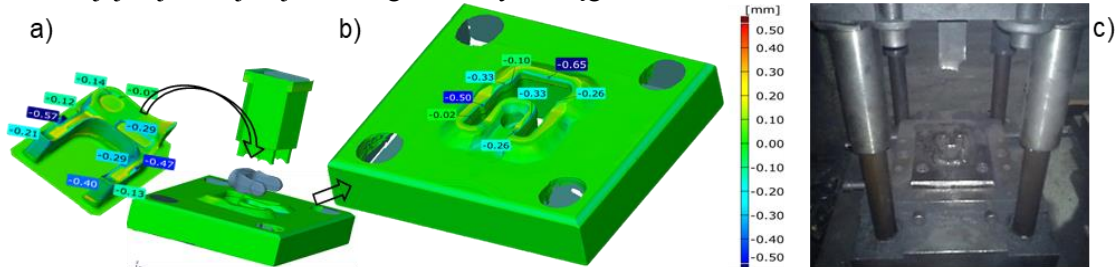
W pierwszym etapie zamodelowano proces kucia matrycowego na gorąco obejmujący 3 operacje kształtowania. Następnie uzyskane wyniki zaimplantowano do drugiego etapu modelowania, w którym zasymulowano proces okrawania na zimno wypływki przy zastosowaniu kryterium pęknięcia Corcrofta-Lathama (wartość 0,5) z uwzględnieniem eliminacji elementów (dla których została przekroczona wartość pęknięcia), dostosowanie pozycji węzłów w pobliżu linii cięcia i mapowania zmiennych stanu z oryginalnej siatki do nowej siatki. W pracy przedstawiono jedynie wyniki dotyczące modelowania numerycznego procesu okrawania. Na rys. 7a przedstawiono schemat procesu okrawania z odkuwką (zaznaczoną na czerwono) układem narzędzi górnego (ruchomego) oraz dolnego (nieruchomego).



Rys. 7. Widok: a) schemat procesu okrawania, b) „zdyskretyzowana” odkuwka przed procesem okrawania dla całej odkuwki, c) zagęszczenie siatki na linii okrawania z wykorzystaniem „meshboxów”

Na rys. 7b przedstawiono odkuwkę widłaka z naniesioną siatką elementów skończonych. W newralgicznych miejscach (ramiona odkuwki, rys. 7c) siatka elementów została dodatkowo zagęszczona, w celu uzyskania bardziej dokładnych, zbliżonych do rzeczywistości wyników.

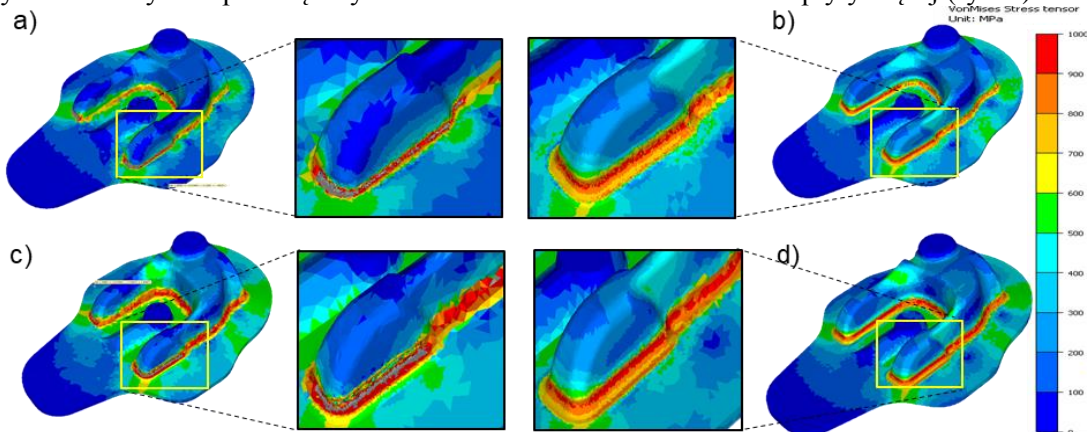
Na rys. 8 przedstawiono wyniki skanowania 3D dla wybranego zestawu zużytych narzędzi do okrawania pod koniec ich eksploatacji około 15000 odkuwek. Jak można zauważyć na rys. 8 najbardziej zużyte w przypadku stempla okrojczego są krawędzie obcinające (okrawające) ramiona-uszy odkuwki, zwłaszcza swojej najostrzejszej strefie, gdzie zużycie sięga nawet 0,57 mm.



Rys. 8. Wyniki pomiarów-skanowania narzędzi do okrawania: a) stempla, b) matrycy, c) widok narzędzi w przyrządzie - okrojniku

Natomiast w przypadku płyty okrojczej najbardziej zużytym obszarem jest krawędź od wewnętrznej strony ramion odkuwki, gdzie zużycie sięga także około 0,65 mm.

Następnie dla każdego z 4 wytypowanych w podrozdziale 2.1 wariantów prowadzono analizę numeryczną w celu wyznaczenia rozkładu odkształcenia oraz naprężeń zastępczych przy maksymalnej sile okrawania. W celu pełniejszej analizy rozkłady odkształceń i naprężeń wyznaczono dla obu stron widłaka, tzn od strony stempla i płyty okrojczej. Przeprowadzona analiza dla rozkładów odkształceń dla wszystkich wariantów miała podobny charakter, jak w przypadku rozkładów naprężeń, pod względem lokalizacji i zmienności występowania. Dlatego szczegółowe wyniki przedstawiono jedynie dla rozkładu naprężeń zastępczych od strony stempla-większych wartości nacisków w stosunku do płyty tnącej (rys. 9).

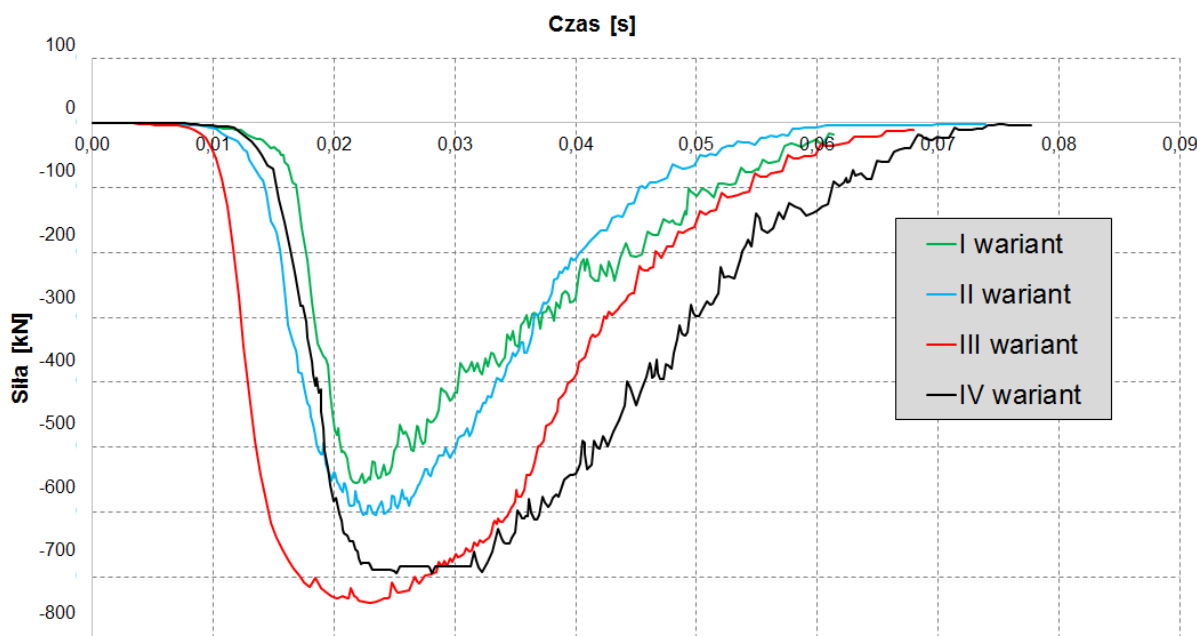


Rys. 9. Rozkłady naprężeń zastępczych dla 4 analizowanych wariantów eksploatacji narzędzi: a) wariant I - dla odkuwki odkutej w nowych narzędziach do kucia i okrawania, b) wariant II - odkuwka wykonana w zużytych narzędziach do kucia i na stosunkowo nowych narzędziach okrojczych, c) wariant III dla odkuwki odkutej w zużytych narzędziach do kucia z wypływką na poziomie powyżej 2,2 mm oraz wyeksploatowanych narzędziach okrojczych, d) wariant IV - dla odkuwki wykonanej w nowych narzędziach do kucia z wypływką 2 mm oraz wyeksploatowanych narzędziach okrojczych

W przypadku naprężeń zastępczych dla wariantu I (rys. 9a), lokalizują się wzdłuż linii okrawania. Maksymalne wartości są na poziomie powyżej 800 MPa, natomiast szerokość linii cięcia jest najmniejsza spośród poszczególnych wariantów. Dla wariantu II, czyli dla odkuwki, z większą grubością wypływki ($g=2,2\text{mm}$) wykutej w zużytych wkładkach matrycowych (około 5000 odkuwek), a następnie okrojonej w stosunkowo nowych narzędziach okrojczych (5000 odkuwek w porównaniu do ich maksymalnej średniej trwałości na poziomie 16000 odkuwek) naprężenia zastępcze rozkładają się bardzo podobnie, jak dla widłaka z cieńszą wypływką ($g=2\text{mm}$). Wartości naprężeń mają nieznacznie większe wartości, a maksymalne wartości występują od strony matrycy okrojczej i wynoszą około 850-900 MPa (rys. 9b). Z kolei rozkłady naprężeń zastępczych dla wariantu III (rys. 9c) są największe w stosunku do wszystkich przypadków i wynoszą ponad 1000 MPa. Dodatkowo można zaobserwować, że obejmują one znacznie większe obszary odkuwki na linii cięcia. Natomiast dla ostatniego, IV wariantu, dotyczącego nowych wkładek matrycujących oraz znacznie wyeksploatowanych narzędzi do okrawania (około 1500 odkuwek) maksymalne wartości naprężeń wynoszą około 900-950 MPa i są nieco niższe, w porównaniu do wariantu III, przy zachowaniu zbliżonej linii cięcia (rys. 9d). Zmiany wartości naprężeń są głównie wynikiem różnej geometrii odkuwki po kuciu oraz stanu narzędzi okrojczych (różnej geometrii narzędzi okrojczych). Warto by przeprowadzić dodatkową analizę uwzględniającą wpływ zmiany stanu narzędzi

kuźniczych w trakcie ich eksploatacji na wartości sił i rozkładu naprężeń podczas okrawania. Bowiem, odkuwka po procesie kucia w aspekcie eksploatacji narzędzi zmienia swoją geometrię, co w konsekwencji wpływa na zmiany pola rozkładu naprężeń podczas okrawania na zimno. Największe wartości naprężeń zaobserwować można dla wariantu III, czy przypadku, gdzie ma miejsce największa różnica wymiarów narzędzi do okrawania (tzw. luzu) a odkuwka posiada największe wymiary geometryczne wskutek eksploatacji wkładek do kucia.

Analizując wykres przebiegów sił okrawania dla poszczególnych wariantów (rys. 10) można zaobserwować, że wartość maksymalnej siły ma miejsce dla III wariantu i wynosi nieco ponad 720 kN. Także jej kształt jest odmienny w porównaniu do pozostałych wariantów, bowiem widać, że narasta najszybciej, co może być spowodowane znacznymi różnicami powiększonych wskutek eksploatacji wymiarów narzędzi do kucia i okrawania. Najkorzystniejszy przebieg sił okrawania uzyskano dla I wariantu, czyli nowych narzędzi do kucia oraz nowych narzędzi do okrawania, dla którego maksymalna siła wynosi około 550 kN, a początek narastania siły zaczyna się najpóźniej w stosunku do pozostałych wariantów. Ponadto na podstawie analizy przebiegów sił można stwierdzić, że największy wpływ na maksymalną wartość siły okrawania oraz całkowitego czasu tego procesu ma geometria / stan narzędzi okrojczych, mniejszy stan narzędzi kuźniczych. Bowiem dla stosunkowo nowych narzędzi do okrawania (około 5000 odkuwek) i odkuwki otrzymanej z częściowo wyeksploatowanych narzędzi kuźniczych maksymalna siła okrawania wynosi 650 kN. Bowiem, w przypadku zużytych narzędzi okrawających i odkuwki widłaka z początku procesu kucia siła okrawania wynosi 700 kN. Ponadto kształt (powolniejszy spadek) siły okrawania dla tego wariantu, w końcowym etapie jest nieznacznie inny, niż dla dotychczasowych przypadków, co może być przyczyną niekorzystnego wciągania materiału odkuwki pomiędzy narzędzia do okrawania. Takie sytuacje obserwowano niekiedy w procesie przemysłowym.

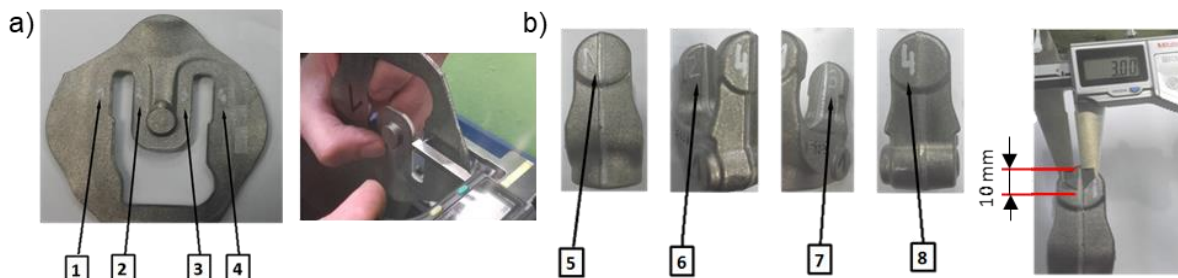


Rys. 10. Przebiegi sił okrawania dla analizowanych przypadków

Na podstawie przedstawionych wyników z rozkładami naprężeń zastępczych oraz przebiegów sił kucia dla analizowanej odkuwki typu rozwidłonego wydaje się, że kluczowe i najbardziej „niekorzystne” warunki w procesie produkcyjnym mają miejsce dla obu typów zużytych narzędzi (wariant III) oraz dla wariantu zużytych narzędzi okrojczych i nowych narzędzi kuźniczych (wariant IV). Dlatego weryfikację wyników modelowania numerycznego przeprowadzono dla obu tych wariantów.

Weryfikacja wyników modelowania numerycznego

Na rys. 11a przedstawiono przykładowe zdjęcia pomiaru grubości wypłytki ze wskazanymi orientacyjnymi obszarami pomiaru z przemysłowego procesu okrawania dla przypadku znacznego wyeksploatowaniu obu rodzajów narzędzi (wariant III). Z kolei na rys. 11b przedstawiono wyniki pomiarów szerokości linii cięcia dla odkuwki po okrawaniu. Natomiast uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.



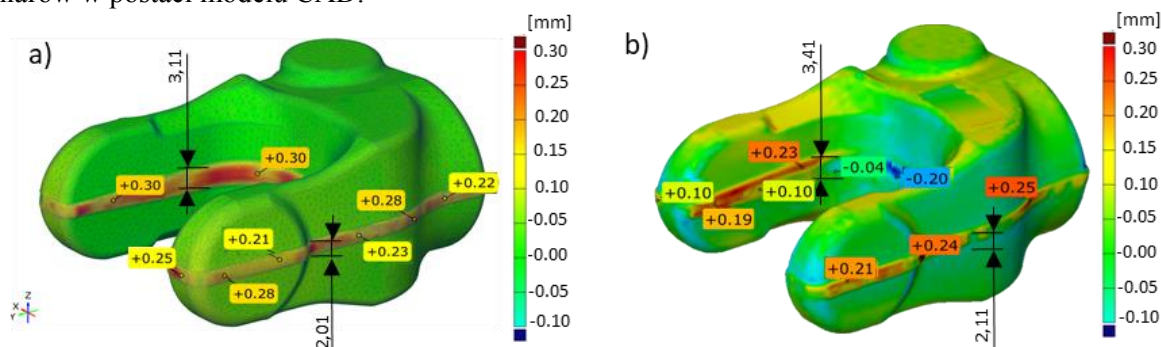
Rys. 11. Przykładowe zdjęcia z dokonywanych pomiarów: a) grubości wyływki, b) szerokości linii cięcia

Tabela. 1. Wyniki pomiarów grubości wyływki oraz szerokości linii cięcia w wybranych obszarach dla odkuwki z wyeksploatowanych narzędzi kuzniczych (5000 odkuwek) i narzędzi do okrawania po 15000 sztuk odkuwek

Numer przykładowej odkuwki	Miejsca przeprowadzonych pomiarów							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	2,17	2,12	2,24	2,04	3,94	3,97	3,89	3,84
B	2,11	2,20	2,23	2,17	3,95	3,96	3,87	3,89
C	2,18	2,23	2,26	2,17	3,98	3,98	3,75	3,88

Uzyskane rezultaty pomiarów wskazują, że dla pobranych z procesu 3 odkuwek wymiary grubości wyływki w wybranych obszarach mieszczą się w przedziale 2,11 do 2,26 mm. Natomiast wymiary szerokości linii cięcia w zakresie 3,75 do 3,98 mm.

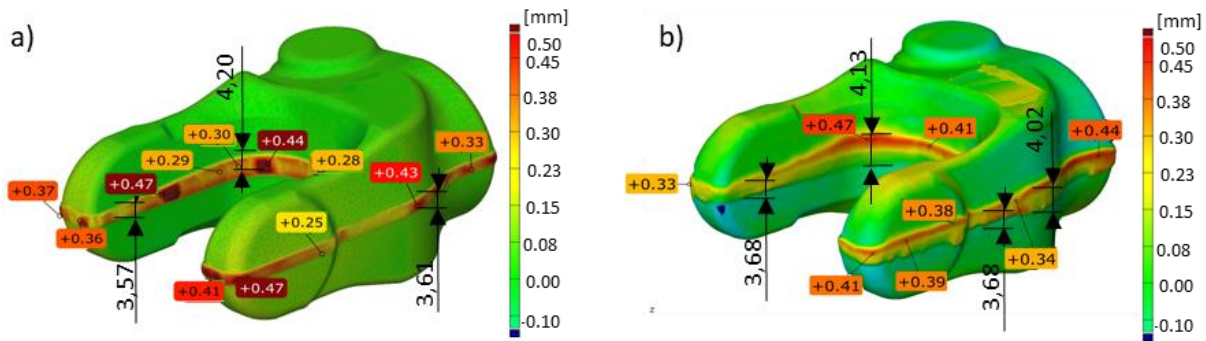
Na rys. 12a przedstawiono wyniki dla przypadku kiedy to w procesie produkcyjnym jest zużycie obu typów narzędzi (wariant III) w postaci porównania wyników uzyskanych z modelu MES po okrawaniu, a na rys. 12b wyniki skanowania 3D odkuwki z procesu przemysłowego w odniesieniu do nominalnych wymiarów w postaci modelu CAD.



Rys. 12. Porównanie modelu odkuwki po okrawaniu wyływki dla wariantu III: a) uzyskanej z MES z nominalnym modelem CAD, b) uzyskanej z procesu przemysłowego dla zbliżonych warunków (skan odkuwki z nominalnym modelem CAD)

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że kształt wraz z odchyłkami w strefie okrawania (linia cięcia) dla odkuwki uzyskanej z MES oraz dla odkuwki otrzymanej w procesie przemysłowym dla zbliżonych warunków są zbieżne. Ponadto dla modelu MES odkuwki szerokość linii cięcia mieści się w przedziale 2-3,11 mm, a odchyłki w kierunku normalnym wynoszą 0,11 do 0,3 mm. Podobnie jest w przypadku odkuwki z przemysłowego procesu, przy czym zarówno szerokość (2,1 do 3,41 mm), jak i odchyłki w kierunku normalnym są nieco większe i bardziej zróżnicowane na całej linii cięcia (0,10 do 0,25 mm). W przypadku modelu numerycznego należy podkreślić, że taki proces jest realizowany w „wirtualnych” idealnych warunkach. Natomiast w procesie przemysłowym mogą pojawić się inne, dodatkowe, nieprzewidziane czynniki, które mogą wpłynąć na końcową geometrię odkuwki. Przedstawione wyniki, zwłaszcza w przypadku procesu przemysłowego, gdzie uzyskane odchyłki sięgają nieznacznie poniżej dopuszczalnej odchyłki 0,3 mm wskazują, że zużycie narzędzi okrojczych (być może również kuzniczych) mieści się w górnym zakresie tolerancji wymiarowej (patrz rys. 3).

Ostatnim etapem analizy był przypadek (wariant IV) dla zużytych narzędzi do okrawania (ok. 15000 sztuk) i nowych narzędzi do kucia (ok. 1000 sztuk). Przeprowadzono podobne analizy, jak dla przypadku powyżej a wyniki przedstawiono na rys.13.



Rys. 13. Porównanie modelu odkuwki po okrawaniu wypłytki dla wariantu IV: a) uzyskanej z MES z nominalnym modelem CAD, b) uzyskanej z procesu przemysłowego dla zbliżonych warunków (skan odkuwki po okrawaniu porównany z modelem CAD)

W przypadku zużytych narzędzi do okrawania i nowego zestawu do kucia uzyskane wyniki z MES, potwierdzone są wynikami skanowania 3D odkuwki po okrawaniu dla zbliżonych warunków eksploatacji. Wartość szerokości linii cięcia mieści się w zakresie od 3,68 mm do 4,13 mm dla pomiarów pobranej z procesu odkuwki i od 3,57 mm do 4,20 mm dla numerycznej symulacji procesu okrawania. Podobnie obwód linii cięcia mieści się w zakresie od 0,34 mm do 0,47 mm dla pomiarów pobranej procesu odkuwki i od 0,29 mm do 0,47 mm dla numerycznej symulacji procesu okrawania. Widać, że zarówno linia ciecia jest szersza i nie mieści się w tolerancji, jak również obwód linii cięcia jest większy od dopuszczalnej wartości +0,3 mm. Spowodowało to przekroczenie dopuszczalnej tolerancji błędu kształtu wyznaczonej powierzchni w obwodzie linii cięcia odkuwki (patrz rys. 3). Odkuwka taka może zostać poddana dodatkowemu zabiegowi usunięcia nadmiaru materiału, który pozwoli jej spełnić postawione kryteria jakościowe. Uzyskanie z procesu kucia matrycowego odkuwki o takich wymiarach wskazuje na konieczność analiza wymiarowo geometrycznej stanu narzędzi i ich ewentualną wymianę na inny nieużyty komplet do okrawania. W analizowanym przypadku, mimo, że uzyskana wartość maksymalnej siły z modelowania numerycznego była wyższa dla stanu wyeksploatowanych obu rodzajów narzędzi w porównaniu do nowych narzędzi kuźniczych i wyeksploatowanych narzędzi okrojczych, to taki stan rzeczy powoduje, że jest on bardziej niekorzystny w aspekcie dokładności wymiarowo-kształtowej odkuwek. Początkowe przypuszczenia wskazywały, że zużyte narzędzia do kucia, jak i zużyte narzędzia do okrawania będzie „najgorszym” stanem eksploatacji (wariant III) obu rodzajów narzędzi. Jednak na podstawie szczegółowej analizy (na podstawie modelowania MES i porównaniu ze skanami) okazuje się, że to IV przypadek, czyli nowe do kucia i zużyte okrojnice, jest „najgorszym”, bo odkuwka nie mieści się w zakresie tolerancji. Wobec powyższego, w typowym procesie produkcyjnym należy zwracać uwagę i podchodzić z dużą ostrożnością do sytuacji dla wariantu III, ale należy zdecydowanie unikać i nie dopuszczać do sytuacji z wariantem IV.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza porównawcza, z wykorzystaniem modelowania numerycznego dostarczyła wielu informacji dotyczących wpływu różnej geometrii odkuwki oraz narzędzi okrojczych na rozkłady naprężeń zastępczych oraz przebiegów sił. Dodatkowo dokonana weryfikacja wyników modelowania numerycznego dla wybranych dwóch najbardziej niekorzystnych wariantów w oparciu o porównanie geometrii uzyskanej z MES oraz skanu odkuwki uzyskanej z przemysłowego procesu potwierdza słuszność przyjętych założeń modelowania numerycznego. W przypadku najbardziej niekorzystnych warunków eksploatacyjnych, tj. zużyte narzędzia kuźnicze i okrojczy oraz nowych narzędzi kuźniczych i wyeksploatowanych narzędzi okrojczych, różnice w wybranych kluczowych wymiarach są niewielkie (kilkuprocentowe), co pozwala na stwierdzenie, że poprzez odpowiedni i przemyślany wybór narzędzi do kucia i okrawania można omijać najbardziej niepożądane warianty, a tym samym zwiększyć wydajność procesu. Dlatego uzyskane wyniki mogą być przydatne do oceny zjawisk i mechanizmów pojawiających się podczas procesu okrawania, w różnych sytuacjach, związanych z warunkami produkcyjnymi i uzależnionych od aktualnego stanu narzędzi do kucia oraz narzędzi do okrawania. Mimo, że metody elementów skończonych są metodami przybliżonymi, to jak wykazały przedstawione w pracy badania, przy dużym doświadczeniu w modelowaniu tego typu zjawisk, popartym, wiedzą praktyczną i inżynierskim podejściem uzyskane wyniki są zbieżne i niewiele odbiegają od warunków rzeczywistych.

Mimo wszystko wydaje się, że konieczne są w tym obszarze dalsze prace w celu jeszcze lepszego odwzorowania warunków przemysłowych poprzez model wirtualny procesu. Niemniej jednak uzyskana zbieżność wyników pozwala z dużym optymizmem spojrzeć na wykorzystanie modelowania numerycznego do nadal trudnych i złożonych geometrycznie i fizycznie procesów okrawania. W analizowanym studium przypadku w warunkach przemysłowych uzyskane wyniki są bardzo cenne, ponieważ pozwalają na

kompleksową analizę procesu okrawania, co w konsekwencji powinno spowodować podjęcie stosowanych działań w celu lepszej kontroli oraz dopracowania pod względem technicznym i technologicznym tych procesów. A także podjęcie próby przejścia z technologii okrawania na zimno, na technologię okrawania na gorąco (bezpośrednio po procesie kucia), co znacząco wpłynęłoby na zwiększenie wydajności całego procesu.

Źródło finansowania:

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR); projekt POIR.01.01.02-00-0064/15.

5. LITERATURA

1. Alimi A, Fajoui J, Kchaou M, Branchu S, Elleuch R, Jacquemin F. Multi-scale hot working tools damage (X40CrMoV5-1) analysis on relation to the forging process. *Engineering Failure Analysis* 2015; 62:142 -155.
2. ASM Metals Handbook, Vol. 14: Forming and Forging, Asm Intl, 1989.
3. Avetisyan M, Meinders T, Huetink J. Improvement of springback predictability after forming and trimming operations. In: Proceedings of the seventh Esaform conference on material forming, Trondheim, Norway 2004.
4. Baptista A.J, Alves J.L, Rodrigues D.M, Menezes L.F. Trimming of 3D solid finite element meshes using parametric surfaces: application to sheet metal forming. *Finite Elements in Analysis and Design* 2006; 42: 1053–60.
5. Bendjoudi Y, Becker E, Bigot R, Amirat A. Contribution in the evaluation of a performance index of hot forging dies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 5-8: 1187-1201.
6. Chen Z.H, Tang C.Y, Lee T.C. An investigation of tearing failure in fine-blanking process using coupled thermo-mechanical method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2004; 44: 155–65.
7. Choi W-Y, Kwak D-Y, Son I-H, Im Y-T. Tetrahedral mesh generation based on advancing front technique and optimization scheme. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2003; 58: 1857–72.
8. Cockcroft M.G, Latham D.J. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals* 1968; 96: 33–9.
9. Coupez T, Digonnet H, Ducloux R. Parallel meshing and remeshing. *Applied Mathematical Modelling* 2000; 25: 153–75
10. Dhondt G. A new automatic hexahedral mesher based on cutting. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2001; 50: 2109–26.
11. Goijaerts A.M, Givaert L.E, Baaijens F.P.T. Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking. *Materials Processing Technology* 2001; 110: 312–23.
12. Gronostajski Z, Hawryluk M, Jakubik J, Kaszuba M, Misun G, Sadowski P. Solution examples of selected issues related to die forging. *Archives of Metallurgy and Materials* 2015; 60(4): 2767-2775.
13. Gronostajski Z, Hawryluk M. The main aspects of precision forging. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 8(2): 39-57.
14. Hambli R, Reszka M. Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment. *International Journal of Mechanical Sciences* 2002; 44: 1349–61
15. Hattangady N.V. Automatic remshing in 3D analysis of forming process. . *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1999; 45
16. Hilditch T.B, Hodgson P.D. Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet. Part 1—experimental observations. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 169: 184–91.
17. Hilditch T.B, Hodgson P.D. Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet, part 2—Mechanisms and modelling. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 169: 192–998.
18. <http://www.transvalor.com/en/cmspages/forge-nxt.32.html>
19. Kawka M, Kakita T, Makinouchi A. Simulation of multi-step sheet metal forming processes by a static explicit FEM code. *Journal of Materials Processing Technology* 1998; 80–81: 54–9.
20. Kiener C, Neher R, Merklein M. Influence of tribological conditions on cold forging of gears. *Production Engineering*. 2018;12-3: 367-375, <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0785-9>
21. Klingenberg W, Singh U.P. Comparison of two analytical models of blanking and proposal of a new model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005; 45: 519–27
22. Kobayashi S, Oh SI, Altan T. Metal forming and the finite-element method. Oxford University Press, New York 1989.
23. Lemiale V, Chambert J, Picart P. Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by FEM simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 2009; 209: 2723–34.
24. Li M. An experimental investigation on cut surface and burr in trimming aluminium autobody sheet. *International Journal of Mechanical Sciences* 2000; 42: 889–906.
25. Lin Y.C, Chen D.D, Chen M.S, Chen X.M, Li J. A precise BP neural network-based online model predictive control strategy for die forging hydraulic press machine. *Neural Computing and Application* 2018; 29: 585. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2556-5>
26. Lu B, Ou H, Armstrong C.G. A simple method to evaluate trimming operation on hot forged blade components. In: Proceedings of the 15th UK conference of the ACME, Glasgow, UK 2006.
27. Lu B. 3D die shape optimisation for net shape forging of aerofoil blades. PhD thesis. Queen’s University Belfast, UK 2008.
28. Lu. B, Ou H. An efficient approach for trimming simulation of 3D forged components. *International Journal of Mechanical Sciences* 2012; 55(1): 30-41.
29. Michalski J, Pawlus P, Żelasko W. Surface topography of cylindrical gear wheels after smoothing in abrasive mass, honing and shot peening. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011; 311-1 DOI: 10.1088/1742-6596/311/1/012022
30. Oyane M, Sato T, Okimoto K, Shima S. Criteria for ductile fracture and their applications. *Journal of Mechanical Working Technology* 1980; 4: 65–81.
31. Rowe G.W, Struggess C, Hartley P, Pillinger I. Finite element plasticity and metal forming analysis. Cambridge University Press, New York 1991.
32. SFTC. DEFORM-3D user manual. Scientific Forming Technologies Corporation, Ohio 2007.
33. Son I-H, Im Y-T. Localized remesh techniques for three-dimensional metal forming simulation with linear tetrahedral elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2006; 67: 672–96.

34. Šraml M, Stupan J, Potr C.I, Kramberger J. Computer-aided analysis of the forging process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2004; 23:161-168.
35. Steffens K, Wilhelm H. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing process. *MTU Aero Engines Report* 2003:1–17.
36. Taylan A, Gracious N, Gangshu S. Cold and hot forging fundamentals and application, *ASM International, Asm Metals Handbook* 2005; 14: 337-338.
37. Yu S, Xie X, Zhang J, Zhao Z. Ductile fracture modelling of initiation and propagation in sheet-metal blanking processes. *Journal of Materials Processing Technology* 2007; 187–188:167–72.