

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

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Gronostajski
Department of Mechanical Engineering
Wroclaw University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: zbigniew.gronostajski@pwr.edu.pl

Dr inż. Jacek Ziemba
Department of Mechanical Engineering
Wroclaw University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: jacek.ziemba@pwr.edu.pl

Dr inż. Łukasz Dworzak
Department of Mechanical Engineering
Wroclaw University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: lukasz.dworzak@pwr.edu.pl

Mgr inż. Paweł Jabłoński
Department of Mechanical Engineering
Wroclaw University of Technology
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland
E-mail: pawel.jablonski@pwr.edu.pl

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

ANALIZA WPLYWU WARUNKÓW SMAROWANIA NA ZUŻYCIE NARZĘDZI W PROCESACH KUCIA MATRYCOWEGO NA GORĄCO

Streszczenie:

Praca dotyczy problematyki smarowania w procesach kucia matrycowego na gorąco z uwzględnieniem trwałości narzędzi i oprzyrządowania kuźniczego. Przedstawiono badania literaturowe oraz własne autorów dotyczące wpływu zastosowania środków smarno-chłodzących, ilości dawki i kierunku jej podawania oraz innych czynników wpływających na warunki tribologiczne. Przeanalizowano także obecnie stosowane w przemyśle urządzenia i systemy smarowania. Na tej podstawie autorzy w oparciu o wiedzę i doświadczenie opracowali i zbudowali urządzenie smarujące. Opracowany system, zaimplementowany do przemysłowego procesu pozwala na dobór i zapewnienie optymalnych warunków tribologicznych w procesie poprzez sterowanie ilością i częstotliwością podawanej dawki środka smarnego. Może być ono alternatywą dla manualnej metody nanoszenia środka smarnego, zależnej od czynnika ludzkiego lub w pełni zautomatyzowanych, lecz droższych systemów smarowania. Uzyskane wyniki badań wskazują na potencjalne możliwości wprowadzenia na stałe do pracy zbudowanego urządzenia także do innych procesów kucia poprzez integrację z manipulatorem. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia większą stabilność i powtarzalność warunków smarowania oraz pozytywnie wpływa na zwiększenie wydajności procesu wytwarzania, a tym samym znacząco obniża jednostkowe koszty produkcji odkuwek.

Słowa kluczowe: kucie matrycowe na gorąco, system smarujący, zużycie, warunki tribologiczne

1. Wstęp

Podczas kucia matrycowego na ciepło i gorąco narzędzia poddawane są bardzo dużym, cyklicznym obciążeniom cieplnym od 80 °C do 600 °C oraz mechanicznym, sięgającym nawet powyżej 1200 MPa [37]. Do głównych i najczęstszych mechanizmów niszczących zaliczyć można [13,26]: zużycie ściernie [4], pęknięcie mechaniczne, odkształcenie plastyczne [23] oraz zmęczenie cieplne [9,36] i cieplno-mechaniczne [7]. Przebieg obciążenia matryc oraz stempli ma cykliczny charakter. Stanowi ono połączenie obciążenia cieplnego i mechanicznego, które wynika z kontaktu i odkształcania gorącego materiału przedkuwki poprzez zimne narzędzie. Szczególny wpływ na trwałość matryc ma zmienne obciążenie cieplne. Jest ono główną przyczyną powstawania pęknięć zmęczeniowych oraz zmian własności fizyczno-mechanicznych wierzchniej warstwy narzędzi [3,30]. Jednocześnie obciążenie cieplne wpływa na zintensyfikowanie zużycia ściernego wywołanego wysokimi naciskami mechanicznymi, a to przekłada się na obniżenie czasu eksploatacji narzędzi i oprzyrządowania kuźniczego [25, 26].

W przypadku trwałości narzędzi kuźniczych kluczowe jest smarowanie. Standardowo podczas kucia matrycowego półswobodnego (spęczanie, spłaszczanie, itp.) nie stosuje się smarowania narzędzi ze względu na nieskomplikowane płynięcie odkształcanego materiału. Inaczej niż ma to miejsce w typowym kuciu matrycowym, w trakcie którego użycie środka smarno-chłodzącego jest wymagane ze względu na konieczność minimalizowania tarcia w celu dokładnego wypełnienia przez odkształcany materiał wykroju roboczego narzędzia. Zastosowanie środków smarno-chłodzących powoduje przede wszystkim zmniejszenie tarcia między materiałem kutym, a materiałem narzędzi, jak również izoluje materiał narzędzia (wykroj roboczy) od bezpośredniego kontaktu z gorącym materiałem kutym. W efekcie skutecznie obniża to temperaturę powierzchni matrycy i tym samym zmniejsza intensywność procesów odpuszczania, utleniania i erozji [13]. Wadą wynikającą ze stosowania środków smarno-chłodzących jest gwałtowne schłodzenie warstwy wierzchniej, co może przyspieszać proces zmęczenia cieplnego. Dodatkową funkcją środka smarnego jest zmniejszenie współczynnika tarcia po uwolnieniu kutego metalu z matrycy [1,2,4]. Na odpowiedni sposób smarowania i chłodzenia narzędzi kuźniczych wpływają nie tylko właściwości środka smarnego, lecz także sposób i kierunek jego podawania, ilość i częstotliwość ekspozycji dawki smarnej. Istotne jest także zapewnienie powtarzalnego i równomiernego rozprowadzania środka smarnego. Obecnie wciąż, w dużej liczbie kuźni matrycowych stosowane są często nieautomatyzowane, mało powtarzalne urządzenia smarujące, które obsługiwane są przez operatorów w sposób manualny. Z tego też powodu coraz powszechniejsze staje się zastosowanie mniej lub bardziej zautomatyzowanych urządzeń oraz systemów smarno-chłodzących, pozwalających na precyzyjne podawanie środka smarnego [12,18,22]. Odpowiednie smarowanie decyduje nie tylko o powstawaniu odkuwki bez wad, takich jak niewypełnienia, ale także korzystnie wpływa na zmniejszenie zużycia narzędzi [20]. Wraz z rozwojem automatyzacji, zaczęły powstawać zautomatyzowane urządzenia oraz systemy smarujące [5,11,17]. Rozwiązania takie są proste w użyciu i zostały z powodzeniem zaimplementowane w przodujących w automatyzacji produkcji kuźniach niemieckich. Dodatkowo dzięki wykorzystaniu manipulatorów, możliwe jest zbudowanie w pełni elastycznego systemu pozwalającego na kontrolowanie wszystkich istotnych parametrów smarowania, jak pozycja dyszy, czas nakładania, proporcje substancji, itd. [10,18]. Dodatkowo systemy są zsynchronizowane z pracą agregatu kuźniczego, co przy sposobie podawania smaru, eliminuje subiektywny czynnik ludzki doświadczonego operatora [19]. Wiąże się to jednak z dosyć wysokimi kosztami inwestycji, które mogą się nie zbilansować w przypadku rozpatrywania jedynie zysku wynikającego z podniesienia jakości produktu oraz trwałości narzędzi.

Dlatego obecnie prowadzone są intensywne poszukiwania nowych rozwiązań dotyczących zarówno środków smarnych, dedykowanych do konkretnych aplikacji kuźniczych, jak i nowoczesnych zautomatyzowanych urządzeń smarujących zapewniających optymalne warunki tribologiczne, które w podwyższonych temperaturach są jeszcze bardziej krytyczne dla przemysłowych procesów kucia matrycowego na półgorąco i gorąco. Prowadzenie dalszych prac badawczo-rozwojowych w tym obszarze jest w pełni uzasadnione zarówno od strony naukowej, jak i finansowej, bowiem zagadnienie skutecznego smarowania stanowi nadal nierozwiązany problem i jest sporym wyzwaniem dla wielu ośrodków naukowych oraz firm przemysłowych.

Celem pracy jest analiza wyników badań dotyczących wpływu ilości, częstotliwości oraz sposobów podawania środka smarnego, a także zastosowania autorskiego systemu smarująco-chłodzącego na trwałość oprzyrządowania kuźniczego w procesach kucia matrycowego na gorąco.

2. Analiza stanu zagadnienia oraz badania dotyczące czynników wpływających na eksploatację narzędzi w procesach kucia matrycowego

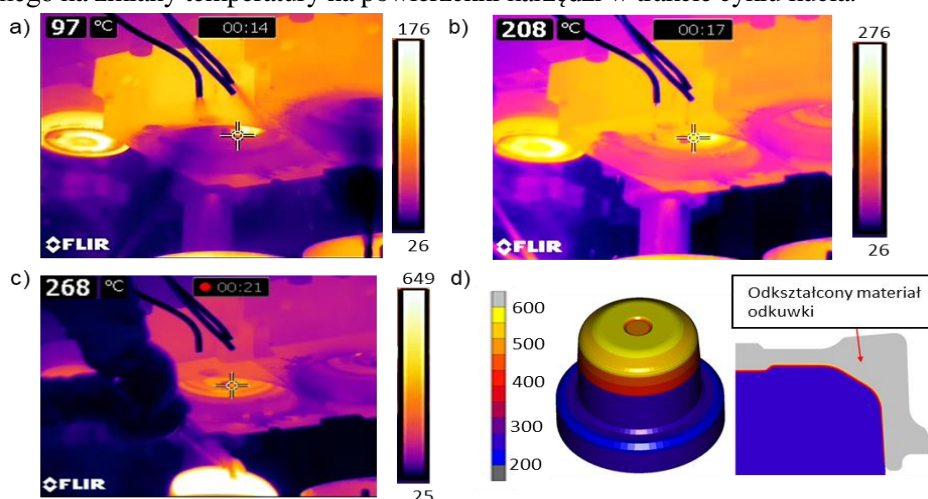
Należy podkreślić, że badaniom i analizie właściwości środków smarnych stosowanych w procesach kucia na gorąco, w dostępnej literaturze poświęcono wiele miejsca [1,11,12,21,24,33]. Ponadto nieustanny rozwój technologiczny sprawia, że poza ośrodkami naukowymi, coraz więcej badań oraz aplikacji przemysłowych, związanych ze środkami smarnymi, dedykowanych dla konkretnych procesów można znaleźć na bardzo konkurencyjnym rynku środków smarnych. Do wiodących producentów środków smarnych na świecie zaliczyć można takie firmy jak: Acheson, Fuchs, Henkel/Bechem, Houghton, Oelheld, itp. a także z Polski firma Naftochem.

Obok niepodważalnej roli środków smarnych, istotnymi czynnikami wpływającymi na smarowanie są odpowiedni sposób nanoszenia środka smarnego oraz technologia jego dozowania. Obecnie nadal najpopularniejszą metodą smarowania jest bezpośredni, ręczny natrysk środka smarnego

wykonywany przez kowala podczas procesu. Główną wadą tego typu smarowania jest nierównomierne rozprowadzanie środka smarnego, co powoduje zmienny rozkład temperatury matrycy i w efekcie szybsze jej miejscowe zużycie. Jedynie w przypadku pras transferowych stosowane są obecnie w przemyśle w pełni zautomatyzowane systemy i urządzenia smarujące, zsynchronizowane z pracą całego agregatu.

W zdecydowanej większości prac w literaturze przedmiotu najwięcej miejsca poświęca się systemom smarowania w procesach kucia na zimno [29], głównie do aluminium [31], bądź na zimno i ciepło [5, 6, 28]. A zdecydowanie mniej, jeżeli chodzi o systemy i urządzenia przeznaczone do procesów kucia na ciepło i gorąco [27,32,37]. Nawet, w obszernej, przeglądowej pracy Altana [1], znaleźć można jedynie skrótowe informacje na temat systemów smarowania, które sprowadzają się bardziej do doboru smarów, aniżeli urządzeń smarujących. Z kolei w pracy [28] znaleźć można informacje na temat urządzeń oraz systemów w jakie wyposażone są agregaty kuźnicze stosowane w japońskim przemyśle kuźniczym, lecz także w cytowanej pracy brak jest danych o systemach smarowania. Interesujące są także wyniki Europejskiego Projektu Badawczego „Brite-Euram” [30] dotyczące opracowania przyjaznych dla środowiska systemów do smarowania narzędzi w procesach kucia stali na ciepło. Przykładowo w pracy [2] w badaniach przeprowadzonych przez zespół niemiecko-japoński na podstawie eksperymentów w trakcie produkcji, opracowano wytyczne, m.in.: schemat doboru optymalnych systemów smarowania w celu zwiększenia trwałości matrycy. Z kolei w pozycji [20] przedstawiono wybrane czynniki wpływające na jakość smarowania oraz zużycie narzędzi. Na uwagę zasługuje praca [35], w której autorzy zaprezentowali możliwości modelowania kierunku i ilości dawki środka smarnego.

Jak wykazano we wstępie, w procesach kucia na gorąco panują ekstremalne warunki pracy, co powoduje, że są one jednymi z najtrudniejszych do realizacji procesów wytwarzania. Autorzy artykułu od wielu lat prowadzą liczne badania dotyczące wpływu warunków tribologicznych na eksploatację narzędzi kuźniczych [15,16]. Przykładowo na rys. 1 przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu podawania środka smarnego na zmiany temperatury na powierzchni narzędzi w trakcie cyklu kucia.



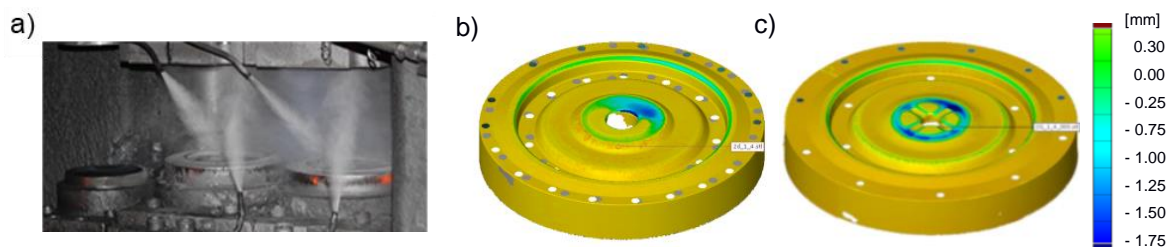
Rys. 1. Termogramy z rozkładami temperatur na górnych stemplach stosowanych w procesie kucia odkuwki typu tarcza: a) cykl smarowania narzędzi – temperatura w zaznaczonym punkcie wynosi 97 °C, b) 3 sekundy po zakończeniu smarowania – wzrost temperatury o ponad 100 °C, c) tuż po procesie kucia – około 1 sekundy po odkształceniu, d) pole temperatury na analizowanym stemplu w momencie kucia (kontaktu) wyznaczone z modelowania numerycznego

Jak można zaobserwować, na podstawie termogramów z kamery termowizyjnej (rys. 1a do rys. 1c), w ciągu zaledwie około 7 sekund procesu kucia, w momencie końcowej fazy smarowania trwającej około 2-3s (rys. 1a) temperatura na powierzchni narzędzia w wybranym punkcie wynosi około 100 °C (rys. 1a). Po kolejnych 3 sekundach temperatura wzrasta gwałtownie do średniej „roboczej” temperatury pracy narzędzi w procesie kucia (rys. 1b). Tuż po kuciu – procesie odkształcenia – kolejne 4 sekundy – wskutek zamiany pracy odkształcenia na ciepło temperatura powierzchni narzędzi wzrosła o 60 °C (rys. 1c).

Prowadzone ponadto badania z wykorzystaniem modelowania numerycznego wykazały, że w momencie kontaktu kształtowanego materiału ze stemplem temperatura wzrasta do ponad 500 °C (rys. 1d). Obserwowane tak dynamiczne zmiany temperatury na powierzchniach roboczych narzędzi, przy nieodpowiednio dobranych parametrach smarowania mogą znacząco skrócić ich czas eksploatacji poprzez nadmierne cykliczne przechłodzenie, bądź nieukierunkowane i niesynchronizowane z pracą agregatu

kuźniczego podawanie dawki środka smarnego. Wydaje się, że nawet najlepiej dobrany środek smarny nie wpłynie znacząco na istotne zmiany w rozkładach temperatur.

Na rys. 2a przedstawiono standardowy sposób smarowania stosowany w prasach korbowych, poprzez ręczne ustawienie dysz smarujących, zgodnie z uznaniem i doświadczeniem operatora.



Rys. 2a) Ręczny sposób dostarczania środka smarnego, b) zużycie narzędzia w przypadku nierównomiernego smarowania oraz c) zużycie narzędzia w przypadku równomiernego smarowania

Brak dostatecznej kontroli nad procesem smarowania oraz złe ustawienie dysz na początku procesu jest przyczyną nierównomiernego zużycia (rys. 2b i rys. 2c), przez co uszkodzenia następują intensywniej i znacząco skracają czas eksploatacji narzędzi oraz negatywnie wpływają na kształt i jakość odkuwki. Niezsynchronizowanie ekspozycji środka smarnego z pracą agregatu kuźniczego oraz przekładaniem odkuwki do kolejnych wykrojów (rys. 3a), a także nadmierne smarowanie może spowodować wady odkuwki oraz być przyczyną przedwczesnego zużywania narzędzi (rys. 3b).



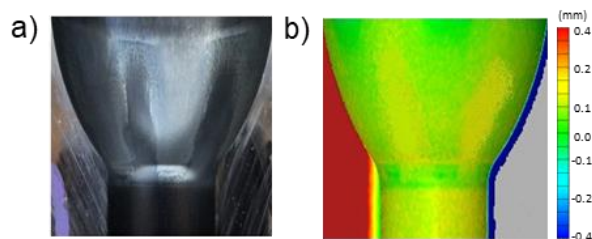
Rys. 3. Nieodpowiedni sposób smarowania: a) zła synchronizacja układu smarującego, b) zbyt intensywne smarowanie – brak odparowania cieczy z mieszaniny środka smarnego, c) pęknięcie w narożu wkładek matrycujących – efekt Rebintera

Niewłaściwie dobrana dawka środka chłodziwo-smarującego może być przyczyną przedwczesnego pęknięcia narzędzi oraz powstawania niewypełnień wykroju. Jest powodem zwiększenia wartości ciśnienia spowodowanego występowaniem kieszeni powietrznej w tym miejscu, przyspiesza powstawanie mikropęknięć oraz tzw. efektu Rebintera (rys. 3c). Rozwiązaniem przedstawionego problemu może być wyeliminowanie czynnika ludzkiego poprzez wprowadzenie precyzyjnego systemu dozowania i sekwencjonowania środka smarnego.

Wraz z rozwojem automatyzacji, zostały opracowane rozwiązania, które pozwalają na bardziej precyzyjne i dokładniejsze nanoszenie materiału smarnego. Obecnie można wyróżnić kilka typów rozwiązań technicznych układów do nanoszenia powłok smarnych [24]. Ze względu na wysoką wydajność oraz krótki czas nanoszenia środka smarnego, rozwiązania zautomatyzowane są zrealizowane w oparciu o natrysk bezpośredni. Jest on wykonywany poprzez system dysz, które rozpylają środek smarny na matrycy podczas zmiany materiału wsadowego. Budowa dyszy jest zależna od używanego środka smarnego oraz parametrów jak np. ciśnienie rozpylania, lepkość smaru. Zaletą takiej metody smarowania jest łatwość ukierunkowania strumienia środka smarnego oraz wytworzenie cienkiej warstwy izolacyjnej na powierzchni narzędzia. Ponadto zautomatyzowane układy zazwyczaj posiadają stację przygotowania środka smarnego lub jego mieszanki w celu utrzymania jednolitego składu w całej objętości. Wcześniejsze przygotowanie środka smarnego zmniejsza możliwość osadzania się cząstek stałych w przewodach oraz dyszach, co w efekcie powoduje wydłużenie czasu pomiędzy serwisami tych urządzeń. W celu uzyskania równomiernej powłoki natryskiwanej, dysze są ustawiane tak, aby odzwierciedlały krzywiznę narzędzia. Wadą użycia klasycznych dysz jest ich wysoki koszt, rozmiar oraz problem z zastosowaniem przy matrycach o dużych gabarytach.

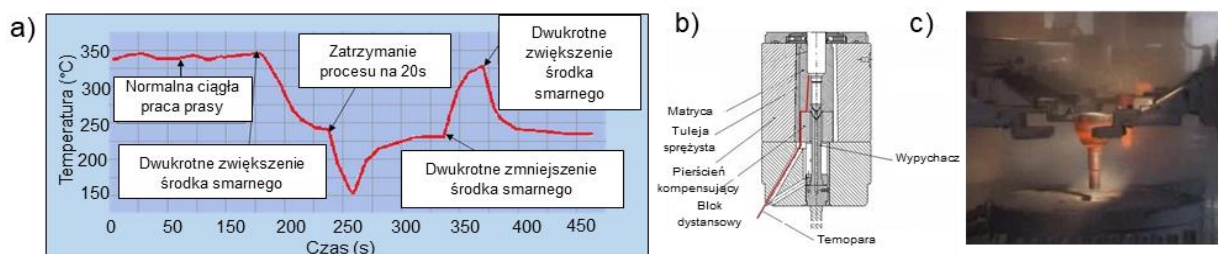
Sam proces automatyzacji procesu smarowania nie pozwala jednak na rozwiązanie analizowanego problemu. Przykładem takim może być zautomatyzowany sposób smarowania na prasie korbowej wyposażonej w transfer odkuwek, tak jak to ma miejsce na przykład w procesie kucia przegubu homokinetycznego. W procesie tym narzędzia smarowane są przez specjalnie skonstruowany wyrzutnik z dyszami. Sześć dysz rozmieszczonych równomiernie na obwodzie, co 60° dostarcza smar w momencie

wyrzutu odkuwki, gdy wyrzutnik znajduje się w górnym położeniu. Efektem tego jest pokrycie powierzchni wnętrza matrycy warstwą smaru z różną intensywnością zależnie od bliskości dyszy i nierównomierny stopień zużycia (wskutek adhezji) na obwodzie matrycy (rys. 4a).



Rys. 4. Nierównomiernie zużyta powierzchnia narzędzia: a) zdjęcie cyfrowe b) wyniki skanowania

Na powierzchni narzędzi można zaobserwować wyraźną różnicę pomiędzy strefami zielonymi oraz żółtymi (rys. 4b), a ciemnymi, do których docierała mniejsza ilość płynu smarującego. W tym samym procesie w celu analizy wpływu ilości dawki smarnej na zmiany temperatury wewnątrz narzędzia (rys. 5) autorzy dokonali pomiaru tego parametru. Wykorzystano do tego termoparę typu K wprowadzoną do jednej z matryc. Pomiar wykazał, że dwukrotne zwiększenie wydatku środka smarnego powoduje spadek temperatury na powierzchni matrycy o około 100 °C. Ponadto analizując cały przebieg, można zaobserwować jak ważne jest optymalizowanie i kontrolowanie procesu smarowania dla całego okresu eksploatacji danego narzędzia a nie tylko pojedynczej operacji kucia.



Rys. 5a) Zmian temperatury w matrycy podczas kucia z zaznaczonymi najczęściej występującymi zakłóceniami w procesie, b) schemat zamontowania termopary w narzędziu, c) widok przenoszonych odkuwek na prasie transferowej

Podobne badania dotyczące temperatury na powierzchni narzędzi kuźniczych podczas cyklu kucia przedstawiono w pracy [8].

Obecnie coraz powszechniejszą metodą smarowania, zwłaszcza w nowoczesnych i zautomatyzowanych kuźniach staje się wykorzystanie ramion manipulatorów, które precyzyjnie oraz powtarzalnie wsuwają głowice smarujące pomiędzy narzędzia. Są to wysoko wydajne systemy, które ze względu na cenę i skomplikowaną budowę są częściej stosowane w kuciu na zimno [10]. Do wiodących producentów systemów smarujących opartych o manipulatory zaliczyć można: AED Automation, SMS Group, Renite, Spay. Natomiast obecnie chętnie wykorzystywanym, znacznie tańszym w stosunku do drogich manipulatorów, a przy tym wysoce zautomatyzowanym systemem smarującym przeznaczonym do kucia matrycowego na gorąco jest urządzenie opracowane przez firmę Jerko (rys. 6) [19]. System ten posiada specjalną, wsuwaną pomiędzy górne i dolne narzędzia płytę smarującą nanoszącą warstwę smaru. Rozwiązanie takie wykorzystane zostanie w Kuźni Jawor w ramach realizowanego projektu badawczego.



Rys. 6. Widok: a) panelu z systemu smarowania z układem aktywnych (wybranych dysz) firmy Jerko [19], b) widok płyty smarującej z dyszami, c) manipulator z chwytakiem wkładający przedkuvkę, d) wjazd płyty smarującej i uruchomienie smarowania

Dodatkowo urządzenie pozwala na programowy wybór dysz, które mają być aktywne podczas podawania środka smarującego, co dodatkowo zwiększa elastyczność systemu.

Jak wykazano powyżej, mimo niezaprzeczalnego, ciągłego rozwoju technologicznego oraz opracowywania nowych rozwiązań technicznych, obecnie nadal dla większości typowych agregatów kuźniczych stosowane są stare, często zawodne i mało powtarzalne urządzenia smarujące, które dodatkowo są obsługiwane przez operatorów, od których zależy jakość smarowania w procesie kucia. Na podstawie przedstawionych badań oraz analizy stanu literatury można zauważyć, że kluczowe zagadnienie w przypadku smarowania stanowi przede wszystkim sposób i kierunek podawania oraz ilość (objętość) oraz czas dozowania czynnika smarująco-chłodzącego. Czynniki te mają decydujące znaczenie, a przypadku ich niewłaściwego doboru powodują znaczne skrócenie czasu eksploatacji narzędzi, a nawet przedwczesne uszkodzenie oprzyrządowania. Odzwierciedla się to także na obniżonej jakości i dokładności wymiarowo-kształtowej odkuwek. Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że największy wpływ na zużywanie się narzędzi kuźniczych, pomijając aspekt doboru smaru, ma precyzyjne ustawienie objętości i częstotliwości ekspozycji dawki środka smarno-chłodzącego. Nieco mniejsze znaczenie ma kierunek podawania smaru względem powierzchni matrycy. Optymalnym kierunkiem natrysku jest kierunek normalny względem powierzchni narzędzia. Jednak ze względu na skomplikowane kształty matryc, jest to w większości przypadków niemożliwe do zrealizowania. Wraz ze wzrostem skomplikowania układu dozującego, tj. rozbudowania głowicy natryskowej, czy układu automatyki, znacząco wzrasta koszt układu smarowania. Obecnie istniejące komercyjne rozwiązania zostały zbudowane w oparciu o wiedzę i doświadczenie firm tworzących te systemy dla wybranych aplikacji przemysłowych. W literaturze brak jest informacji na temat konstrukcji i kryteriów prawidłowego doboru układu smarowania, zwłaszcza dla procesów kucia w podwyższonych temperaturach.

3. Koncepcja autorskiego systemu smarowania

W odpowiedzi na przedstawiony stan wiedzy, wyniki badań i zapotrzebowanie autorzy, na podstawie doświadczenia zbudowali prototypowy system smarująco-chłodzący dedykowany dla procesów kucia odkuwek typu rozwidłonego. Zbudowany układ dozujący – rozdzielający jest pierwszym etapem budowy kompleksowego, elastycznego układu smarowania. W kolejnym etapie zostanie on rozbudowany o manipulator i system dysz. Pozwoli to na prowadzenie dalszych badań i określenie optymalnej metody właściwego natryskiwania środka smarnego (rys. 7).

Jest to kolejne tego typu rozwiązanie opracowane przez autorów [16]. W dotychczas stosowanym urządzeniu smarującym w procesie kucia odkuwki rozwidłonej (widłaka), operator za pomocą zaworu „subiektywnie” regulował dawkę środka smarnego i czas jego ekspozycji poprzez dyszę smarującą. Powodowało to brak stabilności smarowania oraz zmienność warunków tribologicznych w procesie kucia. W porównaniu do poprzednich wersji, obecnie zbudowany system smarujący został częściowo zmodernizowany oraz użyto znormalizowanych elementów składowych, co pozwala na łatwe serwisowanie urządzenia w procesie eksploatacji przemysłowej oraz dostęp do powszechnie dostępnych części, co znacznie obniża koszty urządzenia. Urządzenie zostało wykonane i przetestowane na linii produkcyjnej w Kuźni Jawor, która jest głównym odbiorcą systemu. Przeprowadzone testy pozwoliły na potwierdzenie wysokiej sprawności i pozwoliły na poprawę procesu kucia na gorąco, co przekłada się na jakość i obniżenie kosztów produkcyjnych. W obecnym rozwiązaniu, szczególną uwagę zwrócono na cykl pracy urządzenia (kolejność sekwencji), ilość dawki oraz kierunek podawania środka smarnego.

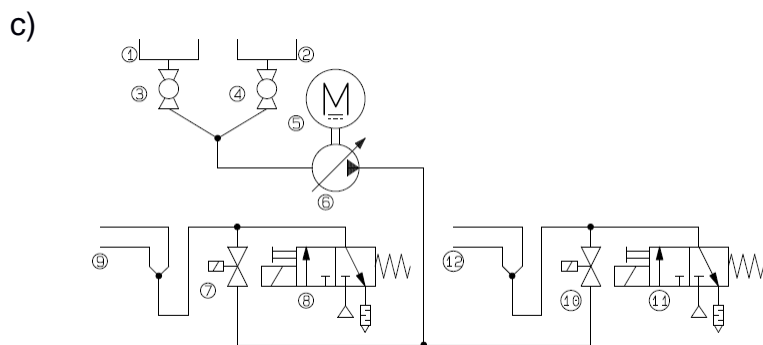
Opisywane rozwiązanie pozwala na precyzyjne i powtarzalne odmierzenie dozowanej dawki z jednoczesną możliwością zróżnicowania proporcji dla kolejnych dysz oraz możliwością swobodnego ustawienia sekwencji nadmuchu powietrza i nanoszenia środka smarnego. W tym celu w urządzeniu o budowie zaprezentowanej na schemacie (rys. 7c) wykorzystano pompę perystaltyczną (6) z silnikiem krokowym (5), która pozwala na precyzyjne odmierzenie ilości dozowanej cieczy smarującej (1).

a)



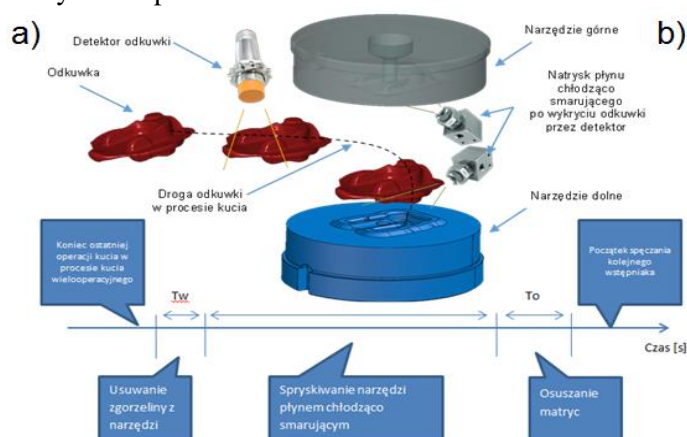
b)





Rys.7. a) Zdjęcie urządzenia dozująco-smarującego pozwalające na regulację wydatku środka smarno-chłodzącego, b) widok podłączonego i pracującego urządzenia w trakcie przemysłowego procesu kucia, c) schemat układu pneumatyki

Dystrybucja dozowanej cieczy na dyszę górną (9) i dolną (12) realizowana jest poprzez dwa zawory membranowe (7 i 10) sterowane pneumatycznie (8 i 11). Po odmierzeniu ilości (objętości) cieczy rozdzielana jest dla każdej z dysz, tj. górnej i dolnej. Opracowane rozwiązanie pozwala na przepychanie środka smarnego do opracowanej przez autorów specjalnej dyszy wydmuchowej poprzez elastyczne przewody za pomocą sprężonego powietrza. Sprężone powietrze stosowane jest dodatkowo do rozpylania cieczy jest to tzw. powietrze dodmuchiujące. Ustawienie kolejności podawania środka smarująco-chłodzącego, czasu przepychania i dodmuchu realizowane jest przez operatora za pomocą prostego w obsłudze panelu HMI. Odpowiednio dobrany czas wyrzutu i ilość środka smarującego sprzyja właściwemu rozpyleniu płynu, hamując procesy kumulacji grafitu w zagięciach matryc oraz pozostawiania wody na ich powierzchni.



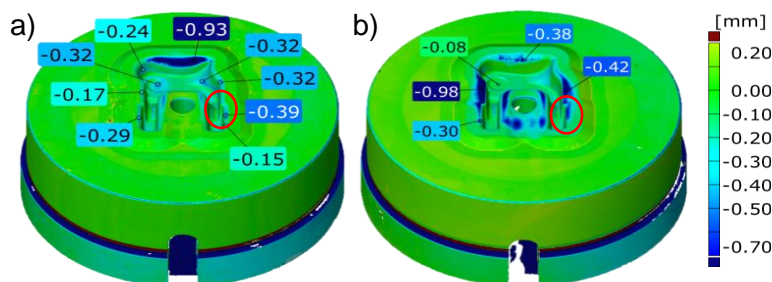
Rys.8. a) Idea działania systemu smarowania wraz z przykładowym schematem cyklu pracy, b) wykorzystanie ramienia manipulatora do ukierunkowanego podawania środka smarno-chłodzącego

Rys. 8a przedstawiono schemat działania urządzenia oraz przykładowy schemat cyklu pracy urządzenia. Regulacja zawartości fazy ciekłej w mieszaninie smarująco-chłodzącej polega na zmianie czasu działania pompy dozującej. Urządzenie posiada dodatkowy zbiornik z czystą wodą (oznaczony nr 2 na rys.7c) służący do czyszczenia i tym samym utrzymywania stałych parametrów smarowania. Wybór między zbiornikiem z cieczą smarującą, a czystą wodą odbywa się przy pomocy zaworów kulowych (oznaczony nr 3 i 4 na rys.7c). System jest ponadto wyposażony w mieszkadło antysedymencyjne, które pozwala na utrzymanie jednorodności zawiesiny grafitu w wodzie. Wstępnie prowadzone badania wykazały, wysoce zadowalające działanie urządzenia w warunkach przemysłowych. Kolejnym etapem rozwoju opracowanego urządzenia do podawania środka smarno-chłodzącego będzie integracja z manipulatorem (rys. 8b).

4. Porównanie i analiza wyników skanowania narzędzi kuźniczych eksploatowanych przy wykorzystaniu nowoopracowanego i dotychczas stosowanego systemu smarowania

Na rys. 9 przedstawiono przykładowe wyniki zbiorcze ze skanowania dolnych wkładek matrycowych stosowanych w operacji kucia wstępnie matrycującego odkuwki typu rozwidłonego po różnej liczbie odkuwek oraz po różnych warunkach tribologicznych (w wyniku zmiany systemu smarowania). Przed skanowaniem wkładki zostały oczyszczone z pozostałości smaru i zgorzeliny. Następnie zeskanowane

cyfrowe obrazy zostały przetworzone do postaci chmury punktów i zamienione na siatki trójkątów a następnie odniesione do modelu CAD.



Rys. 9. Wyniki skanowania wkładek ze stali UNIMAX stosowanych w procesie kucia na gorąco: a) po 16000 odkuwek z nowym systemem smarowania, b) po 16000 odkuwek ze starym systemem smarowania

Przedstawione przykładowe wyniki porównawcze skanów wkładek matrycowych (rys. 9) przetworzonych na cyfrowy obraz wskazują na to, że w przypadku zastosowania nowego urządzenia smarno-chłodzącego pozwalającego na precyzyjne ustawienia dawki smaru, zaobserwowano zmniejszenie zużycia narzędzi. Wstępne testy wykazały, że użycie dawki 10ml środka smarnego (mieszanina grafitu z wodą w stosunku 1:20) w czasie natrysku przez 2s, daje najlepsze rezultaty. Ponadto można także zaobserwować, że zapewnienie „lepszych” warunków smarnych narzędzia, w przypadku wkładki (rys. 9a) spowodowało pewne przesunięcia w zużyciu wybranych stref narzędzia, w stosunku do narzędzia ze starym systemem smarowania. Przykładowo dla narzędzia, przedstawionego na rys. 9b pojawiło się zużycie w miejscach, gdzie kształtowane są końcowe części ramion odkuwki, podczas gdy dla narzędzia pokazanego na rys. 9a (z nowym systemem smarującym) w tym obszarze brak jest śladów zużycia (zaznaczono czerwoną elipsą). Można to tłumaczyć tym, że w wyniku wprowadzenia do procesu nowo opracowanego systemu smarowania zmieniły się warunki tribologiczne, które spowodowały zmiany występowania mechanizmów niszczących w wybranych obszarach narzędzia.

W celu określenia historii zużywania się wybranych wkładek matrycowych (rys. 9) wykorzystano opracowaną przez autorów i częściowo rozbudowaną metodę skanowania odwrotnego, która jak wykazała praktyka przemysłowa stanowi użyteczne narzędzie pomiarowo-badawcze. Do tej pory metoda ta była aplikowana z powodzeniem do osiowosymetrycznych obiektów, o stosunkowo prostych kształtach i dużych wartościach ubytku materiału [14,15]. Opracowana metoda polega na pomiarze przy użyciu skanera, postępującego zużywania się wybranego narzędzia kuźniczego (rys.10a), w postaci jego ubytku materiału, a na podstawie zmian kształtu, cyklicznie pobieranych z procesu odkuwek, w postaci przyrostu materiału (rys.10b). W celu odtworzenia przebiegu zużycia narzędzia dokonuje się skanowania wybranych z serii produkcyjnej odkuwek (co 1000 szt.) z łącznej maksymalnej liczby wytworzonych odkuwek dla każdej z wytypowanych wkładek matrycowych. Do wyznaczenia wykresu opisującego zależności objętościowego zużycia w zależności od liczby wykonanych odkuwek w czasie procesu kucia konieczne jest wyliczenie zmiany objętości pomiarów kolejnych odkuwek do wyniku 100 odkuwki nominalnej, które zostały wyrównane z wykorzystaniem powierzchni referencyjnej.

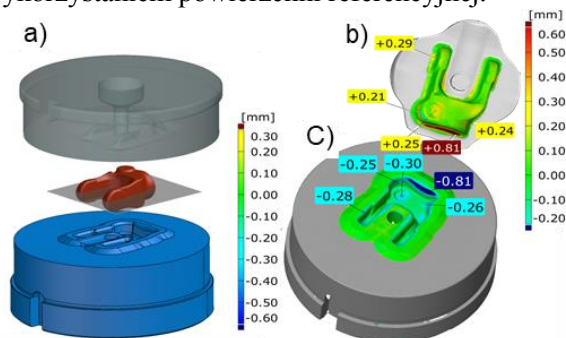
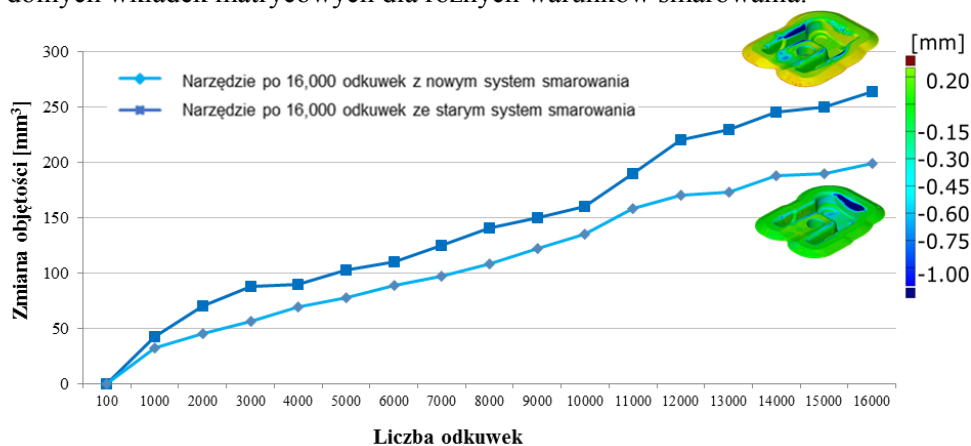


Fig. 10. Idea metody odwrotnej: a) komplet zestawu narzędzi kuźniczych dla drugiej operacji, b) porównanie wyników pomiarów ostatniej odkuwki oraz c) wkładki matrycowej po wykonaniu 16000 sztuk odkuwek, w postaci zmiany kształtu powierzchni

W ten sposób opracowuje się wykresy zmian objętości cyklicznie pobieranych w trakcie procesu i następnie skanowanych odkuwek. Pomiar zmian objętości ostatniej wytworzonej odkuwki dla danej wkładki matrycowej jest weryfikowany z pomiarem objętości narzędzia na koniec pracy. Na rys. 11

przedstawiono analizę zmian objętości przeprowadzoną w celu wyznaczenia historii zużycia się wybranych dolnych wkładek matrycowych dla różnych warunków smarowania.



Rys. 11. Porównanie krzywych zużycia (historii) wyznaczonych w oparciu o autorską metodę skanowania odwrotnego

Zaproponowane podejście wykorzystujące metodę skanowania odwrotnego 3d pozwala na globalny, ale zarazem pełny opis ubytku materiału, poprzez obserwowanie zmian objętości w trakcie procesu kucia, a także na szybką i miarodajną oraz praktyczną ocenę aktualnego stanu narzędzi kuzniczych. Ponadto uzyskane wyniki wskazują, że na podstawie przebiegu i kształtu (tendencji) krzywych zużycia można przewidywać wielkość ubytku materiału, a w konsekwencji sterować wielkością „otwarcia narzędzi” (grubość wypłytki), a nawet wnioskować o momencie wycofania narzędzia z dalszej produkcji wskutek przekroczenia tolerancji wymiarowych.

Analizując wyznaczone przebiegi krzywych zużycia w aspekcie wpływu nowego systemu smarowania można wnioskować, że jego wprowadzenie do procesu zapewnia bardziej powtarzalne warunki tribologiczne i spowodowało zmniejszenie zużycia materiału zwłaszcza w końcowym okresie jego eksploatacji. Skłania to do przeprowadzenia bardziej zaawansowanych badań dotyczących zarówno optymalizacji dawki smaru, jak i kierunku jego podawania, częstotliwości oraz dodatkowych parametrów związanych z procesem smarowania.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę wpływu środków smarno-chłodzących, ilości dawki smaru, czasu podawania i kierunku oraz urządzeń smarujących na zużywanie się i eksploatację narzędzi kuzniczych. Jak wykazano, ilość środka smarnego oraz sposobu podaży stanowi nadal aktualny problem badawczy. Przeprowadzona analiza wykazała, że istotną kwestię stanowi optymalna dawka smaru oraz sposób jej podaży. Tylko poprzez kompleksową i długotrwałą analizę danego procesu kucia można dobrać optymalne warunki tribologiczne zapewniające stabilność i powtarzalność procesu wytwarzania. Dlatego obecnie duży nacisk kładziony jest na rozwój urządzeń smarno-chłodzących, gdyż to one mogą zapewnić powtarzalne warunki pracy narzędzi. W odróżnieniu od wciąż powszechnie stosowanego manualnego systemu smarowania, na który wpływ ma subiektywny czynnik ludzki. Mimo, iż procesy kucia matrycowego w podwyższonych temperaturach są do siebie zbliżone, to jednak każdy wymaga indywidualnego podejścia. Powoduje to, że dla każdego procesu należy podchodzić oddzielnie i dobrać indywidualnie, jak i pozostałe parametry jego ekspozycji oraz sposób smarowania. Przedstawiony w pracy, opracowany przez autorów system smarująco-chłodzący pozwala na dobór i zapewnienie optymalnych warunków tribologicznych w procesie, a także zbadanie wpływu ilości wielkości i częstotliwości dawki środka smarnego na zużywanie się narzędzia dla danego procesu. Wstępne wyniki badań wykazały przydatność tego urządzenia w procesie kucia matrycowego odkuwki typu rozwidlonego, w miejsce obecnie mało stabilnych i sterowanych manualnie przez kowala urządzeń smarujących. Uzasadnione są dalsze, bardziej zaawansowane prace nad doбором optymalnego wydatku środka smarnego oraz innych ustawień smarowania, co może się także wiązać z modernizacją opracowanego urządzenia. Prowadzone będą także dalsze badania związane zarówno z doбором środka smarno-chłodzącego, a także jego optymalnej temperatury, w celu zmniejszenia gradientu temperatur pomiędzy rdzeniem a powierzchnią roboczą narzędzi powodujących zmęczenie cieplne. W ramach dalszych prac planuje się wykorzystanie ramienia manipulatora do badań i testów nad doбором prawidłowego ukierunkowania i precyzją podawania środka smarnego do wykroju narzędzia.

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

Literatura

1. Altan T, Ngaile G, Shen G. Cold and hot forging: fundamentals and applications. ASM International, Ohio 2005.
2. Altan T, Shirgaokar M. Advanced die materials and lubrication systems to reduce die wear in hot and warm forging. <https://www.forging.org/uploaded/content/media/AltansPres.pdf>
3. Anders P, Hogmark S, Bergström J. Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels. *International Journal of Fatigue* 2004; (10): 1095-1107.
4. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics* 1953; (24): 981-988.
5. Bay N. New lubricant systems for cold and warm forging – advantages and limitations. In Liewald, M.: *Proceed. 12th Int. Cold Forging Congr., Stuttgart, Germany 2011*; 1(8).
6. Bay N. New Tribo-systems for Cold Forming of Steel, Stainless Steel and Aluminium Alloys. *Proceedings of 46th International Cold Forging Group (ICFG) Plenary Meeting 2013*.
7. Berti G.A, Monti M. Thermo-mechanical fatigue life assessment of hot forging die steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 2005; 28 (11): 1025–1034.
8. Buchmayr B. Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 2017; 162 (3): 88–93.
9. Choi Ch, Groseclose A, Altan T. Estimation of plastic deformation and abrasive wear in warm forging dies. *Journal of Materials Processing Technology* 2012; 212 (8): 1742–1752.
10. Colin S.H. A review of automation in manufacturing illustrated by a case study on mixed-mode hot forging. *Manufacturing Review* 2014; (1)15, DOI: 10.1051/mfreview/2014012
11. Daouben E, E, et al., Effects of lubricant and lubrication parameters on friction during hot steel forging. *International Journal of Material Forming* 2008; 1: 1223–1226.
12. Deacon R.F, Goodman J.K. Spreading Behavior of water based graphite Lubricants on Hot Die Surfaces. *CIRP* 2006; (55)1: 299-302.
13. Gronostajski Z, et al. The failure mechanisms of hot forging dies. *Materials Science and Engineering, A Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing* 2016; 657: 147-160.
14. Gronostajski Z, Hawryluk M, et al. The application of the reverse 3D scanning method to evaluate the wear of forging tools divided on two selected areas. *International Journal of Automotive Technology* 2017; 18 (4): 653–662.
15. Gronostajski Z, Hawryluk M, Kaszuba M, Ziemia J. Application of a measuring arm with an integrated laser scanner in the analysis of the shape changes of forging instrumentation during production. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 18(2): 194–200. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.2.6>.
16. Hawryluk M, et. al. Systems of supervision and analysis of industrial forging processes. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2016; 18 (3): 315-324.
17. Hirschvogel M, Doelen H.V. Some applications of cold and warm forging. *Journal of Materials Processing Technology* 1992; 35 (7): 343-356.
18. <https://www.aed-automation.com/en/products/solutions-forging.html>, Aed Automation. Solutions forging. 2017. (accessed 17.11.02).
19. <https://www.jerko-kempen.de>, Jerko. 2017. (accessed 17.11.02).
20. Huskonen W.D. Trends in Die Lubrication. *Forging Magazine* 2004; (10): 24-26.
21. Isogawa S, Kimura A, Tozawa Y. Proposal of an evaluating method on lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 1992; 41: 263-266. 10.1016/S0007-8506(07)61200-1.
22. Iwama T, Morimoto Y. Die life and lubrication in warm forging. *Journal of Materials Processing Technology* 1997; 71: 43-48.
23. Kima D.H, Leeb H.C, Kimc B.M, Kimd K.H. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 166: 372–380.
24. Kumar U. et. al. Hot forging lubricants. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics* 2014; 3 (4): 155-163.
25. Lange K, Cser L, Geiger M, Kals J.A.G. Tool life and tool quality in bulk metal forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture* November 1993; 207: 223-239.
26. Lavtar L, Muhic T, Kugler G, Tercelj M. Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. *Engineering Failure Analysis* 2011; 18 (10): 1143-1152.
27. Manji J. Die Lubricants, *Forging* 1994: 39–44.
28. Nagahama T, Enomae S. Cold- and warm-forging press developments and applications. *Journal of Materials Processing Technology* 1992; 35(3–4): 415-427.
29. Ngaile G, Saiki H, Ruan L, Marumo Y. A tribo-testing method for high performance cold forging lubricants. *Wear* 2007; 262: 684-692.
30. Persson A, Hogmark B, Bergstroma J. Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels. *Surface & Coatings Technology* 2005; 191: 216–227.
31. Sagisaka Y, Ishibashi I, Nakamura T, Sasaoka E, Hayakawa K. Evaluation of Environmentally Friendly Lubricant for Aluminium Alloy Cold Forging. *Steel Res. Int., Special Edition, Wiley-VHC Verlag, Weinheim, 2011*; 245-248.
32. Schey J. *Tribology in Metalworking: Lubrication, Friction, and Wear* American Society for Metals, USA 1983.
33. Sheljaskow S. Current level of development of warm forging technology. *Journal of Materials Processing Technology* 1994; 46 (7): 3-18.
34. Sheljaskow S. Tool lubricating systems in warm forging. *Journal of Materials Processing Technology* 2001; 113 (1–3): 16-21.
35. Soltani M, Pola A, La Vecchia G.M, Modigell M. Numerical method for modelling spray quenching of cylindrical forgings. *La Metallurgia Italiana* 2015; (7)8 : 33-40.
36. Starlinga C, Brancob J. Thermal fatigue of hot work tool steel with hard coatings. *Thin Solid Films* 1997; 308(309): 436–442.

37. Taylan A, Gracious N, Gangshu S. Cold and hot forging fundamentals and application. ASM International. Asm metals handbook 2005; 14: 337-338.