

MOŻLIWOŚCI BADANIA ZUŻYCIA ŚCIERNEGO W WARUNKACH ODPOWIADAJĄCYCH PRZEMYSŁOWYM PROCESOM KUCIA

Słowa kluczowe: zużycie ściernie narzędzi, kucie na gorąco, stanowisko badawcze, stal do pracy na gorąco

Streszczenie

W pracy autorzy przedstawili prototypowe stanowisko do badania zużycia ściernego – **TriboForge**, które w odróżnieniu od klasycznych tribometrów pozwala na analizę zużycia w warunkach wysokich nacisków (500 MPa), czyli w warunkach zbliżonych do panujących w przemysłowych procesach kucia. Koncepcją zaprojektowanego i zbudowanego prototypowego stanowiska jest jak najdokładniejsze odwzorowanie zjawisk i procesów oddziałujących na warstwę wierzchnią narzędzi kuźniczych w kontakcie z odkształcanym materiałem odkuwki. Autorzy przeprowadzili wstępne badania dla skojarzenia: materiał narzędziowy i wybrany materiał odkuwki. Parę trącą stanowiły: obracający się krążek wykonany ze stali narzędziowej (WCL) oraz dociskana do niego próbka prostokątna z materiału odkuwki (QS19-20). Dzięki specjalnemu systemowi sterująco-pomiarowemu zintegrowanemu ze stanowiskiem możliwy jest pomiar on-line wielu istotnych parametrów (rozkładu temperatury, prędkości obrotowej próbki, siły docisku przeciwpółki, wielkości zużycia, drogi tarcia oraz zmiany wartości współczynnika tarcia). Skojarzone próbki pracowały przez ustalony wcześniej czas 4 h przy docisku (stałą siłą około 10 kN, co przy średniej wielkości pola kontaktu wynosiło około 220 MPa), ze średnią prędkością obrotową 5 obr/min (1 pełny obrót wynosił około 12 s). Przy założeniu, że najważniejszymi parametrami opisującymi zużycie ściernie są droga tarcia oraz nacisk jednostkowy wykazano, że wielkość zużycia (ubytku materiału) w zależności od długości cyklu jest zbliżona do procesu przemysłowego. Potwierdza to przydatność opracowanego stanowiska badawczego do kompleksowej analizy zużycia ściernego matryc kuźniczych.

Wstęp

Podczas przemysłowych procesów kucia matrycowego narzędzia kuźnicze poddawane są działaniu ekstremalnych warunków. Wiele mechanizmów zachodzących na powierzchni kontaktu narzędzia i kształtowanego materiału odkuwki ma charakter bardzo gwałtowny i trudny do obserwacji. Wpływ zjawisk niszczących na trwałość matryc jest na ogół analizowany oddzielnie i nie ma dokładnego globalnego opisu fizycznego procesu zniszczenia, a więc uwzględniającego wszystkie zjawiska jednocześnie. Dodatkowym utrudnieniem w analizie poszczególnych zjawisk jest zmiana ich intensywności wraz ze zmianą parametrów procesu oraz obszaru powierzchni narzędzia. Obszar determinuje czas kontaktu, naciski, drogę tarcia, zmiany temperatury warunków trybologicznych. Jednym z podstawowych mechanizmów niszczących narzędzia kuźnicze przy wysokich naciskach i w podwyższonych temperaturach jest zużycie ściernie [1, 7-13, 18, 2213, 27].

Intensywny rozwój nauk trybologicznych pozwala na ograniczenie i częściową kontrolę nad procesami niszczącymi, co skutkuje dużymi oszczędnościami oraz zwiększeniem bezpieczeństwa użytkowania maszyn i urządzeń oraz narzędzi kształtujących. Do badań trybologicznych często stosuje się specjalnie przygotowane stanowiska laboratoryjne, zwane tribometrami, które mają za zadanie jak najdokładniej odwzorować warunki występujące w danym urządzeniu (procesie), przy jednoczesnym umożliwieniu aktywnej rejestracji jego wybranych parametrów. Współczesne maszyny trybometryczne skupiają się na badaniu „łagodnych procesów”, w których próbki obciążane są siłami do około 50 N. Obecnie praktycznie nie istnieją stanowiska w pełni odwzorowujące proces zużycia ściernego matryc, a powstające tribometry pozostają na etapie prototypów [3, 4, 121, 17, 129].

Celem pracy jest opracowanie koncepcji i budowa prototypowego stanowiska będącego w stanie zasymulować warunki trybologiczne przemysłowego procesu kucia, przy jednoczesnej akwizycji niezbędnych parametrów.

1. Koncepcja stanowiska do badania zużycia ściernego

W celu zrozumienia i opisanie zjawisk zużycia, oprócz badań eksperymentalnych zdefiniowano wiele modeli matematycznych, pozwalających na teoretyczne określenie wartości zużycia. Jednym z najbardziej powszechnych, będący podstawą większości używanych równań jest model Archarda (1). Większość prowadzonych badań koncentruje się na rozwinięciu i udoskonaleniu powyższego modelu. Opisuje on powstałe zużycie ściernie na skutek kontaktu dwóch ciał, w przypadku ich poślizgu względem siebie:

$$W = K \times \frac{F \times S}{H} \quad (1)$$

gdzie:

W – zużycie,
K – współczynnik zużycia,
F – siła docisku,
S – droga poślizgu,
H – twardość elementu.

Zakłada on, że zużycie danego elementu jest wprost proporcjonalne do siły i drogi poślizgu, a odwrotnie proporcjonalne do twardości materiału, z jakiego wykonany jest element. Bezwymiarowy współczynnik K jest wielkością wyznaczaną eksperymentalnie, charakterystyczną dla każdego z materiałów. Teoretycznie jego wartość jest stała [26], bez względu na rodzaj badanego procesu i mieści się ona w przedziale 7×10^{-3} do 7×10^{-6} (dla stali narzędziowej $1,3 \times 10^{-4}$), w zależności od typu materiałów będących w kontakcie i obecności czynnika smarnego [7, 11].

Inne podejście, co do opisu zjawiska zużycia przedstawia model Shaw'a (2). Wielkość zużycia uzależnia się w nim od ilości energii, która uległa dyssypacji na skutek tarcia:

$$Bu = PL\mu \quad (2)$$

gdzie:

B – moduł zużycia,
P – siła docisku,
L – droga poślizgu,
 μ - współczynnik tarcia,
u – energia właściwa zużycia.

Równanie to opisuje ilość energii potrzebnej do wytworzenia cząstki będącej efektem zużycia, przy określonych naciskach, drodze poślizgu oraz wielkości tarcia występującej pomiędzy elementami

Oprócz przedstawionych powyżej modeli istnieją również modele stworzone specjalnie w celu opisu zużycia matryc w procesie kucia. Równania takie jak te opracowane przez Kang'a czy Bahrens'a, określają wielkość zużycia powstałego po każdorazowym procesie, biorąc pod uwagę nie tylko wpływ temperatury na twardość materiału, ale również zjawisko spadku twardości (wskutek miejscowego odpuszczania) narzędzi w zależności od długości czasu jej oddziaływania [122].

Obecnie istnieje problem związany ze standaryzacją badań wynikający głównie z dużego rozrzutu wyników, oraz braku ich powtarzalności pomiędzy poszczególnymi ośrodkami badawczymi. Aktualnie organizacje takie jak ISO i ASTM opracowało szereg norm i metodologii badań zużycia ściernego jednak dotyczą one głównie „łagodnych” procesów, w których czynniki takie jak naprężenia, czy temperatura nie osiągają dużych wartości. Dotychczasowe maszyny trybologiczne różnią się znacznie między sobą w zależności od badanych zjawisk, a każdy symulowany proces wymaga zazwyczaj indywidualnego podejścia do problemu [7, 23]. Dobór elementów stanowiska badawczego ma kluczowe znaczenie na wyniki przeprowadzanych badań i symulacji fizycznych. W przypadku niedokładnego odwzorowania procesu, bądź pominięcia niektórych czynników prawdopodobnym jest wystąpienie błędu pomiarowego. Jednakże nie wszystkie eksperymenty wymagają w pełni zdefiniowanego środowiska badawczego. Czasem wystarczy wiedza o ogólnym charakterze procesu, przez co stosowanie skomplikowanej aparatury podniosłoby tylko niepotrzebne koszty badań. Z racji stopnia odwzorowania rzeczywistego procesu, maszyny trybologiczne można podzielić na trzy poziomy symulacji:

- *pierwszego rzędu* – najbardziej ogólny, dający informacje o podstawowych parametrach procesu, na jego podstawie można dobrać najodpowiedniejszy materiał oraz określić wpływ poszczególnych czynników na zużycie ściernie.
- *drugiego rzędu* – powiązany ściśle z wartościami poszczególnych parametrów. W tym poziomie symulacji fizycznych bierze się pod uwagę nie tylko fakt występowania danych zjawisk, ale także ich wartości. W symulacjach tego typu istotny wpływ mają takie czynniki jak temperatura procesu, wielkość naprężeń, prędkości czy rodzaj oraz ilość smarowania.
- *trzeciego rzędu* – najwierniej odwzorowujący rzeczywistość. Maszyny tego typu są w zasadzie replikami rzeczywistych stanowisk lub ich części, z tą różnicą, że pozwalają na kontrolę i akwizycję danych.

Symulacje i modelowanie fizyczne pierwszego rzędu są najczęściej przeprowadzane w celu poznania podstaw danego zjawiska oraz w celu wyznaczenia parametrów danego materiału. Drugi rząd symulacji, do którego zalicza się tworzone stanowisko, dotyczy wielu aplikacji inżynierskich, w których wyznacza się wpływ poszczególnych parametrów na zużycie. Pozwala on projektować sprawniejsze systemy, bądź optymalizować już istniejące. Trzeci rząd symulacji mimo nie dostarczania wszystkich

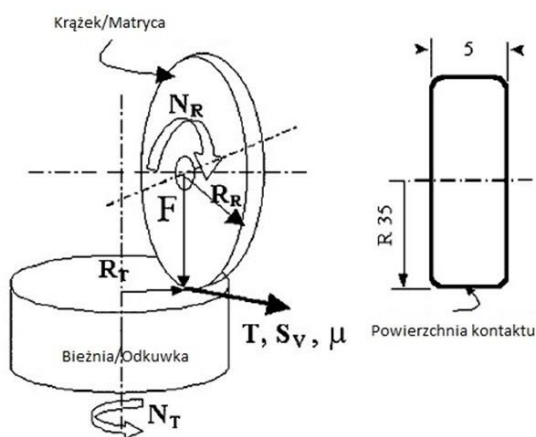
informacji o procesie, jest często stosowany z praktycznych względów, gdy łatwiej jest zmierzyć wymagane parametry na rzeczywistym modelu, bądź jego odwzorowaniu, bez poświęcania czasu na dokładne zrozumienie zjawiska [7].

2. Przegląd literaturowy istniejących rozwiązań

Projektowanie maszyny trybologicznej to skomplikowany proces, w którym bierze udział szereg czynników mających wpływ na zużycie. W przypadku tworzenia tribometru drugiego-rzędu niezbędna jest identyfikacja kluczowych parametrów zjawiska. Każde odstępstwo od rzeczywistego modelu może skutkować obniżeniem korelacji pomiędzy testem, a stanem faktycznym i prowadzić do błędnych pomiarów. Dlatego istotne jest rozważenie wpływu wszystkich parametrów na całokształt procesu i identyfikacja tych niezbędnych do odtworzenia aplikacji [7].

W ramach studiów literaturowych dokonano przeglądu istniejących już rozwiązań maszyn służących do badań trybologicznych. Zidentyfikowano także kilka, stanowisk, które zajmują się bezpośrednio problemem zużycia matryc w procesach kucia przemysłowego.

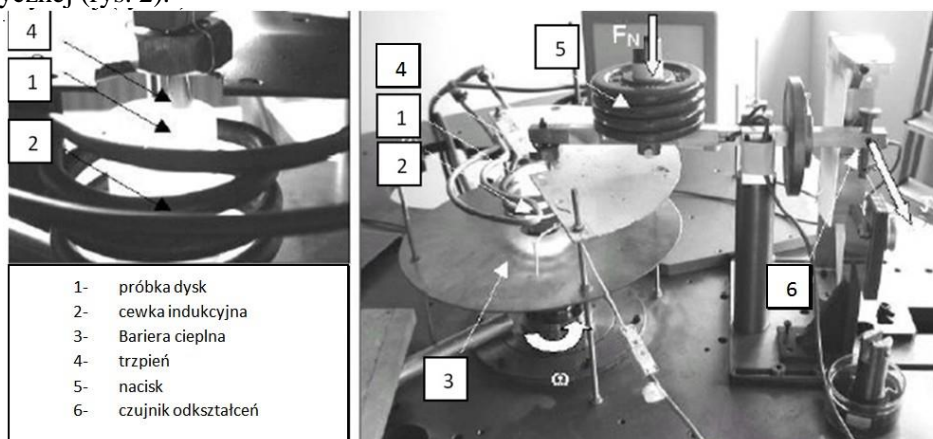
Przykładem takiego urządzenia może być to zaprezentowane w [20] przez naukowców z Uniwersytetu Technicznego w Compiègne. Autorzy artykułu zdecydowali się na rozwiązanie oparte o metodę krążek-bieżnia, które zapewnia ruch obrotowo-przesuwny (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego typu krążek-bieżnia[20].

W rozwiązaniu tym obracający się krążek wykonany z materiału odpowiadającemu matrycy jest dociskany z siłą 50 N do powierzchni obracającej się bieżni, której materiał odpowiada odkuwce. Poprzez zastosowanie systemu sterowania silnikami odpowiadającymi za obrót istnieje możliwość kontroli względnej prędkości elementów i ich wzajemnego poślizgu. Ponadto stanowisko ma możliwość nagrzewania elementów do temperatury 850°C i jej kontroli przy użyciu pirometru.

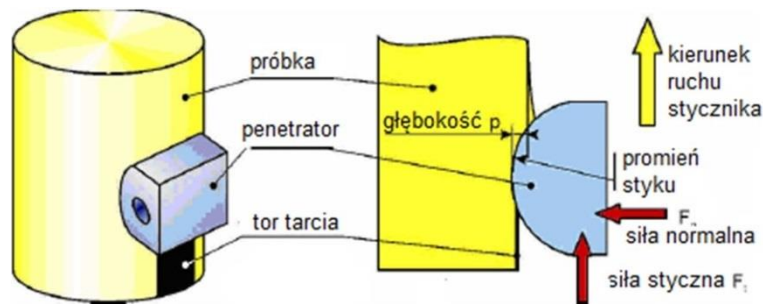
Inne interesujące rozwiązanie zostało opisane w artykule [312], w którym autorzy zdecydowali się na metodę trzpień na bieżni. Trzpień o średnicy 20 mm, będący odpowiednikiem matrycy dociskany jest z siłą 100 N do obrotowej bieżni, która jest nagrzewana z wykorzystaniem zjawiska indukcji elektromagnetycznej (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko typu trzpień na bieźni [12].

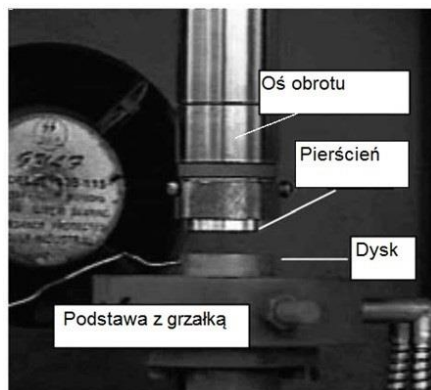
W typowym teście bieźnia jest wstępnie nagrzewana i utrzymywana przez godzinę w stałej temperaturze, co ma zapewnić na celu wytworzenie warstwy tlenków. Następnie następuje właściwy test, w trakcie, którego mierzone są takie parametry jak temperatura, prędkość obrotowa czy czas trwania próby.

Praca [6] opisuje stanowisko o nazwie Warm Hot Upsetting Sliding Test (WHUST), w którym zostaje odwzorowany kontakt odkuwki z matrycą pomiędzy nagrzaną do 1100°C próbką w kształcie walca a dociskany do niej penetratorem o temperaturze 200°C (rys. 3). Testy wykonywane są tak, aby naciski, prędkości poślizgu, prędkość współpracujących powierzchni, temperatury były podobne do warunków przemysłowych. Stanowisko to różni się od innych przede wszystkim uwzględnieniem wpływu smarowania w trakcie badań. Próbki przed testem są pokrywane warstwą smaru w postaci grafitu z wodą, a czynniki takie jak grubość warstwy smaru czy wielkość stałych cząstek są jednym z parametrów testu.



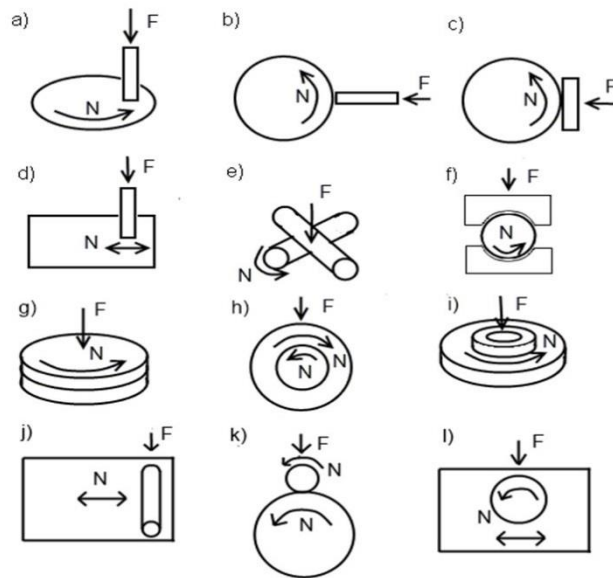
Rys. 3. Schemat stanowiska WHUST [6].

Ostatnie zaprezentowane rozwiązanie zostało opisane w pracy [16]. Autorzy tego rozwiązania zdecydowali się na parę trącą typu pierścień-trzpień. Elementem imitującym matrycę w tym rozwiązaniu jest obracający się pierścień specjalnej konstrukcji, do którego dociskany jest nieruchomy trzpień będący odpowiednikiem odkuwki. Podstawa z grzałką ma zadanie nagrzewanie pierścienia do temperatury sięgającej nawet 500°C (rys. 4). Ideą stanowiska jest odwzorowanie warunków kucia na ciepło przegubów homokinetycznych.



Rys. 4. Urządzenie do wysokotemperaturowego badania zużycia typu pierścień-dysk [16].

Oprócz analizy prowadzonych aktualnie badań prototypowych, innowacyjnych stanowisk do badania zużycia ściernego zajęto się także analizą typowych przemysłowych urządzeń, sprzedawanych do komercyjnego użytku. Jednym z większych producentów maszyn tribometrycznych jest Phoenix Technology Ltd [25]. Oferowane przez firmę rozwiązania stanowisk i urządzeń badawczych bazują na typowych układach par trących (rys. 5).



gdzie: F - docisk, N - przemieszczenie

Rys. 5. Koncepcje geometryczne stanowiska do badania zużycia ściernego, gdzie a) metoda pin-on-disc b) pin-on-ring, c) block-on-ring, d) pin-on-plate e) cylinder-on-cylinder f) cylinder-in-jaws g) disc-on-disc, h) ring-on-cylinder i) ring-on-disc, j) plate-cylinder, k) ring on ring, l) ring-plate.

W powyższym zestawieniu zostało przedstawione większość typowych par trących charakterystycznych dla tribometrów tj. trzebień na dysku, trzebień na pierścieniu itp. oraz rozwiązania mniej popularne, które również wzięto pod uwagę przy symulowaniu procesów kucia.

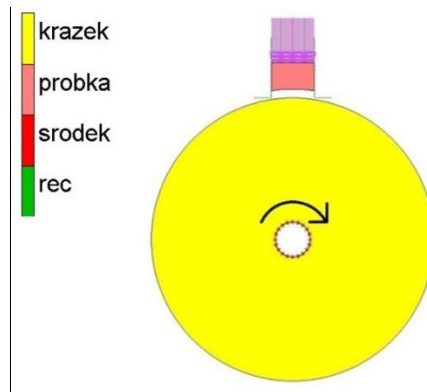
3. Modelowanie numeryczne stanowiska do badania zużycia ściernego

Obecnie w celu weryfikacji podstawowych założeń i określenia parametrów stanowiska badawczego często korzysta się z narzędzi informatycznych, m.in.: opartych o MES. Symulacje numeryczne mają za zadanie zweryfikować rozważania teoretyczne oraz pozwolić dokładniej przeanalizować zjawiska wstępujące podczas prób, a także zapobiec ewentualnym błędom konstrukcyjno-technologicznym powstałym w fazie projektowania [12, 121, 122, 129, 134].

Autorzy, w celu weryfikacji i potwierdzenia założeń dotyczących stanowiska do badania zużycia ściernego zbudowali szereg modeli numerycznych, a następnie przeprowadzili stosowne symulacje komputerowe w pakiecie obliczeniowym MSC.Marc Mentat 2013. Wyniki symulacji pozwoliły na wyznaczenie wielu parametrów, które trudno określić w sposób analityczny, takich jak: rozkład naprężeń wewnątrz krążka, sposób płynięcia uplastycznionej próbki, prędkość jej zużywania, czy też określić wymianę ciepła pomiędzy elementami. Poprzez modelowanie numeryczne ustalono ostateczną wersję konstruowanego prototypowego urządzenia – tribometru, w którym przeciwpróbka w postaci prostopadłościanu o wymiarach 12 mm x 4 mm x 85 mm jest dociskana do krawędzi krążka o średnicy $\varnothing 80$ mm, z siłą odpowiadającą 24000 N. Na etapie symulacji zrezygnowano z chłodzenia i nagrzewania elementów, uznając wstępnie ciepło powstałe na skutek tarcia elementów za wystarczająco odwzorowujące warunki procesu.

3.1. Opracowanie i budowa modelu

Model symulujący działanie stanowiska został zbudowany w oparciu o płaski stan odkształcenia, w którym dociskacz o szerokości 12 mm oddziałuje na krążek o średnicy $\varnothing 80$ mm. Tworzona symulacja składa się z 4 elementów typu „contact body”, dwóch ciał odkształcalnych: krążka i dociskacza, oraz dwóch sztywnych: środka i recipienta. Ponadto powierzchnia kontaktu przeciwpróbki podobnie jak w rzeczywistym eksperymencie została specjalnie wyprofilowana tak, aby od początku trwania próby zapewnić względnie stały styk (rys. 6).



Rys. 6. Schemat modelu z podziałem na poszczególne elementy typu „contact body” z oznaczonym kierunkiem obrotu.

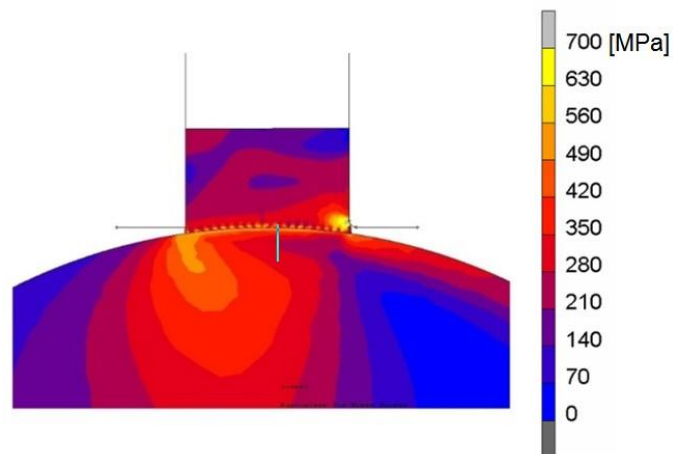
Dla uproszczenia obliczeń wał wraz z krążkiem opisano jako jeden element „krazek” a otwór w jego środku wraz z przyklejonym do niego elementem „środek”, ma za zadanie ułatwić definicje i pomiar wymaganych wielkości. „Dociskacz” znajduje się w elemencie „recypient”, który został opisany przy pomocy pięciu krzywych (zaznaczonych kolorem zielonym na rys.6).

Na jednej z krawędzi elementu dociskacz zdefiniowano warunek brzegowy w postaci nacisków o wartości 500 N/mm. Obrót krążka zapewniono poprzez nadanie jego środkowi prędkości obrotowej 1,0472 rad/s odpowiadającej 10 obr/min w kierunku zgodnym z obrotem wskazówek zegara. Pomiedzy próbką a przeciwpróbką występuje tarcie Coulombowskie o współczynniku $\mu=0,3$. Materiałem dysku jest stal narzędziowa do pracy na gorąco WCLV, natomiast dociskacza stal QS19-20, dla których zdefiniowano charakterystyki materiałowe uwzględniając takie czynniki jak prędkość odkształcania, temperatura, rozszerzalność cieplna, konduktywność czy ciepło właściwe.

Aby zapewnić poprawną symulację wymiany ciepła, jako warunek początkowy przypisano węzłom wszystkich elementów temperaturę 24°C, a pomiędzy próbkami utworzono współczynnik wymiany ciepła równy 20 mW·mm⁻²·K⁻¹. Ponadto uwzględniono wymianę ciepła z otoczeniem, którego temperatura wynosi 24°C.

3.2. Wyniki symulacji

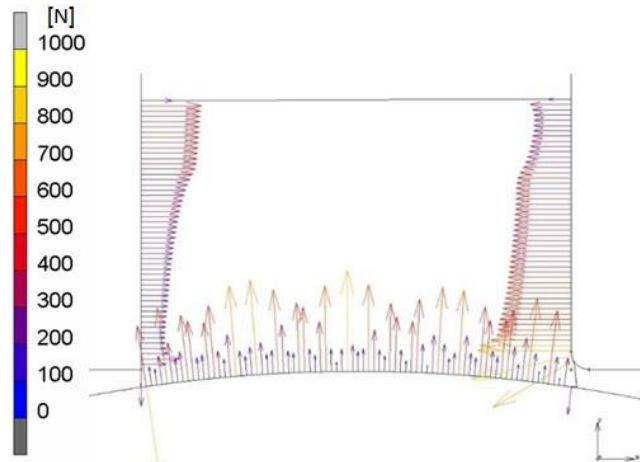
Do jednego z najważniejszych celów modelowania należało określenie naprężeń powstałych w krążku na skutek oddziaływania dociskacza. Ich rozkład dla opisywanego modelu w 6 sekundzie symulacji przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład naprężeń w utworzonym modelu.

Największe naprężenia w badanym krążku występują zaraz pod powierzchnią próbki. Koncentracja naprężeń osiągająca 600 MPa po lewej stronie rysunku jest wynikiem superpozycji oddziaływania siły docisku przeciwpróbki i momentu obrotowego wału i wydaje się to potwierdzać rozważania teoretyczne autorów.

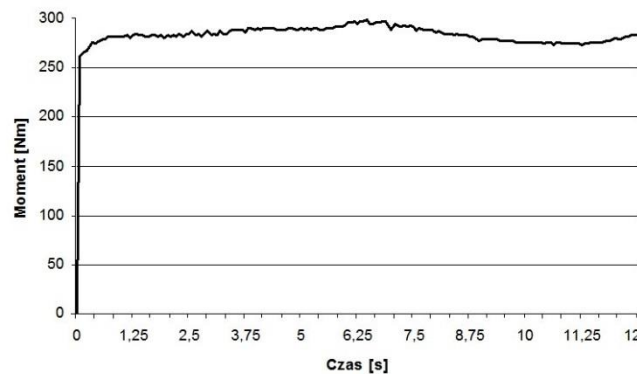
Ponadto dla celów konstrukcyjnych, określono siły normalne występujące na wewnętrznych ściankach recypienta, których rozkład przybiera następującą formę (rys. 8):



Rys. 8. Rozkład sił normalnych powstających w wyniku kontaktu elementów z przeciw próbki.

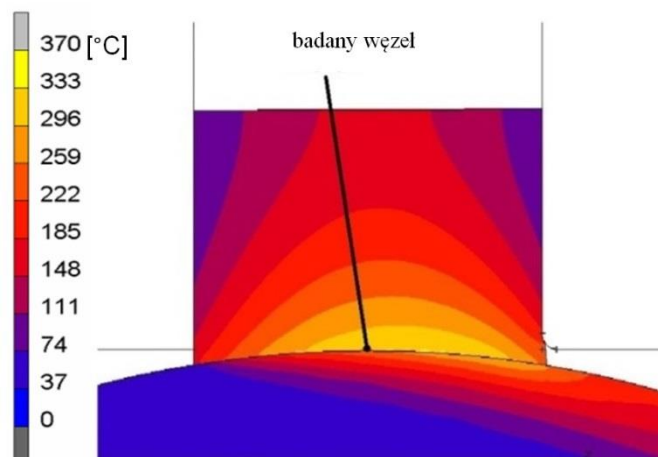
Symulacja wykazała, że najbardziej obciążona jest dolna prawa część recypienta, gdzie zgodnie z kierunkiem obrotu będzie miał miejsce wypływ przeciwpróbki. Oddziaływanie sił sięgających 1000 N wraz z stosunkowo szybkim przesuwnem materiału sprawia, że istnieje duże prawdopodobieństwo zużywania się recypienta w tym miejscu, co oznacza konieczność zastosowania łatwo wymienialnych matryc, montowanych na wyjściu z pojemnika.

Następnie wyznaczono wartość momentu obrotowego elementu „środek”, która jest niezbędna do zapewnienia obrotu wału wraz z krążkiem (rys. 9).



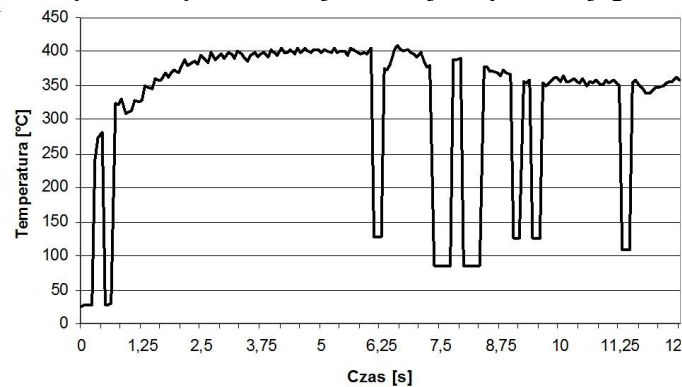
Rys. 9. Zależność momentu w kierunku z od czasu dla elementu „środek”.

Jak widać na wykresie dla krążka o średnicy $\varnothing 80$ i współczynnika tarcia pomiędzy elementami wynoszącym 0,3, moment skręcający potrzebny do obrotu krążka wynosi około 300 Nm. Drugim ważnym, parametrem wymagającym określenia jest stopień wymiany ciepła i temperatura próbek. W utworzonym modelu temperatura w 12 sekundzie symulacji przyjmuje rozkład przedstawiony na rys. 10.



Rys. 10. Rozkład temperatury wraz z badanym węzłem.

Temperatura na powierzchni krążka osiąga w krótkim czasie ponad 300°C. Oznacza to, że niewymagane jest jakiegokolwiek nagrzewanie krążka, a wręcz możliwe jest, że zajdzie potrzeba jego schładzania.



Rys. 11. Zależność temperatury od czasu dla węzła na powierzchni przeciwpróbki.

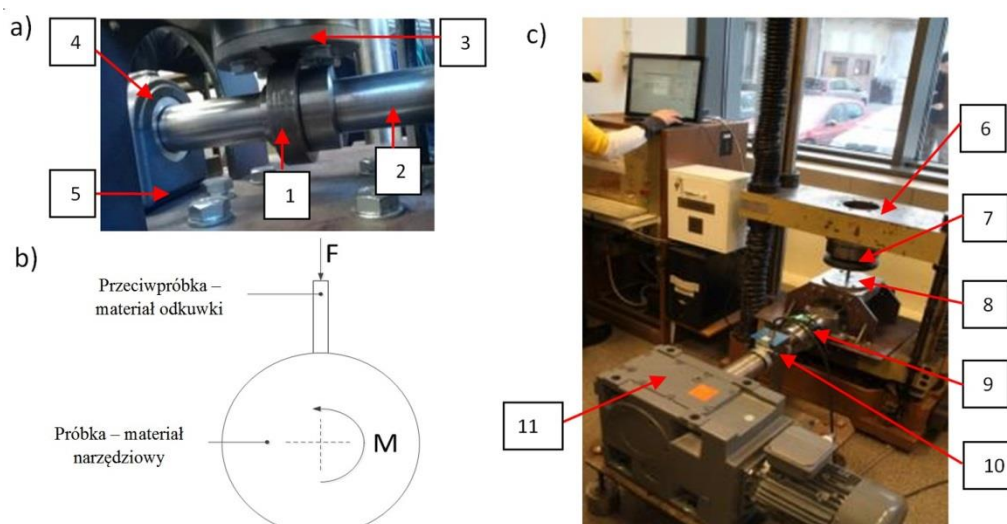
Na rys. 11 przedstawiono zmianę temperatury wybranego węzła w funkcji czasu. Powierzchnia dociskacza w krótkim czasie osiąga temperaturę oscylującą pomiędzy 350°C-400°C, co może powodować konieczność stosowania dodatkowego chłodzenia przeciwpróbki. Charakterystyczne ekstrema minimalne występujące na wykresie są spowodowane błędami programu związanymi z nakładaniem siatki i nie mają odzwierciedlenia w rzeczywistości.

4. Wybór koncepcji i projekt stanowiska

Przy doborze parametrów stanowiska należy wziąć pod uwagę nie tylko kształt i rodzaj próbki oraz przeciwpróbki, ale także wiele innych czynników takich jak np. wielkość, kierunek i charakter obciążenia, które wpływają na wielkość zużycia nie tylko poprzez siłę nacisków. Na etapie tworzenia tribometru należy również uwzględnić to czy obciążenie występujące w modelu rzeczywistym jest stałe, a jeśli nie, to czy ma wpływ na prowadzone badania. W projektowanym rozwiązaniu brano pod uwagę realizację docisku poprzez elementy sprężyste, ciężary z możliwością zastosowania mechanizmu dźwigniowego albo siłowniki [4].

Niemniej ważnym parametrem jest ciepło, jego sposób dostarczania do układu oraz jego wymiana pomiędzy próbką a przeciwpróbką. Temperatura może mieć kluczowy wpływ na geometrię elementów, wartość współczynnika tarcia, a w przypadku kucia nie można zapomnieć o znacznym wpływie temperatury na zachowanie materiału. Podczas konstrukcji stanowiska wzięto pod uwagę zarówno nagrzewanie jak i chłodzenie elementów i rozważono szereg możliwości ich realizacji zaczynając od prostego nagrzewania płomieniowego, a kończąc na wykorzystaniu nagrzewania indukcyjnego oraz takich sposobach chłodzenia jak kąpielowe, natryskowe czy poprzez dysze powietrzne [7]. Innym, często pomijanym czynnikiem jest rodzaj i ilość środka smarnego, wpływ środowiska i otoczenia na zużycie elementów oraz na jakość próby. Środek smarny może oddziaływać na pozostałe czynniki, czyli sposób przemieszczania elementów, rozkład obciążenia oraz dyssypację ciepła. Natomiast poprzez środowisko rozumie się reakcje chemiczne mające wpływ na zużycie elementów poprzez wystąpienie korozji oraz wszelkie zakłócenia w odprowadzaniu ciepła [23].

Na podstawie przeglądu możliwych koncepcji rozwiązań wraz z ich późniejszą weryfikacją przy pomocy modelowania numerycznego zbudowano prototypowe stanowisko do badania zużycia ściernego przy wysokich naciskach (rys. 12), bazujące na metodzie pin-on-ring [25]. Za jej wyborem przemawiała możliwość zadawania dużych obciążeń, które występują w procesie kucia, oszczędność materiału na próbki, w przypadku zastosowania kształtu pierścieniowego oraz najprostsze w realizacji grzanie i chłodzenie. Ponadto w metodzie tej, jako jednej z niewielu istnieje możliwość doprowadzenia przeciwpróbki do stanu plastycznego.



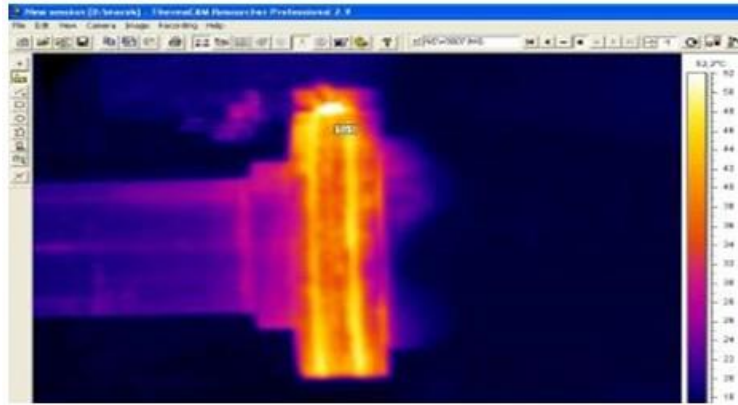
Rys. 12. a) Widok od przodu, obracający się krążek (1) (stal WCL) zamocowany na się wale (2) obustronnie podpartym łożyskami (4), wymienna matryca (3), czujniki siły (5), b) schemat poglądowy stanowiska c) widok główny zbudowanego stanowiska: belka maszyny Tiratest (6), stempel (7), recipient (8), sprzęgło (9), momentomierz (10) motoreduktor (11),

Głównymi (badanymi) elementami stanowiska jest ruchomy krążek (1) o średnicy 80mm (wykonany z materiału narzędziowego typu WCL), zamontowany na wale (2), obustronnie podpartym łożyskami skośnymi (3) w oprawach dzielonych, połączony poprzez sprzęgło (9) z motoreduktorem (rys.12a). Do obracającego się krążka dociskana jest przeciwp próbka zamocowana w recipient (8) w kształcie prostokątnianu o wymiarach 12x4x85 mm (wykonana z materiału odkuwki, QS19-20) popychana stempelkiem (7) (rys. 12c). Docisk realizowany jest przy pomocy maszyny wytrzymałościowej TIRAtest 2300(6), dającej możliwość pracy pod obciążeniem sięgającym do 24kN, co ma zapewnić naprężenia powierzchniowe o wartości 500 MPa. Zastosowanie dwóch czujników siły (5) pod jedną z opraw łożyskowych typu CL-20U (4) o zakresie pomiarowym do 25 kN wraz z czujnikiem momentu obrotowego typu DFM-30 (10) o zakresie do 2000 Nm pozwala na pośredni pomiar wielkości współczynnika tarcia w czasie rzeczywistym. Współczynnik/czynnik tarcia obliczany jest z zależności stosunku poziomej siły tarcia (wyznaczanej z momentomierza) do pionowej siły nacisku wyznaczanej z czujników zamocowanych w podporach. Zamontowany enkoder typu 8.3651 firmy Kubler pozwala na pomiar prędkości obrotowej próbki oraz uzależnienie zmiany podstawowych wielkości od drogi tarcia. Za zapewnienie obrotu krążka odpowiedzialny jest motoreduktor stożkowo-walcowy typu GKS09-3M VBR 100C12 wraz z silnikiem trójfazowym MHEMAXX 100-12C1 (11), o wyjściowym momencie obrotowym wynoszącym 2000 Nm (rys. 12c) i umożliwiającym obrót krążka z prędkością sięgającą do 10,25 obr/min sterowanym przy pomocy falownika typu ESMD302L4TXA. Główne parametry napędu zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Główne parametry motoreduktora

moc znamionowa P_n	2,2 kW
moment znamionowy M_n	14,5 Nm
prędkość znamionowa n_1	1445 obr/min
przełożenie i	140,921
moment wyjściowy M_w	1946 Nm
prędkość wyjściowa n_2	10,31 obr/min

Pomiar zużycia realizowany jest poprzez pomiar zmiany masy krążka na wadze laboratoryjnej. Przed i po wykonaniu próby a także na podstawie skanowania jego geometrii przy użyciu skanera optycznego (wyznaczenie zmiany objętości). Pomiar rozkładu temperatury realizowany jest przy pomocy kamery termowizyjnej (rys.13).

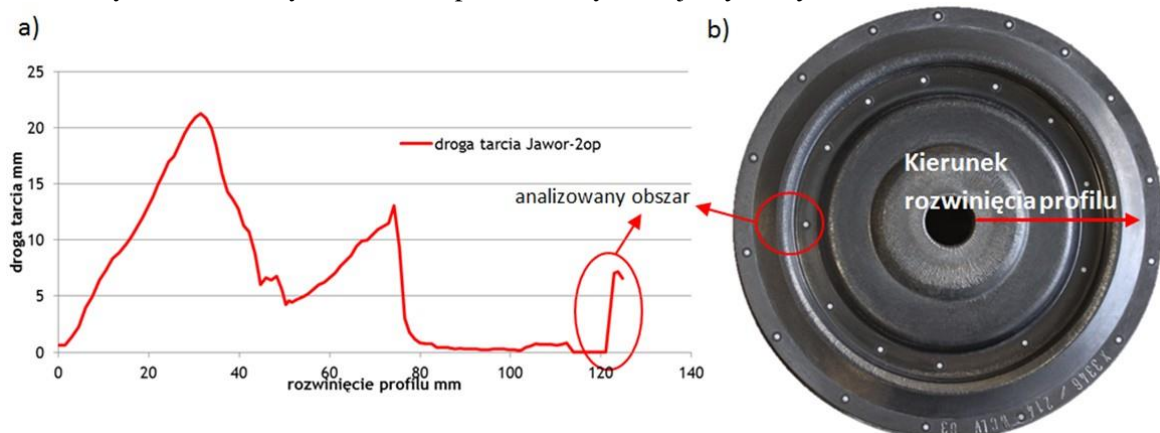


Rys. 13. Termogram z próby

Stanowisko sprzężone jest z zaawansowanym systemem pomiarowym UNITEST, który wyposażony jest w komputer CompactRio z kilkunastoma modułami i kanałami, co pozwala na podłączenie wielu czujników i urządzeń pomiarowych oraz pełne sterowanie. System pomiarowy UNITEST wyposażony jest w dwie aplikacje; pierwsza umożliwia sterowanie układem, pomiar on-line i archiwizację wyników, druga aplikacja pozwala na szerokie spektrum analizy zarejestrowanych sygnałów z czujników.

5. Wstępne badania

Dla zweryfikowania zbudowanego prototypowego stanowiska przeprowadzono wstępne badania. Polegały one na porównaniu zużycia wybranego narzędzia kuźniczego ze zużyciem powstałym na krążku podczas próby. W tym celu wybrana została matryca dolna drugiej operacji kucia na gorąco koła czołowego (rys. 14b). Na podstawie przeprowadzonego modelowania numerycznego przemysłowego procesu wyznaczono **drogę tarcia**—będącą wartością przemieszczenia odkształcanego materiału względem wybranego punktu na powierzchni matrycy. Na profilu analizowanej matrycy wytypowany został obszar na mostku, gdzie dochodzi do intensywnego zużycia ściernego narzędzia (rys. 14a), natomiast nie ma tam wpływu innych mechanizmów związanych z wysoką temperaturą materiału odkuwki. Maksymalne naciski w tym obszarze wyznaczone na podstawie symulacji wynosiły około 215 MPa.



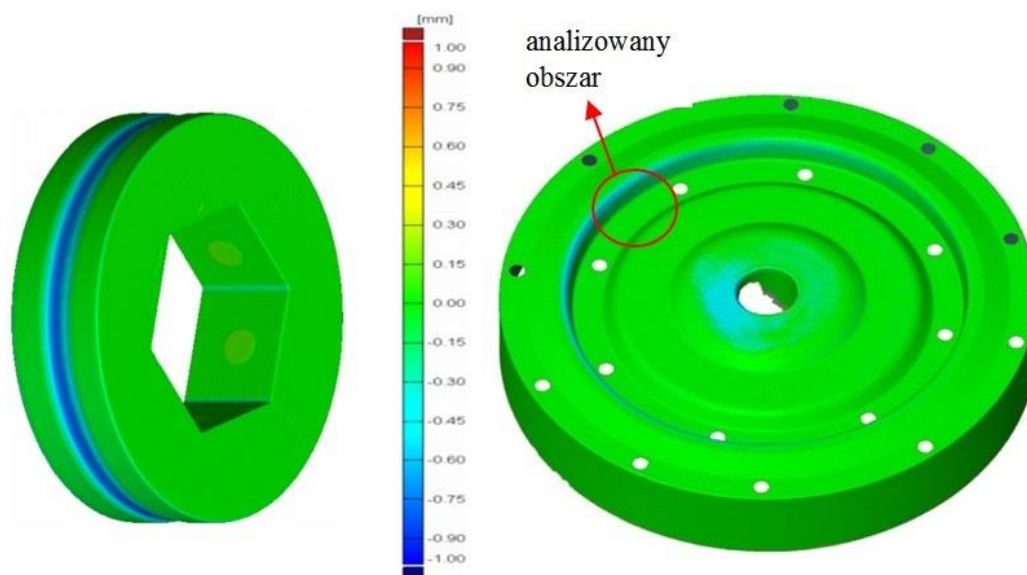
Rys.14. a) Wykres zależności drogi tarcia od rozwinięcia profilu powierzchni narzędzia wyznaczony z MES, b) zużyta matryca z zaznaczonym kierunkiem rozwinięcia profilu.

Badania eksperymentalne na opracowanym stanowisku przeprowadzono bez środka smarnego, co miało na celu zwiększenie prędkości zużycia i skrócenie czasu trwania próby. Nie zaobserwowano również znacznego wpływu czynników środowiskowych na przebieg procesów kucia. Przeciwpółka w trakcie próby laboratoryjnej była dociskana do próbki wykonanej z materiału narzędziowego (stal WCL) ze stałą siłą około 10 kN, co przy średniej wielkości pola kontaktu dawało nacisk około 220 MPa, co odpowiadało wartościom obciążeń z analizowanego obszaru matrycy. Czas próby został tak dobrany, aby całkowita droga tarcia była zbliżona drodze tarcia, jaką pokonał materiał po sumarycznej liczbie odkutych sztuk. Drogę całkowitą próby wyznaczono na podstawie średniej prędkości obrotowej 5 obr/min (1 pełny obrót wynosił około 12 s, czyli tyle ile trwa cykl kucia w warunkach przemysłowych) oraz wymiarów próbki.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie najistotniejszych parametrów z realizowanych badań oraz wyniki wyliczeń najważniejszych parametrów.

Tabela 2. Najważniejsze parametry badań

	Próbka	Matryca (wybrany obszar)
Droga tarcia dla pojedynczej odkuwki [mm]	12	7,5
Czas próby [min/ilość odkuwek]	240/1200	6,3/1900
Nacisk [MPa]	220	215
Droga całkowita [mm]	14400	14250
Wartość zużycia (mm)	0,95	0,9
Współczynnik zużycia k z modelu Archarda	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$4,99 \cdot 10^{-4}$
Współczynnik tarcia	0,48	0,35 (przyjęta w MES)



Rys. 15. Wyniki skanowania: a) krążek w eksperymencie po 240 min, b) matryca dolna w 2 operacji kucia koła po 1900 odkuwkach

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć porównywalne zużycie się krążka oraz narzędzia w wybranym obszarze, które wynosi około 1 mm (rys. 15a i 15b). Zużycie na krążku jest równomierne, inaczej niż w przypadku wkładki matrycowej. Przy czym przy teoretycznym wykonaniu tej samej ilości cykli droga tarcia i prawdopodobnie zużycie dla eksperymentu byłyby o 1/3 większe niż dla procesu przemysłowego, ze względu na brak środka smarnego w trakcie eksperymentu. Na podstawie modelu Archarda wyznaczono zbliżone wartości parametru k, pewne różnice mogą wynikać z nieco innych wartości nacisków i drogi tarcia. Natomiast współczynnik tarcia (średnia wartość) dla pary trącej na stanowisku (bez środka smarnego) został wyznaczony na podstawie pomiarów nacisku i siły od momentu obrotowego. W przemysłowym procesie kucia współczynnik tarcia będzie jeszcze inny (niż przyjęty w MES). Ze względu na duże naciski warstwa filmu smarnego będzie zrywana, choć z drugiej strony w podwyższonych temperaturach wartość współczynnik tarcia dla narzędzia i odkuwki będzie maleć. Te wszystkie różnice w warunkach (inna temperatura w kontakcie podczas eksperymentu i procesie przemysłowym oraz inna wartość współczynnik tarcia) uwzględnia parametr k wyznaczony na podstawie modelu Archarda. Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność zbudowanego stanowiska do badania zużycia ściernego przy wysokich naciskach do przeprowadzania badań laboratoryjnych materiałów używanych do produkcji wkładek matrycowych. W następnym etapie badań zostaną przeprowadzone próby przy różnych wartościach nacisków oraz wartościach drogi tarcia w celu dalszej weryfikacji oraz optymalizacji stanowiska.

6. Podsumowanie i wnioski

Opracowane i zbudowane prototypowe stanowisko pozwala na pomiary wielu niezbędnych wielkości fizycznych (tożsamy z występującymi w przemysłowych procesach kucia) w czasie rzeczywistym, co daje pełną kontrolę nad badanym procesem i powinno pozwolić na wnikliwą analizę niszczenia narzędzi kuźniczych poprzez zużycie ściernego przy wysokich naciskach.

1. Opracowany model numeryczny zbudowanego tribometru pozwolił na wyznaczenie podstawowych parametrów próby, jednakże możliwości metody elementów skończonych są niestety ograniczone. Aby było możliwe dokładne określenie niektórych czynników potrzebne są duże ilości weryfikujących badań eksperymentalnych na stanowisku. Przeprowadzone wstępne badania potwierdziły słuszność przyjętych założeń w modelu numerycznym.
2. Na chwilę obecną jest jeszcze wiele czynników oraz elementów stanowiska, które nie zostały do końca sprawdzone i zweryfikowane. Istnieje duże prawdopodobieństwo szepiania adhezyjnego próbki z przeciwpróbką, niewystarczającego nagrzewania krążka i przeciwpróbki oraz potrzeby zastosowania aktywnego chłodzenia. Zjawiska te oraz inne zostały na obecnym poziomie zaawansowania prac pominięte i zostaną określone dopiero w trakcie przeprowadzania kolejnych badań i testów.
3. Perspektywicznie planuje się stworzenie aktywnego systemu kontroli dostarczania ciepła do stanowiska, wraz z czujnikami termoparowymi pozwalającymi na pomiar temperatury w czasie rzeczywistym. Dodatkowo zostanie udoskonolony model numeryczny stanowiska, który wraz z pomiarami eksperymentalnymi pozwoli na wyznaczanie współczynników materiałowych dla wybranych modeli matematycznych.
4. Zbudowane stanowisko do badań zużycia ściernego pozwoli także na eksperymenty dotyczące badania odporności warstwy wierzchniej narzędzi kuźniczych w zależności od zastosowanych metod inżynierii powierzchni (azotowanie, wymrażanie, nałożenie warstw hybrydowych, czy innych, np. kulowanie, itp.) Pozwoli również na badanie zużycia ściernego innych par materiałów [5, 21]. Może być ono także wykorzystane do innych celów naukowych i dydaktycznych.

7. Literatura

- 1 Altan T. Cold and hot forging fundamentals and application, Ohio: ASM International, 2005.
- 2 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.
- 3 Barrau O, Boher C, Vergne C, Rezai-Aria F. Investigation of Friction and Wear Mechanism of Hot Forging Tool Steels. Karlstadt: 6th Int. Tooling Conference, 2002.
- 4 Bayer R G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing. New York: Marcel Dekker Inc., 2004.
- 5 Ciski A, Nakonieczny A, Babul T. Badanie możliwości połączenia technologii długookresowego wymrażania i kulowania stali narzędziowej do pracy na gorąco W300. *Inżynieria Powierzchni* 2009; 2: 3-9.
- 6 Daouben E, Dubois A, Dubar M, Dubar L. Effects of lubricant and lubrication parameters on friction during hot steel forging. *Int J Mater Form* 2008; 1: 1223 –1226.
- 7 Ding J. Determining Fatigue Wear Using Wear Particle Analysis Tools. *Practicing Oil Analysis* 2003; 9.
- 8 Gronostajski Z, Hawryluk M. The main aspects of precision forging. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 8(2): 39-57.
- 9 Gronostajski Z, Hawryluk M, Krawczyk J, Marciniak M. Modelowanie numeryczne zmęczenia cieplnego stali WCLV stosowanej na matryce w procesie kucia na gorąco. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 3: 129-133.
- 10 Gronostajski Z, Hawryluk M, Kuziak R, Radwanski K, Skubiszewski T, Zwierzchowski M. The equal channel angular extrusion process of multiphase high strength aluminium bronze. *Archives of Metallurgy and Materials* 2012; 4: 897-909.
- 11 Groseclose A, Changhyok C, Gonzalez-Mendez J, Yelich T, Altan T. Estimation of die stresses and wear in warm forging of steel pinion shaft. Columbus 2009. Dostępny w internecie. <https://www.forging.org/system/files/field_document/Estimation%20of%20Die%20Stresses%20and%20Wear%20Final%20Report.pdf>
- 12 Grüning A, Lebsanft M, Scholtes B. Cyclic stress-strain behavior and damage of tool steel AISI H11 under isothermal and thermal fatigue conditions. *Materials Science & Engineering* 2010; 527(7-8): 1979-1985.
- 13 Hawryluk M, Zwierzchowski M.: Analiza strukturalna matryc stosowanych do kucia na ciepło w aspekcie ich trwałości, *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 2: 31-41.
- 14 Jovicic G, Nikolic R, Zivkovic M, Milovanovic D, Jovicic N, Maksimović S, Djordjevic J. An estimation of the high-pressure pipe residual life. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2013; 13: 36-44.
- 15 Koszela W, Pawlus P, Rejwer E, Ochwat S. Possibilities of oil pockets creation by the burnishing technique. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2013; 4: 465-471.
- 16 Lee R., Jou J. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die, *Journal of Materials Processing Technology* 2003; 140: 43–48.
- 17 Niemczewska-Wójcik M, Mańkowska-Snopczyńska A, Piekoszewski W, The investigation of wear tracks with the use of noncontact measurement methods. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2013; 2: 158-167.
- 18 Paschke H, Weber M, Braeuer G, Yilkiran T, Behrens B A, Brand H. Optimized plasma nitriding processes for efficient wear reduction of forging dies. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2012; 4: 407-412.
- 19 Pociecha D, Boryczko B, Osika J, Mroczkowski M. Analysis of tube deformation process in a new pilger cold rolling process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2014; 14: 376-382

- 20 Sallit I, Richard C, Béranger G, Kircher D, Michaud H. Experimental study of wear behaviour of hot forging tool steels under dry conditions: 40CrMoV13 against C35E. Tribology Letters 2002, 12(3), 147-154.
- 21 Smolik J. Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana/powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości matryc kuzniczych. Radom 2007: WITE.
- 22 Stembalski M, Preś P, Skoczyński W. Determination of the friction coefficient as a function of sliding speed and normal pressure for steel C45 and steel 40HM. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2013; 4: 415-528.
- 23 Szczerek M. Problemy systematyzacji badań trybologicznych. Dostępny w Internecie: <
<http://www.tribologia.org/pt/150l/150ls.htm>>.
- 24 Tofil A, Tomczak J, Pater Z. Cross wedge rolling with upsetting. Archives of Metallurgy and Materials 2013; 4: 1191-1196.
- 25 Witryna internetowa: www.phoenix.com.
- 26 Williams J A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. Wear 1999: 225-229.
- 27 Yilkiran T, Behrens B A, Paschke H, Weber M, Brand H, The potential of plasma deposition techniques in the application field of forging processes. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2012; 3: 284-291.

Research possibilities of abrasive wear in conditions corresponding to the industrial processes of forging

In this paper authors present a prototype friction wear test station - TriboForge , which unlike the classic tribometers allows analysis of wear at high pressure (500 MPa), in conditions similar to those in industrial forging processes. Concept designed and built prototype station is for most accurate representation of phenomena and processes affecting the surface layer of forging tools in contact with the deformed material. The authors conducted a preliminary study for the association: tool material and the selected forgings material. Friction pairs were: a rotating disc made from hot tool steel (WCL) and pressed to a rectangular counter sample of the forged material (QS19 -20). Thanks to the special control and measuring system integrated with the wear station number of important parameters can be measured on-line (temperature distribution, sample rotation speed, force on counter specimen, sample wear, friction track and changes in the value of the friction coefficient). Associated samples worked for the predetermined time 4h at pressure (constant force of about 10 kN, which at an average field size was about 220 MPa contact pressure), with an average speed 5rot/min (1 full rotation of approximately 12s). Assuming that the key parameters describing the friction wear are friction track and pressure has been shown that the amount of wear (loss of material) depending on the cycle time is similar to the industrial process. This confirms the usefulness of the developed test station and its comprehensive analysis of forging dies wear.