

## ANALYSIS OF ABRASIVE-MECHANICAL EFFECTS OF TRIBOLOGICAL PROCESSES IN MODELLED CONDITIONS

### Summary

The article presents results of wear tests of modelled elements in friction nodes. Using heat and thermochemical treatment, the condition of surface layers in samples has been modified, and alternative properties of surface layer, characteristic for different treatments, have been arrived at. Then, the samples were put to abrasive and corrosive tests.

## ANALIZA SKUTKÓW ŚCIERNO-MECHANICZNYCH PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH W WARUNKACH MODELOWYCH

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań zużywania modelowych elementów węzłów tarcia. Na drodze obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych zmodyfikowano stan warstwy wierzchniej próbek otrzymując inne charakterystyczne dla każdej z obróbek własności warstwy wierzchniej. Następnie otrzymane próbki poddano zużyciowym testom ścierno-korozyjnym.

### 1. Wprowadzenie

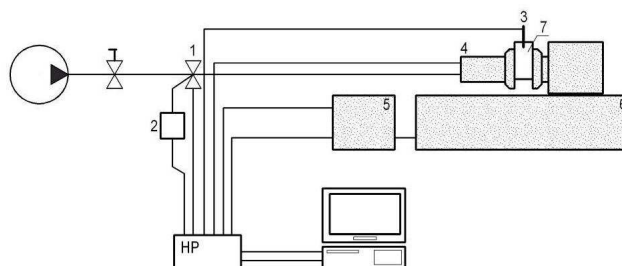
Elementy maszyn i urządzeń przemysłu spożywczego w wielu przypadkach pracują w technologicznie uwarunkowanych środowiskach agresywnych. Dlatego też materiały przeznaczone szczególnie na elementy robocze maszyn i urządzeń tego przemysłu, muszą cechować się nie tylko odpowiednią wytrzymałością, odpornością na zużywanie tarciove, ale charakteryzować się również specyficznymi własnościami warstw wierzchnich decydującymi o odporności na korozję [1]. Procesy korozyjne występujące wespół z naturalnymi wymuszeniami tribologicznymi w wielu przypadkach zmieniają istotnie mechanizmy zjawisk tribologicznych. Objawia się to zmniejszeniem trwałości elementów węzłów tarcia a w szczególności elementów roboczych narażonych na kontakt z agresywnymi substancjami. Zużycie elementów maszyn i urządzeń wskutek jednoczesnego działania dwóch składowych: zużywania ściernego i korozyjnego nie jest sumą wartości uzyskanych w dwóch oddzielnych procesach i zależy ono od wielu czynników [2-4].

Czynnikiem w znaczący sposób decydującym o intensywności przebiegu zachodzącego procesu jednoczesnego zużywania ściernego i korozyjnego jest stan wyjściowy warstwy wierzchniej, współpracujących powierzchni roboczych. Sterując świadomie własnościami warstwy wierzchniej możemy poznać wstępne efekty tych działań poprzez obserwację skutków zużyciowych w modelowych warunkach wymuszeń ścierno-korozyjnych. Tego rodzaju badania pozwalają na ustalenie wpływu poszczególnych parametrów charakteryzujących warstwę wierzchnią na przebieg zużywania się powierzchni roboczych węzłów kinematycznych oraz jednoznaczne określenie skutków tj. zużycia tribologicznego.

Celem niniejszej pracy, było poznanie relacji ilościowych między skutkami zachodzących destrukcyjnych procesów tribologicznych, a świadomie zróżnicowanymi wyjściowymi stanami technologicznymi warstw wierzchnich elementów węzłów tarcia. Stany te wymuszono na drodze zastosowania specjalnych, powierzchniowych obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych.

### 2. Metodyka badań

Badania wykonano w warunkach laboratoryjnych na specjalnie do tego celu zmodernizowanej maszynie tarciowej UMT 2168 wyprodukowanej przez firmę Join Stock Company [5]. Urządzenie to jest połączone z komputerem za pomocą multimetru firmy Helwett-Packard 34970A. Schemat sterowniczo-pomiarowy maszyny pokazano na rys. 1.



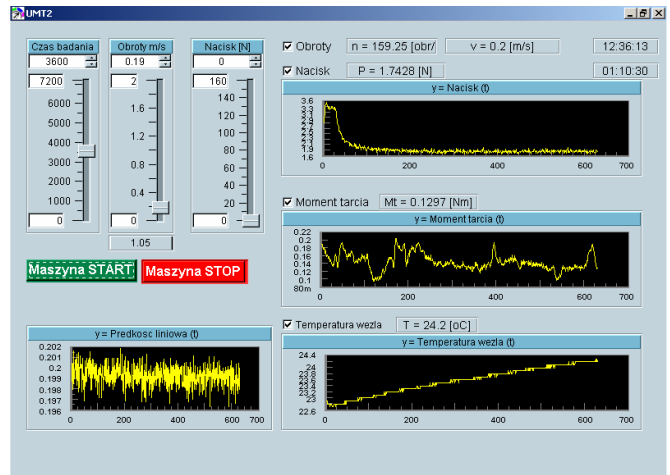
Rys. 1. Schemat sterowniczo-pomiarowy maszyny tarciowej UMT-2168: 1 – zawór pneumatyczny, 2 – przetwornik 4/20 mA, 3 – termopara, 4 – przetwornik momentu tarcia, 5 – sterowanie prędkością 0-1500 obr/min, 6 – prędnica tachometryczna, 7 – komora badawcza

Fig. 1. A control and measurement schematic of UMT-2168 friction testing machine: 1 – pneumatic valve, 2 – 4/20 mA armature, 3 – thermocouple, 4 – moment of friction converter, 5 – 0-1500 rpm generator control, 6 – tachometric generator, 7 – testing chamber

Układ zadawania siły i odczytu parametrów pracy są sterowane i odczytywane za pomocą miernika HP, współpracującego z komputerem. W celu zaprogramowania multimetru posłużono się programem napisanym w języku HP VEE [6]. Sterowanie wszystkimi parametrami eksperymentu także ich zapis na dysk twardy oraz ich bieżący odczyt odbywały się z panelu użytkownika (rys. 3). Część pomiarowa składała się z przetworników: momentu tarcia, ciśnienia wywołującego nacisk próbki, prędnicy tachometrycznej i termopary. Fotografie maszyny tarciowej przedstawiono na rys. 2. natomiast pulpit sterowniczy na rys. 3.



Rys. 2. Fotografia maszyny tarcowej UMT 2169  
Fig. 2. UMT 2169 friction wear machine



Rys. 3. Pulpit sterowniczy maszyny  
Fig. 3. Machine control panel

Jako materiał badawczy wybrano szeroko opisywaną w literaturze stal 45 (wg wycofanej normy PN-H-84019:1993). Jego odpowiednikiem według aktualnie obowiązującej normy PN-EN10083-1+A1:1999 jest stal C45E. Posiada ona strukturę ferrytyczno-perlityczną, a udział obu faz jest podobny. Należy do stali niestopowych, konstrukcyjnych wyższej jakości, ogólnego przeznaczenia. Ma zastosowanie zarówno w stanie znormalizowanym, jak i ulepszonej cieplnie oraz hartowanym powierzchniowo na części maszyn średnio obciążone i narażone na ścieranie takie jak: koła, wieńce, wały zębate, walce, wały, osie czopy, mimośrodry, niektóre narzędzia np. młoty, siekiery, klucze, a także na części do armatury i osprzęt dla kotłów lub turbin parowych pracujących w temperaturze do 450°C. Materiał ten jest także bardzo często stosowany w modelowych badaniach tribologicznych. Został on dostarczony przez producenta stali po wstępnej obróbce ciągnięcia na gorąco. Skład chemiczny, podstawowe własności mechaniczne oraz fizyczne określone przez normę dla stali 45 przedstawiono w tab. 1, 2.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem węzła kinematycznego typu pierścień-pierścień (próbka i przeciwpróbka), które współpracowały ze sobą czołowo [7]. Jeden z pierścieni (próbka) był unieruchomiony, natomiast drugi (przeciwpróbka) obracał się z ustaloną prędkością ślizgania

(n) i zmieniającą się w zależności od zastosowanego nacisku, siłą (N).

Aby uzyskać efekt przyspieszenia badań modyfikacji poddano powierzchnię roboczą próbek (czynnych) wchodzących w skład węzła tarcia poprzez dokonanie dodatkowych czterech nacięć [8]. Doprowadziło to do dostarczenia zwiększonej ilości ścierniwa w strefę kontaktu tarcowego i zintensyfikowało proces. Wymiary próbek oraz fotografie podano na rys. 4a i 4b oraz 5a i 5b.

W celu przeprowadzenia badań w środowisku agresywnym należało zaprojektować i wykonać specjalną komorę badawczą wraz z systemem doprowadzająco-odprowadzającym strumień cieczy i czynnik ścierny. Schemat komory oraz fotografię przedstawiono na rys. 5 i 6. Została ona skonstruowana z tworzyw sztucznych, tj. polichlorku winylu (PVC) oraz plexi (PMMA). Konstrukcja ta umożliwiała obserwację pracującej pary kinetycznej oraz pomiar temperatury za pomocą termopary [9].

System dostarczający medium płynne oraz ścierniwo, umożliwiał utrzymanie stabilnych warunków współpracy węzła poprzez stały dopływ medium korozyjnego oraz ścierniwa w określonej ilości w jednostce czasu. Został on wykonany z węży teflonowych, zaworów przepływowych, rozdzielczy gruszkowych, trójników, butli, lejków itp.). Schemat tego układu i fotografię przedstawiono na rys. 7 i 8.

Tab. 1. Skład chemiczny stali 45

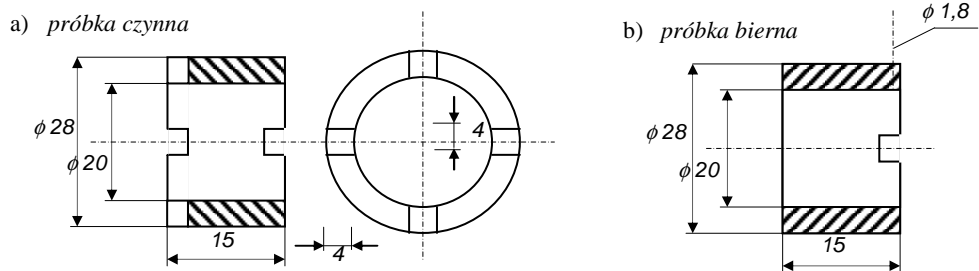
Table 1. Chemical composition of steel 45

Zawartość [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,45-0,50	0,50-0,58	0,17-0,37	≤0,04	≤0,04	≤0,30	≤0,30	≤0,10	≤0,30

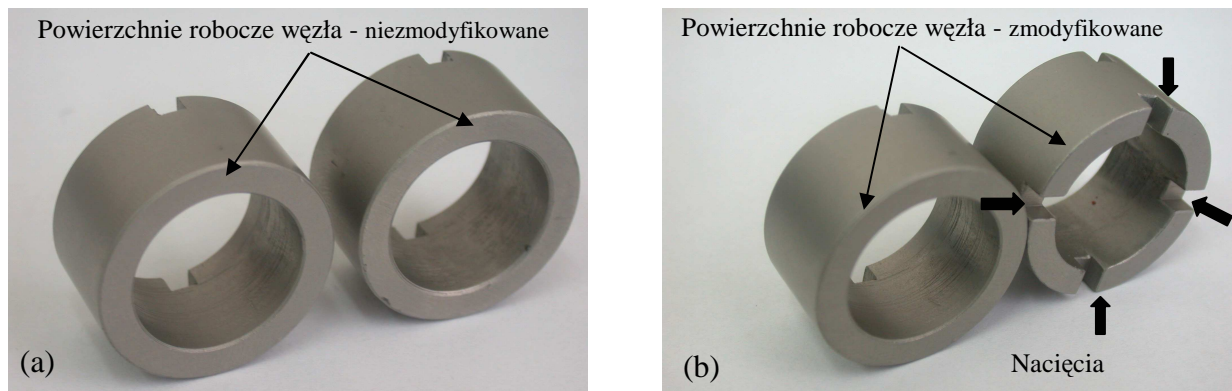
Tab. 2. Własności mechaniczne i fizyczne stali 45

Table 2. Mechanical and physical properties of steel 45

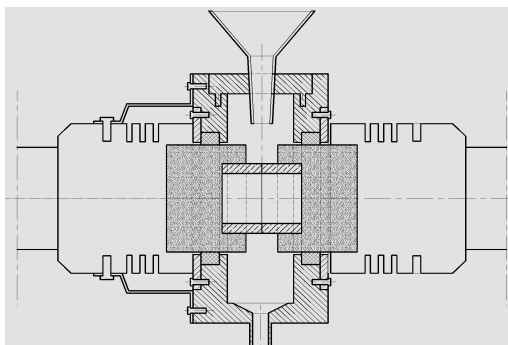
Wytrzymałość na rozciąganie	Granica plastyczności	Wydłużenie	Udarność	Twardość	Gęstość	Współczynnik przewodzenia ciepła	Moduł sprężystości
$R_m$	$R_e$	A	KU	HV	$\rho$	$\lambda$	E
MPa	MPa	%	J	HV 10	g·cm <sup>-3</sup>	W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	GPa
≥600	≥355	16	≥32	240	7,821	48,1	206



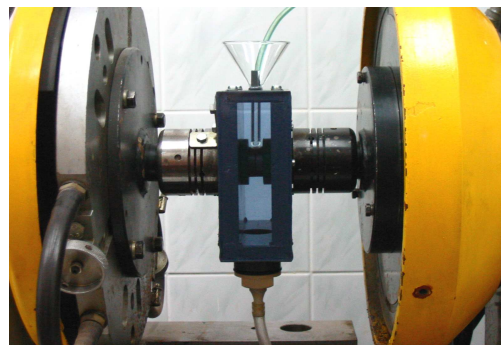
Rys. 4. Wymiary próbek: a) próbka czynna (opcja z nacięciami), b) próbka bierna (opcja bez nacięć)  
 Fig. 4. Sample dimensions: a) active sample (the option with incisions), b) passive sample (the option without incisions)



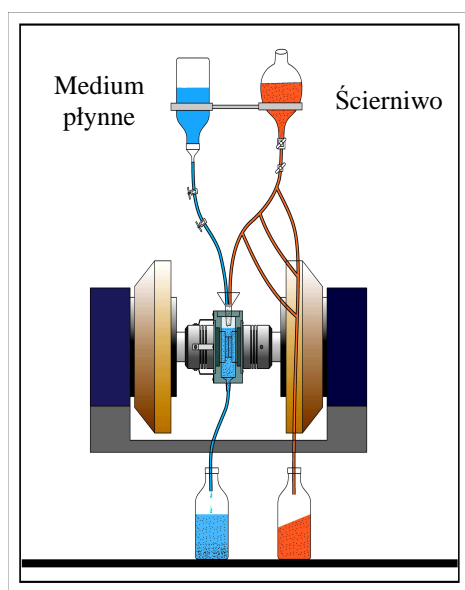
Rys. 5. Fotografie par skojarzeniowych: a) model bez nacięć, b) model z nacięciami  
 Fig. 5. Photographs of associated pairs: a) a model without incisions, b) a model with incisions



Rys. 5. Schemat komory badawczej  
 Fig. 5. Testing chamber technical drawing



Rys. 6. Fotografia komory badawczej  
 Fig. 6. Testing chamber photograph

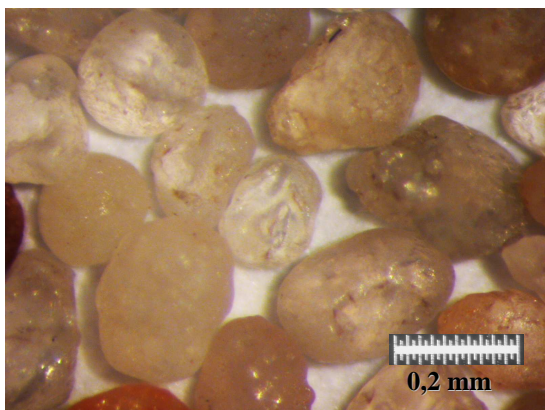


Rys. 7. Schemat układu dostarczającego medium  
 Fig. 7. Technical drawing of material supply system



Rys. 8. Fotografia układu dostarczającego medium  
 Fig. 8. A photograph of material supply system

Węzeł tarcia zanurzony, którą podawano do układu w sposób ciągły, zapewniając tym samym stałą temperaturę współpracy węzła. Jako ścierniwa użyto piasku krzemowego o frakcji ziarna 0,2–0,3 mm i twardości  $995 \pm 10\%$  HV, a natężenie dopływu ścierniwa ustalono na poziomie  $0,5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ . Piasek dobrano tak, aby kształt jego ziaren, stopień ich obtoczenia, wymiary, skład oraz twardość spełniały stawiane wymagania podobieństwa do piasków glebowych (rys. 9) zgodnie z normą PN-EN 933-1:2001. Twardość piasku wynosiła ok.  $995 \pm 10\%$  HV. W celu uzyskania pożądanej frakcji oraz pozbycia się zanieczyszczeń pylistych i organicznych piasek przepłukano, po czym przeprowadzono analizę sitową według normy PN-H-04188:1997. Natężenie dopływu ścierniwa ustalono na poziomie  $0,5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  [1].



Rys. 9. Kształt i wielkość ścierniwa  
Fig. 9. Shape and size of abrasive material

Temperaturę procesu tribologicznego kontrolowano za pomocą termopary umieszczonej w pobliżu strefy kontaktu tarcowego i utrzymywano na stałym poziomie ( $23^\circ\text{C} \pm 3$ ) poprzez regulację dopływu cieczy dla wszystkich wariantów eksperymentu. Czas trwania procesu destrukcyjnego dla każdej pary kinematycznej wynosił 3600 sekund. Szczegółowe dane dotyczące warunków współpracy badanego węzła zawiera tab. 3.

Powierzchnie robocze próbek i przeciwpróbek zostały obrobione przez szlifowanie na ściernicy, przez co uzyskano porównywalne parametry chropowatości wyjściowe dla wszystkich powierzchni współpracujących próbek i przeciwpróbek.

W trakcie badań rejestrowano moment tarcia, siłę docisku, prędkość obrotową, prędkość obwodową oraz temperaturę w odległości 1mm od powierzchni tarcia próbki biernej. Bieżący pomiar temperatury przebiegu procesu umożliwiał jego stabilizację poprzez zmianę prędkości przepływu strumienia cieczy chłodzącej, którą w przypadku badań

korozyjnych był 10% roztwór kwasu siarkowego, natomiast dla potrzeb badań ściernych i mechanicznych używano wody destylowanej.

Ciągły pomiar momentu tarcia wykorzystywany był do oceny jakości przebiegu procesu. Stabilny moment tarcia kwalifikował w pojedynczym cyklu pomiarowym taką realizację do dalszej analizy. Bieżąca kontrola jakości przebiegów eksperymentalnych (prędkości obwodowej, temperatury, momentu tarcia) umożliwiała przyjęcie założenia, iż wyniki uzyskane są powtarzalne, a tym samym i wiarygodne.

W celu usunięcia z badanych próbek wszelkich zanieczyszczeń tj. tłuszcz, pot, kurz, produkty zużycia itp., wszystkie badane próbki były poddawane czyszczeniu w myjce ultradźwiękowej w specjalnie do tego celu przeznaczonym płynie Eskapon E5060. Następnie je osuszano i przechowywano w eksykatorze. Taką samą procedurę stosowano przed i po przeprowadzeniu testów zużyciowych. Dla właściwej oceny błędów pomiarów eksperymenty prowadzone w tych samych warunkach wymuszeń były powtarzane co najmniej pięciokrotnie.

Pomiaru wartości zużycia dokonywano na wadze analitycznej z elektronicznym odczytem firmy Sartorius model BP 221S, która umożliwiała pomiar z dokładnością odczytu do  $0,0001 \text{ g}$ , błąd pomiarowy dla tego urządzenia wynosi  $d = 0,1 \text{ mg}$ .

W celu zabezpieczenia przed korozją powierzchni nie biorących bezpośrednio udziału w procesie tarcia, tym samym uniemożliwiając im zużywanie korozyjne zostały one pokryte powłoką ochronną. Do tego celu użyto wosku pszczelego. Posiadał on dużą plastyczność, nie wchodził w reakcję z podłożem, równomiernie pokrywał powierzchnię tworząc cienką warstewkę, którą pod wpływem ultradźwięków można było z powodzeniem całkowicie usunąć, a przede wszystkim zabezpieczał powłoką powierzchnię przed działaniem medium korozyjnego.

Próbki do badań poddano różnym obróbkom cieplnym i cieplno-chemicznym, szczegółowe dane przedstawiono w tab. 4. W wyniku zastosowania każdej z obróbek uzyskano odmienną od materiału wyjściowego strukturę warstwy wierzchniej oraz zróżnicowane jej własności. Otrzymane warstwy wierzchnie charakteryzują różną odpornością na zużywanie w zależności od jego rodzaju i intensywności.

Wszystkie wybrane obróbki cieplne (normalizowanie, hartowanie z odpuszczaniem wysokim, hartowanie z odpuszczaniem niskim) zwiększające twardość i inne własności mechaniczne powinny wpłynąć na zwiększenie odporności na zużywanie mechaniczne i ściernie.

W przypadku obróbek cieplno-chemicznych (azotowanie, chromowanie), własności powstałych warstw dyfuzyjnych winny wpłynąć na zwiększenie odporności na zużywanie korozyjne.

Tab. 3. Założone wartości parametrów wejściowych  
Table 3. Assumed values of input parameters

Lp.	Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
1.	Siła docisku	$P$	160	[N]
2.	Prędkość obwodowa	$v$	0,2	[m/s]
3.	Stężenie medium korozyjnego	$m$	10%	$\text{H}_2\text{SO}_4$
4.	Frakcja ścierniwa (piasku)	$D$	0,2-0,3	[mm]
5.	Natężenie dopływu ścierniwa	$Q$	0,2	$[\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$
6.	Temperatura węzła tarcia	$T$	$23 \pm 2$	[ $^\circ\text{C}$ ]

Tab. 4. Zastosowane warianty obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych  
 Table 4. The used options of heat and thermochemical treatment

Lp.	Wariant obróbki	Parametry obróbek zasadniczych			Obróbka dodatkowa
		Temp. T <sub>o</sub> [°C]	Czas t <sub>o</sub> [h]	Chłodzenie /Ośrodek	
1.	Normalizowanie	840	1,2	na powietrzu	-
2.	Hartowanie płomieniowe + odpuszczanie wysokie	880 580	7 min. 1	w wodzie na powietrzu	-
3.	Hartowanie płomieniowe + odpuszczanie niskie	880 170	7 min. 1,5	w wodzie na powietrzu	-
4.	Azotowanie jonizacyjne	530	5	atmosfera zjonizowanego azotu	normalizowanie przed azotowaniem; w temperaturze 840°C, chłodzenie na powietrzu
5.	Chromowanie dyfuzyjne	1000- 1050	4	proszek chromujący	utwardzanie cieplne po chromowaniu; hartowanie 850 °C odpuszczanie 160 °C (w oleju) przez 2h

Tab. 5. Warianty metodyczne badań pierwiastkowych  
 Table 5. Methodological options of elementary tests

Eksperyment	Wymuszenia – czynnik			Model
	mechaniczny	ścierny	korozyjny	
I	+	-	-	$I_I = I_M$
II	+	+	-	$I_{II} = I_M + I_S$
III	-	-	+	$I_{III} = I_K$
IV	+	-	+	$I_{IV} = I_M + I_K$
V	+	+	+	$I_V = I_M + I_K + I_S$
+ czynnik występujący w danym doświadczeniu - czynnik niewystępujący w danym doświadczeniu				

Badania prowadzono dla pięciu wariantów obróbek cieplnych i cieplno-chemicznych oraz materiału wyjściowego stali 45. Podzielono je na pięć etapów w zależności od zastosowanych wymuszeń tribologicznych. W pierwszym zużycie było rezultatem tylko zużywania mechanicznego (bez udziału ścierniwa), czynnikiem smarującym i odprowadzającym ciepło z węzła była woda destylowana. W drugim do węzła tarcia jako dodatkowy czynnik ścierny wprowadzono ścierniwo, przez co uzyskano efekt zużywania ścierno-mechanicznego. Wariant trzeci to wymuszenia o charakterze tylko korozyjnym, natomiast w wariant czwarty oprócz wymuszeń korozyjnych uwzględniał także wymuszenia mechaniczne. Ostatni piąty wariant badań był jednoczesnym połączeniem wszystkich trzech oddziaływań mechanicznych, ściernych i korozyjnych. Opisane wyżej warianty metodyczne przedstawiono w tab. 5.

Założono że współpracować ze sobą będą jednoimienne pary przyjętych wariantów obróbek dla każdego rozpatrywanego wariantu obróbek technologicznej warstwy wierzchniej.

### 3. Wyniki badań zużycia

Zbiorczą prezentację uzyskanych wartości zużycia dla wszystkich rozpatrywanych obróbek i wszystkich metodycznych wariantów eksperymentu przedstawiono w tab. 6. Natomiast na rys. od 10 do 15 pokazano w sposób graficzny wartości zużycia osobno dla każdego z przeprowadzonych eksperymentów. Otrzymane wyniki pogrupowano na trzy kategorie według następującej kolejności: I grupa to

materiał wyjściowy, czyli stal 45, druga grupa to zastosowane warianty obróbek cieplnych, natomiast w grupie III znalazły wyniki zużycia dla próbek obrobionych cieplno-chemicznie.

Rezultaty zużycia w warunkach wymuszeń mechanicznych dla poszczególnych wariantów obróbek wskazują na ich wyraźne zróżnicowanie (rys. 10). Najbardziej odporna na zużycie w tych warunkach okazała się warstwa, jaką uzyskano w wyniku hartowania i odpuszczania niskiego (najmniejsze zużycie).

Na podobnym poziomie kształtują się wartości zużycia dla warstwy azotowanej oraz normalizowanej. Największe zużycie uzyskano dla warstwy hartowanej i odpuszczanej wysoko.

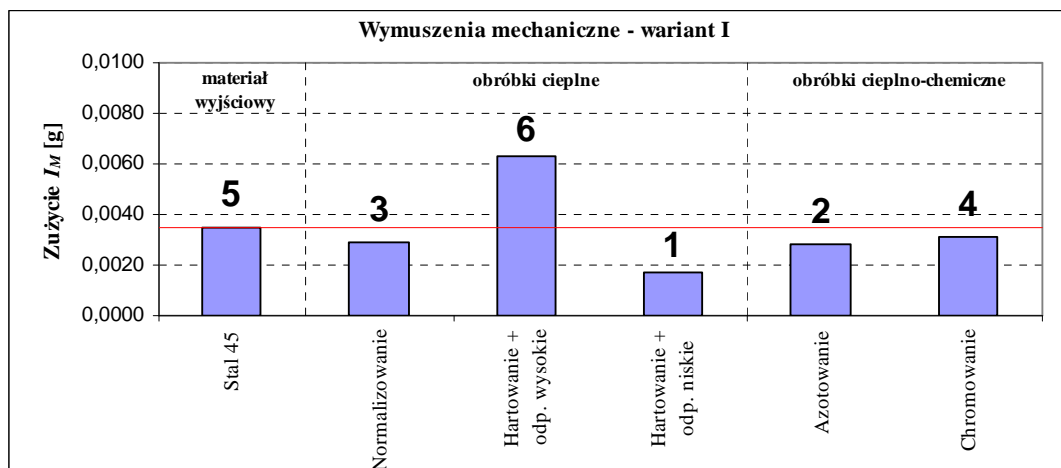
Zużycie tej warstwy okazało się większe od rezultatu uzyskanego dla materiału wyjściowego, czyli stali 45. Ten rezultat świadczy o tym, że w wyniku zastosowania wspomnianej obróbki intensywność procesu zużywania mechanicznego wzrosła.

Eksperyment następny (rys. 11) to realizacja drugiego wariantu metodycznego. Zużywanie spowodowane było wymuszeniami mechanicznymi i ściernymi. Syntetyczne wyniki zawarto w tab. 7, a rys. 11 przedstawia obraz graficzny uzyskanych rezultatów ilościowych.

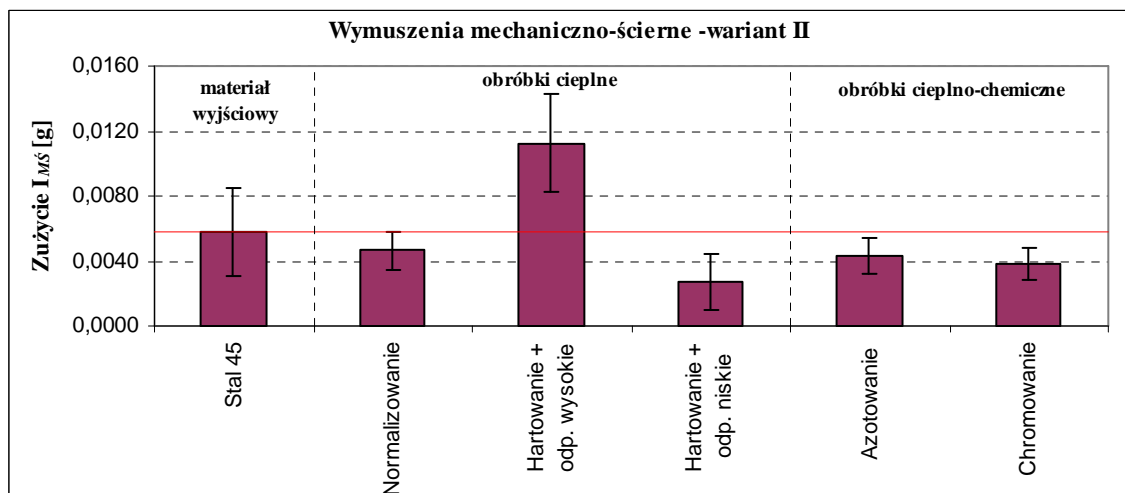
Szczegółowa analiza danych liczbowych uwiarygodnionych na rys. 11 prowadzi do wniosku, że jednoczesne oddziaływanie wymuszeń mechanicznych i ściernych tylko w przypadku warstwy hartowanej i odpuszczanej wysoko prowadzi do większego zużycia niż ma to miejsce w przypadku odniesieniowym, tj. dla próbek ze stali 45.

Tab. 6. Zestawienie wyników badań zużycia próbek wszystkich rozpatrywanych wariantów eksperymentu [g]  
 Table 6. Presentation of test results of wear of samples in all analyzed options of the experiment [g]

Rodzaj wymuszeń tribologicznych	Mechaniczne	Mechaniczno-ściernie	Korozyjne	Mechaniczno-korozyjne	Mechaniczno-ścierno-korozyjne
Wariant badawczy	I	II	III	IV	V
Stal 45	0,0035	0,0058	0,0014	0,0086	0,0138
Normalizowanie	0,0029	0,0046	0,0068	0,0185	0,0254
Hartowanie + odp. wysokie	0,0063	0,0113	0,0010	0,0150	0,0213
Hartowanie + odp. niskie	0,0017	0,0027	0,0028	0,0116	0,0167
Azotowanie	0,0028	0,0043	0,0058	0,0106	0,0210
Chromowanie	0,0031	0,0038	0,0007	0,0046	0,0057



Rys. 10. Wartości zużycia w warunkach wymuszeń mechanicznych (bez oddziaływania czynników ściernych i korozyjnych)  
 Fig. 10. Wear values in the conditions of mechanical forcing (no action from abrasive and corrosive agents)



Rys. 11. Wartości zużycia w zmiennych warunkach wymuszeń mechanicznych i ściernych (bez oddziaływania czynników ściernych i korozyjnych) wraz z 90% półprzedziałami ufności

Fig. 11. Wear values in the changeable conditions of mechanical and abrasive forcing (no action from abrasive and corrosive agents) with 90 % confidence semi-intervals

Porównując wartości zużycia warstw wierzchnich z wariantu I, gdzie występowały tylko wymuszenia mechaniczne z wariantem II, w którym dodatkowo występował czynnik ścierny, można zauważyć:

- 1) bezwzględny wzrost wartości zużycia dla wariantu II,
- 2) wartości zużycia w kolejności wzrastającej kształtują się podobnie jak dla wariantu I z wyjątkiem warstwy chro-

mowanej.

W przypadku warstwy chromowanej i w nieco mniejszym stopniu hartowanej i odpuszczanej wysoko nastąpił tylko nieznaczny wzrost zużycia spowodowany oddziaływaniami ściernymi.

Eksperyment następny (wariant badawczy III) to badania tylko z udziałem czynnika korozyjnego (bez wymuszeń

mechanicznych i ściernych). Wyniki przedstawiono w tab. 7 oraz na rys. 12.

Otrzymane wyniki wskazują na bardzo duże zróżnicowanie odporności na ten rodzaj wymuszeń korozyjnych warstw wierzchnich próbek dla poszczególnych wariantów obróbek powierzchniowych. Najmniejszą wartość zużycia korozyjnego odnotowano dla warstwy chromowanej. Jest ona prawie dziesięciokrotnie mniejsza od największej otrzymanej wartości, jaką uzyskano dla warstwy normalizowanej. Bardzo małą wartością zużycia wykazały się też warstwy hartowane i odpuszczane wysoko oraz stal 45 (niepoddana żadnej obróbce). Małą odporność na wymuszenie korozyjne wykazały nie tylko warstwy normalizowane, ale i azotowane.

Eksperyment IV zgodnie z oznaczeniami zawartymi w tab. 10, to badania przy jednoczesnym udziale wymuszeń mechanicznych (siłowo-kinetycznych) oraz czynnika korozyjnego, bez udziału czynnika ściernego. Wyniki zamieszczono w tab. 10 oraz na rys. 13.

Uzyskane z badań wyniki wskazują na fakt wystąpienia współdziałania wymuszeń mechanicznych z oddziaływaniami czynnika agresywnego. Największe zużycie od-

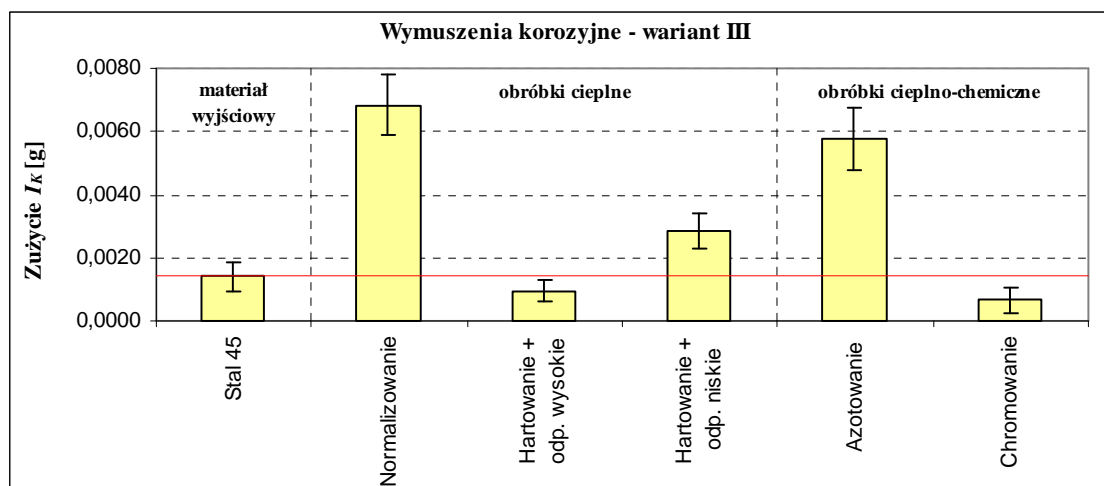
notowano dla warstwy normalizowanej oraz hartowanej i odpuszczanej wysoko.

Warstwa chromowana w rozpatrywanych warunkach wykazała się największą odpornością na zużywanie. Wartość zużycia dla tej warstwy jest dwukrotnie mniejsza od zużycia warstwy wierzchniej stali 45.

Ostatni rozpatrywany wariant metodyczny V, to eksperyment, w którym wystąpiły jednocześnie wszystkie rozpatrywane czynniki wymuszające. Tak więc, zużycie było efektem jednoczesnego występowania oddziaływań mechanicznych, ściernych i korozyjnych. Wyniki zaprezentowano w tab. 7 oraz na rys. 14.

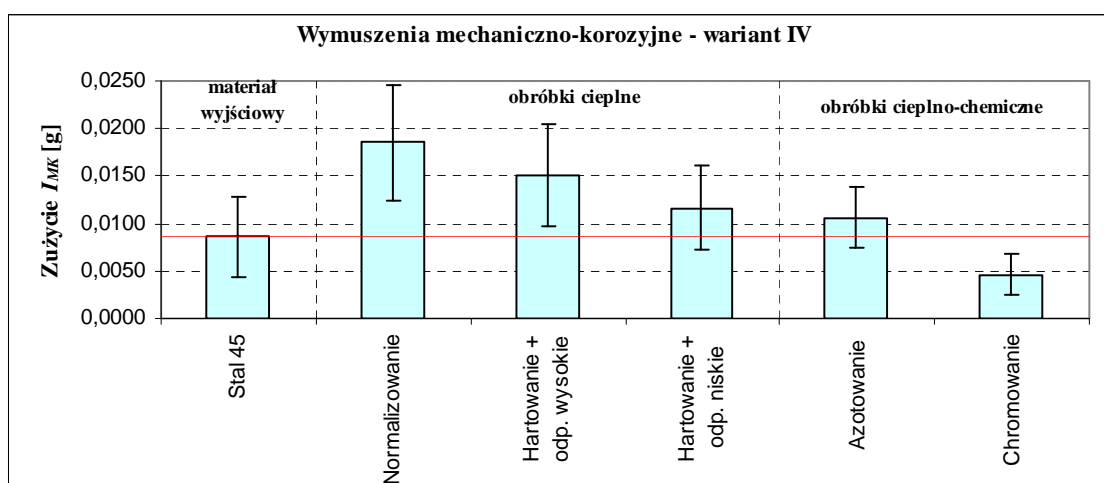
Zaprezentowane wyniki jednoznacznie wskazują, że uzyskane wartości zużycia, są dla wszystkich rozpatrywanych wariantów obróbek największe z dotychczas otrzymanych w innych wariantach badań.

Najmniejsze zużycie w tym przypadku zanotowano dla warstwy chromowanej, a największe dla warstwy normalizowanej. Na rys. 14 numery świadczą o odporności na zużywanie (1 – największa odporność, 6 – najmniejsza odporność na zużywanie) w złożonych warunkach wymuszeń.



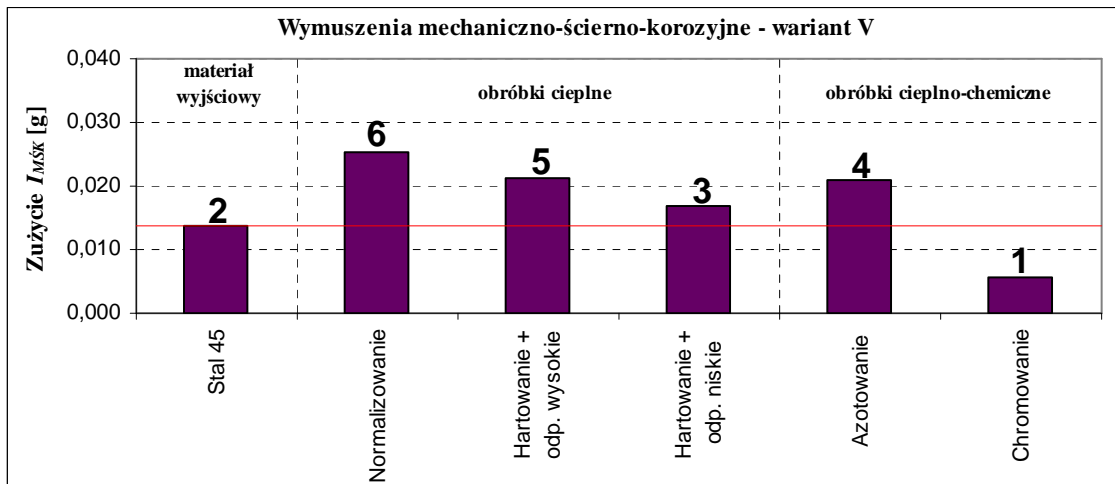
Rys. 12. Wartości zużycia w warunkach wymuszeń korozyjnych (bez oddziaływania czynników mechanicznych i ściernych) wraz z 90% półprzedziałami ufności

Fig. 12. Wear values in the conditions of corrosive forcing (no action from mechanical and abrasive agents) with 90% confidence semi-intervals

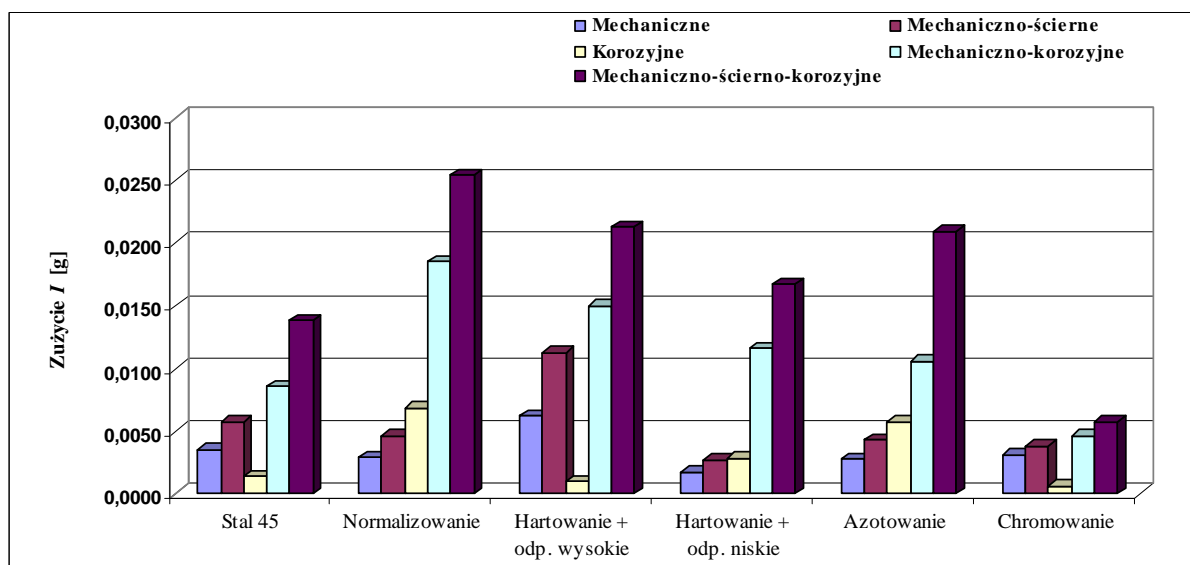


Rys. 13. Wartości zużycia w warunkach wymuszeń mechanicznych i korozyjnych (bez oddziaływania czynników ściernych) wraz z 90% półprzedziałami ufności

Fig. 13. Wear values in the conditions of mechanical and corrosive forcing (no action from abrasive agents) with 90% confidence semi-intervals



Rys. 14. Wartości zużycia w warunkach wymuszeń mechanicznych, ściernych i korozyjnych  
 Fig. 14. Wear values in the conditions of mechanical, abrasive, and corrosive forcing with 90 % confidence semi-intervals



Rys. 15. Zbiorcza prezentacja wyników zużycia uzyskanych dla wszystkich wariantów wymuszeń  
 Fig. 15. Collective presentation of wear results for all forcing options

W tab. 6 przedstawiono zbiorczą prezentację uzyskanych wartości zużycia dla wszystkich rozpatrywanych obróbek i wszystkich wariantów eksperymentu. Zbiorcza prezentacja graficzna została umieszczona na rys. 15. Wynika z niej jasno, iż modyfikacja stanu warstwy wierzchniej próbek pracujących w modelowym węźle tarcia znacząco wpływa na zróżnicowanie wyników zużycia uzyskanych w rozpatrywanych warunkach wymuszeń tribologicznych. W zależności od zastosowanych warunków wymuszeń warstwy te wykazywały różną odporność na zużycie.

#### 4. Podsumowanie

Czynnikiem w znaczący sposób decydującym o intensywności przebiegu zachodzącego procesu jednoczesnego zużywania tribologicznego i korozyjnego jest stan wyjściowy warstwy wierzchniej współpracujących elementów węzłów kinematyczno-ruchowych. Skutkami pośrednimi tego procesu są obserwowane zmiany trwałości i niezawodności nie tylko węzłów tarcia i ich elementów, ale i całych systemów, w których pracują, tj. maszyn i urządzeń.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy występowaniu tylko wymuszeń mechanicznych, bądź mechaniczno-ściernych, najmniejszy ubytek zanotowano dla warstwy hartowanej i odpuszczanej wysoko. Dobrą odpornością wykazały się też warstwy azotowana i chromowana. Gdy o ubytku masy decyduje tylko medium korozyjne, najlepszą odporność wykazała warstwa chromowana oraz hartowana i odpuszczana wysoko. Dla wariantów wymuszeń mechaniczno-korozyjnego oraz mechaniczno-ścierno-korozyjnego zdecydowanie najlepszą odporność wykazała warstwa chromowana.

Z przeprowadzonej analizy wynika również, iż efekt zużyciowy spowodowany współdziałaniem wymuszeń mechanicznych, ściernych, korozyjnych oraz łącznych ścierno-korozyjnych nie jest prostą sumą wartości zużycia będących skutkami wymuszeń występujących samodzielnie. Zarówno zmiana wymuszeń ściernych, korozyjnych, jak też ich łączne oddziaływanie, powodują zmianę intensywności zużywania. Jest to zarazem potwierdzenie występowania w złożonych procesach oddziaływań tarciovych (w tym tarciovych-korozyjnych) współdziałania o charak-



terze synergicznym (wzmacniającym) intensyfikującym procesy zużywania.

## 5. Literatura

- [1] Selech J., Ocena wpływu stanu warstwy wierzchniej materiału na składowe procesy zużycia ścierno – korozyjnego, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn roboczych i Transportu 2005.
- [2] Watson S.W., Friedersdorf F.J., Madsen B.W., Cramar S.D.: Methods of measuring wear – corrosion synergism, *Wear*, 181 – 183 (1995) 476–484.
- [3] Noël R.E.J., Ball A.: On the synergistic effects of abrasion and corrosion during wear, *Wear*, 87 (1983) 351–361.
- [4] Batchelor A.W., Stachowiak G.W.: Predicting synergism between corrosion and abrasive wear, *Wear*, 123 (1988) 281–291.
- [5] Join Stock Company, 2168 YMT Materials Friction Tester <http://www.tochpribor.ivanovo.ru/English/2168umt.htm>
- [6] Helsel R. Visual Programming with HP VEE, Prentice Hall PTR, New Jersey 1998.
- [7] Selech J., Nadolny K., Analiza skutków ścierno-mechanicznych procesów tribologicznych w warunkach modelowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport*, 2006 nr 60, s. 139-146.
- [8] Venkatsen K., Subramanian C., Summerville E.: Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures. *Wear* 203-204, 1997, p. 129-138.
- [9] Nadolny K., Selech J., The influence of modification of surface shape of mating working elements of friction connection on tribological characteristics, *Acta Mechanica Slovaca*, 2004, 3-B s. 129–138.