

THE VALUATION OF WEAR CONSTITUENTS OF TRIBOLOGICAL PROCESSES IN ABRASIVE CORROSION MEDIUM

Summary

The paper presents results of total wear constituents 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 wear tests.

OCENA SKŁADOWYCH ZUŻYCIA PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH W ŚRODOWISKU ŚCIERNO-KOROZYJNYM

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań dotyczące składowych zużycia całkowitego przeprowadzonych w warunkach modelowych. Na drodze obróbek cieplnych i ciepłno-chemicznych zmodyfikowano stan warstwy wierzchniej próbek otrzymując inne charakterystyczne dla każdej z obróbek własności warstwy wierzchniej. Następnie otrzymane próbki poddano użytkowym testom ścierno-korozyjnym i oszacowano składowe zużycia całkowitego.

1. Wprowadzenie

Wielu badaczy prowadziło prace na temat synergizmu pomiędzy zużywaniem i korozją. Połączone zużywanie ścierno-korozyjne zwane też tribokorozją jest procesem tribologicznym powstającym z równoczesnego ścierania się metalu wskutek tarcia oraz chemicznego lub elektrochemicznego utleniania. Wielkości zużycia w każdym z przypadków są ściśle od siebie uzależnione i bardzo trudno jest je określić, ponieważ zużycie całkowite nie jest sumą zużycia korozyjnego i ściernego mierzonych w oddzielnych doświadczeniach [1].

W wielu przypadkach korozja jest przyspieszana poprzez zużycie mechaniczne lub mechaniczno-ścierno i odwrotnie, zużycie mechaniczne czy mechaniczno-ścierno może być przyspieszane lub opóźniane poprzez korozję. Jest wiele czynników, które mogą być odpowiedzialne za wzajemne relacje w mechanicznych i chemicznych wielkościach zużycia systemu tribologicznego [2]. Na przykład lokalne przetarcie pasywnej powłoki prowadzi do przyspieszonego zużycia korozyjnego powodowanego szybkim rozkładem lokalnym warstwy niepasywnej. Twarde cząsteczki tlenków formowanych przez korozję mogą także prowadzić do przyspieszenia zużycia metali poprzez zużycie mechaniczne lub ścierno-mechaniczne. Z kolei plastyczne deformacje warstwy wierzchniej trącego metalu często doprowadzają do przemieszczania się materiału na drugie ciało (metal) w konsekwencji prowadząc do zmniejszenia tempa zużycia przyspieszanego korozją.

W warunkach rzeczywistych, w jakich współpracują układy tribologiczne zużywanie ścierno-korozyjno-mechaniczne jest często powiązane z luźnymi cząsteczkami ściernymi znajdującymi się pomiędzy dwoma trącymi powierzchniami [3]. W rezultacie dwie powierzchnie i znajdujące się pomiędzy nimi cząsteczki tworzą układ trzech ciał.

Celem niniejszej pracy, było ilościowe oszacowanie

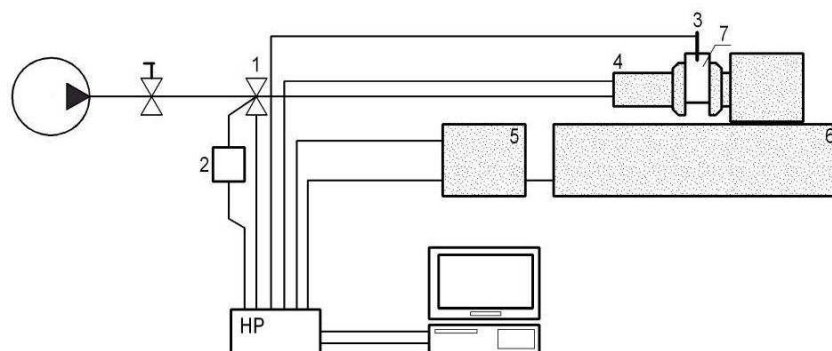
składowych zużycia w warunkach ścierno-korozyjnych w zależności od stanu wyjściowego technologicznych warstw wierzchnich. Stany te wymuszono na drodze zastosowania specjalnych, powierzchniowych obróbek cieplnych i ciepłno-chemicznych [4]. Zaprezentowano także, koncepcję modeli teoretycznych opisujących proces zużywania z podziałem na poszczególne składowe oraz przedstawiono zachodzące między nimi interakcje. Szczegółowe dane dotyczące tylko wartości zużycia zostały zaprezentowane w pracy [4].

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 przedstawiono na rys. 1.

Układ zadawania siły i odczytu parametrów pracy są sterowane i odczytywane za pomocą multimetru HP, współpracującego z komputerem. Sterowanie wszystkimi parametrami eksperymentu także ich zapis na dysk twardy oraz ich bieżący odczyt odbywały się z panelu użytkownika.

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 ulepszonym cieplnie oraz hartowanym powierzchniowo. Skład chemiczny, podstawowe własności mechaniczne oraz fizyczne określone przez normę dla stali 45 przedstawiono w tab. 1, 2.



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

Fig. 1. Control and measurement scheme of the friction machine UMT-2168: 1 - pneumatic valve, 2 - pressure transducer, 3 - thermocouple, 4 - friction moment transducer, 5 - control of generator of 0-1500 rev/min, 6 - tachogenerator, 7 - test chamber

Tab. 1. Skład chemiczny stali 45

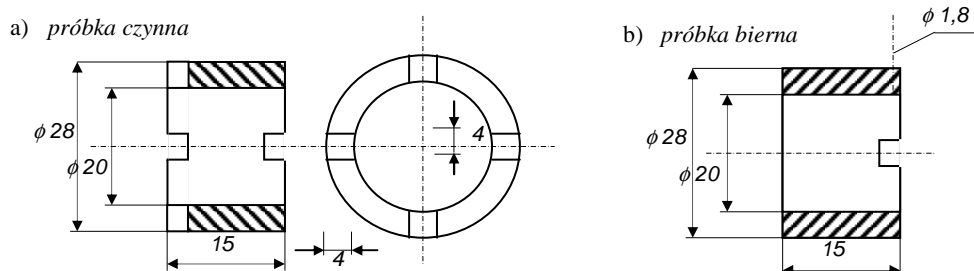
Table 1. Chemical analysis of steel 45

| 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. Właściwości 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 | ρ | λ | E |
| MPa | MPa | % | J | HV 10 | g·cm ⁻³ | W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ | GPa |
| ≥600 | ≥355 | 16 | ≥32 | 240 | 7,821 | 48,1 | 206 |

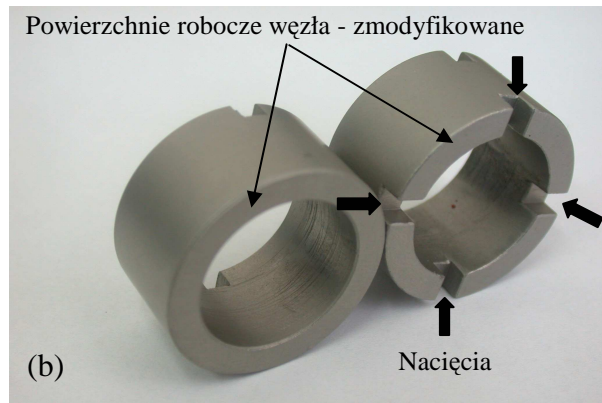
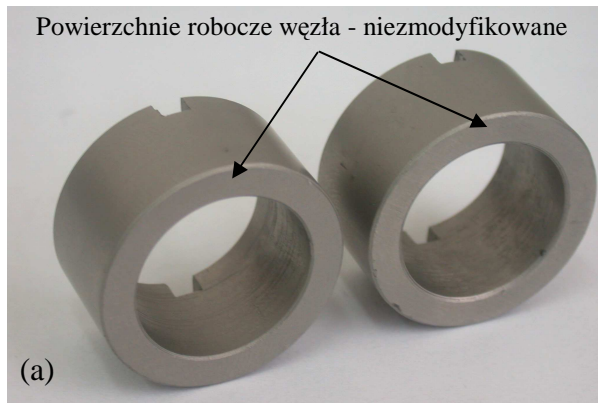


Rys. 2. Wymiary próbek: a) próbka czynna (opcja z nacięciami), b) próbka bierna (opcja bez nacięć)

Fig. 2. Sample dimensions: a) active sample (the option with incisions), b) passive sample (the option without incisions)

Badania przeprowadzono z zastosowaniem węzła kinematycznego typu pierścień-pierścień (próbka i przeciwpróbka), które współpracowały ze sobą czołowo. 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 boczną próbek (czynnych) wchodzących w skład tarcia poprzez dokonanie dodatkowych czterech nacięć [6]. Doprowadziło to do dostarczenia zwiększonej ilości ścierniwa w strefę kontaktu tarcowego i zintensyfikowało proces. Wymiary próbek oraz fotografie podano na rys. 2a i 2b oraz 3a i 3b.



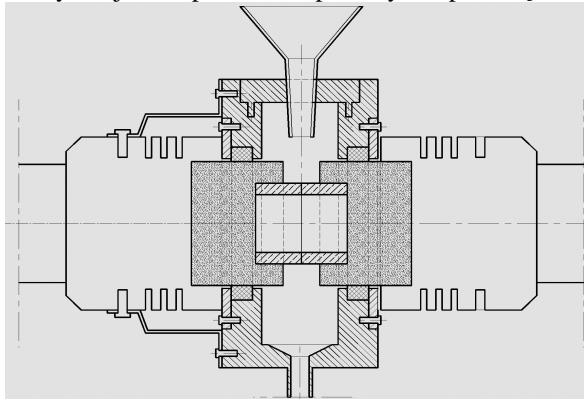
Rys. 3. Fotografie par skojarzeniowych: a) model bez nacięć, b) model z nacięciami

Fig. 3. Photographs of associated pairs: a) a model without incisions, b) a model with incisions

W celu przeprowadzenia badań w środowisku agresywnym należało zaprojektować i wykonać specjalną komorę badawczą wraz z systemem doprowadzającym strumień cieczy i czynnik ścierny. Schemat komory oraz fotografię przedstawiono na rys. 4 i 5. Konstrukcja ta umożliwia obserwację pracującej pary kinetycznej oraz pomiar temperatury za pomocą termopary

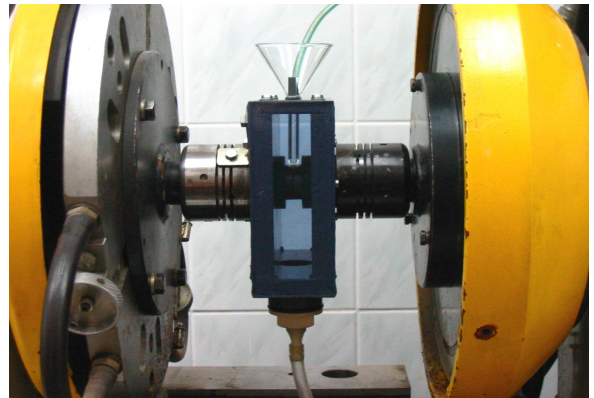
turey za pomocą termopary [7].

System dostarczający medium płynne oraz ścierniwo, umożliwił utrzymanie stabilnych warunków współpracy wężła poprzez stały dopływ medium korozyjnego oraz ścierniwa w określonej ilości w jednostce czasu. Schemat tego układu i fotografię przedstawiono na rys. 6 i 6a.



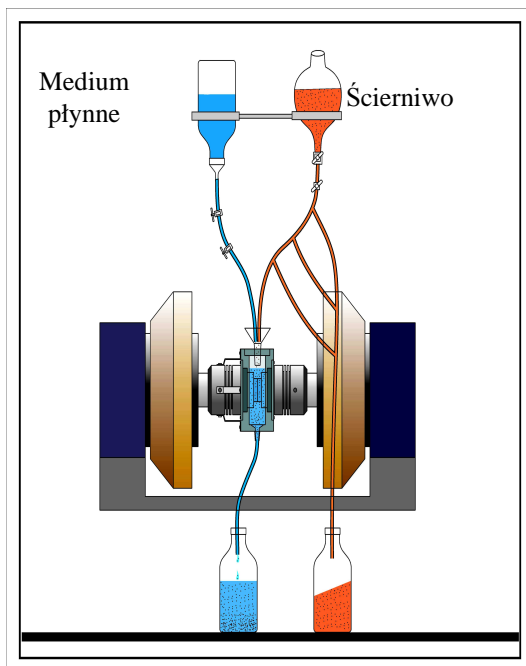
Rys. 4. Schemat komory badawczej

Fig. 4. Testing chamber technical drawing



Rys. 5. Fotografia komory badawczej

Fig. 5. Testing chamber photograph



Rys. 6. Schemat układu dostarczającego medium

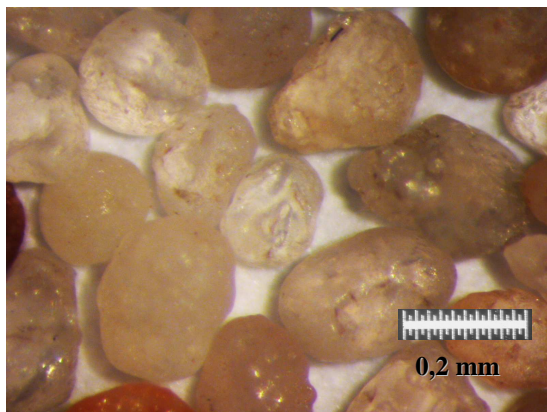
Fig. 6. Technical drawing of material supply system



Rys. 6a. Fotografia układu dostarczającego medium

Fig. 6a. A photograph of material supply system

Węzeł tarcia był zanurzony w cieczy modelowej, którą była woda destylowana. Ciecz 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. 7) zgodnie z normą PN-EN 933-1:2001. 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 $0,5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.



Rys. 7. Kształt i wielkość ścierniwa
Fig. 7. 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. 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.

Oceny wartości zużycia tribologicznego, dokonywano z dokładnością $\pm 0,0001 \text{ g}$. Rezultat końcowy był średnią sumy zużycia dla próbki i przeciwpróbki, szczegółowe dane

dotyczące warunków współpracy zawiera tab. 3.

W trakcie badań rejestrowano moment tarcia, siłę docisku, prędkość obrotową, prędkość obwodową oraz temperaturę w odległości 1 mm 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 ekcykatorze. 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 $d = 0,1 \text{ mg}$.

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 ścierne.

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% | H_2SO_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 ± 2 | [°C] |

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

| Lp. | Wariant obróbki | Parametry obróbek zasadniczych | | | Obróbka dodatkowa |
|-----|--|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | | Temp. T _o [°C] | Czas t _o [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 zużywania | Składowe zużycia |
|---|----------------------|---------|-----------|---------------------------------|---|
| | mechaniczny | ścierny | korozyjny | | |
| I | + | - | - | $I_I = I_M$ | I_M |
| II | + | + | - | $I_{II} = I_M + I_{\dot{S}}$ | $I_{\dot{S}} + I_{AM\dot{S}}$ |
| III | - | - | + | $I_{III} = I_K$ | I_K |
| IV | + | - | + | $I_{IV} = I_M + I_K$ | I_{AMK} |
| V | + | + | + | $I_V = I_M + I_K + I_{\dot{S}}$ | $I_{\Delta M\dot{S}K} + I_{\Delta\dot{S}M}$ |
| + 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 ścierniwo-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. Koncepcja oceny składowych zużycia całkowitego

Aby oszacować ilościowo składowe zużycia w zależności od stanu wyjściowego technologicznych warstw wierzchnich należało sformułować koncepcję modeli teoretycznych opisujących proces zużywania, rozróżnić po-

szczególne składowe oraz przedstawić zachodzące między nimi interakcje.

Próby takie podejmowano wielokrotnie między innymi w pracach [9-12]. W pracy P. Tyczewskiego [9] problem ten został przedstawiony najbardziej całościowo. Zaproponowano w niej zarówno jakościowe modele zużywania jak i przedstawiono charakterystyki ilościowe. W niniejszej pracy powołując się na wyżej wymienioną pracę postanowiono założyć podobną koncepcję budowy modeli zużywania ścierniwo-korozyjnego oraz występujących między nimi wzajemnych interakcji.

Przyjęto zatem, że teoretyczny model opisujący efekt zużywania można przedstawić jako sumę składowych będących skutkiem oddziaływań mechanicznych (I_M), korozyjnych (I_K), ściernych ($I_{\dot{S}}$) oraz skutków ich wzajemnych interakcji oznaczonych (I_{Δ}) (1). Pod pojęciem „teoretyczny model” należy rozumieć taki model, którego wartości wszystkich składowych z założenia dałoby się jednoznacznie wyznaczyć, w specyficznych sterowanych warunkach wymuszeń.

$$I_C^T = I_M + I_K + I_{\dot{S}} + I_{\Delta} \quad (1)$$

Składową interakcyjną I_{Δ} przedstawiono jako sumę składników będących efektem takich procesów destrukcyjnych jak: ścierniwo – mechanicznych ($I_{\Delta\dot{S}M}$), korozyjno – mechanicznych ($I_{\Delta KM}$), ścierniwo – korozyjnych ($I_{\Delta\dot{S}K}$) oraz jed-

noczesnego wpływu procesów ścierno – korozyjno – mechanicznych ($I_{\Delta SKM}$):

$$I_{\Delta} = I_{\Delta SM} + I_{\Delta KM} + I_{\Delta SK} + I_{\Delta SKM}. \quad (2)$$

Oddziaływanie ścierno–mechaniczne jest zależne od wpływu czynnika ściernego na procesy mechaniczne oraz wpływu czynnika mechanicznego na procesy ściernie:

$$I_{\Delta SM} = I'_{\Delta SM} + I'_{\Delta MS}. \quad (3)$$

Podobnie oddziaływanie korozyjno–mechaniczne jest zależne od wpływu czynnika korozyjnego na procesy mechaniczne oraz wpływu czynnika mechanicznego na procesy ściernie:

$$I_{\Delta KM} = I'_{\Delta KM} + I'_{\Delta MK}. \quad (4)$$

Również oddziaływanie ścierno–korozyjne jest zależne od wpływu czynnika ściernego na procesy korozyjne oraz wpływu czynnika korozyjnego na procesy ściernie:

$$I_{\Delta SK} = I'_{\Delta SK} + I'_{\Delta KS}. \quad (5)$$

Podstawiając sformułowane zależności do równania (1) otrzymano model w najogólniejszej postaci:

$$I_C^T = I_M + I_K + I_S + I'_{\Delta SM} + I'_{\Delta MS} + I'_{\Delta KM} + I'_{\Delta MK} + I'_{\Delta SK} + I'_{\Delta KS} + I_{\Delta SKM}. \quad (6)$$

4. Wyniki

W tab. 6 zaprezentowano wyniki oszacowań jednorodnych składowych interakcyjnych zużycia. Składowe mechaniczna i korozyjna zostały ustalone na drodze empirycznych pomiarów zużycia. Natomiast pozostałe składowe interakcyjne oszacowano na drodze obliczeniowej. Kolumna pierwsza tab. 6 pokazuje w jaki sposób wyliczono wartości poszczególnych składowych. Należy zaznaczyć, iż składowa mechaniczna I_M oraz składowa korozyjna I_K są to wartości zużycia uzyskane dla wymuszeń odpowiednio mechanicznych i korozyjnych. Natomiast składowa ścierna I_S (ze względu na brak możliwości jej bezpośredniego pomiaru) została podana wraz ze składową interakcyjną mechaniczno–ścierną $I_{\Delta MS}$. Także składowa interakcyjna $I_{\Delta MSK}$ została oszacowana na drodze obliczeniowej z zależności podanej w tab. 6.

Na rys. od 8 do 12 przedstawiono wielkość poszczególnych składowych w sposób graficzny.

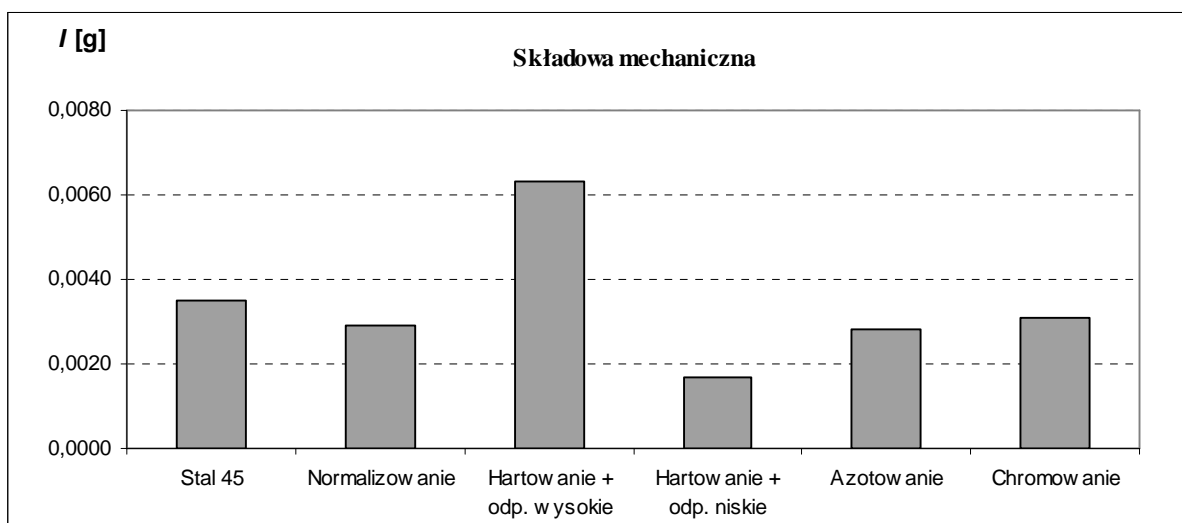
Z rys. 8 przedstawiającego wartości składowej mechanicznej I_M dla wszystkich wariantów obróbek, można odczytać, że największy udział tej składowej odnotowano dla materiału poddanego hartowaniu i odpuszczaniu wysokiemu. Ten rezultat świadczy o tym, iż w tym przypadku mamy do czynienia z najintensywniejszym zużywaniem mechanicznym.

Natomiast najmniejszą wartość zużycia uzyskano dla obróbki hartowaniem i odpuszczaniem niskim. W tym przypadku zużywanie mechaniczne przebiega z najniższą (najmniejszą) intensywnością.

Tab. 6. Zestawienie wyników oszacowań składowych zużycia i składników interakcyjnych [g]

Table 6. Presentation of test results of wear constituents and interaction components [g]

| Wariant badawczy | Składowe | Materiał wyjściowy | Normalizowanie | Hartowanie + odp. wysokie | Hartowanie + odp. niskie | Azotowanie | Chromowanie |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|------------|-------------|
| I | I_M | 0,0035 | 0,0029 | 0,0063 | 0,0017 | 0,0028 | 0,0031 |
| II - I | $I_S + I_{\Delta MS}$ | 0,0023 | 0,0017 | 0,0050 | 0,0010 | 0,0015 | 0,0007 |
| III | I_K | 0,0014 | 0,0068 | 0,0010 | 0,0028 | 0,0058 | 0,0007 |
| IV - I - III | $I_{\Delta MK}$ | 0,0037 | 0,0088 | 0,0077 | 0,0071 | 0,0020 | 0,0008 |
| V-I-III-(II-I)-(IV-I) | $I_{\Delta MSK} + I_{\Delta SM}$ | 0,0029 | 0,0052 | 0,0013 | 0,0041 | 0,0089 | 0,0004 |



Rys. 8. Wartości składowej mechanicznej
Rys. 8. Mechanical constituent values

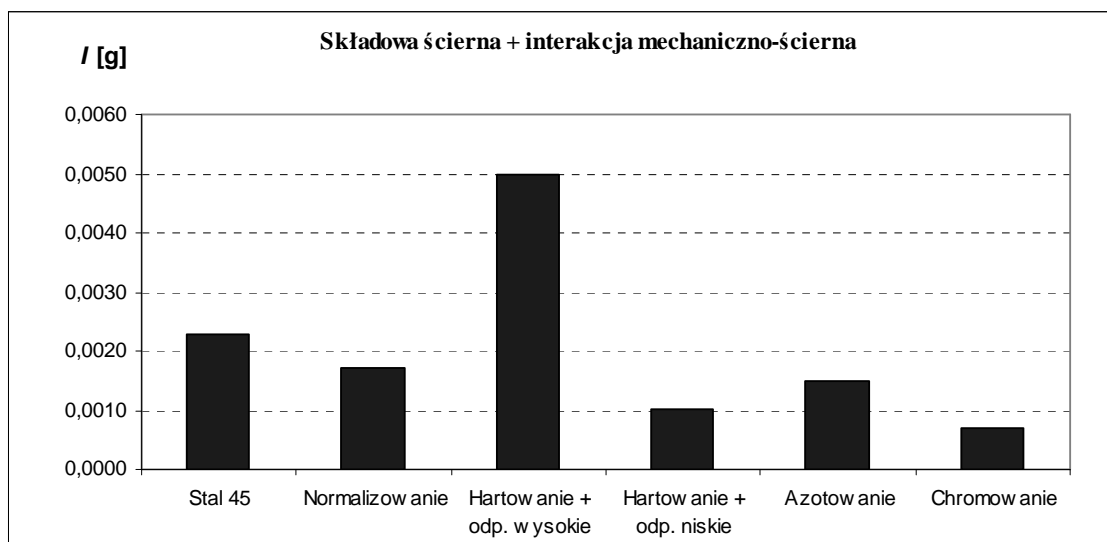
Rys. 9 prezentuje wartości składowej ścierniej i interakcji ścierno-mechanicznej. Z rysunku tego wynika, że zużywanie ścierno-mechaniczne przebiega z największą intensywnością dla warstw wierzchnich hartowanych i odpuszczanych wysoko. Najmniejszą wartość zużycia, inaczej niż dla wymuszeń mechanicznych, otrzymano dla próbek chromowanych oraz hartowanych i odpuszczanych nisko. Wiązać się to może z dużą twardością powierzchni tych próbek, co potwierdza znane dotychczas fakty, iż w przypadku materiałów twardszych niż ścierniwo, wpływ tego ostatniego na zużycie jest mały. Można zatem określić te warstwy wierzchnie jako warstwy o dobrej odporności na zużywanie ściernie.

Największą odpornością na zużywanie korozyjne (rys. 10) wykazała się warstwa chromowana, niewiele mniejszą odporność na ten rodzaj zużycia posiada warstwa hartowana i odpuszczana wysoko oraz materiał wyjściowy (odniesieniowy), czyli stal 45.

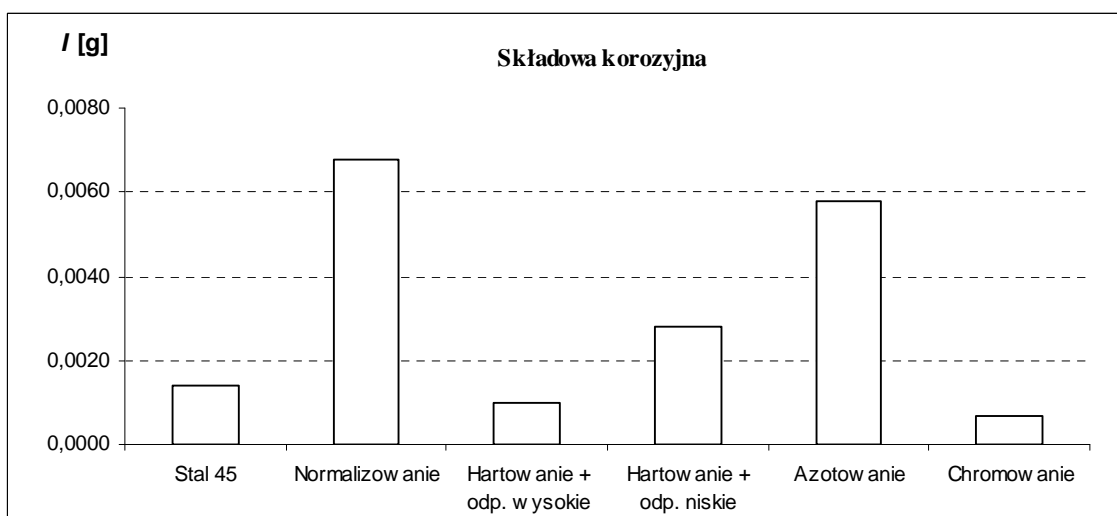
Na rys. 11 pokazano wartości składowej interakcyjnej mechaniczno-korozyjnej. W tym przypadku największe interakcje między tymi dwoma procesami zużyciowymi wystąpiły dla warstwy normalizowanej, co jest wyraźnie wi-

doczne na wykresie (najwyższy słupek). Świadczy to o intensyfikacji zużywania korozyjnego przy jednoczesnym występowaniu oddziaływań mechanicznych. Najmniejsza interakcja wystąpiła w przypadku warstwy chromowanej. Małe wartości skutków tego rodzaju synergicznych oddziaływań zaobserwowano także dla stali 45, a więc dla warstwy niepodanej żadnej obróbce cieplnej czy cieplno-chemicznej. Tym samym widać, że warstwa chromowana jest najodporniejsza na tarcio-korozyjne oddziaływania.

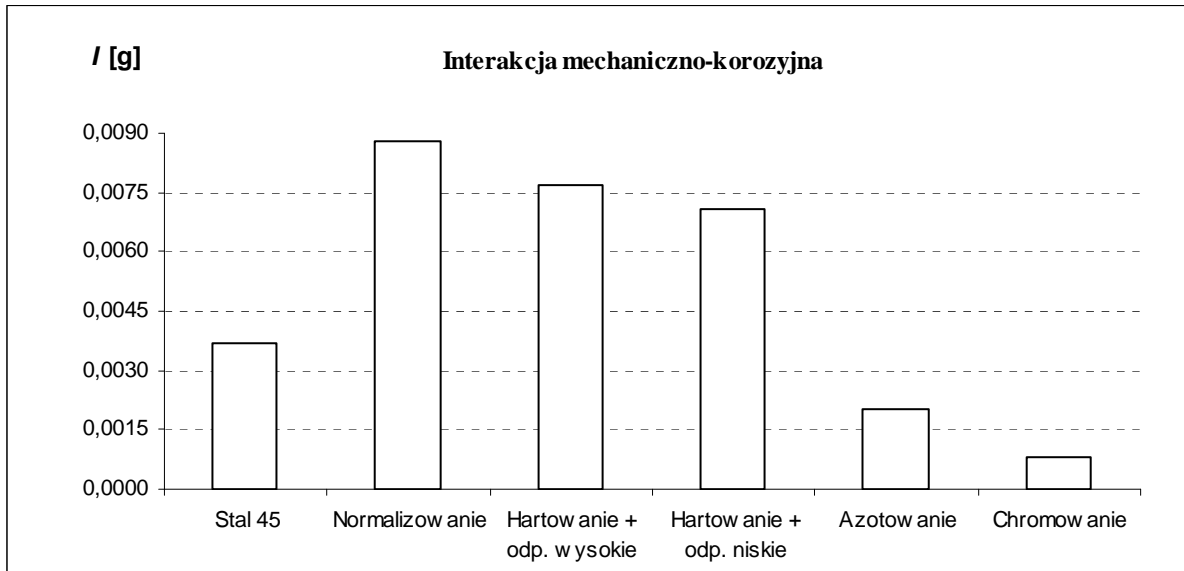
Rys. 12 przedstawia sumę składowych interakcyjnych ścierno-korozyjnej i mechaniczno-ścierno-korozyjnej. Największą wartość tych składowych (interakcji ścierno-korozyjnej oraz mechaniczno-ścierno-korozyjnej) uzyskano dla warstwy azotowanej. Duże wartości zużycia na skutek wzajemnych wymuszeń interakcyjnych (mechanicznych, ściernych i korozyjnych) wykazała też warstwa normalizowana. Najmniejsze wartości omawianej sumy składowych zużycia odnotowano dla warstwy chromowanej. Wartość otrzymana w tym przypadku jest ponad trzykrotnie mniejsza od następną w kolejności (najbardziej odpornej na ten rodzaj współdziaływań) warstwy hartowanej i odpuszczanej wysoko.



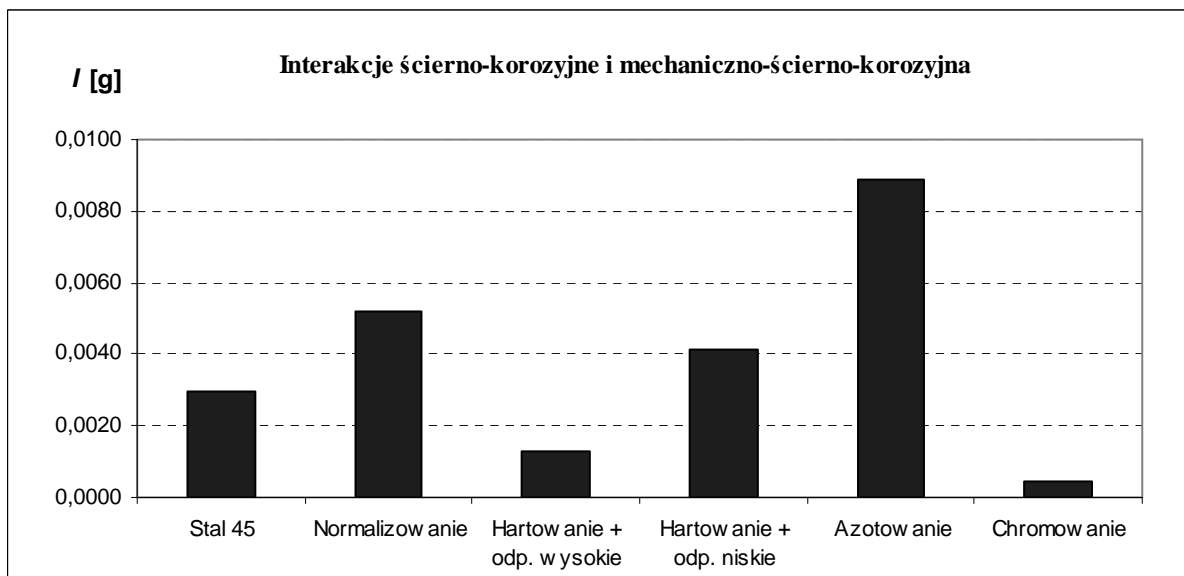
Rys. 9. Suma wartości składowej ścierniej i interakcji mechaniczno-ścierniej
 Rys. 9. Sum of abrasive constituent values and mechanical-abrasive interaction



Rys. 10. Ubytki składowych korozyjnych
 Fig. 10. Losses of corrosive constituents



Rys. 11. Wartości składowych interakcyjnych mechaniczno-korozyjnych
 Rys. 11. Values of mechanical and corrosive interaction constituents



Rys. 12. Suma składowych interakcyjnych ściernokorozyjnej i mechaniczno-ściernokorozyjnej
 Rys. 12. Sum of abrasive-corrosive and mechanical-abrasive-corrosive interaction constituents

Rys. 13 jest podsumowaniem graficznym tego, co zostało zaprezentowane na rysunkach 8 do 12.

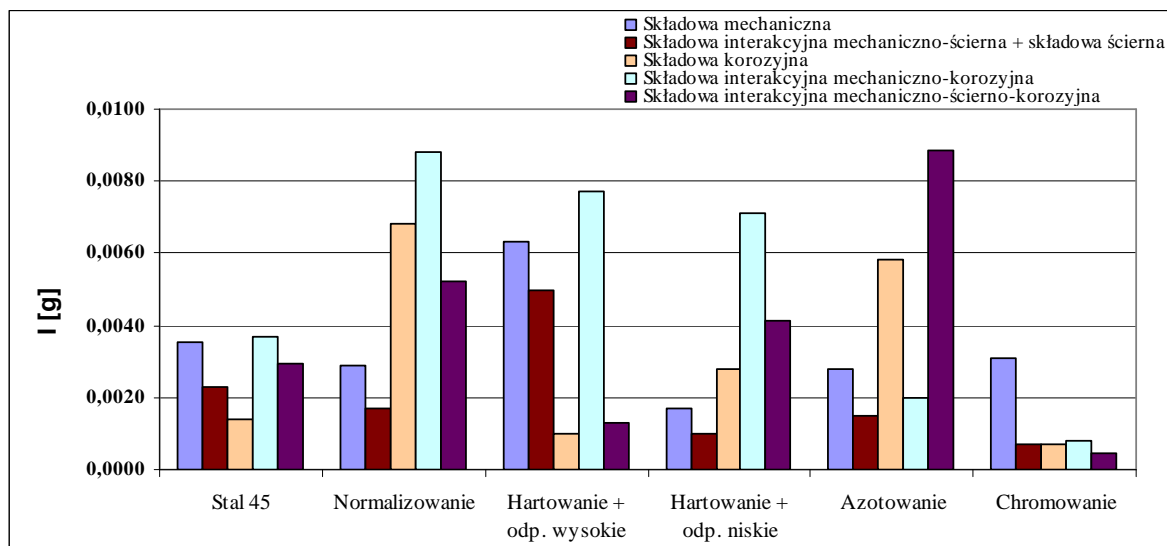
Przedstawia prezentację zbiorczą relacji między wszystkimi składowymi opisanymi uprzednio. Daje to możliwość jednoczesnego porównania wszystkich składowych oraz pozwala na pełniejszą analizę relacji między nimi. Spośród wszystkich rozpatrywanych wariantów warstw wierzchnich, najmniejszą wartość zużycia w rozpatrywanych złożonych warunkach wymuszeń mechaniczno-ściernokorozyjnych wykazała warstwa chromowana. Znaczenie gorzej, jednak stosunkowo dobrze w porównaniu do pozostałych warstw wypadła też stal 45.

W kolejnym zestawieniu zaprezentowanym tab. 7 oraz na rys. 14 przedstawiono wyniki składowych interakcyj-

nych wyrażonych w procentach w odniesieniu do zużycia globalnego I_C^T otrzymanego w wyniku zastosowania jednocześnie wszystkich trzech wymuszeń mechanicznych, ściernych i korozyjnych.

Na rys. 14 przedstawiono w sposób graficzny procentowe udziały składowych oraz składowych interakcyjnych w odniesieniu do wartości zużycia globalnego I_C^T .

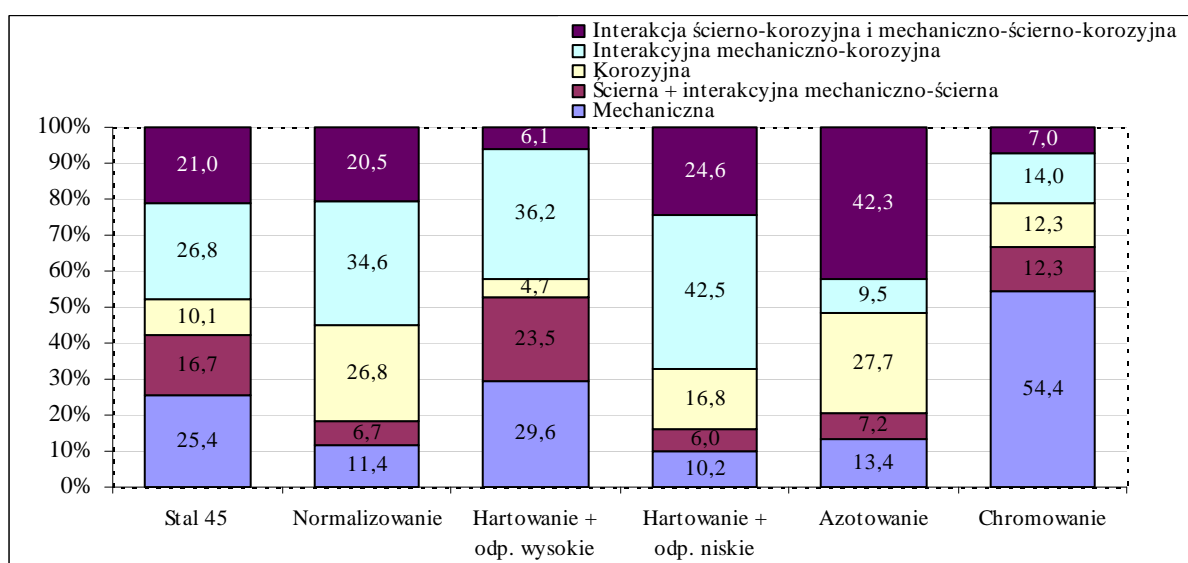
Z przedstawionych na rys. 14 danych można wyciągnąć wnioski szczegółowe odnośnie relacji między jednoimiennymi składowymi zużyciami (mechanicznymi, korozyjnymi) oraz różnymi rodzajami skutków zużyciowych wywołanych współdziałaniami o charakterze interakcyjnym przy występowaniu złożonych wymuszeń mechaniczno-ściernokorozyjnych.



Rys. 13. Zbiorcze zestawienie wartości składowych głównych oraz składowych interakcyjnych
 Fig. 13. Summary presentation of main wear constituents and interaction constituents

Tab. 7. Procentowy udział poszczególnych składowych oraz składowych interakcyjnych w zużyciu globalnym I_C^T
 Tabela 7. In percentage share of particular constituents and interaction constituents in global wear I_C^T

| Rodzaj składowej | Symbol | Sposób wyliczenia | Materiał wyjściowy | Normalizowanie | Hartowanie + odp. wysokie | Hartowanie + odp. niskie | Azotowanie | Chromowanie |
|--|-----------------|---|--------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|------------|-------------|
| Mechaniczna | I_M | I_M | 25,4% | 11,4% | 29,6% | 10,2% | 13,4% | 54,4% |
| Składowa ścierna + interakcja mechaniczno-ścierna | $I_S + I_{AMS}$ | $I_{MS} - I_M$ | 16,7% | 6,7% | 23,5% | 6,0% | 7,2% | 12,3% |
| Korozyjna | I_K | I_K | 10,1% | 26,8% | 4,7% | 16,8% | 27,7% | 12,3% |
| Interakcyjna mechaniczno-korozyjna | I_{AMK} | $I_{MK} - I_M - I_K$ | 26,8% | 34,6% | 36,2% | 42,5% | 9,5% | 14,0% |
| Interakcyjna ścierno-korozyjna i mechaniczno-ścierno-korozyjna | I_{AMS} | $I_{MSK} - (I_M + I_K + I_{AMS} + I_{AMK})$ | 21,0% | 20,5% | 6,1% | 24,6% | 42,3% | 7,0% |



Rys. 14. Graficzna prezentacja udziałów procentowych składowych jednoimiennych (mechanicznych, korozyjnych) oraz interakcyjnych dla wymuszeń mechaniczno-ścierno-korozyjnych
 Fig. 14. Graphic presentation in percentage shares of monominals constituents (mechanical, corrosive) and interaction constituents in mechanical-abrasive-corrosive conditions

W odróżnieniu od danych przytoczonych na rysunkach od 8 do 12 gdzie podano wartości zużyc w skali bezwzględnej na rysunku 14 przedstawiono je w ujęciu względnym, procentowo. Tego rodzaju ujęcie pozwala na interpretację jakościową, a przedstawione histogramy stanowią swego rodzaju modele interpretacyjne. Z analizy tych modeli wynika:

1. Składowe zużycia całkowite będące skutkiem oddziaływań tylko mechanicznych, w zależności od wariantu obróbki warstwy wierzchniej kształtują się na poziomie od 54,4% (w przypadku warstwy chromowanej) do około 10% dla warstw hartowanych i odpuszczanych nisko.
2. Wartości składowych zużycia korozyjnego wahają się od około 27% w przypadku warstw azotowanych i normalizowanych do około 5% dla warstw hartowanych i odpuszczonych wysoko.
3. Największy udział skutków zużywania ścierno-mechanicznego odnotowano dla warstw chromowanych (54,4%+12,3% =66,7%), najmniejszy dla warstw har-

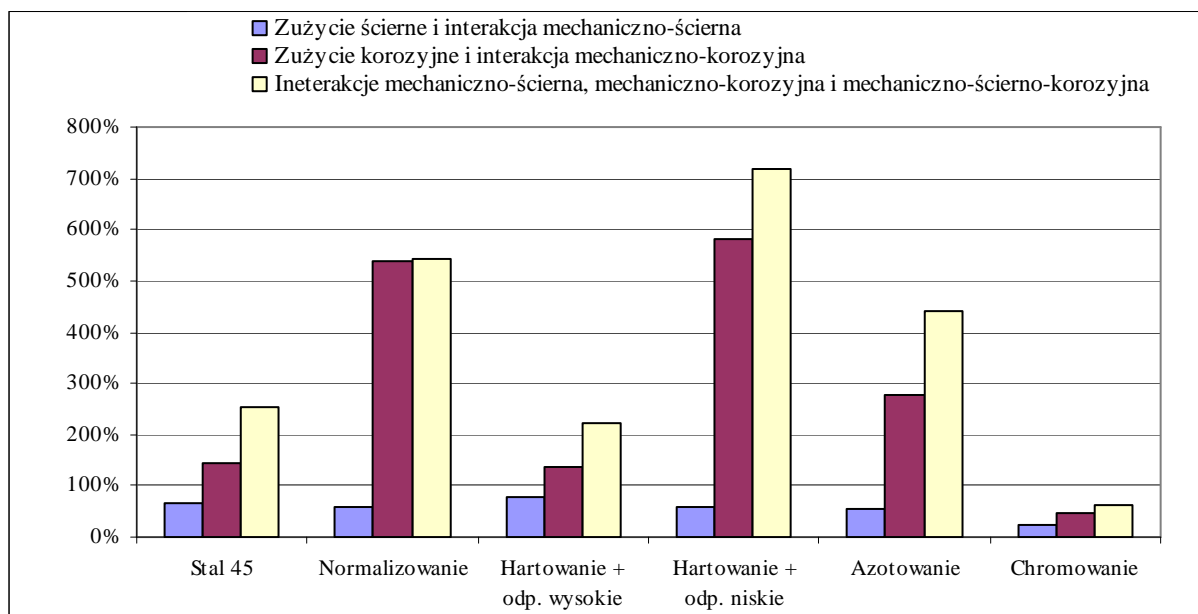
towanych i odpuszczanych nisko (10,2% + 16,8% =27%).

4. Oddziaływania mechaniczne decydują o intensywności zużywania korozyjnego, co wyraża się w największym stopniu w przypadku zużywania mechaniczno-korozyjnego warstw normalizowanych (26,8%+34,6%=61,4%), a w najmniejszym przy zużyciu warstw chromowanych (12,3%+14%=26,3%).
5. Składowe sumaryczne oddziaływań ściernych i interakcyjnych mechaniczno-ścierno-korozyjnych ($100\% - I_M - I_K$) wahają się od 73% w przypadku warstw hartowanych i odpuszczanych nisko do 33,3% dla warstw chromowanych.

W tab. 8 oraz na rys. 15 przedstawiono procentowy wzrost zużycia całkowitego spowodowany występowaniem dodatkowych wymuszeń ściernych, korozyjnych oraz o charakterze interakcyjnym korozyjno-ściernym w odniesieniu do zużycia spowodowanego tylko wymuszeniami mechanicznymi.

Tab. 8. Porównanie skutków zużywania dla różnych warunków wymuszeń w stosunku do zużycia mechanicznego
Table 8. Comparison effects of wear for different conditions in relations to mechanical wear

| Lp. | Rodzaj wymuszenia | Materiał wyjściowy | Normalizowanie | Hartowanie + odp. wysokie | Hartowanie + odp. niskie | Azotowanie | Chromowanie |
|-----|---|--------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|------------|-------------|
| 1 | Zużycie ściernie i interakcja mechaniczno-ścierna | 66% | 59% | 79% | 59% | 54% | 23% |
| 2 | Zużycie korozyjne i interakcja mechaniczno-korozyjna | 146% | 538% | 138% | 582% | 279% | 48% |
| 3 | Interakcje mechaniczno-ścierna, mechaniczno-korozyjna i mechaniczno-ścierno-korozyjna | 254% | 541% | 222% | 718% | 441% | 61% |



Rys. 15. Graficzna prezentacja wpływu poszczególnych wymuszeń na wzrost zużycia w odniesieniu do zużywania mechanicznego

Rys. 15. Graphic presentation of the influence of individual terms of co-operation on wear value in relation to mechanical wear

Z zaprezentowanych danych (tab. 8 i rys. 15) wypływają następujące wnioski:

- występowanie dodatkowych oddziaływań ściernych (obok wyjściowych mechanicznych), powoduje wzrost zużycia od 23% (dla warstwy chromowanej) do 79% (w przypadku warstwy hartowanej i odpuszczanej wysoko) w stosunku do wartości zużycia mechanicznego,
- dodatkowe oddziaływania korozyjne (obok wyjściowych mechanicznych), powodują wzrost zużycia od 48% w przypadku warstw chromowanych do 582% (w przypadku warstwy hartowanej i odpuszczanej nisko) w stosunku do wartości zużycia mechanicznego,
- oddziaływania interakcyjne mechaniczno-ściernokorozyjne podwyższają zużycie w stosunku do zużycia mechanicznego odpowiednio z 61% (dla warstw chromowanych) do 718% przy hartowaniu i odpuszczaniu wysokim.

5. Wnioski

Wyniki badań oceny zużycia jednoznacznie wskazują, iż w procesach tribologicznych, w których oprócz wymuszeń mechanicznych występują dodatkowo wymuszenia ściernie i korozyjne oraz ich wzajemne interakcje, końcowe zużycie jest dla wszystkich badanych wariantów warstw wierzchnich większe od sumy składowych uwzględnionych w pojedynczych procesach.

Z analizy danych zestawionych na rys. 14 i 15 nasuwa się spostrzeżenie, iż w przypadku zużywania mechaniczno-ściernokorozyjnego tylko dla warstw wierzchnich chromowanych nie odnotowano dominującej roli procesów zużywania ściernego i jego oddziaływań interakcyjnych. W tym jedynym przypadku dominującą rolę odgrywały procesy zużywania mechanicznego (ciernego).

Z przeprowadzonej analizy wynika również, iż efekt zużyciowy spowodowany współdziałaniem wymuszeń mechanicznych, ściernych, korozyjnych oraz łącznych ściernokorozyjnych 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 tarcioowo-korozyjnych) współdziałania o charakterze synergicznym (wzmacniającym) intensyfikującym procesy zużywania.

Literatura

- [1] Watson S. W., Friedersdorf F. J., Madsen B.W., Cramer S. D.: Methods of measuring wear corrosion synergism, *Wear*, 181-183 (1995) 476-484.
- [2] Mishra A., Finnie I.: A classification of three-body abrasive wear and design of new tester, *Wear* 601, 1980. p. 111-121.
- [3] Rabinowicz E., Dunn E. L., Russell P. G.: A study of abrasive wear under three-body condition, *Wear* 4, 1961, p 245-255.
- [4] Selech J., Ocena wpływu stanu warstwy wierzchniej materiału na składowe procesu zużycia ściernokorozyjnego, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn roboczych i Transportu 2005.
- [5] Join Stock Company, 2168 YMT Materials Friction Tester <http://www.tochpribor.ivanovo.ru/English/2168umt.htm>
- [6] 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.
- [7] Venkatsen K., Subramanian C., Summerville E.: Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures. *Wear* 203-204, 1997, p. 129-138.
- [8] Selech J., Nadolny K.: Analiza skutków procesów tribologicznych ściernomechanicznych w warunkach modelowych, X jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, *Tribologia* 3/2005 str. 295-306.
- [9] Tyczewski P.: Modele interpretacyjne mechanizmu zużycia ściernokorozyjnego. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2002.
- [10] Watson S.W., Cramer S. D., Madsen B. W.: Corrosion and wear in white cast irons, *Proc. 12 th Int. Corros. Congr.*, 3A 1993, 1353-1366.
- [11] Zahng T. C., Jiang X. X., Li S. Z. Lu X. C.: A quantitative estimation of the synergy between corrosion and abrasion. *Corrosion Science*, Vol. 36, No. 12, 1994, p. 1953-1952.
- [12] Zheng Y. G., Yao Z. M., Ke W.: Erosion – corrosion resistant alloy development for aggressive slurry flows. *Materials Letters* 46 2000 p. 362-368.