

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**



P. 3351/76

GÓRNICTWO

**Z. 75
GLIWICE
1976**

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	3
2. Ogólna charakterystyka warunków tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych	6
2.1. Przegląd stanu wiedzy na temat zjawisk tribologicznych w hamulcach	6
2.2. Charakterystyka techniczna i badania eksploatacyjne hamulców maszyn wyciągowych	8
2.3. Termiczne warunki pracy hamulców maszyn wyciągowych	13
2.4. Hamulcowe tworzywa cierne	15
2.5. Podsumowanie	19
3. Badania własności tribologicznych pary tworzywo cierne — stal	20
3.1. Cel i zakres badań	20
3.2. Problemy modelowania w badaniach tribologicznych	21
3.3. Warunki badań	22
3.4. Badania zależności charakterystycznych dla węzłów tarcia na modelu ikonicznym hamulca tarczowego w warunkach stabilnej prędkości	28
3.4.1. Wyniki badań	28
3.4.2. Dyskusja i podsumowanie wyników badań	35
3.5. Badania zależności charakterystycznych dla węzłów tarcia przy pomocy symulacji ikonicznej pracy hamulca tarczowego maszyny wyciągowej	39
3.5.1. Badania zużycia	39
3.5.2. Symulacja ikoniczna kinetycznych charakterystyk tarcia	41
3.5.3. Podsumowanie wyników badań	45
4. Studium zjawisk tribologicznych w parze tworzywo cierne — stal	46
4.1. Analiza uszkodzeń elementów ciernych w hamulcach i ich klasyfikacja	46
4.2. Metodyka badań tribologicznych	47
4.3. Fizykalna identyfikacja zjawisk tribologicznych	48
4.3.1. Przeciwpróbka stalowa	48
4.3.2. Próbki z tworzyw ciernych	53
4.3.3. Stałe produkty zużycia	58
4.4. Dyskusja wyników badań fizykalnych	60
4.5. Modele zjawisk tribologicznych w hamulcach	64
4.6. Struktura warstwy wierzchniej tworzyw ciernych	68
5. Wnioski ogólne	71
6. Literatura	74
7. Streszczenia	81

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 484

P. 3351/76

STANISŁAW F. ŚCIESZKA

PROBLEMY HAMOWANIA MASZYN WYCIĄGOWYCH

**STUDIUM WAŻNIEJSZYCH ZJAWISK
TRIBOLOGICZNYCH W PARZE CIERNEJ
TWORZYWO HAMULCOWE-STAL**

GLIWICE

1976

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Mirosław Chudek

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 80+140 Ark. wyd. 5,52 Ark. druk. 5,25 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 80 g
Oddano do druku 13.7.1976 Podpis. do druku 7.9.1976 Druk ukończ. we wrześniu 1976
Zamówienie 880 76 N-25 Cena zł 14,-

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

PS-337/76

1. WSTĘP

Przewidywana dalsza koncentracja wydobycia, wzrost głębokości wybierania i nowe technologie transportu kopalnianego, narzucają konieczność budowy urządzeń wyciągowych, dających dobową przelotowość szybu rzędu 30.000 Mg z głębokości do 1500 m, spełniających jednocześnie wysokie kryteria sprawności energetycznej i niezawodności działania. Kierunki rozwoju maszyn wyciągowych [7, 15, 37, 76, 86, 101], naczyń wyciągowych [4, 67] i napędów elektrycznych [36, 80] wskazują, że będą to urządzenia wyciągowe z wielolinowymi maszynami wyciągowymi. Wzrost udźwigów naczyń oraz zwiększenie krotności ich zawieszenia stwarzają przed hamulcem konieczność rozwijania większego momentu hamującego [81]. Ten kierunek rozwoju powoduje coraz większe obciążenie elementów hamulca, przy czym w elementach tych mogą występować nowe jakościowo, technicznie niekorzystne zjawiska tribologiczne [123]. Wzrost momentu hamującego dla określonej średnicy bębna napędowego można uzyskać przez zwiększenie współczynnika tarcia, nacisku jednostkowego, współczynnika wzajemnego przykrycia elementów hamulca lub liczby bieżni hamulcowych. Zmiany te są ograniczone geometrycznymi, przede wszystkim materiałowymi cechami konstrukcyjnymi hamulca. Ze względu na kryteria działania i trwałości hamulca podstawowe znaczenie mają własności tribologiczne materiałów ciernych. Wynika stąd potrzeba przebadania tych własności dla tworzyw ciernych na modelach symulujących przemysłowe warunki pracy hamulca maszyny wyciągowej. W celu prawidłowego określenia warunków badań i kryteriów oceny należy przeprowadzić analizę rozwiązań hamulców w prognozowanej populacji maszyn wyciągowych, które będą budowane w Polsce do około 1990 roku, ze szczególnym uwzględnieniem warunków tarcia.

Jednym z elementów procesu konstruowania węzłów tarcia maszyn roboczych jest ocena trwałości i niezawodności tych węzłów, dla której ważna jest umiejętność prognozowania, jak też ilościowego zapisu zjawisk cierno zużyciowych w okresie ich eksploatacji [117, 123]. Podejmowano próby powiązania własności użytkowych różnych tworzyw ciernych z parametrami tarcia [92, 93, 102, 103] oraz z charakterystycznymi własnościami mechanicznymi tych tworzyw [70, 72, 118].

Wszystkie prace z tego zakresu można uznać jedynie za wstępne i dalekie od rozwiązania zagadnienia predykcji zjawisk towarzyszących tarcu.

W procesie tarcia, pod wpływem różnych wartości pola temperatur, oddziaływań mechanicznych i oddziaływania środowiska, zachodzą różne istotne zmiany własności warstwy wierzchniej materiału, jej deformacje oraz inne zjawiska tribologiczne. Wartości maksymalnych temperatur powierzchni tarcia determinują warunki współpracy materiałów ciernych, a w szczególności materiałów azbestowych z lepiszczem organicznym, ze względu na ich strukturę wewnętrzną [61]. Podwyższonym temperaturom towarzyszy destrukcja lepi-

szcza, obniżenie wartości współczynnika tarcia, metalizowanie powierzchni tarcia tworzyw, iskrzenie oraz inne zjawiska zakłócające prawidłową pracę hamulca.

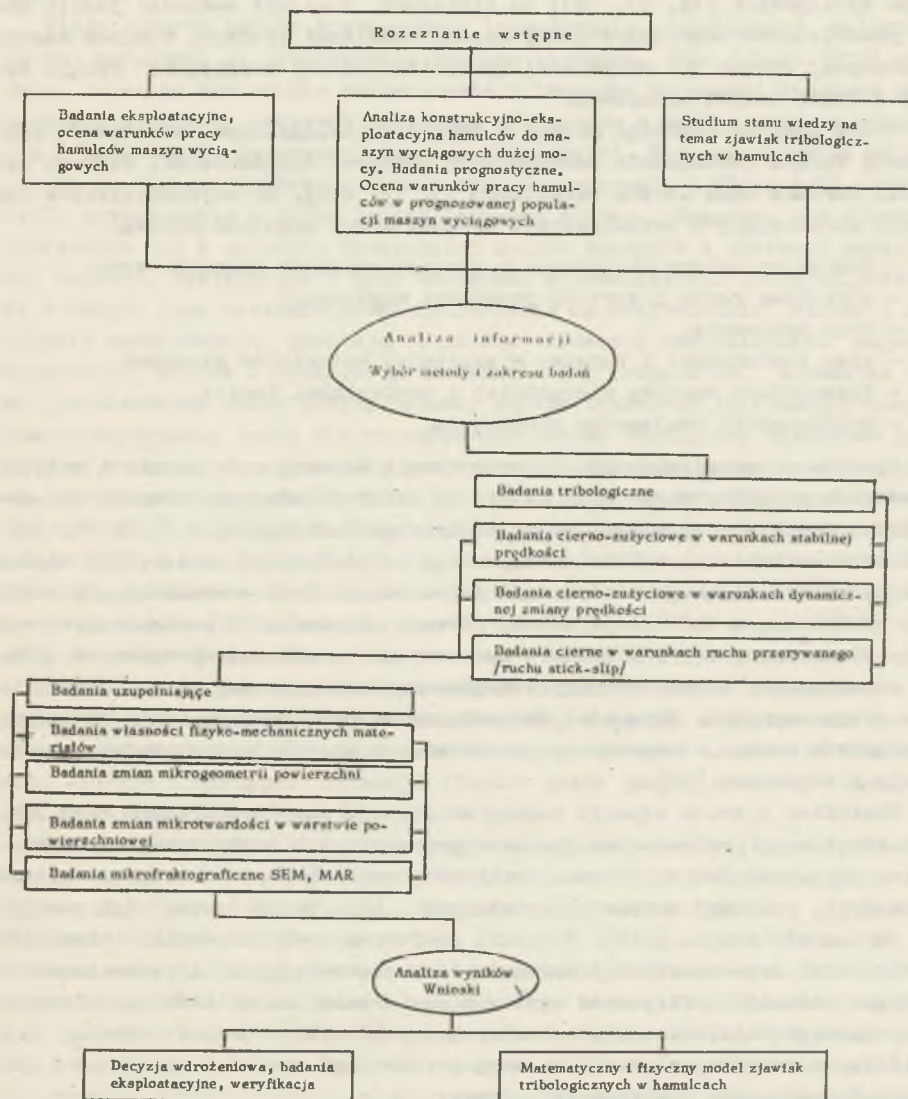
Złożoność procesu tarcia i zużycia stanowi główną trudność zbudowania ogólnego modelu fizycznego zjawiska oraz jego matematycznego zapisu. Przedstawione obecnie w literaturze zależności mają charakter hipotez będących funkcją kilku czynników uznanych za dominujące.

Analizę krytyczną hipotez tarcia suchego dokonało wielu autorów [51, 60, 70]. Dowodzą oni szeregu istotnych niedociągnięć istniejących hipotez. Hipotezy te (z wyjątkiem hipotezy energetycznej) bazują tylko na zjawiskach nietypowych dla realnych części maszyn i oparte są eksperymentalnie przede wszystkim na tarcu metali [60]. Hipotezy tarcia nie uwzględniają związku między poszczególnymi parametrami tarcia oraz procesami tarcia i zużycia. Szczególnie słabo wyjaśniają proces tarcia tworzyw sztucznych w skojarzeniu z metalami. W tym zakresie dużą rolę należy przypisać pracom teoretyczno-eksperymentalnym, które na drodze wielu doświadczeń i statystycznego opracowania wyników mogą przynieść uogólnione zależności, charakterystyczne dla węzłów tarcia w maszynach. Celowe jest, w tym przypadku, stosowanie maszyn matematycznych, które umożliwiają wielowariantowe opracowanie danych eksperymentalnych, jak też ich późniejsze wykorzystanie w pracach konstrukcyjnych, obliczeniach trwałości, niezawodności i innych.

W oparciu o aktualny stan wiedzy o tarcu suchym w hamulcach w niniejszej pracy postawiono sobie za cel:

- identyfikację zjawisk tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych przy pomocy symulacji ikonicznej dla wybranej grupy tworzyw ciernych,
- opracowanie fizycznego modelu zjawisk tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych, a w szczególności opracowanie mechanizmu metalizowania (nażelazowania) się wybranej grupy tworzyw ciernych przy współpracy ze stalą,
- opracowanie metody teoretyczno-eksperymentalnych badań tribologicznych hamulcowych tworzyw ciernych oraz zebranie otrzymanych z badań ilościowych faktów empirycznych w formie analitycznej (matematycznego modelu).

Schemat programu pracy przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Program pracy

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW TRIBOLOGICZNYCH W HAMULCACH MASZYN WYCIĄGOWYCH

2.1. Przegląd stanu wiedzy na temat zjawisk tribologicznych w hamulcach

Prace z zakresu identyfikacji zjawisk tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych [92, 93, 123] są nieliczne. Ponieważ zachodzi jednak duże podobieństwo charakteru pracy między hamulcami ciernymi różnych maszyn roboczych, pomimo ich oczywistej specyfiki, należy uwzględnić wyniki badań z wielu innych opracowań.

Pracę hamulca ciernego możemy w sensie tribologicznym traktować jako proces tarcia technicznie suchego pary tworzywo cierno-metal, którego warunki określa duża liczba czynników [53, 73, 123]. Do najważniejszych czynników określających tribologiczne warunki pracy hamulców należą:

- charakter zmiany obciążenia i wartość nacisków jednostkowych,
- charakter ruchu i wartość prędkości względnej,
- czas hamowania,
- stan powierzchni i warstwy wierzchniej materiałów ciernych,
- temperatura warstwy wierzchniej i powierzchni tarcia,
- współczynnik wzajemnego przykrycia.

Zgodnie z mechaniczno-molekularną teorią tarcia, opór tarcia i zużycie elementów rozpatrywanej pary, zależą od dwóch składowych oddziaływań: mechanicznego (deformacyjnego) i molekularnego (adhezyjnego) [49, 72, 73]. Składowa mechaniczna wynika z wzajemnego oddziaływania powierzchni elementów pary, powodującego wielokrotne deformowanie tych powierzchni. Opór tarcia pochodzący z deformacji zależy głównie od własności mechanicznych warstwy wierzchniej i jej struktury geometrycznej, ale zależy także od składu chemicznego, mikrostruktury wewnętrznej i stopnia jej zdefektowania oraz stanu naprężeń. Własności mechaniczne ulegają zmianie wraz ze zmianą parametrów tarcia, temperatury powierzchni i gradientu temperatury w warstwie wierzchniej [32].

Charakter zjawisk adhezji zależy od rodzaju współpracujących ciał, tzn. ich struktury, powinowactwa chemicznego, własności mechanicznych, a zwłaszcza wytrzymałości na ścinanie oraz od stanu ich powierzchni, tj. mikrogeometrii, grubości warstw adsorbowanych i błon dyfuzyjnych, jak również od parametrów tarcia [110]. W czasie wzajemnego oddziaływania elementów powierzchni może nastąpić przerwanie błon adsorbacyjnych i jednocześnie adhezyjne połączenie fizycznie czystych powierzchni materiałów par ciernych. Przy łącznym działaniu sił, normalnych i stycznych w trakcie tarcia, naprężenia w warstwie wierzchniej mogą przekroczyć wartości krytyczne i powodować intensywne ubytki materiałów.

Nowe badania [23, 48, 49, 53, 59, 63] dowodzą, że na powierzchniach tarcia elementów z materiałów kompozytowych, występują złożone procesy u-

tlenia, redukcji, topnienia, odparowania oraz sublimacji. Tworzy się przy tym warstwa wierzchnia o innych od rdzenia własnościach.

W tworzywach ciernych o lepiszczu organicznym następuje w wysokich temperaturach piroliza [17, 63, 130, 134]. Z lepiszcza wydzielają się liczne ciekłe i gazowe produkty, a na powierzchni pozostają twarde koksopodobne cząsteczki.

Wielu autorów badało przenoszenie (namazywanie, nalepianie) materiału bieżni metalowej na powierzchnię tworzyw ciernych. Wise i Lewis [133] uważają, że są to wgniecionie mechanicznie w tworzywo warstewki metalowe przeniesione z obręczy zestawów kołowych, uformowane w wyniku procesu zmęczenia i deformacji plastycznej warstwy wierzchniej. Nie przedstawili oni jednak na to żadnego materiału dowodowego. Georgierskij i Olina [48] stwierdzili przenoszenie w parze żeliwo-tworzywo cierne, tłumacząc to zjawisko tworzeniem się w warstwie wierzchniej żeliwa obszarów o złożonej warstwowej budowie. Występujące w tych obszarach mikroobjętości tworzywa, powstałe w wyniku jego wcześniejszego naniesienia na powierzchnię żeliwa i następnie zawalcowania, powodują obniżenie własności mechanicznych warstwy wierzchniej żeliwa i okresowe przenoszenie jej fragmentów. Mechanizm ten nie potwierdzony przez innych badaczy należy traktować jako marginesowy i charakterystyczny tylko dla początkowego okresu współpracy elementów pary o dużej wstępnej chropowatości powierzchni. Zjawisko przenoszenia stali obserwowano podczas badań Nowicki [88-90], tłumacząc je oddzielaniem się cząsteczek stali w wyniku odkształceń plastycznych, spowodowanych wysoką temperaturą i naciskami. Autor ten nie przedstawił opisu mechanizmu tego zjawiska, udokumentował jednak towarzyszące mu obniżenia wartości współczynnika tarcia [88]. Ścieszka we wcześniejszych swoich pracach [117, 123, 125] przypisywał pojawienie się warstwy o dużej zawartości żelaza na powierzchni tarcia tworzyw ciernych między innymi procesowi polegającemu na tworzeniu się ognisk o dużej zawartości Fe, w wyniku zagęszczania wypełniaczy zawierających Fe (czerwień żelazowa, azbest) w warstwie wierzchniej tworzyw i następnie redukcji tlenków przez gazowe produkty rozpadu lepiszcza (H_2 , CO) w wysokiej temperaturze.

Przenoszenie bardziej wytrzymałego mechanicznie materiału na powierzchnię tarcia mniej wytrzymałego przeciwpartniera było stwierdzone przez wiele innych badaczy [44, 47, 72]. Zjawisko to tłumaczono głównie wykruszaniem zmęczeniowym twardego materiału lub jego intensywnym utlenianiem i następnie wgniataaniem oderwanych cząstek lub błon tlenkowych w warstwę wierzchnią materiału bardziej miękkiego (np. brązu, tekstolitu i innych). W kilku opracowaniach [17, 45] łączono przenoszenie metali na powierzchnię tworzyw ze znakiem i wartością ładunków elektrycznych powstających na powierzchni tarcia w wyniku elektryzacji. Zdaniem tych autorów tworzywa, które elektryzują się dodatnio, nanoszą się na metale, tworząc parę cierną: tworzywo-tworzywo, a tworzywa elektrycznie intensywnie zużywają metale po-

przez ich nanoszenie na powierzchnię tworzyw i ukształtowanie pary:metal-metal. Opracowania te nie podają jednak fizycznej natury i mechanizmu wpływu znaku ładunku elektrycznego na przenoszenie metali na dielektryki. Bowden i Tabor [20] uważają, że pola elektrostatyczne w parach ciernych, takich jak hamulce, mają nieistotny bezpośredni wpływ na siłę tarcia, ale oddziałują pośrednio poprzez: wymuszanie ukierunkowanego ruchu zjonizowanych cząstek gazów (np. wodoru, tlenku węgla), przyciąganie pyłów, wilgoci oraz cząstek zużycia przeciwpróbki. Przy zbliżeniu naładowanego elektrostatycznie tworzywa do metalu następuje iskrowe elektryczne rozładowanie i elektroerozja elementów ciernych [45, 113].

Kragielski [72] tłumaczy przenoszenie z jednego ciała na drugie różnicami energii powierzchniowej, uważa że ciało o mniejszej energii będzie się namazywało na ciele o większej energii powierzchniowej.

Istnieje także przypuszczenie [3, 29], że gdy powierzchnie współpracujące nie są geometrycznie jednakowe, występuje niesymetryczne przenoszenie od większej powierzchni do mniejszej. Poglądy te mają jednak ograniczony zakres zastosowania, gdyż kierunek przenoszenia zależy jeszcze np. od rodzaju materiału i temperatury. Jeżeli temperatura mniejszej powierzchni jest bliska temperaturze topnienia materiału, ulega ono rozmazywaniu na tarczy [109].

Obecność cząstek materiału przeciwpróbki (najczęściej stopu żelaza) na powierzchni tworzyw ciernych jest zawsze niekorzystna z punktu widzenia trwałości i efektywności hamulca. Tworzeniu się jednoimiennej pary, np. stal-stal, towarzyszy duży miejscowy wzrost temperatury, intensywne niszczenie stalowego przeciwpartnera, obniżenie współczynnika tarcia oraz iskrzenie.

Dotychczasowe prace dały dużą ilość informacji o zjawisku przenoszenia w warunkach tarcia technicznie suchego oraz liczne próby przedstawienia jego fizycznej natury, nie stworzyły jednak pełnego fizycznego modelu mechanizmu przenoszenia metali (materiałów bieżni hamulca) na hamulcowe tworzywa cierne.

2.2. Charakterystyka techniczna i badania eksploatacyjne hamulców maszyn wyciągowych

Specyfika procesu hamowania we współczesnych maszynach wyciągowych polega między innymi na programowanym przebiegu siły normalnej, dociskającej elementy cierne w czasie hamowania, której wartość nie zależy od efektu jej działania. Rodzi się stąd duże znaczenie stabilności tribologicznych własności tworzyw ciernych przez cały okres eksploatacji hamulca. Wzrost lub spadek intensywności hamowania w stosunku do jej wartości spodziewanej może wywołać skutki awaryjne.

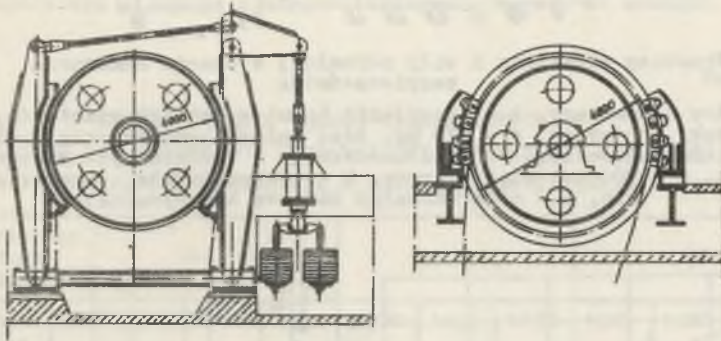
Inną specyfikę stanowią geometryczne cechy konstrukcyjne oraz funkcyjny podział działania hamulca na:

- hamowanie manewrowe, którym kończy się każda część cyklu wydobywczego. Praca hamulca ciernego ograniczona jest w tym przypadku do zatrzymania urządzenia z bardzo małej prędkości „wleczonej”,
- hamowanie bezpieczeństwa, którego wystąpienie ma charakter losowy i może mieć miejsce w każdej sytuacji ruchowej urządzenia. Cała energia kinetyczna urządzenia wyciągowego jest w tym przypadku pochłaniana przez hamulec cierny.

Obecnie stosowane są w Polsce głównie pneumatyczne napędy hamulców i szczękowe zespoły robocze w układzie walcowym [12].

Rozwiązania te będą jednak miały coraz bardziej ograniczone zastosowanie w maszynach wyciągowych dużej mocy.

W największych maszynach są stosowane hydrauliczne hamulce tarczowe (rys. 2) [8, 9, 15, 27, 81]. Dla dokonania oceny warunków tarcia (kine-

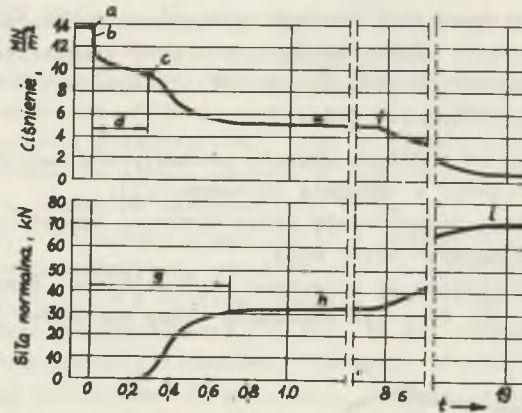


Rys. 2. Hamulce górniczych maszyn wyciągowych wieloliniowych
 a - hamulec szczękowy walcowy z napędem pneumatycznym, b - hydrauliczny hamulec tarczowy

tycznych, dynamicznych, geometrycznych i termicznych) w istniejących i prognozowanych hamulcach maszyn wyciągowych wykonano szereg badań eksploatacyjnych i analitycznych parametrów technicznych tych maszyn [10]. Badania te były najczęściej fragmentami kompleksowych badań urządzeń wyciągowych [5, 6, 38, 92], obejmujących także pomiary wielkości mechanicznych w bębnach pędnych, linach i naczyniach.

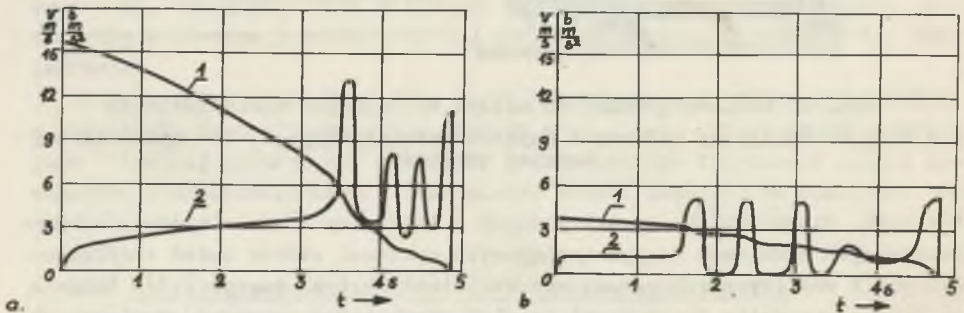
Badania przeprowadzone między innymi na prototypowej maszynie wyciągowej z hydraulicznymi hamulcami tarczowymi [43], (tabl. 2, przykład I). Pomierzono naprężenia mechaniczne w niektórych elementach hamulca, zmiany prędkości, przyspieszeń i ciśnienia w czasie hamowania manewrowego i bezpieczeństwa oraz obciążenia termicznego elementów ciernych. Wyniki badań ciśnienia i siły normalnej w siłownikach hydraulicznych przedstawia rys. 3. Zmiany prędkości i przyspieszeń chwilowych maszyny wyciągowej w czasie hamowania zależą od przyłożonego momentu hamującego i właściwości dyna-

wicznych całego urządzenia wyciągowego (sprężystość i długość lin, położenie i ciężar naczyń itd.).



Rys. 3. Przebieg ciśnienia i siły normalnej w czasie hamowania hamulcem bezpieczeństwa

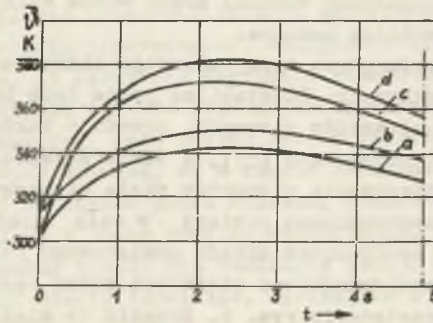
a - hamulec odhamowany, b - wyzwolenie hamulca, spadek ciśnienia, c - dojdzie szczęki do tarczy, d - 270 ms, czas jazowy hamulca przy luzie 1,5 mm, e - ciśnienie pierwszego stopnia hamowania, f - koniec pierwszego stopnia hamowania, g - 700 ms, czas progowy, h - siła normalna pierwszego stopnia, i - siła normalna końcowa (maksymalna)



Rys. 4. Wyniki pomiarów wielkości kinematycznych maszyny wyciągowej

a - wykres prędkości i opóźnień w czasie hamowania bezpieczeństwa, jazda w górę pełnym skipem (30 Mg), b - wykres prędkości i opóźnień w czasie hamowania bezpieczeństwa, jazda w dół pełnym skipem (30 Mg)
1 - wykres prędkości, 2 - wykres opóźnień

Wykres prędkości i opóźnień w czasie hamowania przedstawia rys. 4. Widoczne pulsacje wartości opóźnienia są wynikiem oddziaływania na bęben drgających wzdłużnie lin, nośnych, naczyń i urobku. Zmiany wartości średniej temperatury powierzchni tarczy, mierzonych termoparą ślizgową w miejscu nabiegania i zbiegania tarczy w badanej maszynie [42], w trakcie hamowania bezpieczeństwa przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Wykresy temperatury powierzchni tarczy w czasie dwóch kolejnych hamowań bezpieczeństwa z prędkości początkowej $v_p = 16$ m/s
 a, b - temperatura mierzona w miejscu nabiegania tarczy na szczękę, c, d - temperatura mierzona w miejscu zbiegania tarczy ze szczęki

Tablica 1

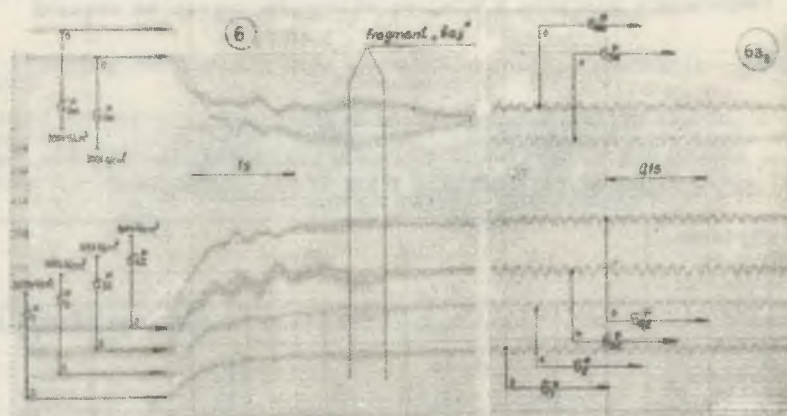
ZMIANY ŚREDNIC BĘBNÓW WIELOLINOWYCH
 I LICZBY PAR SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH W FUNKCJI UDŹWIGÓW,
 GŁĘBOKOŚCI CIĄGNIENIA I KROTNOŚCI ZAWIESZENIA

Masa użyteczna nosiwa w na- czyniu Q, Mg	40			50			60		
	1200	1400	1600	1200	1400	1600	1200	1400	1600
Głębokość ciągnięcia H, m									
Liczba lin, w									
6	3,6	4,0	4,5	4,0	4,5	5,0	4,5	5,0	5,6
8	3,2	3,6	5,6	3,6	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5
10	2,8	3,2	3,2	3,2	3,6	3,6	3,6	4,0	4,0
12	2,5	2,8	3,2	3,2	3,2	3,6	3,2	3,6	3,6
Liczba par siłowników i	20			24			28		

Imne hamulce z prognozowanej populacji dużych maszyn wyciągowych (tabl. 1) charakteryzują się różną nominalną geometrią styku. Zakładając zastosowanie tych samych siłowników [42] w oparciu o pracę [10, 137], wyliczono średnicę bębnow wielolinowych, geometrię bieźni oraz liczbę koniecznych siłowników dla zapewnienia 3-krotnej statycznej pewności hamowania [8].

Znając geometryczne i materiałowe cechy konstrukcyjne hamulca oraz jego kinematyczne i dynamiczne warunki pracy można wyliczyć obciążenie termiczne elementów dowolnego hamulca.

Hamulce maszyn wyciągowych typu walcowego charakteryzują się rozbudowanymi układami szczękowymi. Niestabilna praca tych hamulców, wywołana drganiami samowzbudnymi elementów ciernych, powoduje także niebezpieczne drgania maszyny oraz jej fundamentu [57], a także prowadzi do skrócenia czasu pracy, a nawet do zniszczenia elementów węzła ciernego. Na jednej z maszyn wyciągowych przeprowadzono pomiary w celu dokonania identyfikacji drgań. Po wykonaniu specjalnego układu pomiarowego rejestrowano wielkości przemieszczeń wybranych punktów i wielkości zmian naprężeń. Przykładowy wycinek oscylogramu przedstawia rys. 6. Drgania te miały charakter drgań samowzbudnych wywołanych tarcieniem.



Rys. 6. Wycinek z oscylogramu z zapisem zmian naprężeń w elementach hamulca w czasie hamowania bezpieczeństwa z prędkości początkowej $v_p = 6$ m/s

Badania przeprowadzone na kilku wybranych losowo maszynach wyciągowych wykazały, że niektóre hamulce nie spełniają kryterium statycznej pewności hamowania oraz charakteryzują się znacznie wydłużoną drogą hamowania bezpieczeństwa w stosunku do przewidywanych wartości. Zjawisko to związane z okresowym obniżeniem się wartości współczynnika tarcia można nazwać fadingiem eksploatacyjnym [63]. Stwierdzone eksperymentalnie [127], że główną przyczyną tego zjawiska była obecność wody na powierzchni tarcia hamulca (przypadki takie obserwuje się w szybach, gdzie nośnikiem wody są liny) oraz metalizowanie się powierzchni tworzyw [88].

2.3. Termiczne warunki pracy hamulców maszyn wyciągowych

W celu uchronienia się przed możliwością awaryjnego nagrzania okładzin, należy przy projektowaniu przeprowadzić obliczenie sprawdzające.

Z praktyki wynika, że nadmierne nagrzanie elementów hamulca zmniejsza ich żywotność oraz obniża wartość współczynnika tarcia [73, 87], a tarcza stanowiąca bieżnię hamulca, może zostać trwale zdeformowana. Badania na obiektach przemysłowych dowodzą, że w czasie normalnej pracy maszyny wyciągowej, napędzanej silnikiem prądu stałego, przyrost temperatury elementów hamulca, wynikający z pracy hamulca manewrowego, jest minimalny lub całkowicie nie mierzalny i może być pominięty [119]. Należy natomiast w obliczeniach uwzględnić efekty termiczne, wynikające z pracy ciernej hamulca bezpieczeństwa.

Przy tarczu suchym dwóch powierzchni chropowatych rzeczywisty styk na poszczególnych wierzchołkach mikronierówności tych ciał jest bardzo krótkotrwały, a temperatura jaka się w wyniku tego styku wywiązuje jest maksymalną temperaturą powierzchni tarcia [32, 35, 72]. Temperatura ta jest jedną ze składowych opisujących pole temperatur w trących się ciałach. Znajomość tego pola ma istotne znaczenia, gdyż jak wykazały badania [32, 108] naprężenia mechaniczne w warstwie wierzchniej trących się elementów, w wielu hamulcach pochodzą głównie od udarów cieplnych. Temperatura i gradient temperatury w dużym stopniu decydują o intensywności zużycia i zmęczenia materiałów.

Temperaturę elementów ciernych określają następujące wielkości:

- v'_t - maksymalna temperatura powierzchni tarcia,
- v'_o - temperatura początkowa,
- v'_v - średnia temperatura objętościowa,
- v'_p - średnia temperatura nominalnej powierzchni tarcia,
- v'_b - temperatura błysku,
- grad v' - gradient temperatury w warstwie efektywnej,

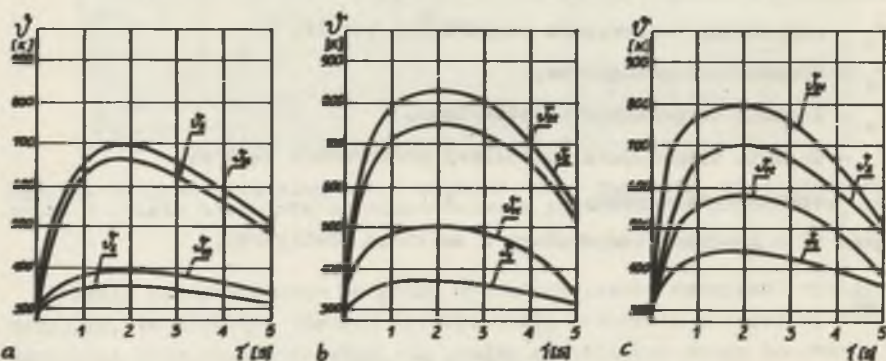
gdzie:

$$v'_t = v'_o + v'_p + v'_b \quad (1)$$

Znajomość maksymalnej temperatury powierzchni tarcia v'_t pozwala na porównanie obciążenia temperaturowego mikroobszarów materiałów ciernych z dopuszczalną temperaturą, której przekroczenie powoduje w przypadku tworzyw termoutwardzalnych np. destrukcję lepiszcza, metalizowanie powierzchni tarcia [63, 123, 133] a w przypadku materiału bieżni stalowej uplastycznienie, płynięcie i dekohezję zmęczeniową warstwy wierzchniej [49, 73, 108].

CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA WYBRANYCH MASZYN WYCIĄGOWYCH

Charakterystyczne dane maszyn wyciągowych	Jednost.	Wartości liczbowe		
		Przykł. I	Przykł. II	Przykł. III
Masa użyteczna nosiwa w naczyniu, Q	Mg	30	40	60
Głębokość ciągnięcia, H	m	800	1600	1200
Średnica bębna wielolinowego, D_b	m	5,5	4,5	3,2
Liczba lin nośnych, w		4	6	12
Prędkość maksymalna, v_m	$\frac{m}{s}$	16	20	20
Czas hamowania, t_h	s	5	5	4,6
Praca tarcia na jedną powierzchnię tarczy, L	kJ	5950	10213	11504
Powierzchnia efektywna tarczy, A_1	m^2	3,76	3,1	2,248
Powierzchnia szczęk, A_2	m^2	0,504	0,63	0,882
Grubość tarczy, b_1	m	0,03	0,03	0,03
Wymiary okładziny ciernej, $I_2 \times g_2$	m	0,21x0,3	0,21x0,3	0,21x0,3



Rys. 7. Przebiegi zmian temperatury w czasie hamowania bezpieczeństwa dla $v_p = v_m$

a - przykład I, b - przykład II, c - przykład III (tablica 2)

Dla trzech charakterystycznych rozwiązań maszyn wyciągowych, których dane przedstawiono w tabl. 2, wyliczono wartości zmian temperatur w hamulcach [120, 121, 130]. Przykład I odpowiada maszynie wyciągowej typu

4L-5500
2x 3600 produkcji ZUT "Zgoda". Pozostałe maszyny należą do prognozowanej serii maszyn wyciągowych o bardzo dużych mocach (tabl. 1). Przebieg zmian temperatury elementów hamulca w czasie hamowania bezpieczeństwa przedstawia rys. 7. Uzyskane drogą obliczeń temperatury informacje uściślają wymagania konstrukcyjno-materiałowe dla tych hamulców i są niezbędne dla właściwego wyboru tworzywa ciernych.

2.4. Hamulcowe tworzywa cierne

Cechy konstrukcyjne i warunki pracy hamulców w maszynach roboczych są bardzo zróżnicowane [1, 2], a współczesne ich rozwiązania wskazują na coraz większe obciążenie cieplne elementów ciernych [61, 128]. Zróżnicowanie to zmusiło do opracowania bardzo szerokiego zestawu tworzyw ciernych przeznaczonych do pracy w hamulcach [2, 49, 65; 75, 135]. Do podziału tworzyw ciernych można zastosować różne kryteria [70, 72, 87, 88]. Najbardziej ogólny podział wyróżnia cztery grupy tworzyw: niemetalowe, metalowe, metalowo-ceramiczne i metalowo-żywiczne.

- a - niemetalowe, do których zaliczamy:
 - organiczne (np. drewno, skóra, filc i inne),
 - nieorganiczne (np. porcelana, beton i inne),
 - azbestowe z lepiszczem organicznym,
 - impregnowane olejami schnącymi,
 - o lepiszczu kauczukowym,
 - o lepiszczu z żywicy termoutwardzalnej,
 - o lepiszczu mieszanym (kauczukowo-żywicznym),
- b - metalowe, do których zaliczamy: żeliwa, stale niskowęglowe, proszki spiekane, niektóre stopy miedzi i inne,
- c - metalowo-ceramiczne o bardzo zróżnicowanej budowie i technologii, które charakteryzują się między innymi: wysoką odpornością cieplną, dużą twardością, stabilnością współczynnika tarcia, w szerokim zakresie temperatur, dużą ściernością oraz wysokimi kosztami wytwarzania [2, 63, 75, 132],
- d - metalowo-żywiczne, których trzy zasadnicze składniki stanowią: żywica, azbest oraz proszki metali w ilości co najmniej 20% (wagowo). Tworzywa te charakteryzują się korzystnymi własnościami cierno-życiowymi [63, 134].

Na obecnym etapie rozwoju konstrukcji hamulców maszyn wyciągowych znalazły zastosowanie głównie tworzywa azbestowe impregnowane olejami schnącymi (Tanolex, Binolex) oraz w starszych rozwiązaniach drewno topolowe.

Stosowane rodzaje tworzyw ciernych oraz zalecanie dla konstruktorów ograniczały maksymalne naciski jednostkowe do wartości $0,3-0,7 \frac{MN}{m^2}$ i dawały podstawę do projektowania hamulców typu walcowego, o bardzo dużych pe-

SKŁADY CHEMICZNE WYBRANYCH MATERIAŁÓW CIERNYCH

Lp.	Składniki	Tworzywo W-12	Tworzywo AKF	Tworzywo M-31	Tworzywo ZK-VI-19	Tworzywo TEXTAR V-1431	Tworzywo Polofen FA-3
		Zawartość składników w procentach wagowo					
1	Kauczuk syntetyczny	17	12,5	-	-	-	-
2	Żywice (Novolak, Rezomel, Rezolit i inne)	-	12,5	21	22	17	33
3	Azbest (włókna mineralne żuźłowe i azbestowe)	37	46,0	22	32	21	47
4	Granulat i proszki metali kolorowych	21	-	29	20	31	15
5	Baryt mielony	-	-	-	13	10	-
6	Grafit	-	-	-	0,3	5	-
7	Czerwień żelazowa	8	25	-	5	5	-
8	Środki wulkanizacyjne	5	-	-	-	-	-
9	Wypełniacz krzemionkowy	4	-	28	5	5	-
10	Inne	8	4	-	2,7	6	5

WŁASNOŚCI FIZYKOMECHANICZNO I CIERNE WYBRANYCH MATERIAŁÓW CIERNYCH

Lp.	Parametr	Jednostka	Tworzywo W-12	Tworzywo AKF	Tworzywo M-31	Tworzywo ZK-VI-19	Tworzywo TEXTAR V-1431	Tworzywo GALFEL	Tworzywo COSID	Tworzywo Polofen FA-3
1	Gęstość, γ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2220	1970	2650	2410	2240	2140	2240	1780
2	Twardość, HK	$\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$	204,1	171,5	669,8	171,0	144,0	28,4	429	301
3	Udarność, U	$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$	9,3	4,3	3,9	7,7	5,1	18,0	3,7	22,1
4	Średni współ- czynnik tar- cia, $\bar{\mu}$		0,440	0,444	0,390	0,351	0,388	0,504	0,305	0,280
5	Średnia inten- sywna zużycia, \bar{J}_g	$\frac{\text{mJ}}{\text{g}}$	34,7	44,4	182,2	50,4	29,1	35,0	61,5	23,1
6	Średnia efek- tywna inten- sywność zuży- cia, \bar{e}_g	$\frac{\text{mJ}}{\text{N}}$	67,5	98,4	433,6	126,6	92,7	71,2	167,2	65,0

wierzchniach tarcia szcęk. Warunki pracy hamulców tarczowych (p.2.3) eliminują natomiast te rodzaje tworzyw. Dla prognozowanej populacji dużych maszyn wyciągowych (tabl. 1) znajdują zastosowanie [94, 123] tworzywa metalowo-żywiczne oraz niektóre tworzywa azbestowe, c lepiszczu żywicznym i kauczukowo-żywicznym (skład i własności wybranych do dalszych badań tworzyw przedstawiają tablice 3 i 4). Te rodzaje tworzyw zostały dobrze zbadane od strony procesu wytwarzania. Wyniki prac [24, 61, 62, 63, 107, 111, 112, 130, 134] umożliwiają stosunkowo swobodną zmianę ich własności tribologicznych, chociaż nie dają jeszcze umiejętności ich dowolnego kształtowania. Skład tworzyw ciernych jest bardzo różny. Można jednak wyszczególnić następujące grupy składników i ich wagowy udział [111]:

lepiszcze	20-30%,
azbest	20-40%,
wypełniacze nieorganiczne	15-40%,
wypełniacze organiczne	5-15%.

Podstawowym składnikiem tworzyw, od którego w znacznym stopniu zależą odporność termiczna i cierność, jest lepiszcze. Obecnie coraz częściej stosuje się tworzywa oparte na modyfikowanych żywicach termoutwardzalnych [134]. Dodanie do lepiszcza różnego rodzaju wypełniaczy zmienia zasadniczo jego własności mechaniczne i tarciove. Odpowiednio dobrane wypełniacze podnoszą cierność (korund, tlenki żelaza, dodatki organiczne), współczynnik przewodzenia ciepła (metale, tlenki metali, kauczuk syntetyczny), odporność na zużycie (baryt, trójsiarczek molibdenu), stabilność cieplną (azbest, włókna żużlowe, mika), przeciwdziałają zacieraniamu (grafit, baryt, sadza), ułatwiają wulkanizację kauczuku lub sieciowanie żywicy (tlenek wapnia, tlenek baru, tlenek magnezu), smarują w wysokich temperaturach (olej, siarczek ołowiu, siarczek antymonu). Działanie różnych składników nie jest jednokierunkowe, dlatego dobór optymalnej struktury wewnętrznej jest skomplikowany. Każdy wypełniacz wywiera skomplikowany wpływ na lepiszcze i pozostałe składniki. Nad doskonaleniem tworzyw ciernych i wyspecjalizowanym przeznaczeniu pracuje w dalszym ciągu wiele laboratoriów na całym świecie.

Materiałom przeznaczonym na elementy cierne w hamulcach można postawić ogólne wymagania, które w wielu przypadkach są przeciwstawne.

Utrudnia to wybór i zmusza do kompromisu uzależnionego od charakterystyki przypadku ich zastosowania. Podstawowe wymagania stawiane materiałom ciernym wg danych zawartych w pracach [32, 49, 53, 54, 72], to:

- stabilna i wysoka wartość współczynnika tarcia,
- duża odporność na zużycie w szerokim zakresie zmian parametrów tarcia,
- brak skłonności do szczepień adhezyjnych,
- duża stabilność mechaniczna, chemiczna i termochemiczna,
- stabilność i równomierność zmian chemicznego i fazowego składu oraz struktury i innych własności warstwy wierzchniej w procesie eksploatacji,

- odporność na korozję, odporność na działanie wody, oleje i inne substancje,
- wysoki punkt topienia,
- wysoki współczynnik przewodzenia ciepła,
- niski współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- duża wartość ciepła właściwego,
- dobra technologiczność (np. obrabialność, mała kruchość i inne).

Dla uzyskania spodziewanej trwałości elementów ciernych hamulca ważne jest, aby w czasie hamowania konstituował się w warstwie wierzchniej dodatni gradient własności mechanicznych [32, 123]. Powoduje to lokalizację deformacji plastycznych i zniszczeń materiału w bardzo cienkiej strefie przypowierzchniowej i uniemożliwia głębokie wrywanie jej cząstek. W procesie tarcia nie powinny następować niekorzystne, z punktu widzenia własności użytkowych, objętościowe zmiany w tworzywie.

2.5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza literaturowa i wstępne badania hamulców dowodzą aktualności i ważności podjętego w pracy zadania. Występujące w praktyce eksploatacyjnej okresowe lub trwałe obniżenie sprawności hamulców stanowi duże zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania urządzenia wyciągowego. Obniżenie wartości współczynnika tarcia w warunkach hamowania bezpieczeństwa może doprowadzić do bardzo poważnego stanu awaryjnego, stąd duże znaczenie identyfikacji technicznie niekorzystnych zjawisk tribologicznych na powierzchniach tarcia w hamulcach.

Badania eksploatacyjne i analityczne potwierdzają coraz większe obciążenie frykcyjne elementów hamulca, które dla maksymalnych parametrów pracy wywołują na powierzchni tarcia temperatury przekraczające temperaturę destrukcji kauczuku i żywicy. Porównanie otrzymanego z obliczeń obciążenia cieplnego hamulców maszyn wyciągowych z wynikami badań termograwimetrycznych wykazuje, że na okładziny tych hamulców niekorzystne własności mają: materiały organiczne, tworzywa cierne o lepiszczu kauczukowym oraz azbestowe impregnowane olejami schnącymi. W tworzywach tych destrukcja cieplna rozpoczyna się najwcześniej, kauczuk w temperaturze powyżej 570 K zamienia się w ciecz i odparowuje. Tworzywa azbestowe impregnowane olejami schnącymi wykazały w temperaturze 570 K ubytek masy równy 4,9%, a w temperaturze 770 K był on równy 24 % .

W tworzywach o lepiszczu kauczukowym nanotowano dla temperatury 570 K odpowiednio 4,8% i 1,9% ubytku masy, a dla temperatury 770 K wynosił on 19% i 14%. Zachodzące w tych temperaturach przemiany termochemiczne w warstwie wierzchniej powodują także istotne zmniejszenie odporności tworzywa na zużycie [116]. W oparciu o znajomość warunków pracy elementów ciernych hamulców maszyn wyciągowych do badań głównych wyselekcjonowano osiem two-

rzyw z grup, które najlepiej odpowiadają funkcjonalnym i trwałościowym wymaganiom stawianym tym hamulcom.

Dla uzyskania pełnej oceny własności tribologicznych hamulcowych tworzyw ciernych trzeba wykonać dużą liczbę badań, w których poszczególne etapy symulują ich przemysłowe warunki pracy.

Specyfika cech konstrukcyjnych i eksploatacji hamulców maszyn wyciągowych stwarza konieczność przeprowadzenia większości badań w warunkach laboratoryjnych i pozwala tylko na końcową weryfikację wyników w warunkach przemysłowych.

Do programu laboratoryjnych badań tribologicznych należą:

- badania w warunkach stabilnej prędkości poślizgu,
- badania w warunkach dynamicznie zmiennej prędkości poślizgu (symulacja ikoniczna pracy hamulca),
- badania w warunkach ruchu przerywanego (ruch stick-slip) [126, 129].

Wyżej wymieniony program powinien obejmować warunki symulujące największe obciążenie przypowierzchniowej strefy warstwy wierzchniej elementów hamulca tarczowego, które charakteryzują: prędkość początkowa hamowania $v_p = 20 \frac{m}{s}$, naciski jednostkowe $p > 1,0 \frac{MN}{m^2}$, maksymalna temperatura powierzchni tarcia $v_t > 800 K$. Ze względu na różną nominalną geometrię styku w poszczególnych rozwiązaniach wielosegmentowych hamulców tarczowych [9, 81, 115], należy uwzględnić także w badaniach współczynnik wzajemnego przykrycia [114]. Współczynnik ten można rozpatrywać jako czynnik wpływający na wielkość oddziaływania otoczenia, czyli lepszy lub gorszy dostęp atmosfery otoczenia do obszaru styku ciernego [74] oraz jako konstrukcyjny wskaźnik dysypacji energii cieplnej.

3. BADANIA WŁASNOŚCI TRIBOLOGICZNYCH PARY: TWORZYWO CIERNE-STAL

3.1. Cel i zakres badań

Ważnym czynnikiem w procesie konstruowania hamulców w maszynach roboczych jest prawidłowa ocena fizycznej trwałości ich elementów [40]. Intensywność starzenia elementów jest wypadkową wymuszeń starzenia (mechanicznych, cieplnych, chemicznych, elektrycznych) i odporności materiałów elementów na ich działanie. Zależy ona od rodzaju procesów niszczących, wywołanych np. tarciem [55]. Analityczne powiązanie własności użytkowych materiałów ciernych z parametrami tarcia, charakterystykami materiałowymi i geometrycznymi cechami konstrukcyjnymi węzła tarcia, pozwoliłoby na rozwiązanie szeregu ważnych zagadnień, a mianowicie:

- tribologicznych - ocena własności ciernozużyciowych tworzyw w funkcji widma wymuszeń i mikroklimatu otoczenia (temperatura, wilgotność, zanieczyszczenia powietrza),

- eksploatacyjnych - prognozowanie zużycia elementów jako część szerzej pojętej predykcji trwałości i niezawodności maszyn (systemów) [131],
- konstrukcyjnych - podstawa do optymalizacji węzłów tarcia ze względu na wybrane kryteria [69].

W ostatnich kilku latach wykonano szereg prac, które pozwalają prognozować wartość współczynnika tarcia i zużycie przy zawężonych wartościach parametrów [14, 31, 69, 95-97, 103-105, 117, 123]. Dalsze prace w tym zakresie wzbogacają zbiór faktów empirycznych i aproksymują uogólnione rozwiązanie w postaci zależności analitycznych.

Celem tej części pracy było zbadanie tribologicznych charakterystyk tworzyw na modelach ikonicznych oraz zbudowanie modelu matematycznego, w którym będą uwzględnione zależności między: odpornością tworzywa na zużycie, współczynnikiem tarcia a naciskami jednostkowymi, prędkością względną ruchu, charakterystycznymi cechami materiałowymi (HK, U) oraz współczynnikiem wzajemnego przykrycia.

Stanowisko badawcze i warunki badań zapewniały, że fizyczny model eksperymentów odwzorowywał hamulce tarczowe maszyn wyciągowych.

3.2. Problemy modelowania w badaniach tribologicznych

W badaniach tribologicznych przyjmujemy podział metod modelowania na fizyczne i matematyczne. W modelowaniu matematycznym posługujemy się modelem symbolicznym (symbolami matematycznymi). W badaniach tribologicznych używamy modeli fizycznych, ikonicznych, czyli że laboratoryjne badania prowadzimy na stosowanych trójwymiarowych układach fizycznych, które mają odwzorowywać układ rzeczywisty (oryginał). Eksperymenty na modelach ikonicznych nazywamy symulacją ikoniczną. Symulacja ikoniczna w zagadnieniach tribologicznych polega na odwzorowaniu w warunkach laboratoryjnych charakteru zjawisk tribologicznych, odpowiadających rzeczywistym węzłom tarcia (oryginałom). Trudność modelowania procesu tarcia i zużycia polega na tym, że przyjęcie tych samych materiałów oraz parametrów tarcia jeszcze nie odwzoruje wystarczająco precyzyjnie wszystkich zjawisk tribologicznych [21, 72, 98], Materiały par ciernych zmieniają w czasie tarcia swoje własności [49, 58], w zależności od różnych czynników, np.: temperatury i gradientu temperatury w warstwie wierzchniej, makrogeometrii powierzchni tarcia elementów ciernych, parametrów tarcia, oddziaływania środowiska i innych [25, 33, 34, 52, 98, 136].

Uzyskane drogą analizy wymiarowej [84] kryteria podobieństwa [22, 32, 56], oparte na odwzorowaniu zjawisk: cieplnofizycznych, fizycznomechanicznych, dynamicznych oraz makro- i mikrogeometrii powierzchni tarcia, nie dają pełnych możliwości modelowania wpływu wszystkich czynników, przez co zmuszają do eksperymentalnej oceny kryteriów podobieństwa i wyznaczenia zakresu ich zastosowania [33]. W przypadku materiałów termoutwardzalnych,

w skład których wchodzi związki organiczne, dużą rolę odgrywają procesy tribochemiczne zależne od temperatury, ciśnienia i składu chemicznego środowiska. W badaniach uwzględnia się je dodatkowymi kryteriami [33].

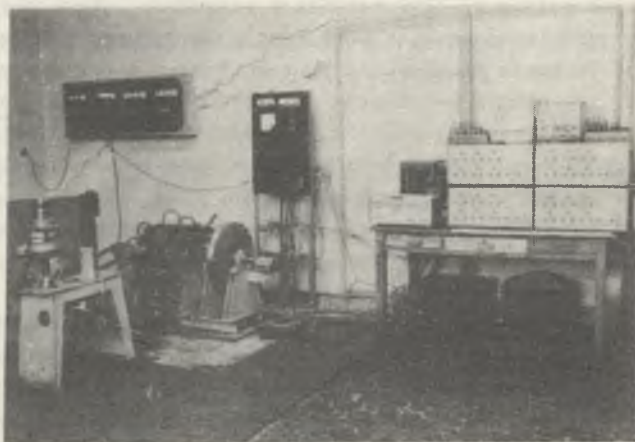
Modelowanie tarcia i zużycia można traktować tylko jako przybliżone, a o dokładności odzworowania rzeczywistych warunków pracy decydują między innymi kryteria przyjęte za najważniejsze. Modelowanie pracy hamulców maszyn wyciągowych [22] oparto na założeniach równości jednostkowej mocy tarcia, współczynników przewodności i oddawania ciepła dla modelu i oryginału. Równość tych współczynników ułatwia użycie tych samych materiałów oraz współczynnika wzajemnego przykrycia. Przyjęte założenia opierają się na badaniach [22, 92], które wykazują istotną korelację między mocą tarcia a temperaturą powierzchni. W wykonywanych w niniejszej pracy badaniach modelowych na laboratoryjnym stanowisku badawczym (rys. 10) założono dla oryginału i modelu równości następujących parametrów:

- początkowej wartości prędkości względnej ruchu,
- średniej wartości nacisków jednostkowych,
- współczynnika wzajemnego przykrycia.

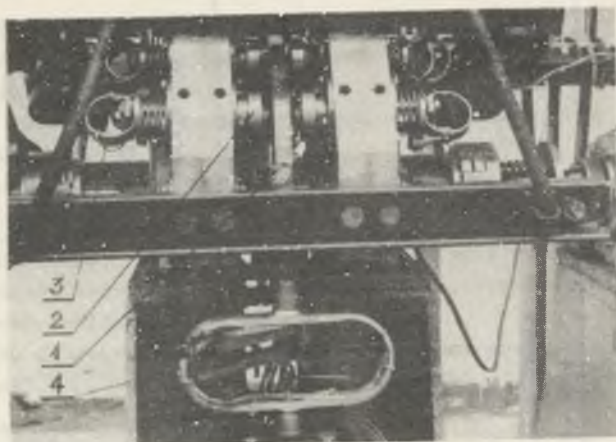
Czas hamowania dla modelu wyliczono, zakładając równość temperatury powierzchni tarcia dla oryginału i modelu.

3.3. Warunki badań

Badania cierne wykonano na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku (modelu ikonicznym hamulca tarczowego) rys. 8-10 [91, 125]. Ogólną charakterystykę modelu przedstawia tablica 5.

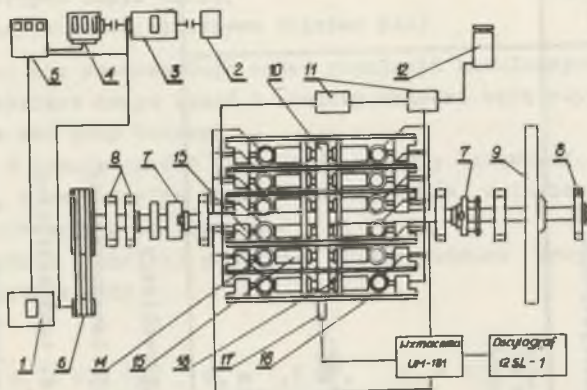


Rys. 8. Ogólny widok stanowiska badawczego oraz aparatury pomiarowej



Rys. 9. Stanowisko badawcze, sposób mocowania i docisku próbek do tarczy oraz pomiaru momentu tarcia

1 - tarcza, 2 - próbka i uchwyt próbki, 3 - czujnik siły normalnej, 4 - czujnik siły tarcia



Rys. 10. Schemat stanowiska badawczego

1 - silnik prądu stałego, 2-5 - układ zasilający, 6 - przekładnia pasowa, 7 - sprzęgła, 8 - łożyska toczne, 9 - koło zamachowe, 10 - tarcza, 11 - rozdzielacze, 12 - pompa statyczna, 13 - tłoczki, 14 - czujniki tensometryczne siły normalnej, 15 - prowadnik i uchwyt próbki, 16 - próbka, 17 - czujnik tensometryczny siły tarcia, 18 - rama łącząca

Wyposażenie stanowiska w czasie badań stanowił zespół aparatury do ciągłego pomiaru siły tarcia, obciążenia normalnego próbek, temperatury powierzchni tarcia oraz kontroli prędkości obrotowej i drogi tarcia.

CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO

Cechy charakterystyczne	Jednostki miary	Wartość	U w a g i
Prędkość względna tarcia	m/s	0,2-40	regulacja płynna
Nacisk jednostkowy	$\frac{MN}{m^2}$	do 7	regulacja płynna
Powierzchnia tarcia próbek	cm ²	$i = \begin{cases} x i \\ 1...12 \end{cases}$	
Wymiary przeciwpróbki	mm	∅ 240	
<p>Układ obciążający: hydrauliczny</p> <p>Pomiar docisku próbki: tensometryczny</p> <p>Pomiar momentu tarcia: tensometryczny</p> <p>Pomiar prędkości: stroboskopem</p> <p>Pomiar drogi tarcia: licznik mechaniczny</p> <p>Pomiar temperatury: mikrotermopara stykowa (chromel-alumel)</p>			<p>regulacja płynna</p> <p>rejestracja</p> <p>rejestracja</p> <p>rejestracja</p>

Zespół ten składał się z:

- oscylografu ośmiopętlicowego R F T, typu 8LS-1,
- miernika wielkości dynamicznych IL typ RF-01 T,
- stroboskopu Dawf, typ 1203 B,
- czujników kabłąkowych tensometrycznych do pomiaru siły normalnej i siły tarcia (rys. 9),
- mikrotermopar stykowych chromel-alumel \varnothing 0,2 mm.

Przedmiotem badań były próbki wykonane z hamulcowych tworzyw ciernych reprezentujących grupy, które znalazły zastosowanie w najnowszych konstrukcjach hamulców tarczowych maszyn wyciągowych, czyli tworzywa niemetalowe i metalowo-żywiczne.

Wybrano osiem tworzyw produkowanych w kraju i za granicą o różnej strukturze wewnętrznej [50, 62, 63, 111, 112, 134], tabl. 3:

- kauczukowe, tworzywo W-12,
- kauczukowo-fenolowo-formaldehydowe, tworzywo AKF,
- fenolowo-formaldehydowe, tworzywo M-31,
- melaminowo-fenolowo-formaldehydowe, tworzywo ZK-VI-19,
- żywiczne, tworzywo Textar V-1431 (RPN),
- kauczukowe, tworzywo Galfel (Włochy),
- żywiczne, tworzywo Cosid (NRD),
- fenolowo-formaldehydowe, tworzywo Polofen FA-3.

Wybrane tworzywa nie reprezentują całej populacji hamulcowych tworzyw ciernych, czyli uzyskane drogą badań i analizy wnioski będą reprezentatywne tylko dla dwóch ww. grup tworzyw.

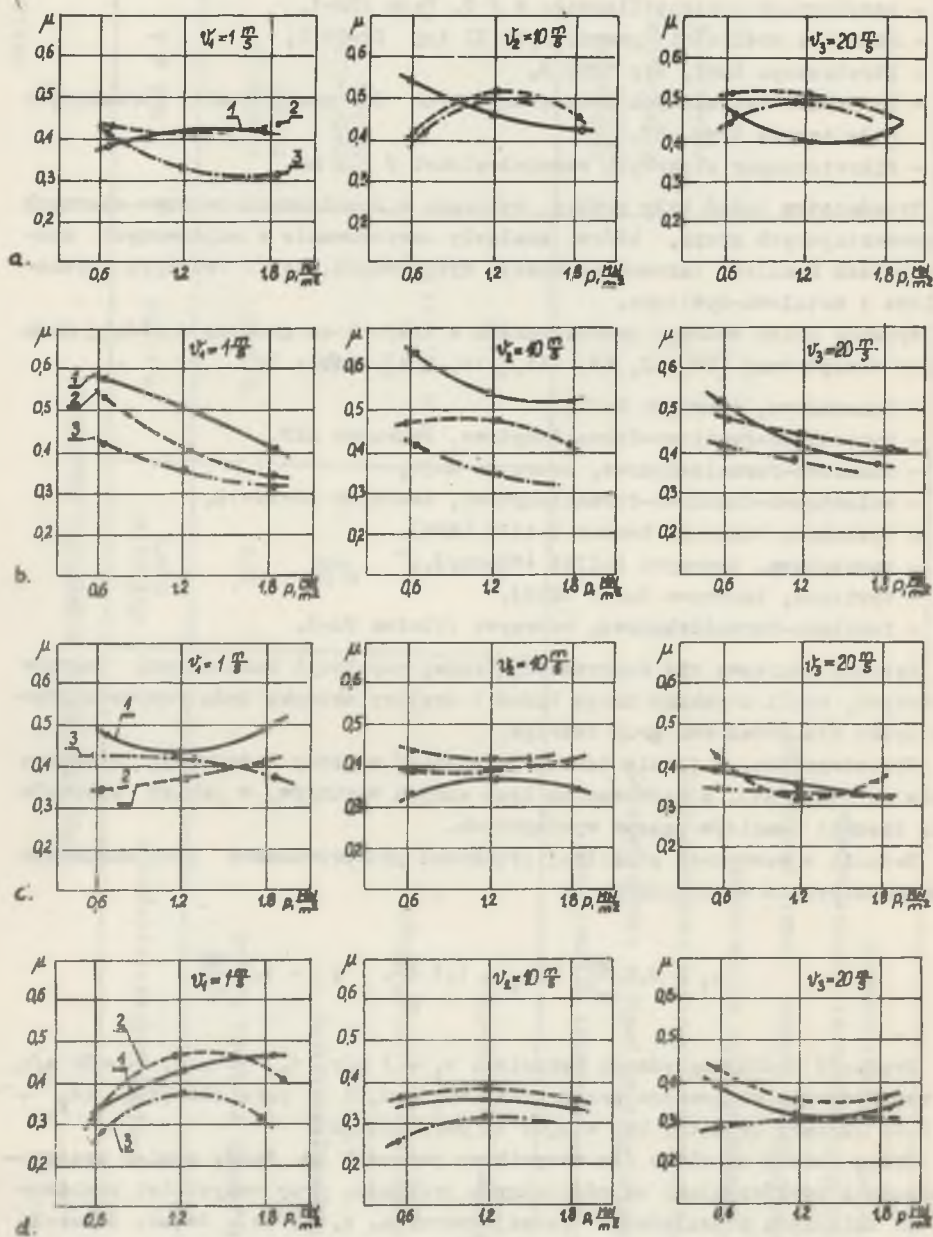
Przeciwpróbka, w formie tarczy jako część maszyny badawczej, wykonana była ze stali St5, z zachowaniem tych samych warunków, w jakich wykonuje się bieżnie hamulców maszyn wyciągowych.

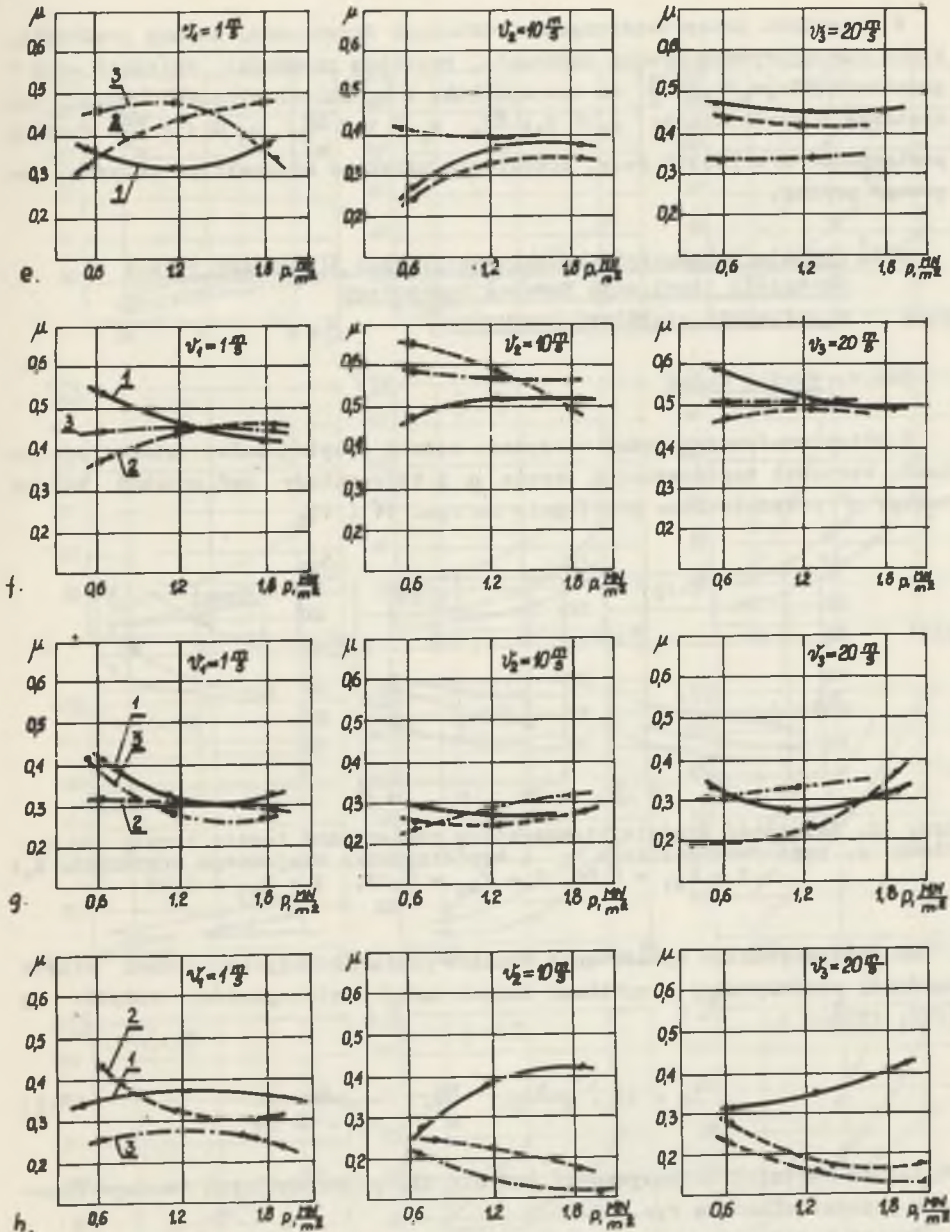
Badania w warunkach stabilnej prędkości przeprowadzono przy naciskach jednostkowych o wartościach:

$$p_1 = 0,6 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}, \quad p_2 = 1,2 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}, \quad p_3 = 1,8 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}.$$

Prędkość ruchu względnego wynosiła: $v_1 = 1$ m/s, $v_2 = 10$ m/s, $v_3 = 20$ m/s, a współczynnik wzajemnego przykrycia $kw_1 = 0,01$ (1 para szczęk), $kw_2 = 0,02$ (2 pary szczęk), $kw_3 = 0,04$ (4 pary szczęk).

Drogę tarcia ustalono dla wszystkich par na 5 km. Każdy pomiar przeprowadzono z powtórzeniami na oddzielnych próbkach, przy wszystkich kombinacjach zmiennych niezależnych (rodzaj tworzywa, p, v, kw). Dawało to około 1500 pomiarów współczynnika tarcia zużycia próbek i temperatury powierzchni tarcia przeciwpróbki.





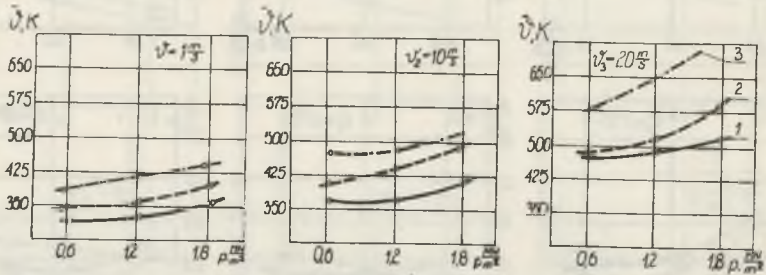
Rys. 11. Zależność wartości współczynnika tarcia badanych tworzyw od nacisku p , prędkości poślizgu v i współczynnika wzajemnego przykrycia k_w
 a - tworzywo W - 12, b - tworzywo AKF, c - tworzywo M - 31, d - tworzywo ZK - VI - 19, e - tworzywo Textar V - 1431, f - tworzywo Galfel, g - tworzywo Cosid, h - tworzywo Polofen FA - 3, 1 - $k_{w1} = 0,01$, 2 - $k_{w2} = 0,02$, 3 - $k_{w3} = 0,04$

W badaniach przeprowadzonych w warunkach dynamicznej zmiany prędkości, które odwzorowywały proces hamowania, przebieg prędkości zmieniał się w granicach od $v_p \approx 20 \frac{m}{s}$ do zatrzymania. W badaniach stosowano naciski jednostkowe o wartościach: $p_1 \approx 0,6 \frac{MN}{m^2}$, $p_2 \approx 1,2 \frac{MN}{m^2}$, $p_3 \approx 1,8 \frac{MN}{m^2}$. Pomiarów powtarzano $m = 50 \div 100$ razy, dopóki nie uzyskano mierzalnego zużycia wagowego próbek.

3.4. Badania zależności charakterystycznych dla węzłów tarcia na modelu ikonicznym hamulca tarczowego w warunkach stabilnej prędkości

3.4.1. Wyniki badań

Z przeprowadzonych badań otrzymano szereg oscylogramów, które odczytano wartości współczynnika tarcia μ i temperatury powierzchni tarcia tarczy \bar{v} przedstawiono graficznie na rys. 11 i 12.



Rys. 12. Zależność średniej temperatury powierzchni tarcia tarczy od nacisku p , prędkości poślizgu v i współczynnika wzajemnego przykrycia k_w :
1 - $k_{w1} = 0,01$, 2 - $k_{w2} = 0,02$, 3 - $k_{w3} = 0,04$

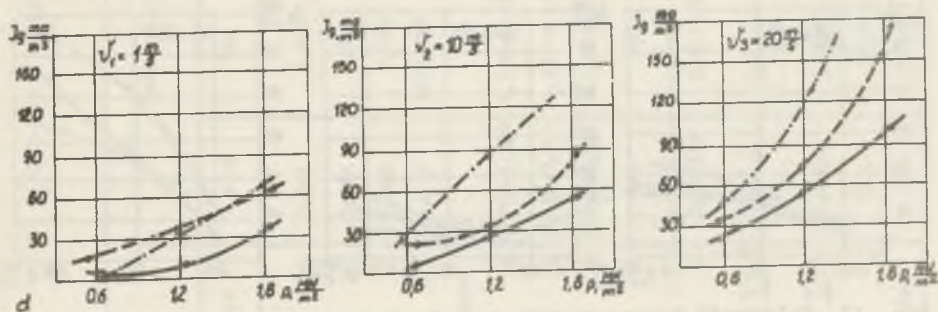
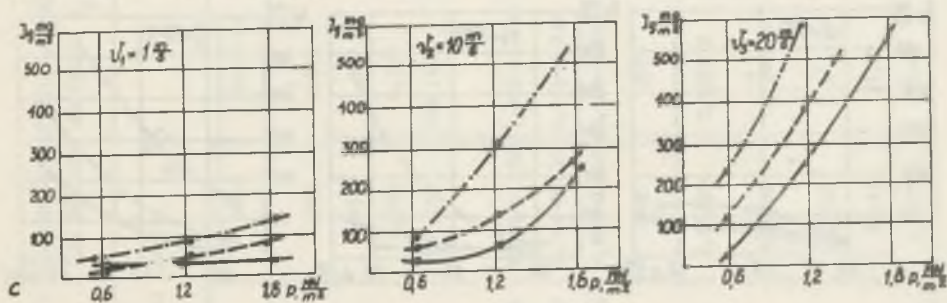
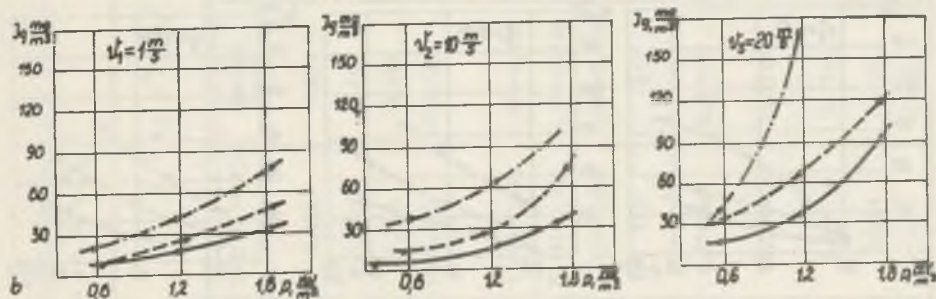
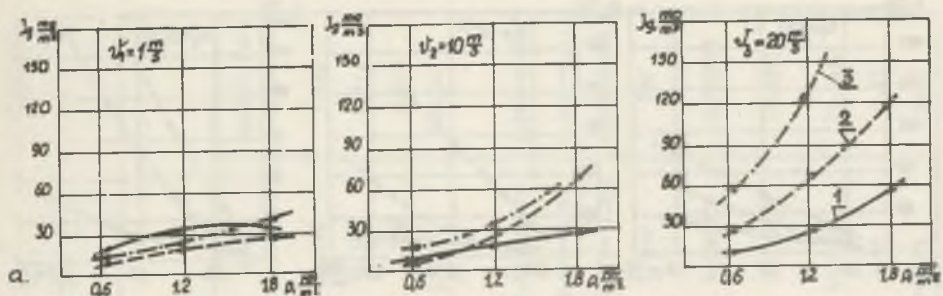
Do statystycznego opracowania wyników pomiarów zużycia próbek wzięto bardziej porównywalne z wynikami innych badań intensywności zużycia I_g [117, 123]

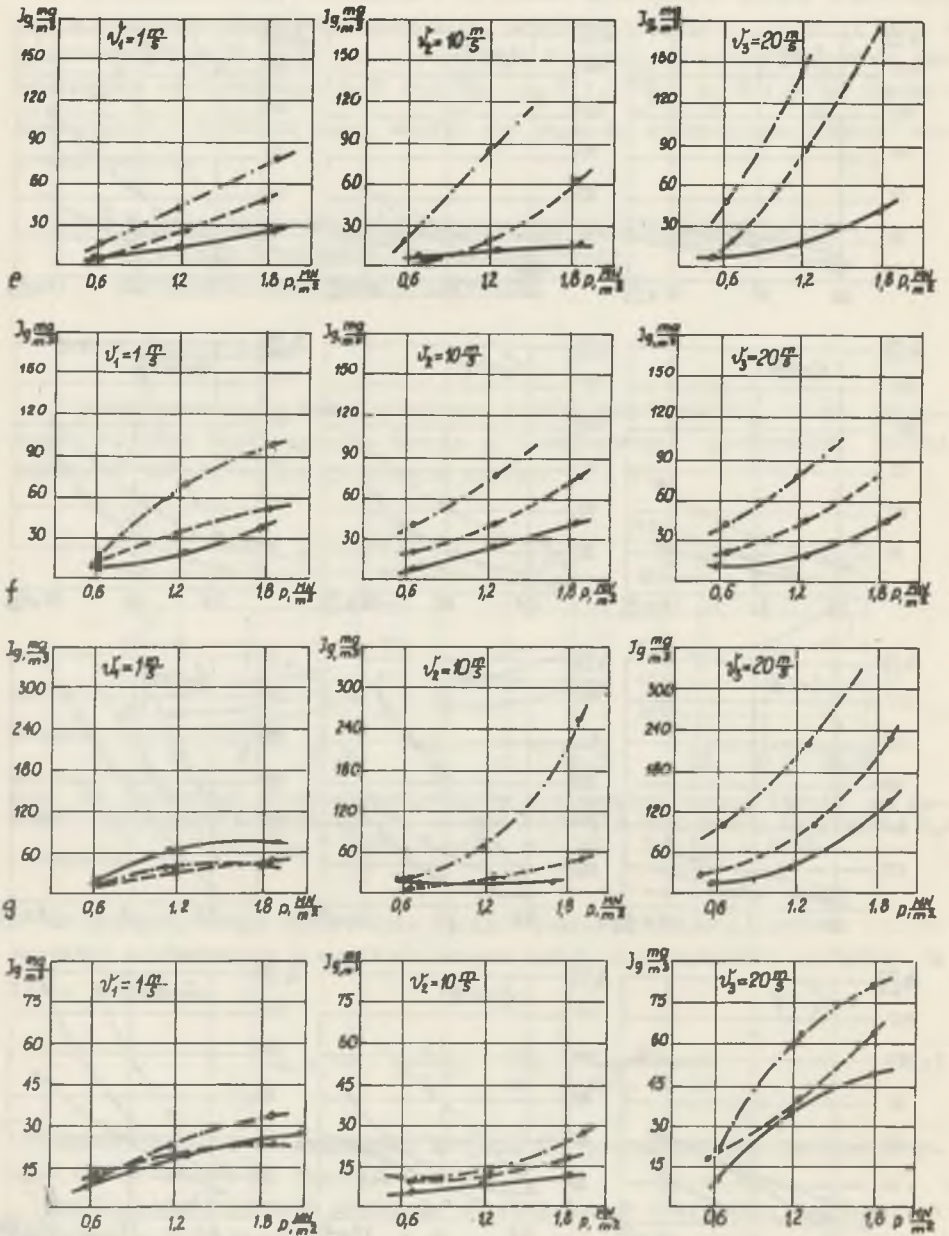
$$I_g = 10 \cdot \frac{z}{A \cdot s}, \quad \frac{mg}{m}, \quad \frac{mg}{cm^2 \cdot 10 \text{ km}} \quad (2)$$

Obliczone wartości intensywności zużycia dla poszczególnych tworzyw ciernych przedstawiono na rys. 13.

Wyniki badań ciernych posłużyły do ilościowego powiązania zmiennych w funkcjach o charakterze:

$$\begin{aligned} I_g &= f_1(p, v, k_w) \\ \mu &= f_2(p, v, k_w) \\ \bar{v} &= f_3(p, v, k_w) \end{aligned} \quad (3)$$





Rys. 13. Zależność intensywności zużycia badanych tworzyw od nacisku p , prędkości poślizgu v i współczynnika wzajemnego przykrycia k_w

a - tworzywo W - 12, b - tworzywo AKF, c - tworzywo M - 31, d - tworzywo ZK - VI - 19, e - tworzywo Textar V - 1431, f - tworzywo Galfel, g - tworzywo Cosid, h - tworzywo Polofen FA - 3, 1 - $k_{w1} = 0,01$, 2 - $k_{w2} = 0,02$, 3 - $k_{w3} = 0,04$

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNYCH DLA INTENSYWNOŚCI ZUŻYCIA I_g
 DLA RÓWNIANIA REGRESJI $I_g = k \mu p^{\alpha} v^{\beta} k_w \gamma$

OZNACZENIA	Intensywność zużycia $I_g = \frac{mg}{m}$				$I_g = k \mu p^{\alpha} v^{\beta} k_w \gamma$				
	W-12	AKF	M-31	ZK-VI-19	TEXTAR V-1431	GALFEL	COSID	POLOFEN FA-3	
Współczynnik regresji	α	1,551	1,600	1,543	1,545	1,454	1,693	1,186	1,286
	β	0,084	0,275	0,695	1,383	0,111	0,149	0,185	0,114
	γ	0,429	1,005	0,785	0,782	1,048	0,971	0,309	0,510
Wykaz wolny	K	241,049	2273,328	1601,987	1082,469	2525,009	1893,155	305,21	280,34
Przedziały ufności wsp. regresji na poziomie	α	1,719-1,383	1,735-1,465	1,708-1,378	1,676-1,414	1,683-1,225	1,816-1,570	1,814-0,558	1,909-0,663
istotności 5%	β	0,136-0,032	0,320-0,230	0,754-0,636	0,429-0,337	0,191-0,031	0,189-0,109	0,420-0,050	0,342--0,114
	γ	0,552-0,306	1,112-0,898	0,825-0,645	0,891-0,673	1,234-0,862	1,071-0,871	0,875--0,257	1,018-0,002
Liczba danych	N	240	240	240	240	220	210	220	240
Współcz. korelacji	R	0,818136	0,911005	0,913214	0,907070	0,778662	0,927559	0,681772	0,724842
Suma kwadratów regresji	$\sum c^2$	10,21481	18,68824	32,9998	18,356574	14,568115	14,01334	9,258275	13,2499
Resztowa suma kwadratów	$\sum I_g^2$	5,04605	3,82958	6,5701	3,953919	9,459156	2,2743	10,066	11,9689
Test	F	13,51	32,61	30,49	31,05	10,24	41,32	6,82	8,83
Poziom istotności		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNYCH DLA INTENSYWNOŚCI ZUŻYCIA I_g
 DLA RÓWNIANIA REGRESJI $I_g = k\mu(pv)^{\alpha}k_w^{\beta}$

OZNACZENIA	Instensywność zużycia $I_g \frac{mg}{m^3}$				$I_g = k\mu(pv)^{\alpha}k_w^{\beta}$				
	Rodzaj tworzywa	W-12	AKF	M-31	ZK-VI-19	TEXTAR-V-1431	GALFEL	COSID	POLOFEN FA-3
Współczynniki regresji	α	0,197	0,367	0,777	0,468	0,188	0,248	0,294	0,270
	β	0,293	0,893	0,723	0,672	0,939	0,800	0,352	0,548
Wyraz wolny	K	130,582	1324,778	1114,320	639,061	1483,263	890,693	317,03	290,325
Przedziały ufności wsp.	α	0,275-0,119	0,443-0,291	0,846-0,708	0,540-0,396	0,293,0,083	0,334-0,162	0,559-0,029	0,525-0,015
refresji na poziomie istotności 5%	β	0,485-0,101	1,076-0,710	0,892-0,554	0,846-0,498	1,186-0,692	1,016-0,584	1,023-0,319	1,168-0,072
Liczba danych	N	240	240	240	240	220	210	230	250
Współczynnik korelacji	R	0,377227	0,687349	0,862178	0,722902	0,517823	0,55167	0,458947	0,51038
Suma kwadratów regresji	$\sum c^2$	2,17168	10,63859	29,41455	11,65927	6,44274	4,95721	4,195449	6,5692
Resztowa suma kwadratów	$\sum i_g^2$	13,0895	11,87937	10,15562	10,65135	17,5847	11,3308	15,72282	18,6497
Test	F	1,10	5,99	19,31	7,30	2,44	2,91	3,09	4,39
Poziom istotności		>0,05	<0,01	<0,01	<0,01	>0,05	>0,05	>0,05	0,01 < a < 0,05

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNYCH
DLA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA μ .

OZNACZENIA		Współczynnik tarcia μ $\mu = k p^\alpha v^\beta k_w \gamma$							
Rodzaj tworzywa		W-12	AKF	M-31	ZK-VI-19	TEXTAR V-1431	GALFEL	COSID	POLOFEN-FA-3
Współczynniki regresji	α	-0,059	-0,240	-0,021	0,038	0,057	-0,093	0,007	-0,192
	β	+0,069	-0,004	-0,049	-0,031	-0,011	0,060	-0,048	-0,100
	γ	-0,041	-0,206	-0,003	-0,124	0,030	+0,007	-0,073	-0,487
Wyraz wolny	k	0,339	0,195	0,416	0,224	0,438	0,470	0,242	0,048
Przedziały ufności wsp. regresji na poziomie istotności 5%	α	-0,024±-0,094	-0,212±-0,268	+0,008±-0,05	0,076±0,0	+0,119±-0,005	-0,047±-0,139	0,169±-0,155	0,005±-0,389
	β	0,070±0,048	0,005±-0,013	-0,038±-0,06	-0,018±-0,044	0,011±-0,033	0,075±0,045	0,012±-0,108	0,028±-0,172
	γ	-0,015±-0,067	-0,186±-0,228	0,022±-0,028	-0,093±-0,155	0,081±-0,021	0,045±-0,031	0,073±-0,219	-0,327±-0,647
Liczba danych	N	240	240	240	240	220	210	220	240
Współczynnik korelacji	R	0,670011	0,86912	0,5730	0,58046	0,1966	0,599676	0,372464	0,83958
Suma kwadratów regresji	$\sum \alpha^2$	0,17952	0,52061	0,10443	0,16997	0,02853	0,18402	0,1149	2,8594
Resztowa suma kwadratów	$\sum \mu^2$	0,22038	0,16859	0,21364	0,33449	0,70971	0,32770	0,7135	1,197
Test	F	5,43	3,25	20,58	3,38	0,26	3,74	11,7	19,1
Poziom istotności		<0,01	0,01 < a < 0,05	<0,01	0,01 < a < 0,05	>0,05	0,01 < a < 0,05	<0,01	<0,01

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNYCH
DLA ŚREDNIEJ TEMPERATURY POWIERZCHNI TARCZY

Średnia temperatura powierzchni tarczy \bar{v} , K			
Oznaczenia		$\bar{v} = k \mu p^{\alpha} v^{\beta} k_W^{\gamma} + 273$	$\bar{v} = k \mu (pv)^{\alpha} k_W^{\beta} + 273$
Współczynniki regresji	α	0,328	0,308
	β	0,307	0,458
	γ	0,458	-
Wyraz wolny	k	529,535	528,477
Przedziały ufności współczynników regresji na poziomie istotności 5%	α	0,389 \pm 0,267	0,327 \pm 0,289
	β	0,327 \pm 0,287	0,504 \pm 0,412
	γ	0,506 \pm 0,410	-
Liczba danych	N	240	240
Współczynnik korelacji	R	0,933814	0,934119
Suma kwadratów regresji	$\sum c^2$	5,246661	5,250201
Resztowa suma kwadratów	$\sum d^2$	0,770092	0,7666764
Test	F	45,42	45,45
Poziom istotności		<0,01	<0,01

Do aproksymacji wyników pomiarów przyjęto równanie regresji w postaci wykładniczej:

$$\begin{aligned}
 y &= k_1 \mu p^{\alpha_1} v^{\beta_1} k_w^{\delta_1} \\
 y &= k_2 \mu (pv)^{\alpha_2} k_w^{\delta_2} \\
 y &= k_3 p^{\alpha_3} v^{\beta_3} k_w^{\delta_3}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Wykonano także obliczenia stosując równania regresji w postaci liniowej, ale istotność aproksymacji okazała się gorsza. Przyjęta postać równania regresji wystarczająco dokładnie aproksymuje wyniki pomiarów i jest zgodna z poprzednimi badaniami autora [117, 123]. Podobne rozwiązanie proponują także: Archard i Hirst [11], Orlacz [92], Pavelescu [96], Rhee [103] Sworzyński [112].

Zestawienie wyników obliczeń przedstawiają tablice 6-9.

3.4.2. Dyskusja i podsumowanie wyników badań

Otrzymane wyniki pomiarów współczynnika tarcia i intensywności zużycia w funkcji nacisków jednostkowych, prędkości poślizgu i współczynnika wzajemnego przykrycia wskazują na zróżnicowany wpływ ww. czynników.

Wpływ tych czynników na współczynnik tarcia jest dla poszczególnych tworzyw ciernych niejednokierunkowy i dla większości z nich nieznaczny (rys. 11, tabl. 8). Proces tarcia pary hamulcowej: tworzywo cierne-metal wykazał niestabilny charakter. Wypadkowy dla wszystkich tworzyw wpływ nacisku, prędkości - współczynnika wzajemnego przykrycia na opór tarcia dobrze ilustruje funkcja [8], wzrost p i v nieznacznie obniża współczynnik tarcia, a k_w zwiększa jego wartość. Za wyjątkiem tworzywa Polofen i Cosid (rys. 15) nie stwierdzono gwałtownego obniżania się wartości współczynnika tarcia ze wzrostem średniej temperatury powierzchni tarcia (rys. 12). Prawdopodobnie każdy z czynników ma skomplikowany wpływ na zjawiska fizykochemiczne i mechaniczne w obszarze styku, na własności materiałów pary ciernej oraz na średnią temperaturę powierzchni tarcia (rys. 12), temperaturę na rzeczywistych powierzchniach styku oraz temperaturę objętościową.

Wzrost nacisku jednostkowego wywołuje zmiany, z których jedne obniżają, a drugie zwiększają opór tarcia w parze: tworzywo cierne-metal. I tak np. wzrost nacisku poprzez wzrost temperatury powoduje zmianę mechanicznych własności materiałów, zwiększenie rzeczywistej powierzchni styku, zmniejszenie szczeliny kontaktowej, a przez to zmniejszenie adsorpcji, zwiększenie się wydzielania smarowych produktów destrukcji oraz zwiększenie się udziału na powierzchni tarcia twardych koksowych produktów destrukcji tworzywa. Powoduje on także intensyfikację procesu metalizacji, zwiększenie

aktywności chemicznej elementów (adsorpcji, dyfuzji) na powierzchniach odkrytych, jak również zwiększenie intensywności niszczenia błon adsorbowanych [34, 49, 72, 73] itd.

W zakresie zmian objętych pracą jest najistotniejszy, a zarazem powtarzalny dla wszystkich tworzyw, wpływ nacisków jednostkowych na intensywność zużycia. Duży okazał się także wpływ współczynnika k_w , natomiast najmniejszy wpływ na wyniki miała prędkość poślizgu. Zmiany intensywności zużycia tworzyw ciernych spowodowane zmianą współczynnika k_w są nieduże dla małych prędkości (v_1), gdyż wywołują małe zmiany temperatury (rys. 12), poniżej temperatury destrukcji lepiszcza. Dla dużych prędkości współczynnik k_w wpływa istotnie na wartość intensywności zużycia. Nacisk jednostkowy, siła tarcia i prędkość decydują o stopniu i gradiencie sprężysto-plastycznych deformacji warstwy wierzchniej, o wielkości powierzchni rzeczywistego styku oraz o aktywności chemicznej powierzchni tarcia. Zmiany wartości temperatury warstwy wierzchniej prowadzą do zmiany struktury materiałów, zmiany ich własności mechanicznych, jak również ułatwiają szczenie i utlenianie powierzchni lub powodują płynięcie strefy przypowierzchniowej materiałów [17, 70, 72]. Wynika stąd duży wpływ wartości nacisku na intensywność zużycia tworzyw ciernych. Stosunkowo mniejszy wpływ prędkości świadczy także o występowaniu w badaniach zużycia cieplnego tworzyw (destrukcji lepiszcza), które zależy od czasu oddziaływania temperatury, a nie od drogi tarcia (w badaniach przyjęto stałą drogę tarcia). Niektóre próbki miały po badaniach powierzchnię nametalizowaną (szczególnie wyraźnie tworzywa W-12, AKF i Galfel), nie można było jednak wyznaczyć wyraźnej granicy, opisaną np. parametrami tarcia, która dla określonego tworzywa ciernego i przeciwpróbki wyznaczałaby warunki, kiedy metalizowanie wystąpi a kiedy nie. Zjawiska tego nie notowano np. przy prędkości v_1 , a dla prędkości v_3 było najczęstsze, lecz nie występowało ono zawsze, nawet dla tych samych pozostałych parametrów tarcia i materiałów. Najprawdopodobniej występowanie tego zjawiska związane jest między innymi z wielkością temperatury na rzeczywistych powierzchniach styku tworzywa i stalowej przeciwpróbki.

Próbki otrzymane z badań ilościowych tarcia i zużycia posłużyły w następnych etapach do fizykalnych badań mających na celu identyfikację zjawisk tribologicznych.

Szukając związku między cechami materiałowymi i odpornością na zużycie oraz ciernością badanych tworzyw, związano w funkcję korelacyjną: średnią intensywność zużycia \bar{I}_g , średni współczynnik tarcia $\bar{\mu}$, udarność U i twardość HK tworzyw ciernych (tabl. 4).

Otrzymano stąd funkcje (tabl. 10):

$$\bar{I}_g = 17,5 \left(\frac{HK}{U} \right)^{0,3}$$

oraz

$$\bar{\mu} = 0,460 \left(\frac{HK}{U} \right)^{-0,05} \quad (5)$$

ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNEJ DLA I_g oraz

Oznaczenia	$I_g = K \left(\frac{HK}{J} \right)^a p^b v^c k_w^d$	$\mu = K \left(\frac{HK}{J} \right)^a p^b v^c k_w^d$	$\bar{I}_g = k \left(\frac{HK}{J} \right)^a$	$\bar{\mu} = k \left(\frac{HK}{J} \right)^a$
Współczynniki regresji				
a	0,306	-0,050	0,295	-0,057
b	1,414	-0,107	-	-
c	0,243	-0,026	-	-
d	0,694	-0,146	-	-
Wyraz wolny	K	0,257	17,53	0,460
Przedziały ufności wsp. regresji na poziomie istotności 5%				
a.	0,384±0,228	-0,022±-0,078	0,645±-0,055	0,076±-0,190
b.	1,639±1,189	-0,024±-0,190	-	-
c.	0,321±0,165	0,003±-0,055	-	-
d.	0,879±0,509	-0,078±-0,214	-	-
Liczba danych	N	1530	8	8
Współczynnik korelacji	R	0,766	0,397	0,413
Suma kwadratów regresji	$\sum c^2$	140,6	2,521	0,047
Resztowa suma kwadratów	$\sum y^2$	98,6	13,45	0,227
Test	F	75,1	8,9	1,4
Poziom istotności		<0,01	>0,05	>0,05

W dalszych obliczeniach powiązано wyniki badań wszystkich tworzyw, przyjmując równanie regresji w postaci:

$$y = k_{\mu} \left(\frac{HK}{U} \right)^a p^b v^c k_w^d \quad (6)$$

Była to próba syntezy wszystkich otrzymanych zależności. W wyniku obliczeń na maszynie matematycznej otrzymano równania (tabl. 10) które po zaokrągleniu wykładników potęgowych do dwóch cyfr znaczących mają postać

$$I_g = 285 \mu \left(\frac{HK}{U} \right)^{0,3} p^{1,4} v^{0,24} k_w^{0,7} \quad (7)$$

$$\mu = 0,257 \left(\frac{HK}{U} \right)^{-0,05} p^{-0,1} v^{-0,03} k_w^{0,15} \quad (8)$$

Zależności te są próbą matematycznego sformalizowania podstawowych procesów tribologicznych, jakimi są opór tarcia i zużycia.

Niektórzy autorzy [130] nie stwierdzili korelacji między własnościami mechanicznymi i frykcyjnymi dla tworzyw ciernych lub też nie zalecają stosowania twardości i udarności jako wskaźników własności mechanicznych (np. ich mała precyzyjność, duży rozrzut). Ze względu jednak na specyfikę mechanizmu tarcia, charakter dominujących zjawisk elementarnych w czasie zużycia ściernego [117] oraz istniejące hipotezy tarcia, takie ujęcie tej zależności wydaje się słuszne. Szczególnie w materiałach kompozycyjnych wartość twardości i udarności jest dobrym reprezentantem ich odporności na rysowanie, wyciskanie oraz wrywanie mikrowystępów, łącznie z udarowym zginaniem. Duża twardość tworzywa kompozycyjnego, opartego na lepiszczu żywicznym, związana jest z obecnością twardych wypełniaczy, które mogą się stać po wyjściu na powierzchnię elementami ściernymi. Udarność natomiast zależy między innymi od jakości wiązań między komponentami. Zmniejszenie twardości, np. metalowych wypełniaczy, wywołuje zmniejszenie zużycia tworzywa ciernego [130]. Zwiększenie natomiast ilości wypełniaczy w postaci proszków metali i pyłów ciernych powoduje zwiększenie zużycia tworzyw ciernych [112].

Badania wykazały dużą istotność wpływu makrogeometrii wężła tarcia na jego własności cierno-zużyciowe. Wpływ ten można ująć w modelu przy pomocy współczynnika k_w .

Wyniki i forma ich przedstawienia pozwalają na ogólne poznanie związków między głównymi wielkościami opisującymi hamulca jako wężel tarcia. Zastosowanie uzyskanych zależności (modeli matematycznych) do obliczeń trwałości okładzin hamulca maszyny wyciągowej jest ułatwione, gdyż można założyć, że warunki tarcia i zużycia w tych hamulcach nie zależą od resursu okładziny cierniej, aż do osiągnięcia stanu granicznego.

3.5. Badanie zależności charakterystycznych dla węzłów tarcia przy pomocy symulacji ikonicznej pracy hamulca tarczowego maszyny wyciągowej

3.5.1. Badania zużycia

Hamowanie jest przykładem procesu tarcia, w którym zachodzą ciągle zmiany czynników zewnętrznych, a przede wszystkim prędkości poślizgu i obciążenia, jak również pola temperatury, własności warstwy wierzchniej materiału oraz występowania różnych tribochemicznych procesów w strefie styku [48, 56]. Wyniki z pomiarów zużycia w warunkach odwzorowujących proces hamowania przeliczono, wprowadzając pojęcie tzw. efektywnej intensywności zużycia e_g . Jest to stosunek zużycia wagowego badanych próbek do pracy tarcia, jaką wykonały one w czasie badań

$$e_g = \frac{\sum_n z}{\sum_m L} = \frac{\sum_n z}{\sum_m E_u \eta} \quad (9)$$

gdzie:

n - liczba próbek, $n = 2, 4, 8$,

m - liczba powtórzeń,

E_u - energia kinetyczna wirującego układu, MJ,

η - współczynnik sprawności dla wirującego układu.

Obliczone wartości efektywnej intensywności zużycia przedstawiono graficznie na rys. 14. Wyniki te posłużyły do ilościowego powiązania zmierzanych. Do aproksymacji wyników pomiarów przyjęto równanie regresji w postaci wykładniczej

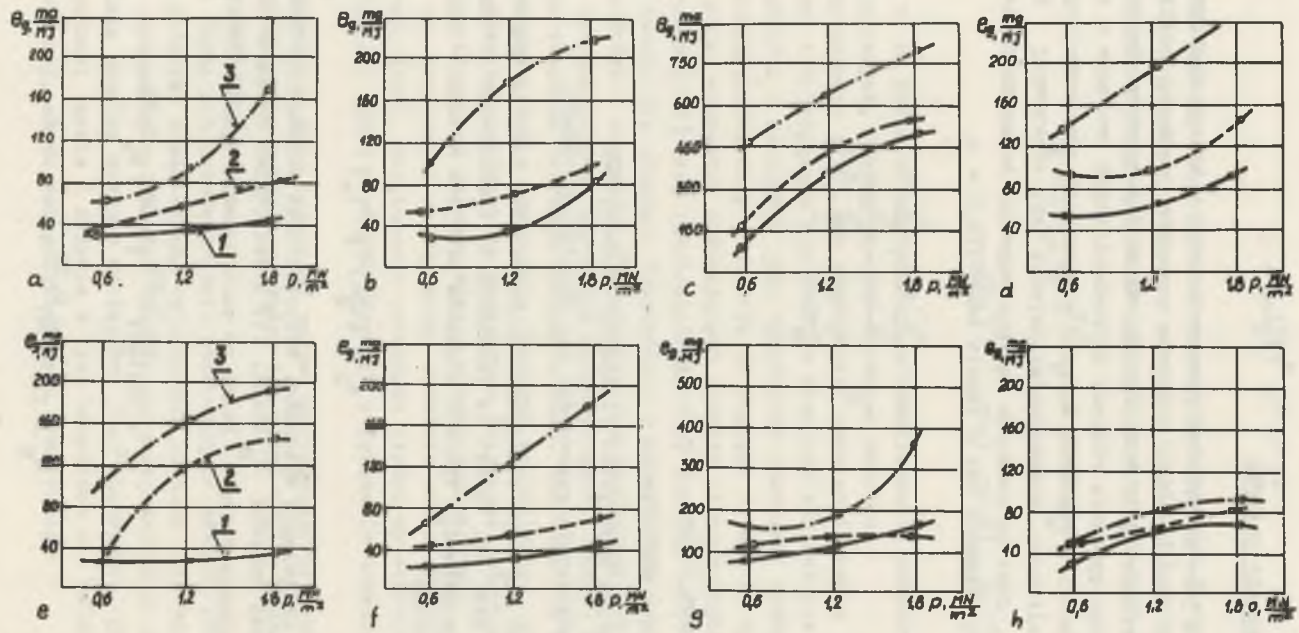
$$e_g = k \left(\frac{HK}{U} \right)^{\alpha} p^{\beta} k_w^{\delta} \quad (10)$$

Podobne obliczenia wykonano, wykorzystując średnie wartości efektywnej intensywności zużycia \bar{e}_g (tabl. 11) z wszystkich pomiarów dla danego tworzywa. Otrzymano funkcje, które po zaokrągleniu wykładników potęgowych mają postać:

$$e_g = 0,585 \left(\frac{HK}{U} \right)^{0,33} p^{0,68} k_w^{0,76} \quad (11)$$

oraz

$$\bar{e}_g = 37,8 \left(\frac{HK}{U} \right)^{0,33} \quad (12)$$



Rys. 14. Zależność efektywnej intensywności zużycia badanych tworzyw od nacisku p i współczynnika wzajemnego przykrycia k_w
 a - tworzywo W - 12, b - tworzywo AKF, c - tworzywo M - 31, d - tworzywo ZK - VI - 19, e - tworzywo Textar V - 1431, f - tworzywo Galfel, g - tworzywo Cosid, h - tworzywo Polofen FA - 3: 1 - $k_{w1} = 0,01$, 2 - $k_{w2} = 0,02$, 3 - $k_{w3} = 0,04$

Tablica 12

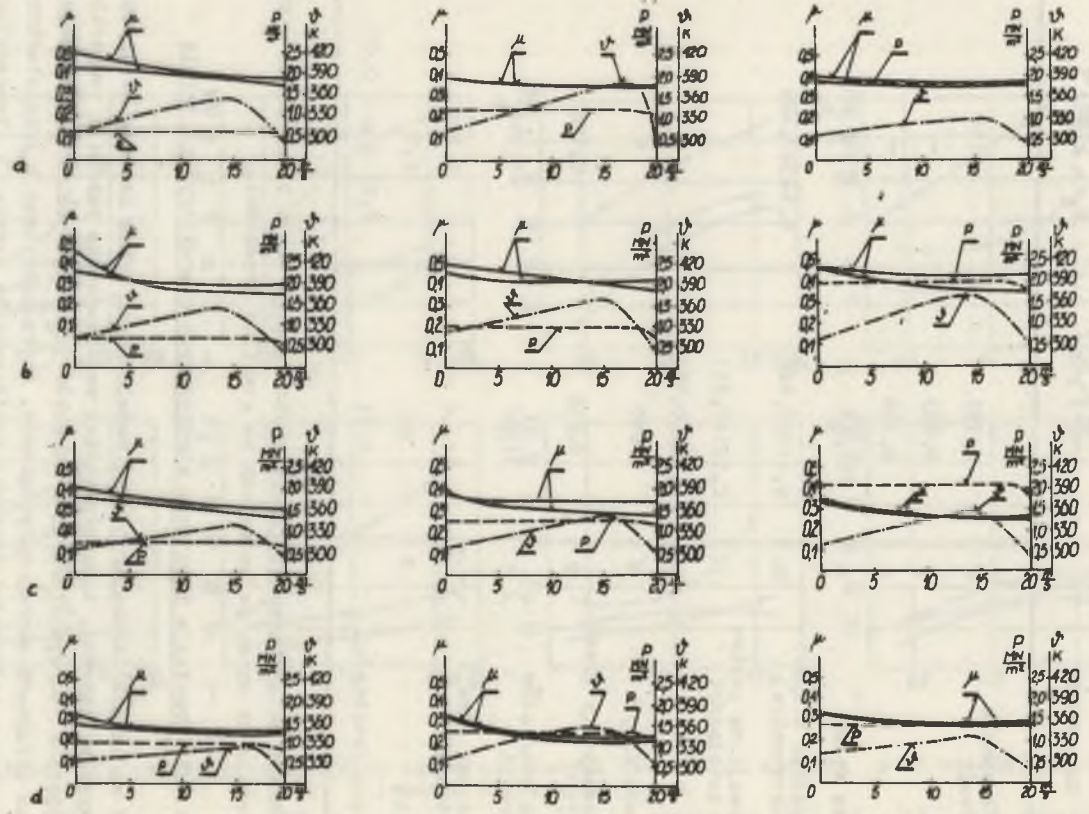
ZESTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ FUNKCJI KORELACYJNYCH
DLA EFEKTYWNEJ ZUŻYCIA e_g

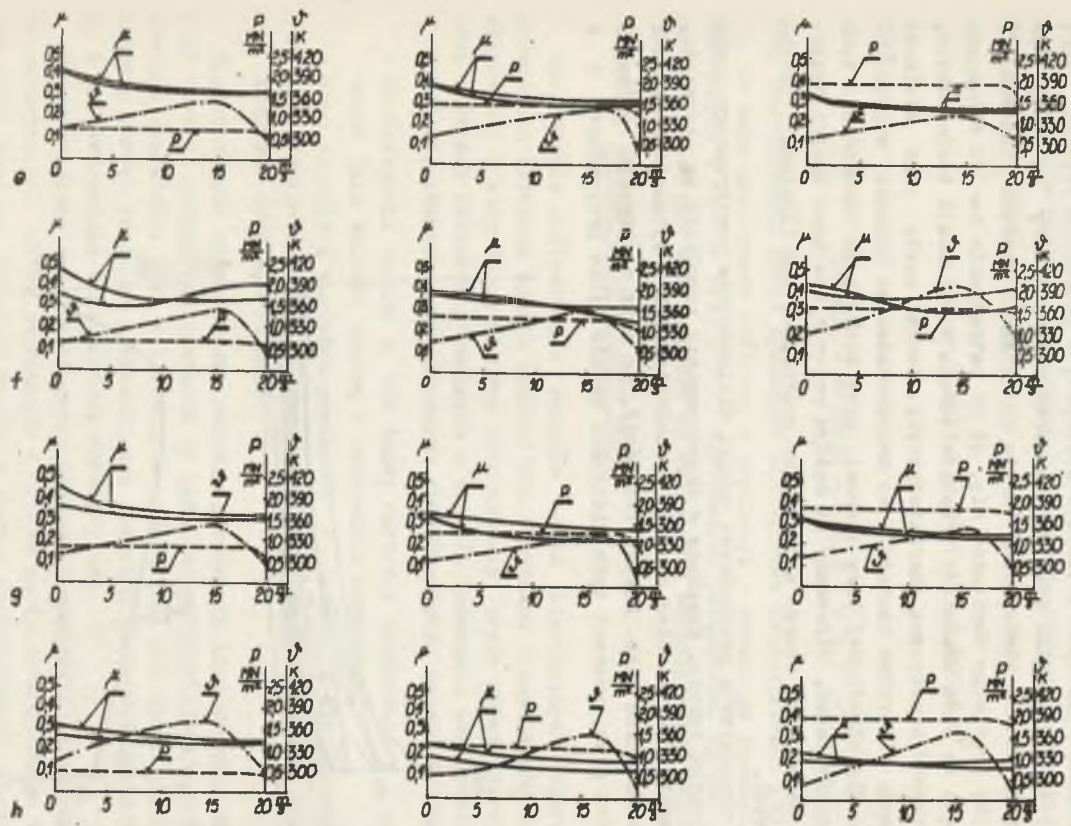
Oznaczenia		$e_g = k \left(\frac{HK}{U} \right)^{\alpha} p^{\beta} k_w^{\gamma}$	$\bar{e}_g = x \left(\frac{HK}{U} \right)^{\alpha}$
Współczynnik regresji	α	0,337	0,334
	β	0,683	-
	γ	0,758	-
Wyraz wolny	K	585,23	37,82
Przedział ufności współczynnika regresji na poziomie istotności	α .	0,419÷0,245	0,643÷0,025
5%	β .	0,925÷0,441	-
	γ .	0,952÷0,564	-
Liczba danych	N	690	8
Współczynnik korelacji	R	0,836	0,750
Suma kwadratów regresji	$\sum c^2$	34,67	1,586
Resztowa suma kwadratów	$\sum y^2$	14,84	1,231
Test	F	48	8,0
Poziom istotności		0,01	0,01 < a < 0,05

Zmiany na powierzchni tarcia próbek z tego etapu badań miały podobny charakter do zmian po badaniach ze stabilną prędkością.

3.5.2. Symulacja ikoniczna kinetycznych charakterystyk tarcia

W warunkach laboratoryjnych, modelujących pracę hamulca bezpieczeństwa maszyny wyciągowej, badano przebieg współczynnika tarcia i temperatury dla przyjętych tworzyw ciernych i nacisków jednostkowych. Z przeprowadzonych badań otrzymano szereg oscylogramów, które odczytano i przedstawiono w formie wykresu zależności wartości współczynnika tarcia i temperatury od prędkości poślizgu na rys. 15. Uzyskano tą drogą przybliżony przebieg wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości dla różnych nacisków jednostkowych i rodzajów tworzyw. Jest to jeden z ważnych elementów weryfikacji materiałów ciernych. Postać graficzna wyników modelowych badań współ-





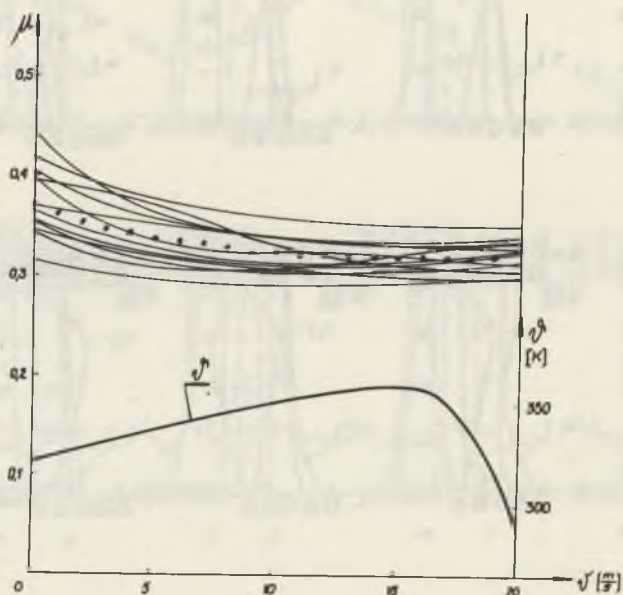
Rys. 15. Wykresy zmian wartości współczynnika tarcia tworzyw ciernych w trakcie hamowania z prędkością początkową $v_p > 20$ m/s. Każdy wykres zawiera dwa dowolnie wybrane przebiegi współczynnika tarcia, przebieg średniej temperatury tarcia i średniej wartości nacisków jednostkowych

a - tworzywo W - 12, b - tworzywo AKF, c - tworzywo M - 31, d - tworzywo ZK - VI - 19, e - tworzywo Textar V - 1431, f - tworzywo Galfel, g - tworzywo Cosid, h - tworzywo Polofen FA - 3

czynnik tarcia ma jednak w praktyce inżynierskiej ograniczone zastosowanie. Dalece niewystarczający jest także zapis wyników w postaci tylko jednej średniej wartości. Uzyskany w większości badań charakterystyczny kształt siodłowy przebiegu wartości współczynnika tarcia jest spowodowany wydzielaniem składników gazowych z tworzyw ciernych, w pierwszym rzędzie pary wodnej [21, 127], w wyniku gwałtownego wzrostu temperatury na wierzchołkach mikronierówności powierzchni tarcia na początku procesu hamowania i następnie jej powolnego obniżania się, aż do zatrzymania części wirujących.

Ze względu na dużą złożoność procesów tarcia w warunkach technicznych, należy traktować kinetyczną charakterystykę cierną wężła jako wielkość stochastyczną. Nietrudno zauważyć, że przeprowadzając badania współczynnika tarcia dla określonej pary cierniej, przy zachowaniu technicznie tych samych warunków badań, otrzymamy za każdym razem nieco inne wyniki. Realizacji tych zależności tworzy w przypadku graficznej ich ilustracji pewien zbiór krzywych.

Rys. 16 przedstawia przypadkowe wyniki wielokrotnie powtarzanego pomiaru współczynnika tarcia. Uzyskane w eksperymencie rezultaty są oczywiste, jeżeli założymy, że przebieg zjawisk tribologicznych i sytuacja pomiarowa będą za każdym razem inne. Możemy twierdzić, że przy zachowaniu opisanej jednorodności prób, rozrzut tych wielkości będzie tylko przypadkowy i o



Rys. 16. Przebiegi wartości współczynnika tarcia dla czternastokrotnie powtarzalnych pomiarów. Warunki badań: tworzywo Texter V - 1431, prędkość początkowa $v_p = 20$ m/s nacisk jednostkowy $p \approx 1,2 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$ (\bar{T} - średnia temperatura powierzchni tarczy stalowej)

rozkładzie normalnym. Do opisu tego typu zależności należy więc zastosować aparat teorii prawdopodobieństwa. Wyniki obliczeń $\bar{\mu}_v$ (średniej wartości współczynnika tarcia dla danego punktu v , $v = 0, 1, 2, \dots, 20$ m/s) aproksymowano krzywą drugiego stopnia $\bar{\mu}_v = \mu_0 - \alpha v + \beta v^2$ wg klasycznej metody najmniejszych kwadratów. W wyniku przeprowadzonej procedury estymacji parametrów rozkładu otrzymano następujące funkcje na wartość średnią i wariancję zmiennej losowej μ :

$$\bar{\mu}_v = 0,3653 - 0,0057 v + 0,00018 v^2 \quad (13)$$

oraz

$$S^2(\mu)_v = (1292,8 - 114,6 v + 4,93 v^2) 10^{-6} \quad (14)$$

Przy zastosowaniu testu zgodności Kłmogorowa zweryfikowano [23] hipotezę, że dane empiryczne pochodzą z populacji o normalnym rozkładzie, o wyznaczonych z wzorów (13) i (14) wartościach parametrów. Wyniki przeprowadzonego testu nie dały podstaw do odrzucenia weryfikowanej hipotezy.

3.5.3. Podsumowanie wyników badań

Opracowanie statystyczne wyników badań kinetycznych charakterystyk sprzężenia ciernego będzie szczególnie przydatne w hamulcach maszyn wyciągowych, w których ma miejsce programowany (przez układ sterujący) przebieg wartości nacisków normalnych w trakcie hamowania bezpieczeństwa.

Symulacja ikoniczna kinetycznych charakterystyk tarcia wykazała, że:

- współczynnik tarcia μ dla danej wartości prędkości v możemy traktować jako zmienną losową o rozkładzie normalnym,
- wraz ze zmianą wartości prędkości v zmieniają się wartości parametrów rozkładu, które można z wystarczającą dokładnością aproksymować krzywymi drugiego stopnia.

Zaproponowana statystyczna metoda opracowania kinetycznych charakterystyk tarcia, wymaga zastosowania do badań eksperymentalnych nowoczesnego zestawu aparatury, gdyż w klasycznym ujęciu jest ona czasochłonna. Tor pomiarowy oprócz czujnika i wzmacniacza powinien obejmować zapis magnetyczny i przetwarzającą dane maszynę matematyczną.

Przeprowadzone badania cierno-uzyciowe pozwoliły na poszerzenie zbioru empirycznych faktów związanych z opisem sprzężenia ciernego w ikonicznym modelu hamulca. Uzyskane wyniki w formie analitycznych zależności można uważać za wstępną fazę budowania modelu matematycznego zjawisk tribologicznych w hamulcach.

W takiej jednak postaci mają one kilka niedociągnięć:

- otrzymane formuły nie uwzględniają oddziaływania adhezyjnego między trącymi elementami,

- nie uwzględniają wpływu specyficznych warunków w obszarach styku (głównie wysokiej temperatury) na przyjęte do obliczeń wskaźniki mechaniczne.

Proponuje się w dalszych badaniach wprowadzenie wartości energii adhezji w [51, 102] dla danej pary jako wskaźnika uwzględniającego adhezyjne oddziaływanie trących się powierzchni elementów wężła.

Uzupełniona funkcja miałaby postać:

$$F(I_g, HK, U, W, p, v, k_w, \mu) = 0 \quad (15)$$

Inne wielkości charakteryzujące tworzywo cierne, a więc: ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła oraz mikrostrukturę geometryczną jego powierzchni i przeciwpróbki można, jak wykazały badania [65, 123], pominąć jako mało istotne i zmieniające się w małych granicach dla tego typu skojarzeń.

W oparciu o teorię podobieństwa i analizę wymiarową przyjęte wielkości można zgrupować w bezwymiarowe kryteria

$$\left(\frac{I_g W v}{p^2}\right), \left(\frac{HK W}{U p}\right), \left(\frac{HK}{p}\right), (k_w), (\mu) \quad (16)$$

Proces tarcia twardych ciał wywołuje zmiany temperatury w strefach styku, a jednocześnie zmiany ich mechanicznych i molekularnych własności (np. twardości, udarności, energii powierzchniowej). Zmieniają się także tribologiczne wielkości, jak: wartość zbliżenia, głębokość przenikania mikronierówności, opory deformacji oraz powierzchnia rzeczywistego styku. Jak wykazały badania [82, 123], charakterystyczne własności tworzyw można zbadać w różnych temperaturach i obliczyć parametry funkcji dla każdej zmiennej zależnej i temperatury. Znając przepisy funkcyjne możemy wprowadzić te wyrażenia do wzorów (3), (4) lub (7).

4. STUDIUM ZJAWISK TRIBOLOGICZNYCH W PARZE TWORZYWO CIERNE-STAL

4.1. Analiza uszkodzeń elementów ciernych w hamulcach i ich klasyfikacja

W warstwie wierzchniej elementów ciernych hamulców zachodzi kompleks zjawisk tribologicznych i innych zjawisk związanych z procesem hamowania. Zjawiska te są główną przyczyną zmiany resursu hamulca. Utrata resursu hamulca może być gwałtowna (np. na skutek defektów materiałowych, niewłaściwej eksploatacji) i powodująca trwałą utratę własności użytkowych przez elementy cierne lub postępująca, powodująca stopniowy ubytek materiału ele-

mentów ciernych, nie zmieniająca zasadniczo charakterystyk sprzężenia ciernego [123]. Fizyczna istota utraty ресурсu w czasie hamowania daje podstawy do zastosowania podziału uszkodzeń wg następujących kryteriów [49]:

- rodzaju materiału elementów ciernych (np. metale, polimery),
- miejsca występowania procesów (np. powierzchnia tarcia, rdzeń materiału),
- rodzaju czynników występujących w eksploatacji (np. chemiczne składniki otoczenia, temperatura),
- charakteru procesów (np. jednorazowy, cykliczny).

W maszynowych węzłach tarcia zasadniczy wpływ na siłę tarcia i zużycie elementów ma stan ich warstwy wierzchniej. Pod wpływem występujących na powierzchniach wysokich temperatur, szybkozmiennych parametrów tarcia, fizykochemicznego oddziaływania środowiska itd., zmiany stref przypowierzchniowych materiałów są szczególnie intensywne, decydują one o efektywności pracy i trwałości elementów ciernych. Często w elementach tych, pod wpływem wysokich temperatur, zachodzi jednocześnie wiele wzajemnie powiązanych procesów [49, 58].

Do najczęściej spotykanych należą:

- sprężysto-plastyczne deformacje i dekohezja w mikroobszarach styku,
- procesy dyfuzyjne i chemiczne w materiałach,
- procesy elektrolityczne,
- zmiany fazowe i strukturalne,
- destrukcja, odgazowanie, odparowanie, kondensacja,
- topnienie, krystalizacja.

Na procesy te mają wpływ substancje powierzchniowe aktywne, a także elementarne defekty struktury krystalograficznej (wakanse, dyslokacje, wtrącenia itd.). Zniszczenia i niesprawności eksploatacyjne, których źródłem są zjawiska tribologiczne, mają złożony charakter i ich wyjaśnienie nie może opierać się tylko na znajomości warunków eksploatacji i charakteru obciążenia, ale także na ogólnej charakterystyce procesów zachodzących na powierzchniach tarcia. Charakterystyczną cechą oddziaływania rzeczywistych powierzchni tarcia jest ich dyskretny charakter, oddziaływania zachodzi (wraz ze wszystkimi towarzyszącymi zjawiskami) na oddzielnych powierzchniach styku. W utworzonych, w wyniku działania sił normalnych i stycznych złączach frykcyjnych biorą udział materiały obu elementów. Identyfikacja procesów na powierzchniach styku i stref powierzchniowych jest podstawą stworzenia fizycznego modelu zjawisk tribologicznych w hamulcach.

4.2. Metodyka badań zjawisk tribologicznych

Zróznicowane procesy, towarzyszące tarcia w hamulcach, wymagają zastosowania bardzo zróznicowanych metod ich identyfikacji.

Przyjęta metodyka obejmowała badania:

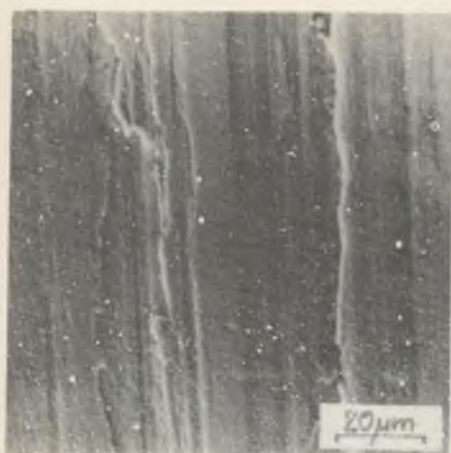
- makroskopowe powierzhni tarcia, dla określenia rodzaju zużycia,
- mikrofraktograficzne powierzhni tarcia, warstwy wierzchniej oraz produktów zużycia na mikroskopach optycznych i elektronowych scannujących (SEM) dla obserwacji zmian topografii powierzhni, struktury warstwy wierzchniej, określenia mechanizmu zużycia, przenoszenia materiałów i innych zjawisk w mikroobszarach styku,
- rentgenowską mikroanalizę powierzhni tarcia, warstwy wierzchniej oraz produktów zużycia na mikroanalizatorze rentgenowskim (MAR) [19, 106], dla oceny zmian koncentracji różnych pierwiastków,
- rentgenowską analizę fazową powierzhni tarcia przy wykorzystaniu metody Bragg-Brentano dla identyfikacji faz na powierzhni tarcia,
- chropowatości powierzhni tarcia na profilografie,
- mikrotwardości warstwy wierzchniej,
- termograwimetryczne materiałów ciernych [63] dla ilościowej oceny procesów destrukcji tworzyw przy wysokich temperaturach,
- chromatograficzną analizę gazową materiałów ciernych [63, 134] dla określenia składu chemicznego produktów pirolitycznego rozkładu.

4.3. Fizykalna identyfikacja zjawisk tribologicznych

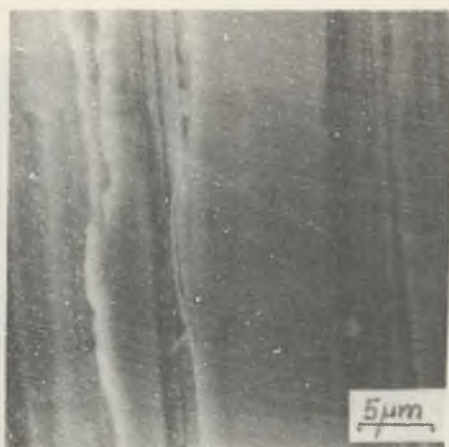
4.3.1. Przeciwpróbki stalowe

Mikrostruktura geometryczna powierzhni przeciwpróbek stalowych (stal St5) uległa zmianie w wyniku współpracy z tworzywami ciernymi (rys. 17, 18).

Występujące rysy i bruzdy świadczą o zużyciu ściernym i plastycznym deformowaniu stref przypowierzhniowych stali [125]. Profilogramy (rys. 19) [117, 123] wskazują, że główny mechanizm zużycia to niszczenie wierzchołków nierówności przez ścięcie i plastyczne odkształcenie oraz towarzyszące mu wypełniania wgłębień produktami zużycia. Zaobserwowano także ubytki materiału, spowodowane wrywaniem oraz tworzenie narostów. Rentgenowska analiza fazowa ujawniła obecność na powierzhni stalowej przeciwpróbki razem z fazą α - Fe i Fe_3C faz FeO , Fe_3O_4 i Fe_2O_3 , występowały także ślady Cu, przeniesione z tworzywa ciernego oraz stwierdzono linie dyfrakcyjne, pochodzące od mineralno-organicznych składników tworzyw. Badania wykonane na mikroanalizatorze rentgenowskim potwierdziły, że cała powierzhnia tarcia tarczy stalowej jest utleniona (rys. 20). Identyfikacja cząstek na jej powierzhni ujawniła, że pochodzą one z tworzywa ciernego (rys. 21), np. cząstki azbestu, w skład którego wchodzi Mg, Si, O_2 . Stwierdzono także obecność Cu (rys. 22) bez Sn lub Zn, co wskazuje na wyparowanie tych pierwiastków w trakcie tarcia z granulek mosiądzu i brązu, stanowiącego wypełniacz metalowy tworzyw W-12 i ZK-VI-19.

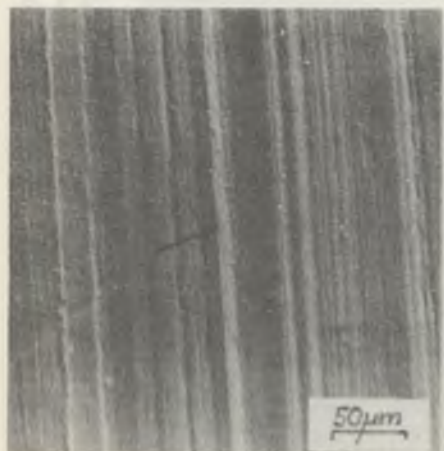


a)



b)

Rys. 17. Powierzchnia tarcia przeciwpróbki stalowej. Widoczne ślady zużycia ściernego oraz płynięcia mikroobszarów warstwy powierzchniowej. SEM

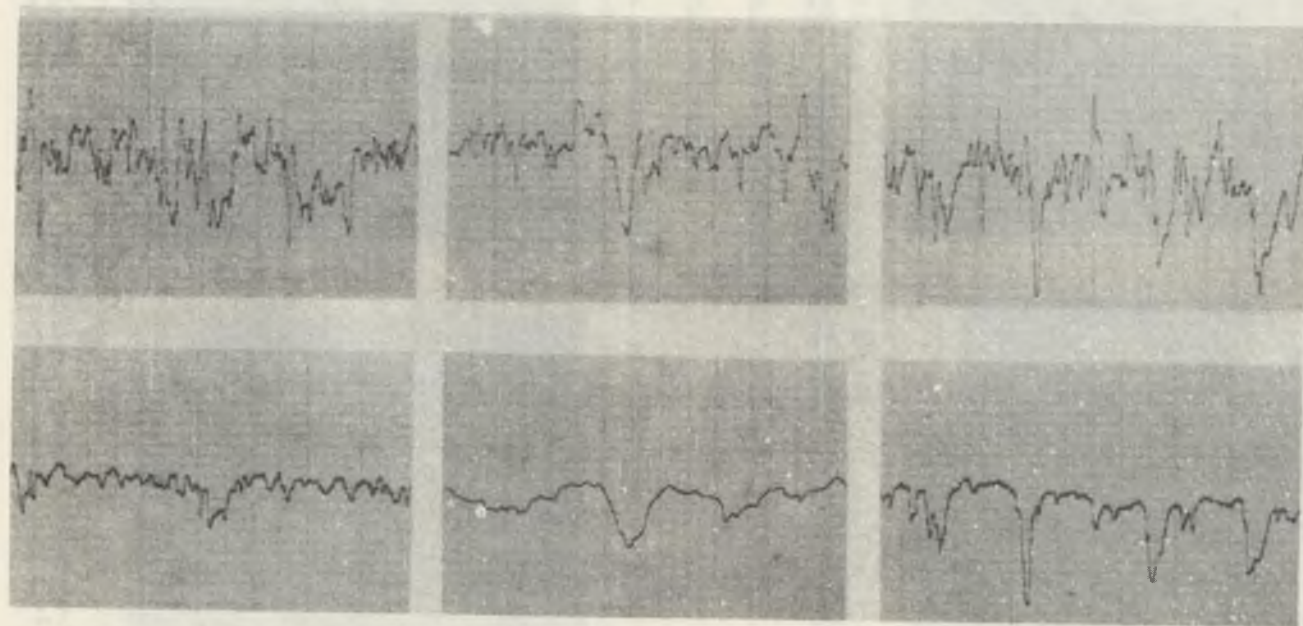


a)

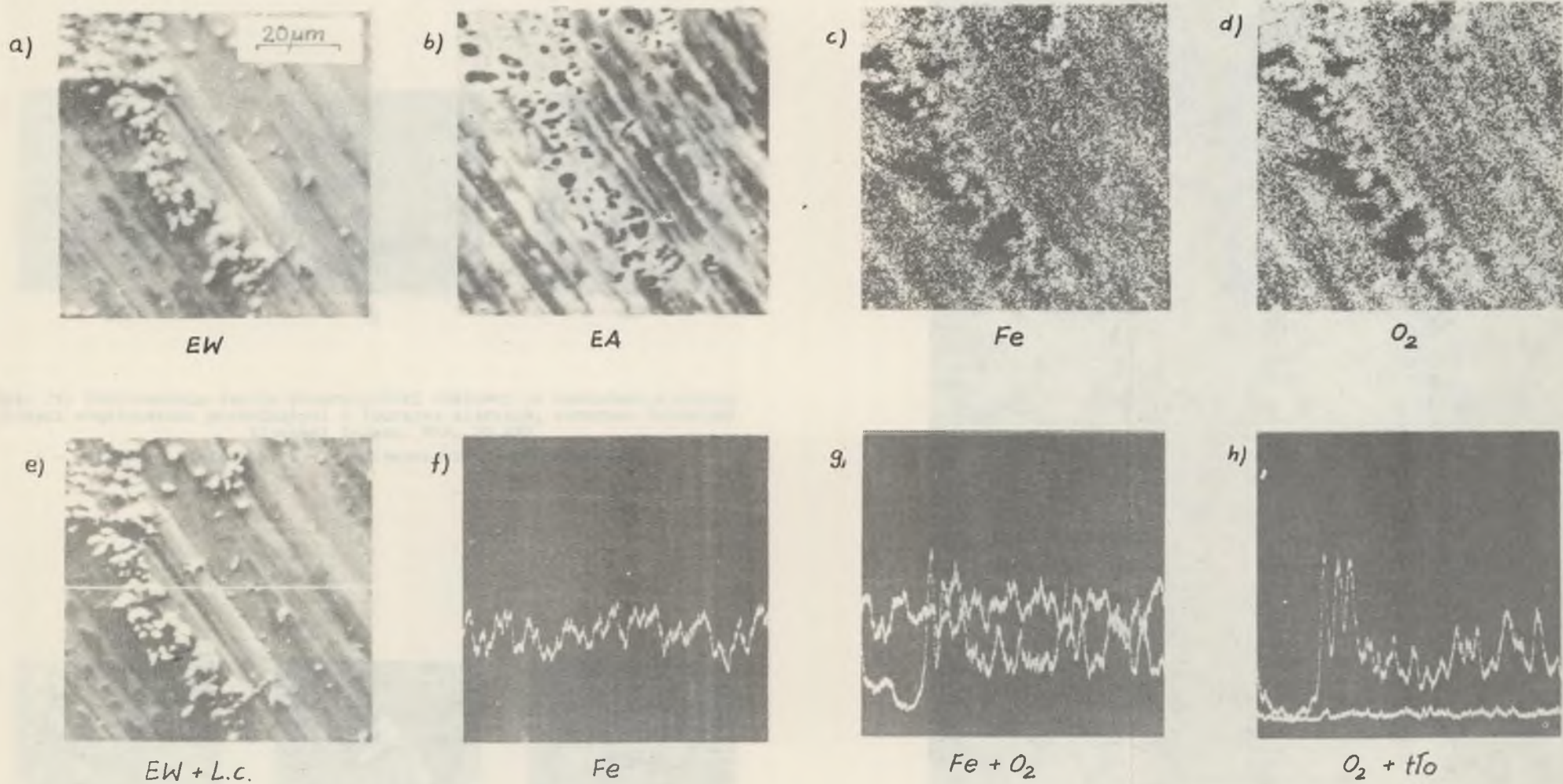


b)

Rys. 18. Powierzchnia tarcia przeciwpróbki stalowej. Widoczne rysy powstałe w wyniku oddziaływania twardych produktów zużycia. SEM

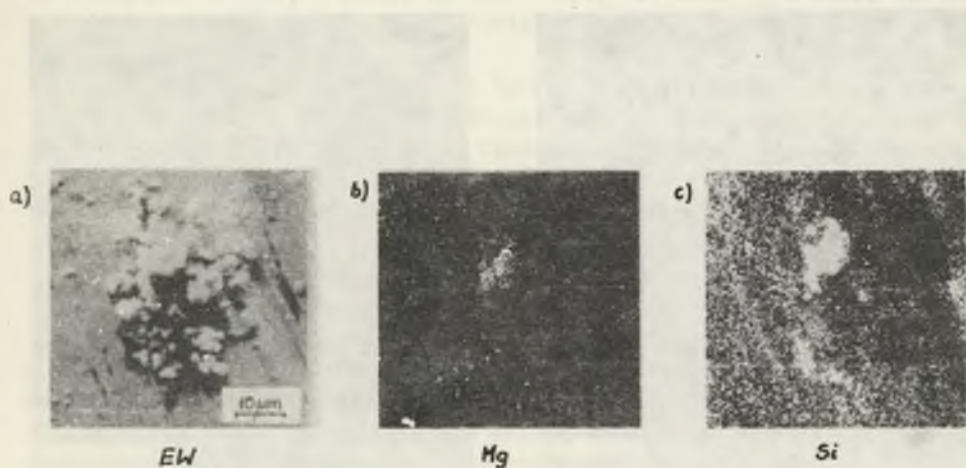


Rys. 19. Zmiany zarysu poprzecznego profilu powierzchni tarcia przeciwpróbki stalowej. Pow. pionowe 5000x
pow. poziome 100x
a - profilogramy przed badaniami, b - profilogramy po badaniach



Rys. 20. Powierzchnia tarcia przeciwpółki stalowej po badaniach. Kuliste tlenki żelaza oraz powierzchniowe utlenienie stali. MAR. 10 keV

a - elektrony wtórne, b - elektrony absorbcyjne, c, d - rozmieszczenie pierwiastków Fe i O₂, f, g, h - wykresy względ-
zmian koncentracji pierwiastków



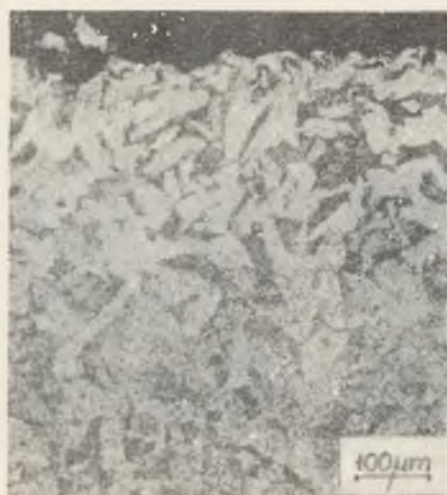
Rys. 21. Powierzchnia tarcia przeciwpróbki stalowej po badaniach, z naniesionymi cząsteczkami pochodzącymi z tworzywa ciernego, otoczone kulistymi tlenkami żelaza. MAR. 25 keV

a - elektrony wtórne, b, c - rozmieszczenie pierwiastków Mg, Si



Rys. 22. Powierzchnia tarcia przeciwpróbki stalowej po badaniach, z wiórami miedzianymi. MAR. 25 keV

a - elektrony wtórne, b, c - rozmieszczenie pierwiastków Cu, Zn



Rys. 23. Mikrostruktura przeciwpróbki stalowej (St-5), zgląd trawiono nitaliem



a)

b)

Rys. 24. Powierzchnia przeciwpróbki stalowej. Widoczne szczeliny i wykruszenia. SEM

Badania mikrofraktograficzne warstwy wierzchniej i powierzchni ujawniły odwęglanie warstwy o pewnej grubości (rys. 23) oraz deformację układu ziarn w wyniku ich plastycznych odkształceń w wysokiej temperaturze [123, 125].

Na powierzchni tarcia stalowej tarczy wystąpiły mikroszczeliny (rys. 24), są one wynikiem działania cyklicznie zmiennych naprężeń termicznych, naprężeń pochodzących od przemiany fazowej $\alpha \rightarrow \gamma$ oraz wykruszenia się twardego i kruchej cementytu z ziarn perlitu. Pomiarzy nie wykazały jednak istotnej zmiany mikrotwardości w warstwie wierzchniej.

4.3.2. Próbki z tworzyw ciernych

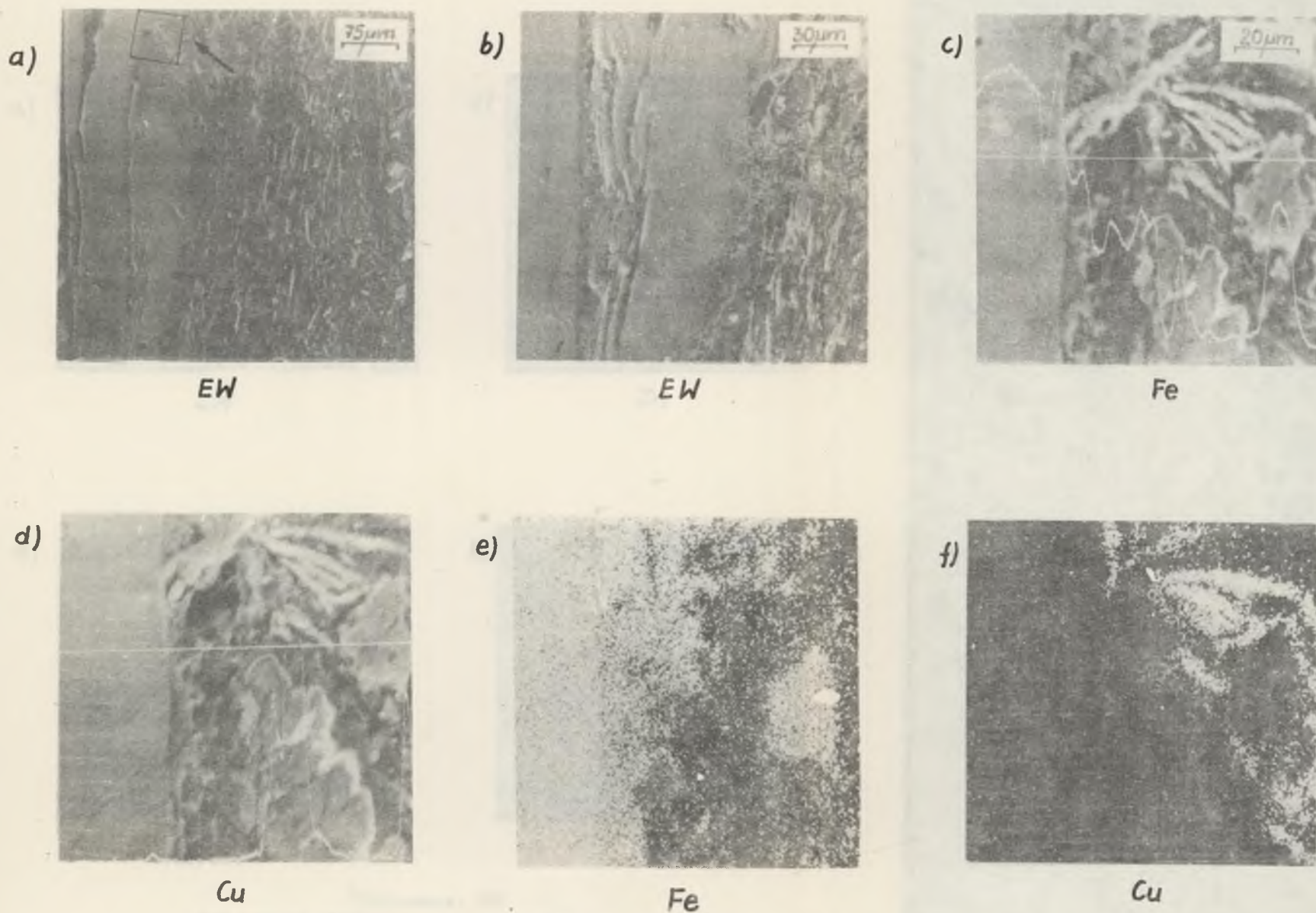
Rentgenowska analiza fazowa wykazała na powierzchniach tworzyw ciernych po tarcii wzrost ilościowy faz FeO , Fe_3O_4 i Fe_2O_3 (tabl. 12). Na powierzchni próbek, na których były optycznie widoczne nametalizowania, stwierdzono obecność fazy α - Fe. Były to selektywnie przeniesione z tarczy, nalepione płytki ferrytu. Faza α - Fe występowała tylko na niektórych próbkach. Zjawisko przenoszenia żelaza zależało od parametrów tarcia (im wyższe tym przenoszenie bardziej prawdopodobne i intensywniejsze) oraz od rodzaju tworzywa. Szczególnie silnie metalizowały się próbki z tworzyw W-12, AKP i Galfel, na których warstwy metaliczne w niektórych przypadkach zajmowały dużą część nominalnej powierzchni tarcia. Dla pozostałych tworzyw można było stwierdzić obecność skupisk żelaza tylko przy pomocy mikroanalizatora. Badania zglądów warstw nametalizowanych na tworzywach przy użyciu mikroanalizatora wykazały w tych warstwach dużą koncentrację pierwiastka Fe (rys. 25). Z analizy punktowej w różnych miejscach zglądu (rys. 25) otrzymano następujące procentowe zawartości Fe: 99,5, 91,3, 95,0, 88,6, 99,0, 99,5, 99,2, 99,5, 87,2, 79,7, 65,6.

W sąsiedztwie warstw znajdowały się skupiska Fe o zagęszczeniu odpowiadającemu tlenkom żelaza. W warstwach tych nie stwierdzono wyraźnych skupisk Cu (rys. 25). Badania powierzchni tarcia tworzywa W-12 (rys. 26) potwierdziły obecność Fe w otoczeniu tlenków żelaza oraz cząsteczek miedzi i mosiądzu (mosiądz jest wypełniaczem metalowym tworzywa W-12). W niektórych obszarach występowania miedzi brak było cynku, przypuszczalnie w wyniku wysokich temperatur podczas tarcia nastąpiło odcynkowanie cząstek mosiądzu. Potwierdziły to także badania punktowe. Rozmieszczenie i rozkład pierwiastków na powierzchni tworzywa ZK-VI-19 przedstawia rys. 27. Wycinek powierzchni tworzywa M-31 (rys. 28) zawiera skupiska żelaza o większej zawartości tego pierwiastka, niż jest ona charakterystyczna dla tlenków Fe (wypełniacz tworzywa). Analiza punktowa wykazała w tych miejscach 94,2, 95,1 i 96,1% Fe.

Badania mikrofraktograficzne powierzchni tarcia tworzyw pozwoliły na obserwację zmian topografii powierzchni jako skutku tarcia i ocenę mechanizmu zachodzenia tych zmian. Nametalizowane warstewki przyjmowały różne

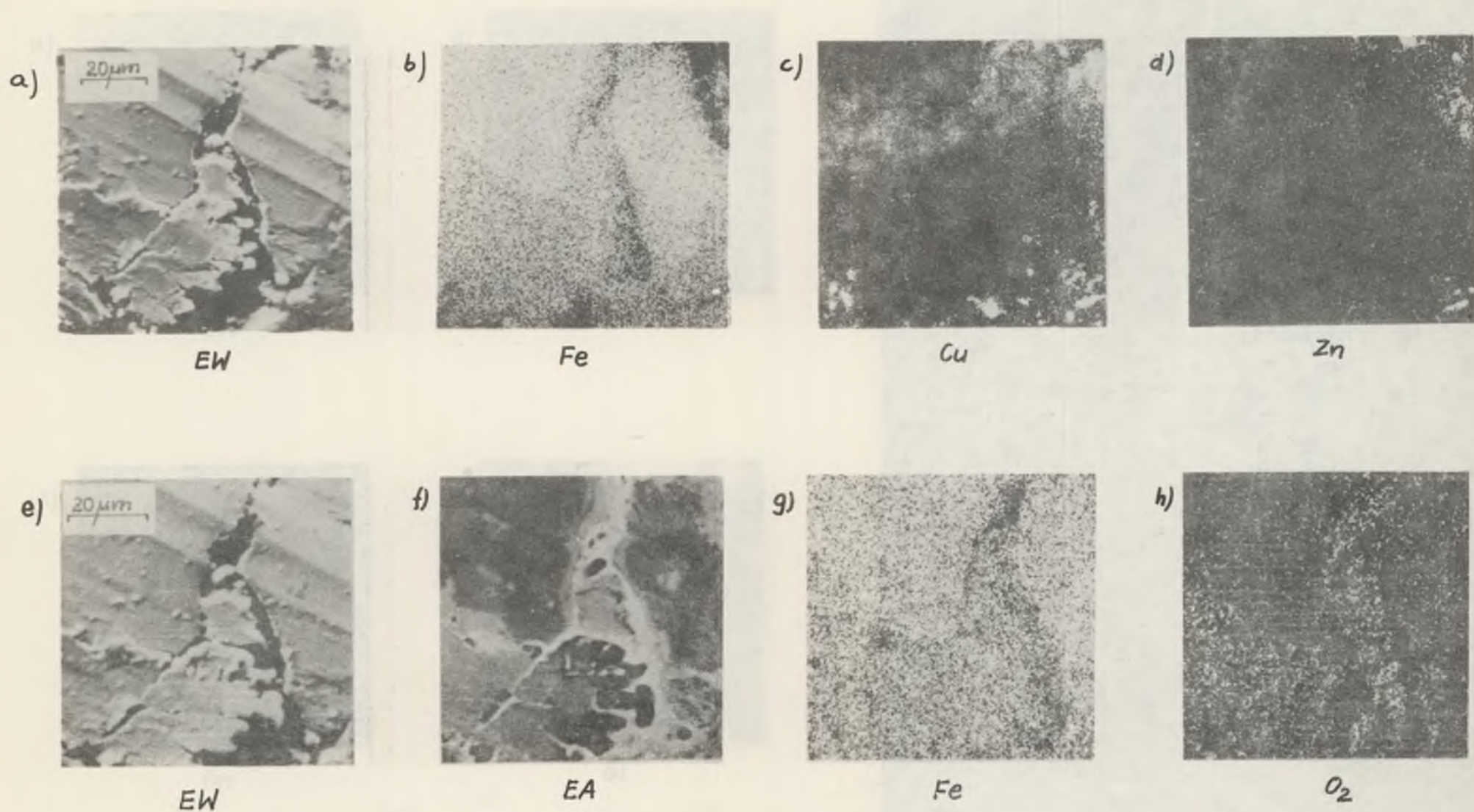
WYNIKI RENTGENOWSKIEJ ANALIZY FAZOWEJ [138]

Nr	Próbka, oznaczenie	Fazy zidentyfikowane po stronie niepracującej	Fazy zidentyfikowane po stronie pracującej
1	W-12 ($p_2v_2k_{w1}$)	α -CuZn Fe_3O_4 FeO (śląd)	α -CuZn Fe_3O_4 FeO α -Fe
2	W-12 ($p_3v_2k_{w2}$)	α -CuZn Fe_2O_3 (śląd) Fe_3O_4 FeO (śląd)	α -CuZn Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO α -Fe
3	AKF ($p_1v_2k_{w1}$)	Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO (śląd)	Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO (śląd)
4	AKF ($p_3v_3k_{w1}$)	Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO	Fe_2O_3 Fe_3O_4 FeO α -Fe
5	ZK-VI-19 ($p_2v_2k_{w3}$)	α -CuSn Ba SO ₄ Fe_2O_3 (śląd) Fe_3O_4 FeO	α -CuSn Ba SO ₄ Fe_2O_3 (śląd) Fe_3O_4 FeO
6	Stal St5		α -Fe FeO Fe_3O_4 Fe_3C Cu

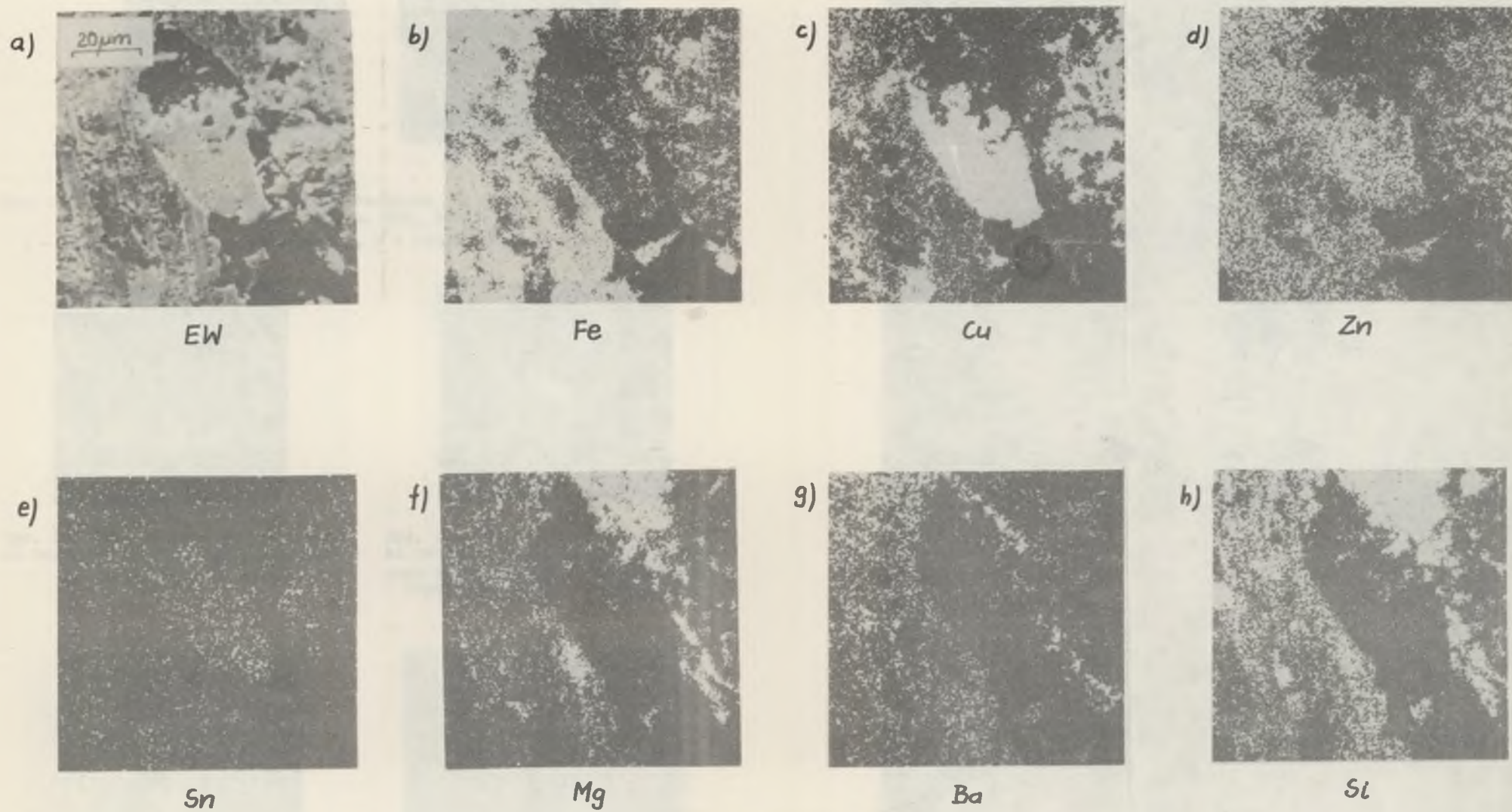


Rys. 25. Warstwa wierzchnia tworzywa W-12 ($p_2 v_3 k_{w1}$) z warstwowymi nalepianiami Fe, zgląd prostopadły do powierzchni tarcia. MAR, 25 keV

a, b - elektrony wtórne, c, d - wykresy względnych zmian koncentracji Fe i Cu



Rys. 26. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa W-12 ($p_3 v_2 k_{w3}$), miejsce nametalizowane. MAR
 a-d - obraz elektronowy i rozmieszczenie pierwiastków Fe, Cu, Zn na powierzchni próbki, 25 keV, e-h - obraz elektronowy
 (elektrony wtórne i absorbcyjne) oraz rozmieszczenie pierwiastków Fe, O₂ na powierzchni próbki, 19 keV



Rys. 27. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa ZK-IV-19 ($p_2 v_2 k_{w2}$) MAR, 25 keV
 a - obraz elektronowy powierzchni, b-h - rozmieszczenie pierwiastków Fe, Cu, Zn, Sn, Mg Ba, Si



a)



b)

Rys. 28. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa M-31 ($p_3 v_2 kw_1$) ze skupiskami żelaza. MAR, 25 keV

a - obraz elektronowy, absorbcyjny, b - rozmieszczenie pierwiastka Fe



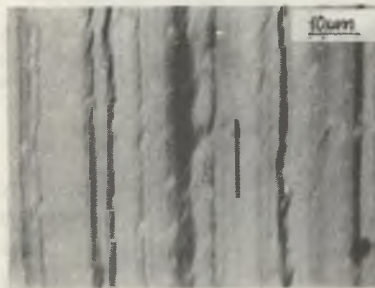
Rys. 29. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa AKF ($p_2 v_3 kw_1$). Widoczne nalepienia ferrytu



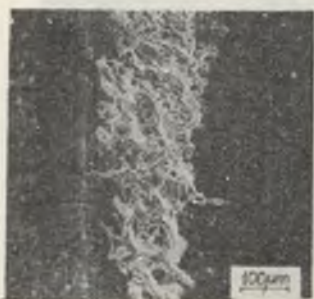
Rys. 30. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa W-12 ($p_3 v_2 kw_3$), namazane warstwowo na powierzchnię tworzywa cząsteczki ferrytu. SEM



Rys. 31. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa Galfel ($p_2 v_3 kw_1$), wyciskanie narostku żelaza na zewnątrz nominalnej powierzchni tarcia

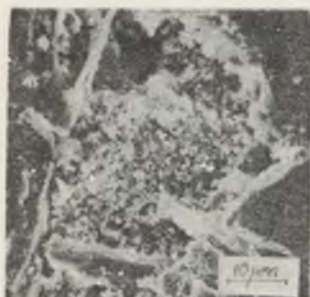


Rys. 32. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa AKF ($p_2 v_1 kw_1$), brudzą na powierzchni tworzywa ujawniają jego anizotropowość, widoczne są wystające twarde składniki. SEM



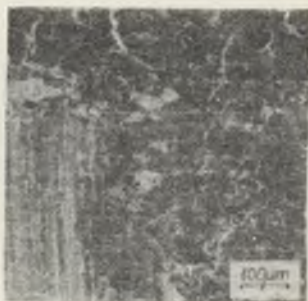
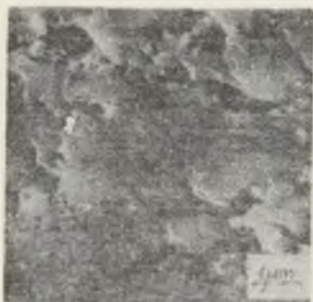
a) b)

Rys.33. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa POLOFEN Fa-3 ($p_2 v_3 k_{w2}$). SEM
a - miejsce złuszczenia się tworzywa w wyniku destrukcji lepiscza i naprężeń termicznych, b - powierzchnią wnętrza jamki po odprysku



a) b)

Rys. 34. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa ZK-VI-19 ($p_3 v_3 k_{w1}$). SEM. Na powierzchni widoczne miejsca rozmazanego wypełniacza metalowego, obszar zniszczonego lepiscza z wystającymi włóknami azbestu. W nierównościach powierzchni tarcia tworzywa zgromadzone są produkty zużycia



Rys. 35. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa Cosid ($p_1 v_3 k_{w1}$). SEM. Miejsce wielokrotnie deformowane

Rys. 36. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa Textar V-1431 ($p_2 v_2 k_{w2}$). SEM. Wycinek powierzchni częściowo pokryty namazywanym wypełniaczem metalowym

foiomy (rys. 29), miały budowę warstwową (rys. 30), złożoną z cząstek (płytek) ferrytu.

Uformowane warstwy żelaza na tworzywach o małej wytrzymałości mechanicznej (odporności na wyciskanie) oraz termicznej, np. na tworzywie Galfel, były pod wpływem działania sił tarcia wyciskane na zewnątrz nominalnej powierzchni tarcia (rys. 31). Szczeliny, rysy i inne nierówności na powierzchni tworzyw (rys. 32-36) są wynikiem wielorakich czynników, np. mechanicznych oddziaływań mikronierówności przeciwpróbki, uderzeń termicznych o dużym gradientcie, destrukcji organicznego lepiszcza, połączonej z wydzielaniem płynnych i gazowych produktów i tworzeniem koksopodobnych pozostałości [49, 63, 123]. Szczególnie duże ubytki lepiszcza organicznego występują w sąsiedztwie większych cząstek wypełniacza metalowego (rys. 37), który jest źródłem wysokich temperatur dla przylegających cząstek lepiszcza. W przypadku wysokich parametrów tarcia metalowe wióry wypełniacza mogą ulec adhezyjnemu szcpieniu z tarzą i mogą być wyrwane z powierzchni tworzywa (rys. 38).



Rys. 37. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa Galfel ($p_2 v_2 kw_1$), obszar w pobliżu dużego ziarna metalowego, wypełniacza oraz głęboka szczelina zniszczonego lepiszcza w wyniku działania wysokiej temperatury produktów zużycia, iskier. SEM



Rys. 38. Powierzchnia tarcia próbki tworzywa Polofen FA-3 ($p_2 v_3 kw_2$). SEM. Widoczny duży wiór metalowy (CuZn) zniszczony w wyniku tarcia (jest on wyrwany z tworzywa)

W procesie tarcia tworzyw ciernych w wyniku oddziaływania czynników mechanicznych i termicznych, konstytuuje się warstwa powierzchniowa o zmienionych, w porównaniu z rdzeniem własnościach. W pierwszym etapie, do temperatury około 520 K, następuje umocnienie warstwy wierzchniej [116], w wyniku dalszego, potehnologicznego usieciowania żywicy (podobnie jak przy wygrzewaniu) [61], towarzyszy temu procesowi wzrost twardości warstwy powierzchniowej tworzywa [13]. Jednak powyżej 570 K zachodzi destrukcja, najpierw kauczuku a potem żywicy. W wyniku jej zaś następuje wydzielanie ciekłych i gazowych produktów [49, 63, 130], które mogą zasadniczo zmienić warunki tarcia. Z badań [63] wynika, że z warstwy tworzywa Textar o grubo-

ści 3 mm uległy znacznemu odgazowaniu: ksylen, fenol oraz krezol. Odparowały także: para wodna, CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , NH_3 oraz benzen.

4.3.3. Stałe produkty zużycia

Produkty zużycia uzyskane w badaniach ciernych przeprowadzonych w warunkach stabilnej prędkości (p. 3.4) były obserwowane na mikroskopie optycznym i elektronowym scanningowym. Stałe produkty zużycia z poszczególnych prób tarcia (rys. 39-41) miały zróżnicowaną wielkość i kształt, nie zaobserwowano natomiast wyraźnego wpływu na ich kształt parametrów tarcia i rodzaju materiału. W większości są to produkty mechanicznego współdziałania mikronierówności partnerów (porównanie z powierzchnią tworzywa na rys. 32) oraz stałe produkty termicznej destrukcji tworzywa (porównanie z



Rys. 39. Produkty zużycia tworzywa W-12 ($p_3 v_3 k_{w2}$). SEM



Rys. 40. Produkty zużycia tworzywa Textar V-1431 ($p_2 v_2 k_{w2}$). SEM



Rys. 41. Produkty zużycia tworzywa Galfel ($p_3 v_2 k_{w3}$). SEM



Rys. 42. Produkty zużycia tworzyw ciernych w formie płaskich cząsteczek a - tworzywo M-31 ($p_3 v_3 k_{w2}$), SEM, b - tworzywo AKF ($p_3 v_1 k_{w1}$), SEM, c - tworzywo AKF ($p_3 v_1 k_{w1}$)

powierzchnią tworzywa na rys. 34). Zaobserwowano także duże płaskie cząstki (rys. 42 i 43), które są przypuszczalnie zdartymi z powierzchni tworzywa, utwardzonymi warstwami (jest to potwierdzenie istnienia tych warstw sugerowanego przez Kragielskiego [72]). Warstwy po ich zerwaniu ulegają dalszemu kruszeniu lub zrolowaniu (rys. 44) w procesie tarcia, aż do wyjścia ze strefy nominalnego styku. Częściowe rozwarstwienie na powierzchni tworzywa przed oderwaniem się cząsteczki od próbki pokazuje rys. 45.



Rys. 43. Produkty zużycia tworzywa W-12 ($p_1 v_3 k_{w3}$), MAR

a - obraz elektronowy warstewki zdartej z powierzchni tarcia tworzywa, widoczny wgłębiony produkt zużycia stalowej przeciwpróbki, b - rozmieszczenia Fe, c - obraz elektronowy warstewki

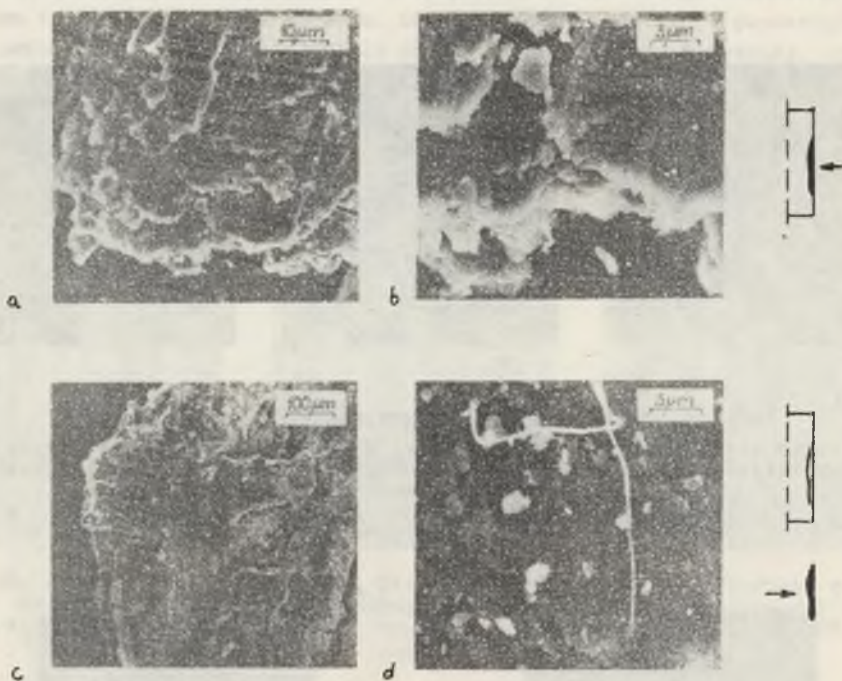


Rys. 44. Produkty zużycia tworzywa Galfel ($p_3 v_2 k_{w3}$)

Rys. 45. Powierzchnia tarcia tworzywa AKF ($v_2 p_2 k_{w1}$), częściowe rozwarstwienie przed oderwaniem

4.4. Dyskusja wyników badań fizykalnych

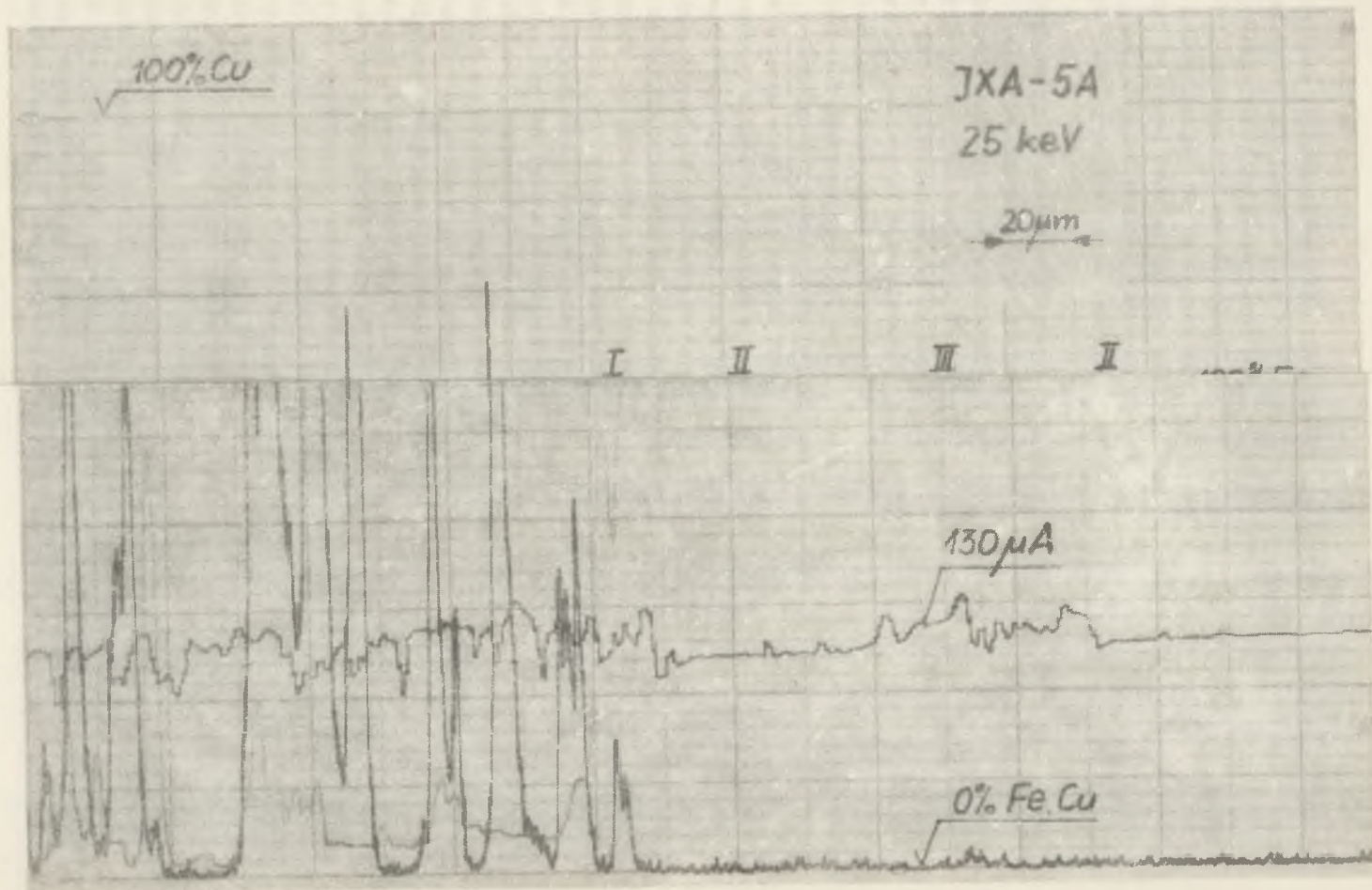
Wszystkie obserwacje mikroskopowe warstw metalicznych na powierzchniach tworzyw wykazały ich warstwową budowę. Nie są to jednolite objętości metalu (stali) przeniesione z przeciwpróbki na tworzywo, lecz narosty utworzone w wyniku wielokrotnego nanoszenia i namazywania cząsteczek α -Fe i tlenków Fe (rys. 46) (oraz towarzyszących temu procesów redukcji i utle-



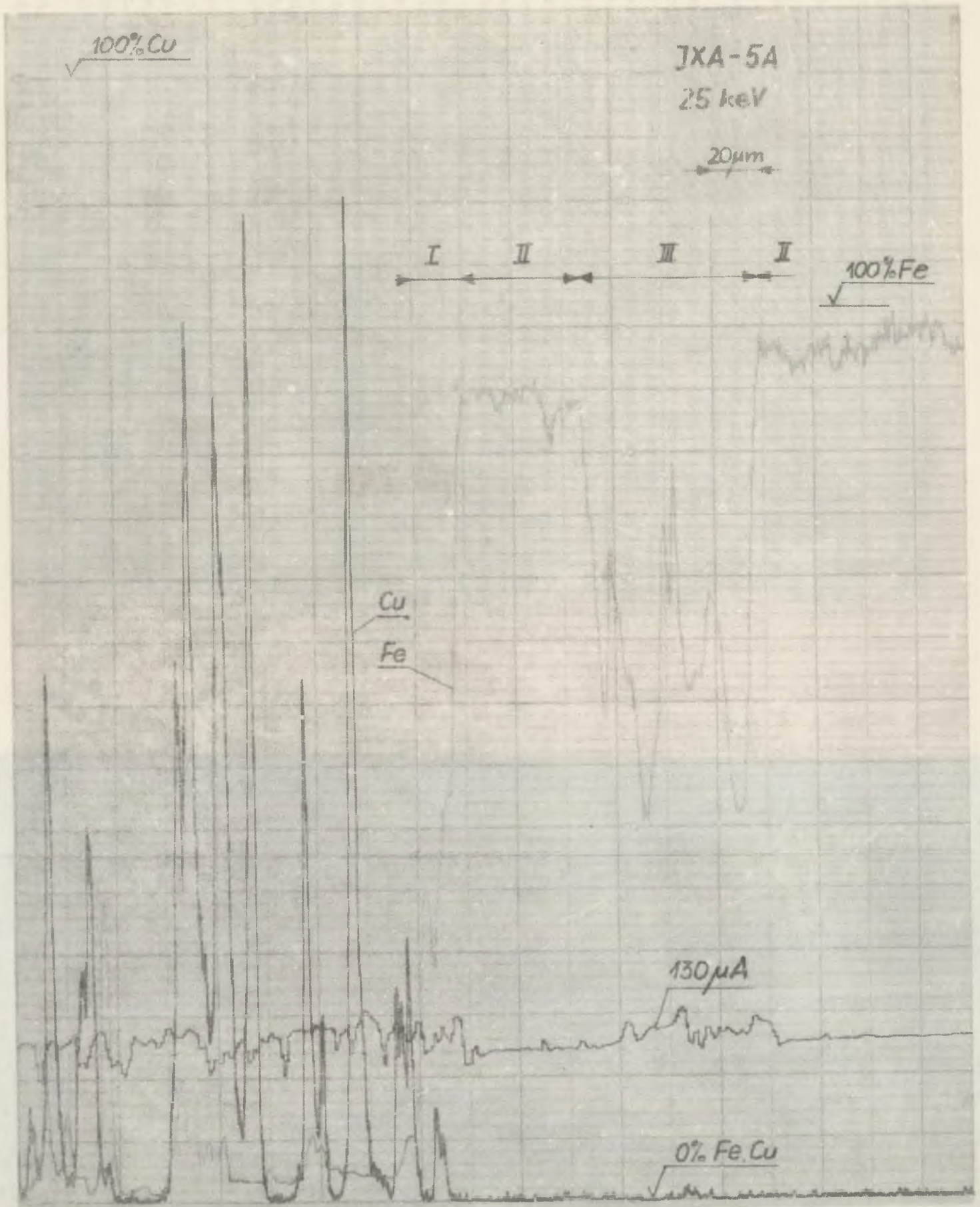
Rys. 46. Powierzchnia warstwy metalicznej. SEM

a, b - powierzchnia tarcia warstwy z naniesionymi warstwowo cząsteczkami ferrytu, c, d - powierzchnia wewnętrzna warstwy po zdarciu ujawniająca niejednorodność warstwy, koksowe produkty zużycia oraz włókna azbestu

niania. Pomiarzy dały wyższe wartości mikrotwardości dla warstw metalicznych na tworzywach) średnia wartości $MH = 3210 \frac{MN}{m^2}$ od mikrotwardości ferrytu i perlitu stali St5 (średnia wartość dla ferrytu $MH = 1030 \frac{MN}{m^2}$, dla perlitu $MH = 1270 \frac{MN}{m^2}$). Wyniki te należy tłumaczyć obecnością w warstwie twardych tlenków żelaza, silnym umocnieniem wskutek deformacji i impulsowych oddziaływań termicznych oraz dyfuzyjnymi przemianami [74], np. dyfuzją atomów azotu [109].



Rys. 47. Warstwa wierzchnia tworzywa W-12 ($p_2 v_3 k_{w1}$), rozkład pierwiastków Fe i Cu na zglądzie prostopadłym do powierzchni tarcia. MAR



Rys. 47. Warstwa wierzchnia tworzywa W-12 (p_2, v_3, k_{w1}), rozkład pierwiastków Fe i Cu na zglądzie prostopadłym do powierzchni tarcia. MAR

Analiza liniowa zawartości Cu i Fe w warstwie wierzchniej tworzyw wskazuje na istnienie trzech etapów charakterystycznych dla tworzenia warstwy metalicznej na powierzchni tworzyw (rys. 47).

Etap pierwszy to zarodkowanie warstwy metalicznej. W tym okresie wzrasta koncentracja Fe na skutek zagęszczania wypełniaczy w warstwie wierzchniej tworzywa oraz wnikania w nią produktów zużycia przeciwpróbki stalowej, tzn. cząstek stali i zdartych błon tlenkowych. Dominujące dla tego etapu jest zużycie ściernie tworzywa oraz zużycie ściernie i korozyjne stali.

Etap drugi to nawiązywanie współdziałania molekularnego między trącymi się ciałami oraz pomiędzy produktami zużycia a powierzchniami tych ciał. Szczepienia adhezyjne pary jednoimiennej ulegają zniszczeniu wewnątrz warstwy przeciwpróbki stalowej, uzyskuje się przez to wzrost grubości warstwy, przy jednoczesnym jej dalszym wgniataniu się do wewnątrz tworzywa. Osłabienie własności mechanicznych warstwy wierzchniej stali, na tyle istotne, aby zniszczenie następowało wewnątrz tej warstwy, jest możliwe dzięki procesom zmęczeniowym [20, 44, 72] oraz dyfuzji wodoru do stali [44, 66], wywołującej kruchość wodorową.

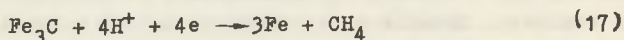
W trzecim etapie, na skutek przekroczenia przez naprężenia styczne w utworzonej warstwie metalicznej jej wytrzymałości na ścinanie, następuje zerwanie warstwy w całości lub w jej najsłabszym przekroju. Od tego momentu dany obszar powierzchni nie wchodzi w skład konturowej powierzchni styku, aż do jej ponownego nawiązania. Wykonano także bilansowe pomiary zawartości Fe dla wykazania, czy stwierdzony wcześniej procentowy wzrost zawartości Fe w warstwie wierzchniej tworzyw ciernych był tylko wynikiem zagęszczania tlenków żelaza w strefie przypowierzchniowej w czasie tarcia, czy też został on spowodowany przenoszeniem żelaza z przeciwpróbki stalowej. Badania przeprowadzono metodą kolorymetryczną. Na wybranych próbkach z różnych tworzyw wykonano pomiary zawartości Fe w warstwach o grubości 1 mm przed i po badaniach ciernych. Wybrane wyniki reprezentatywne dla pozostałych rezultatów przedstawia tabl. 13.

Wyniki te (np. próbki Nr 1, 2, 6) wskazują na wyraźny wzrost ilości Fe w warstwie wierzchniej tworzyw, które nie można tłumaczyć tylko zagęszczeniem się wypełniaczy zawierających tlenki żelaza, tak więc głównym źródłem tego wzrostu jest stalowa tarcza hamulcowa. Udokumentowanego w ten sposób przenoszenia żelaza w parze tworzywo ciernie-stal nie można rozpatrywać bez uwzględnienia szeregu zjawisk chemicznych [16], które wywołują szybkie zmiany objętościowe fazy stałej tworzyw ciernych oraz wydzielanie płynnych produktów reakcji, aktywnych chemicznie w stosunku do przeciwpróbki i jej produktów zużycia. Aktywność chemiczną, jak wykazały badania [45, 49, 63] posiadają substancje: H_2 , CO, CO_2 i para wodna. Zdysocjowany na przykład termicznie wodór, wydostający się na powierzchnię tarcia, jest adsorbowany przez powierzchnię stali [56], następnie dyfunduje w głąb poprzez siatki krystaliczne ferrytu i koncentruje się w komorach położonych na gra-

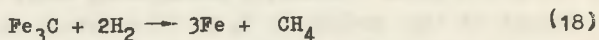
WYNIKI POMIARÓW ZMIAN ZAWARTOŚCI Fe W WARSTWIE WIERZCHNIEJ
PRÓBEK SPOWODOWANYCH TARCIEM O STAŁOWĄ PRZECIWRÓBKĘ

Nr	Próbka, oznaczenie	Zawartość Fe przed tarcieciem		Zużycie		Zawartość Fe po tarcieciu	
		ilość Fe,mg	% Fe	wagowe mg	liniowe μm	ilość Fe,mg	% Fe
1	W-12 (p ₂ v ₃ k _{w2})	14,2	6,2	31,1	138	49,8	24,1
2	AKF (p ₃ v ₂ k _{w1})	23,1	12,1	17,3	87	52,1	27,0
3	M-31 (p ₃ v ₂ k _{w1})	10,8	3,5	23,0	409	11,1	3,6
4	ZK-VI-19 (p ₁ v ₃ k _{w1})	9,9	3,8	13,0	51	9,8	3,8
5	V-1431 (p ₂ v ₂ k _{w3})	2,4	1,2	6,7	25	2,4	1,2
6	Galfel (p ₃ v ₂ k _{w1})	12,5	5,4	21,0	103	32,5	19,0
7	Cosid (p ₃ v ₂ k _{w1})	2,3	1,1	25,8	72	4,2	2,0
8	Polofen (p ₃ v ₃ k _{w2})	12,1	6,1	26,1	152	12,2	6,1

nicach ziarn. Zjawisko to, zależnie od stopnia zdeformowania warstwy wierzchniej, zachodzi do głębokości 0,01-0,2 mm [99]. Dyfuzja wodoru, przez kryształy cementytu przy podwyższonej temperaturze, prowadzi do reakcji:



lub dla wodoru cząsteczkowego



Metan wywołuje wysokie ciśnienie i prowadzi do powstawania międzykrystalicznych pęknięć w stali. W stalach węglowych nawodorowanie cementytu powoduje wytworzenie gąbczastego ferrytu o bardzo niskich własnościach mechanicznych [66, 100]. Przy normalnym ciśnieniu reakcja odwęglania stali wodorem zachodzi od temperatury 580 K, a przy większych ciśnieniach temperatura ta obniża się, a szybkość reakcji rośnie. W wielu eksperymentach ciernych (rys. 12) spełnione były warunki termiczne dla jej zachodzenia, tak więc przenoszenie można częściowo tłumaczyć kruchością wodorową stali. Na proces ukierunkowanego przechodzenia zjonizowanych atomów wodoru na powierzchnię stali ma wpływ pole elektrostatyczne między powierzchniami trących się ciał. Na powierzchniach tarcia obu elementów par tworzywo cierz-

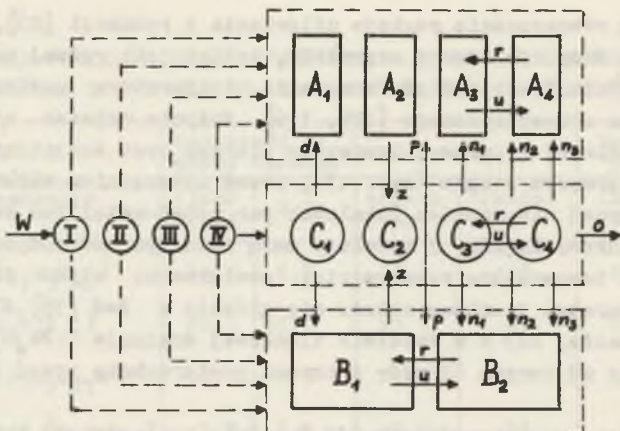
ne-stal zachodzą równocześnie reakcje utleniania i redukcji [83], o intensywności których decyduje szereg czynników, takich jak: rodzaj materiału, charakter obciążenia i stopień zdeformowania, temperatura powierzchni oraz skład ośrodka atmosferycznego [109, 110]. Zużycie wskutek utleniania przeciwpróbki stalowej w parze z tworzywem ciernym jest dominującym rodzajem zużycia w pierwszym etapie (rys. 47), przed utworzeniem warstwy metalicznej, czyli przed utworzeniem lokalnych par metal-metal. Ten rodzaj zużycia jest stosunkowo łagodny i wywołuje małą intensywność zużycia bieżni stalowej. Jeżeli temperatura rzeczywistej powierzchni styku przekracza wartość 843 K, warstwa tlenkowa składa się głównie z FeO [39], dla temperatury styków poniżej 843 K w warstwie tlenkowej dominuje Fe_4O_4 , który jest mniej kruchy od innych tlenków i chroni powierzchnię przed zużyciem adhezyjnym.

W temperaturach przekraczających 843 K rośnie intensywność zużycia [39], a wydzielające się z tworzyw gazy CO i H_2 stwarzają w mikroobjętościach między powierzchniami ciał trących warunki dla redukcji tlenków żelaza ($Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$) [64].

Traktując twardość jako opór, który przeciwstawia materiał przy wgniataniu w jego powierzchnię innego bardziej twardego materiału, ujawnia się zależność między twardością tworzywa a tworzeniem się rozwiniętej w głąb tworzywa warstwy metalicznej. Na tworzywach miękkich, takich jak: W-12, AKF, Galfel, w skład których wchodzi kauczuk (kauczuk najwcześniej wykazuje duże ubytki masy), tworzą się warstwy metaliczne głęboko wgniecione w tworzywo. Na tworzywach twardych, takich jak: M-31, Cosid, warstwy te występują rzadziej i tylko w postaci cienkich blaszek. Blaszkę tę ulegają łatwe zerwaniu z tworzywa w wyniku szczepień adhezyjnych, po przerwaniu warstwy tlenków na tarczy stalowej. Przerwania są w tym przypadku możliwe na skutek dużych nacisków na rzeczywistych powierzchniach styku między wgłębiającymi się w tworzywo z dużym oporem cząsteczkami żelaza i jego tlenków a tarczą stalową.

W oparciu o analizę wyników badań fizykalnych elementów ciernych i stan literatury dotyczącej analizowanego zagadnienia [20, 30, 46, 64, 68, 83, 113], kompleks zjawisk tribologicznych charakterystycznych dla pary: hamulcowe tworzywo cierne-stal, można przedstawić przy pomocy schematu jak na rys. 48.

Układ trący składa się z trzech ciał: A - okładziny hamulca (A_1 - Ie-piszczce, A_2 - wypełniacze, A_3 - tlenki Fe, A_4 - faza α -Fe), B - tarczy hamulca (B_1 - stal, B_2 - tlenki Fe), C - ciała "trzeciego" (C_1 - płynne produkty zużycia tworzyw ciernych, C_2 - stałe produkty zużycia tworzyw, C_3 - cząsteczki fazy α -Fe, C_4 - cząsteczki tlenków Fe). Układ trący poddany jest zewnętrznemu wymuszeniu kinematycznemu i dynamicznemu (W), co wywołuje w układzie odpowiedni stan obciążeń mechanicznych (I), pole temperatur (II) oraz pole elektrostatyczne (III). Układ działa w określonym otoczeniu (IV). W warunkach tarcia technicznie suchego można w układzie,



Rys. 48. Schemat tribologiczny układu trącego w hamulcach

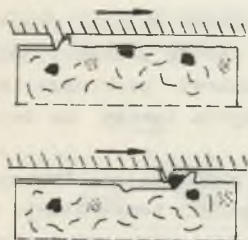
jak na rys. 48, wyszczególnić następujące dominujące procesy fizyczne i przemiany: u - utlenianie, r - redukcja, d - dyfuzja (O_2 , H_2 , CO, CH_4 i innych), z - zużycie (przejście masy ciał do produktów zużycia), p - przeniesienie masy pomiędzy ciałami w wyniku przerywania szczytów adhezyjnych poza granicami pierwotnego rozdziału, n_1 - nanoszenie fazy α -Fe, n_2 - nanoszenie tlenków Fe, n_3 - nanoszenie organicznych i innych składników tworzyw ciernych, o - opuszczenie przez produkty zużycia układu. W wyniku zachodzących w układzie procesów i przemian w ciałach stanowiących parę cierną konstrytuje się warstwa wierzchnia. Skład chemiczny strefy przypowierzchniowej w momencie przerywania tarcia jest wypadkową tych przemian i procesów oraz wskazuje na właściwość układu niesymetrycznego do wyrównania gęstości składników struktury w układzie w procesie tarcia.

4.5. Modele zjawisk tribologicznych w hamulcach

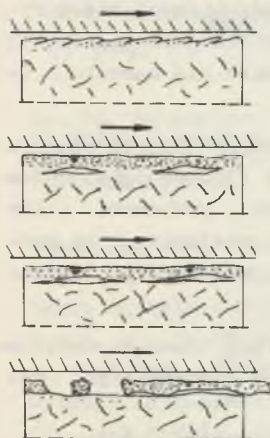
Doświadczenia wykazały dużą złożoność zjawisk towarzyszących tarcia elementów stanowiących parę: tworzywo cierne hamulcowe - stal.

W hamulcach maszyn wyciągowych, w pełnym zakresie zmian parametrów tarcia, wiodące rodzaje zużycia tworzyw to: zużycie ściernie, adhezyjne i ciepłne, których udział w ogólnym bilansie mechanizmu zużycia zmienia się w funkcji temperatury i stanu warstwy wierzchniej.

W przypadku temperatur tarcia niższych od temperatury destrukcji lepiska tworzyw ciernych i innych jego składników lub płynięcia metalu, następuje mniej lub bardziej intensywne wzajemne, mechaniczne deformowanie się warstw powierzchniowych, zależne od mikrogeometrii i własności mechanicznych tych warstw oraz produktów zużycia. Na powierzchni obu elementów pary następuje rysowanie, bruzdowanie, skrawanie (rys. 49), niszczenie wierzchołków mikronierówności itd.



Rys. 49. Schematyczny model ściernego oddziaływania elementów pary tworzywo cierne-stal



Rys. 50. Schematyczny model tworzenia i niszczenia umocnionych warstw powierzchniowych w warstwie wierzchniej tworzywo ciernych

Obecność twardych wypełniaczy w postaci proszków metali i pyłów ciernych (np. korundu) jest czynnikiem intensyfikującym zużycie cierne tworzyw (rys. 49) oraz przeciwpróbek stalowych [111]. Dlatego też twarde wypełniacze metalowe powinny mieć wymiary nie pozwalające na ich wyrwanie z powierzchni, tak na skutek mechanicznych oddziaływań nierówności przeciwpróbki stalowej, jak też w wyniku szczypteń adhezyjnych między materiałem wypełniacza i stalą.

Jeżeli w tworzywie ciernym konstrytuuje się warstwa umocniona w wyniku mechanicznych i termicznych oddziaływań oraz wnikania w nią, np. metalowych produktów zużycia, może następować okresowe jej zrywanie (głębokie wyrwanie) rys. 50. W procesie tym oprócz sił stycznych może brać udział ciśnienie zamkniętych w mikroobszarach gazowych produktów rozpadu składników organicznych tworzywa.

Występujące przy wysokich parametrach współpracy metalizowanie się próbek z tworzyw ciernych ma złożony charakter.

Koniecznymi warunkami powstania tego zjawiska na dużej powierzchni tarcia są:

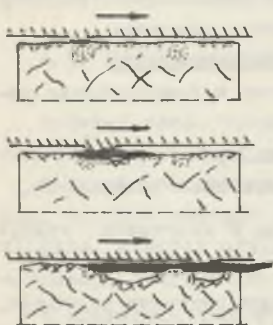
- temperatura powierzchni tarcia wyższa od temperatury destrukcji organicznych składników tworzywo ciernych, w szczególności kauczuku i wydzielanie gazów H_2 , CO , CO_2 ,
- obniżenie własności mechanicznych warstwy wierzchniej tarczy stalowej poprzez:
 - silne plastyczne przeddeformowanie,
 - odwęglenie stali wodorem w temperaturze powyżej 580 K,
 - zmęczenie i zdefektowanie,
 - utlenianie i wykruszanie błon tlenkowych,
- wzmocnienie i wzrost twardości wgniatających się w pierwszym etapie w tworzywo cząsteczek metalu (α -Fe),
- takie ukształtowanie struktur wieloskładnikowego tworzywa cierne, aby było możliwe łatwe wgniatanie warstwy metalicznej w tworzywo w kierunku normalnym do powierzchni tarcia i jej trudne wyciskanie w kierunku stycznym do tej powierzchni. Wyciskanie warstwy nie występuje jeżeli opór wyciskania tworzywa P_w jest większy od siły stycznej μN działającej na warstwę.

Do warunków przyspieszających proces narastania warstwy należą: proces redukcji tlenków żelaza (pochodzących z tworzywa i z tarczy stalowej) działanie sił pola elektrostatycznego, wywołującego kierunkowe przenoszenie, np. zjonizowanych atomów wodoru na stal i cząstek zużycia tarczy na tworzywo cierne.

Utworzone ognisko Fe, izolowane termicznie przez przylegające tworzywo, jest w czasie tarcia o stalową tarczę źródłem wysokiej temperatury, a dalsze powiększanie twardych narostów żelaza na tworzywie można tłumaczyć:

- a) adhezyjnym oddziaływaniem między narostem a odwęgloną warstwą stali, tworzeniem i ścinaniem szczepień (powierzchnia narostu jest ciągle pokryta, charakteryzuje się dużą fizyczną czystością "in statu nascendii" i wysoką temperaturą, co sprzyja etapom współdziałania molekularnego). Ścięcia występują na granicy umocniającej się w wyniku odkształceń plastycznych warstewki pod powierzchnią stalowej tarczy, czyli powodują przenoszenie i powiększanie się narostu z umocnionego żelaza,
- b) mechanicznym nanoszeniem, nalepianiem, mechanicznym przytrzymaniem i wgniataniem drobnych luźnych cząstek żelaza i tlenków jedna na drugą, a następnie ich spiekaniem [36]. Dzięki temu procesowi zbiorczych stykających się z sobą drobnych ziarn wiąże się wzajemnie, po podgrzaniu do temperatury niższej od potrzebnej do stopienia, tworząc lity i mechanicznie wytrzymały polikryształ.

Obydwa mechanizmy, o wyraźnie dyskretnym charakterze, tłumaczą warstwowo-płytkową budowę narostu (rys. 30 i 46). W warunkach rzeczywistych mechanizmy te występują prawdopodobnie nierozdzielnie.

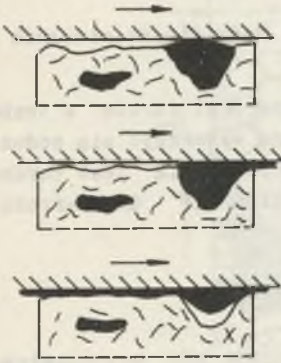


Rys. 51. Schematyczny model inicjacji i rozwoju warstw metalicznych na powierzchni tarcia tworzyw ciernych

W sąsiedztwie warstwy metalicznej tworzywo ulega destrukcji, co umożliwia warstwie rozrostu w głąb tworzywa, a jednocześnie osłabia wiązania między warstwą a tworzywem (warstwa przylega tylko do skupisk tlenków żelaza i azbestu, rys. 51), aż do jej zerwania. Nie można wykluczyć, że pod wpływem dużych temperatur oraz ośrodka redukcyjnego (CO , H_2) następuje redukcja tlenków żelaza, a utworzona warstwa jest częściowo wynikiem tego procesu. Zerwanie warstwy następuje, jeżeli połączenia adhezyjne między tarczą stalową a warstwą są silniejsze od wiązań warstwy z tworzywem. W takim przypadku obserwowano także na tarczy miejscowe narosty, które w dalszej współpracy z tworzywem ciernym powodowały jego głębokie rysowanie. Metalizowaniu towarzyszyło zawsze iskrzenie.

Wypełniacze metalowe tworzyw ciernych w wyniku mechanicznego i adhezyjnego oddziaływania ślizgają-

cych się powierzchni tworzą na stalowej przeciwpróbce nalepienia, np. miedzi lub jej stopów (rys. 52). Dla pary Fe-Cu występują połączenia adhezyjne, a ich zerwanie następuje wewnątrz warstwy wierzchniej miedzi, gdyż wytrzymałość tych połączeń jest większa od wytrzymałości miedzi [51].



Rys. 52. Schematyczny model nanoszenia warstw miedzi na powierzchnię stali

Świadczy to o wystąpieniu dyfuzji między metalami. Ścinanie wewnątrz warstwy wierzchniej miedzi oraz jej namazywanie jest spotęgowane wyższą temperaturą warstwy wierzchniej tworzywa, od temperatury warstwy wierzchniej przeciwpróbki stalowej. W przypadku wystarczającej ilości wypełniacza nalepiona warstewka pokrywa dużą część powierzchni przeciwpróbki. Jest ona w procesie tarcia w mikroobjętościach wielokrotnie deformowana, utleniana i zrywana. Częstki z tej warstewki oraz z granulek wypełniacza przechodzą wielokrotnie z jednego ciała na drugie [44]. Utworzona w ten sposób warstewka ma własności ochronne dla przeciwpróbki stalowej [44], zmniejsza jej zużycie i przenoszenie na powierzchnię tworzyw ciernych.

Własności takie ma wypełniacz metalowy tworzyw ZK-VI-19, M-31, Textar V-1431. Na powierzchniach, np. tworzywa ZK-VI-19 i M-31 (rys. 28) występują także ogniska o dużej koncentracji Fe, które inicjują zjawisko metalizowania, ale na skutek obecności warstewki Cu na powierzchni przeciwpróbki stalowej, przenoszenie α -Fe nie jest na tyle intensywne, żeby przewyższyć intensywność zużycia lub nie występuje w ogóle, jeżeli warstewka Cu jest ciągła. Jak z tego mechanizmu wynika, pozytywna rola wypełniacza metalowego nie polega tylko na zmianie niektórych własności tworzywa, np. współczynnika przewodzenia ciepła, ale przede wszystkim na zmianie procesu tarcia. Stąd ważne jest jaki to będzie wypełniacz, tak ze względu na jego geometrię, jak i na materiał.

Potwierdzeniem roli wypełniacza może być np. niekorzystny wpływ obecności aluminium w materiale ciernym [111]. Aluminium tworzy ze stalą szczeplenia tarciove (bez dyfuzyjne) o niewielkim stopniu związania na skutek obecności tlenków, a tlenki aluminium mają dużą twardość i aktywnie uczestniczą w procesie ścieńczenia elementów pary cierniej.

W hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych należy się liczyć z wystąpieniem zjawiska fadingu eksploatacyjnego. Jak wykazała analiza warunków termicznych współpracy elementów hamulców, w czasie hamowania bezpieczeństwa temperatura maksymalna przekroczyć może temperaturę chemicznej i mechanicznej stabilności tworzywa. Hamulec bezpieczeństwa działa sporadycznie, między hamowaniami okładzina ulega znacznemu nawilgoceniu (szczególnie w szybach mokrych), a w czasie manewrowych zahamowań (z powodu niskiej temperatury) nie nastąpi odparowanie wody.

Nagłe zahamowanie z pełnej prędkości jazdy hamulcem bezpieczeństwa może spowodować kilka sumujących efekt fadingu zjawisk jak np.:

- gwałtowne odparowanie H_2O ze strefy powierzchniowej tworzywa i tarczy,
- destrukcję składników organicznych tworzywa i wydzielanie ciekłych i gazowych produktów.

W wyniku tych zjawisk zmieniają się gwałtownie warunki tarcia z technicznie suchego na mieszany, a w mikroobszarach mogą wytworzyć się poduszki pary wodnej i gazów. W tych warunkach współczynnik tarcia jest bardzo nie stabilny i jak wykazały badania [127] może obniżyć się do wartości poniżej 0,1.

4.6. Struktura warstwy wierzchniej tworzyw ciernych

Wytrzymałość eksploatacyjna okładzin ciernych, czyli ich wytrzymałość powierzchniowa i objętościowa jest związana z własnościami warstwy wierzchniej ukonstytuowanymi w czasie procesu eksploatacji. Intensywność zmian własności fizycznych i chemicznych w poszczególnych obszarach warstwy wierzchniej konstytuowanej procesami technologicznymi i eksploatacyjnymi jest nierównomierna, gdyż niejednorodny jest wyjściowy materiał cierny a procesy w nim zachodzące nie są ciągłe. Tworzywa cierne jako anizotropowe mieszaniny składników o różnych własnościach mają bardzo zróżnicowaną strukturę warstwy wierzchniej, w której poszczególne strefy są trudne do wyodrębnienia.

Model budowy warstwy wierzchniej hamulcowych tworzyw ciernych uwzględniający różne termiczne warunki pracy okładziny ciernej przedstawia rys. 53. Uwzględniona na rysunku temperatura jest średnią temperaturą powierzchni tarcia w czasie hamowania, w którym ta warstwa została ukonstytuowana.

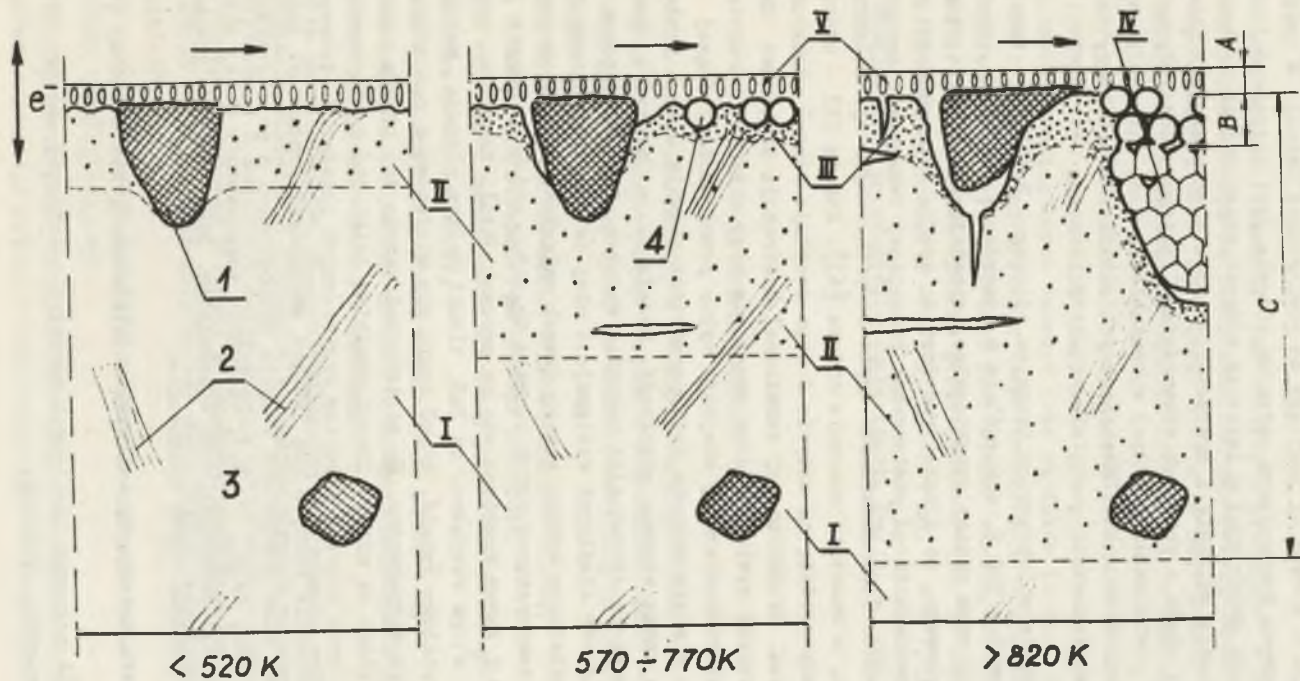
I - Strefa materiału wyjściowego, nie zmienionego chemicznie. Ze względu na charakter obciążenia okładzin w hamulcach jest to strefa odkształceń sprężystych lub trwałych postaciowych i normalnych.

II - Strefa umocniona tworzywa cierne. Zagadnienie umacniania się tworzyw ciernych w wyniku zgniotu i procesów cieplnych (wygrzewania) opracował Janecki [61].

W strefie umocnionej w wyniku procesów cieplnych zachodzących w toku tarcia następuje:

- zwiększenie stopnia usieciowania żywicy w następstwie postępującej polikondensacji i pełniejszego zwulkanizowania kauczuku,
- zwiększenie sorpcji żywicy na wypełniaczach, przede wszystkim na azbeście.

Ze strefy tej wyparowuje woda "luźno związana" i woda absorpcyjna z azbestu oraz odprowadzeniu ulegają inne części lotne jak: CO , CO_2 , co mię-



Rys. 53. Model budowy warstwy wierzchniej tworzyw ciernych

1 - wypełniacz - wiór metalu, 2 - wypełniacz - włókna azbestu, 3 - lepiszcze - żywica, kauczuk, 4 - cząsteczki żelaza i tlenków żelaza

dzy innymi inicjuje powstawanie szczelin. Lepiszczce charakteryzuje się wysoką twardością a tworzywo odpornością na zużycie [116]. W temperaturach do około 520 K strefa II przylega do powierzchni tarcia. W tych warunkach temperaturowych dominującym rodzajem zużycia jest zużycie ściernie. Przy ślizganiu się dwóch ciał o istotnie różnych własnościach mechanicznych zachodzi głębokie wnikanie i bruzdowanie ciała o własnościach niższych przez nierówności ciała o wyższych własnościach. Ścierane oddziaływanie ślizgających się powierzchni o różnej wytrzymałości jest intensyfikowane przez niejednorodność własności mechanicznych składników struktury tworzywa, np. twarde wypełniacze stają się elementami ściernymi.

III - Strefa zniszczonego tworzywa ciernego. Działanie temperatury o wartości powyżej 520 K, szczególnie w atmosferze powietrza, powoduje degradację żywicy oraz zmiany strukturalne, wyrażające się zmniejszeniem ciężaru cząsteczkowego, co z kolei prowadzi do spadku wytrzymałości mechanicznej oraz powstawania na powierzchni pracującej tworzywa ciernego pęknięć i rozwarstwień. Termostabilność żywic modyfikowanych np. melaminą [134] jest wyższa, a kauczuku znacznie niższa [63]. Strefa III charakteryzuje się niską odpornością na zużycie o czym decyduje rozpad struktury polimerów lepiszcza. Produktem tej termicznej destrukcji są bardzo drobne zwęglone cząsteczki żywicy. Proces zwęglenia przy niższych parametrach tarcia występuje nierównomiernie, obejmuje tylko pewne obszary trącej się powierzchni a w miarę wzrostu tych parametrów zajmuje całą powierzchnię i przenika na coraz większą głębokość. Strefa ta w procesie tarcia ulega szybkiemu zużyciu odsłaniając następną warstwę. Mimo trwających tylko kilka sekund uderów cieplnych występują w niej intensywne procesy fizykochemiczne. Wypełniacze tworzą szereg nowych związków: azbest chryzolitowy rozpada się w temperaturze 820 K tworząc Mg_2SiO_4 , który ma gorsze własności mechaniczne i łatwo rozciera się na proszek [111], baryt w temperaturze około 800 K ulega rozpadowi na BaS, tlenki żelaza ulegają redukcji a wypełniacze metalowe (miedź, brąz) topią się miejscowo i rozsmażają na powierzchni przeciwpartniera. Na powierzchni tarcia tej strefy ujawniają się szczeliny, które są między innymi wynikiem działania cyklicznych obciążeń termicznych oraz procesu pirolizy organicznych składników tworzywa ciernego. Powierzchnia pokrywa się luźnymi zwęglonymi produktami zużycia cieplnego tworzywa oraz produktami zużycia pochodzącymi z przeciwpróbki stalowej (α -Fe, FeO, Fe_3O_4 , Fe_2O_3), następuje zagęszczenie w tej strefie twardych i bardziej termostabilnych wypełniaczy. Mikrotwardość powierzchni tarcia tworzyw wzrasta około dwukrotnie.

IV - Strefa metaliczna (warstwa nażelazowana), która tworzy się w wyniku:

- ścinania połączeń tarciovych wewnątrz osłabionej warstwy wierzchniej przeciwpróbki stalowej,

- procesu spiekania drobnych, luźnych cząstek żelaza i jego tlenków wglębnionych w powierzchnię tworzywa,
- procesu redukcji tlenków żelaza.

V - Strefa adsorbowana. Elementy par ciernych pracujące w warunkach technicznie suchych adsorbują na powierzchniach zanieczyszczenia: drobiny pochodzenia organicznego, pary H_2O , gazy. Strefa ta daje efekty tarcia technicznie suchego w nie smarowanych węzłach tarcia, np. w hamulcach.

Poszczególne strefy (w szczególności I, II, III) są trudne do wyodrębnienia, występowanie lub grubość stref jest zależna od własności fizycznych i chemicznych poszczególnych tworzyw oraz warunków tarcia. Strefy te w zależności od intensywności przemian termochemicznych w lepiszczu mają różne zmieniające się barwy, w kierunku powierzchni tarcia, od jasno brązowej do czarnej. Poszczególne wymiary geometryczne z rys. 53 osiągają następujące przybliżone wartości: A - 2-3 Å, B - < 1 mm, C - < $1,73 \sqrt{a \cdot t_h}$ (gdzie: a - współczynnik przewodzenia temperatury, $\frac{m^2}{s}$, t_h - czas hamowania, s).

5. WNIOSKI OGÓLNE

1. Specyfika cech konstrukcyjnych i eksploatacyjnych hamulców maszyn wyciągowych stwarza konieczność przeprowadzenia większości badań w warunkach laboratoryjnych i pozwala tylko na końcową weryfikację wyników w warunkach przemysłowych.

Do programu laboratoryjnych badań tribologicznych należą:

- badania w warunkach stabilnej prędkości poślizgu,
- badania w warunkach dynamicznie zmiennej prędkości poślizgu (symulacja ikoniczna pracy hamulca),
- badania w warunkach ruchu przerywanego (ruch stick-slip).

Program ten powinien obejmować warunki symulujące największe obciążenie strefy przypowierzchniowej elementów hamulca.

2. Hamowania bezpieczeństwa maszyny wyciągowej z prędkości maksymalnej wywołują największe obciążenie frykcyjne elementów hamulca maszyny wyciągowej. Ukonstatuowany w warunkach maksymalnego obciążenia stan warstwy wierzchniej tworzywa ciernego decyduje w znacznym stopniu o jego właściwościach użytkowych w czasie hamowania manewrowego między kolejnymi zahamowaniami bezpieczeństwa.

W szczytowych warunkach pracy hamulców maszyn wyciągowych może wystąpić zjawisko fadingu eksploatacyjnego.

3. Specyfika warunków pracy różnych nowoczesnych maszynowych węzłów tarcia wymaga zmiany wiodącego rodzaju tribologicznego eksperymentu badań

czego z wysublimowanych badań pierwiastkowych, których model matematyczny opisuje pojedyncze zjawiska tribologiczne (najczęściej patologiczne w odniesieniu do maszynowych węzłów tarcia) na badania teoretyczno-eksperymentalne na modelach ikonicznych, odwzorowujących pracę oryginału. Przyjęte w tych badaniach modele matematyczne zjawisk tribologicznych powinny obejmować parametry tarcia, cechy materiałowe i istotne cechy konstrukcyjne węzła tarcia. Uzyskane na drodze analitycznego opracowania "całkowych" wyników badań tribologicznych matematyczne zależności nie będą uniwersalne dla wszystkich przypadków tarcia zewnętrznego, lecz wyidealizowane i ograniczone przyjętym w eksperymencie zakresem badań i własnościami modelowego stanowiska badawczego. Dla takich badań nie można przyjąć jednego modelu mechanizmu tarcia i zużycia.

4. Identyfikacja zjawisk tribologicznych wykazała dużą złożoność zjawisk towarzyszących tarcia elementów hamulca (p. 4.3). Tribologiczny system (rys. 48) dla takich węzłów ciernych złożony jest z trzech ciał (okładzina, bieżnia hamulca oraz ciało trzecie) i otoczenia, które wzajemnie na siebie oddziałują mechanicznie, energetycznie, elektrostatycznie i chemicznie. W hamulcach maszyn wyciągowych, w pełnym zakresie zmian parametrów tarcia, wiodące rodzaje zużycia tworzyw to zużycie ściernie, adhezyjne i ciepłone, których udział w ogólnym bilansie mechanizmu zużycia zmienia się w funkcji temperatury i stanu warstwy wierzchniej. Otrzymane z teoretyczno-eksperymentalnych badań analityczne zależności charakterystyczne dla tarcia suchego w hamulcach (7), (8), (11) mogą służyć jako funkcje-kryteria i pozwalają na ogólne poznanie związków między głównymi czynnikami opisującymi hamulec jako węzeł tarcia (np. wpływ parametrów tarcia na temperaturę, współczynnik tarcia, zużycie). W zakresie zmian objętych pracą najistotniejszy, a zarazem powtarzalny dla wszystkich tworzyw, jest wpływ nacisków jednostkowych na intensywność zużycia. Duży okazał się także wpływ współczynnika k_w . Najmniejszy wpływ na wyniki miała prędkość poślizgu.

5. W wyniku tarcia o przeciwpróbkę stalową na powierzchni hamulcowych tworzyw ciernych tworzy się warstwa metaliczna o dużej zawartości α -Fe oraz tlenków żelaza. Narost ten wgnieciony w tworzywo charakteryzuje się dużą twardością, powoduje zwiększenie zużycia tarczy stalowej i obniżenie współczynnika tarcia. Warstwowo-płytkowa budowa narostu wskazuje na dyskretny charakter jego wzrostu. Nażelazowanie powierzchni tworzyw występuje w tych parach tworzywo ciernie-stal, w których:

- temperatura powierzchni tarcia jest wyższa od temperatury pirolizy,
- następuje obniżenie własności mechanicznych warstwy wierzchniej stali,
- przenoszone mikroobjętości α -Fe ulegają umocnieniu,
- ukształtowanie struktury wieloskładnikowego tworzywa ciernego jest takie, że warstwa metaliczna - narost nie ulega wyciskaniu w trakcie tarcia ($P_w > N\mu$).

Do warunków przyspieszających proces narastania warstwy należą: proces redukcji tlenków żelaza i działanie sił pola elektrostatycznego.

6. Pełny cykl badań tribologicznych, wykonany zgodnie z przyjętą w niniejszej pracy metodyką i zakresem badań wykazał, że najlepsze własności na okładziny hamulców maszyn wyciągowych mają tworzywa charakteryzujące się między innymi:

- dużą stabilnością chemiczną (brak kauczuku),
- małą różnicą twardości mikroskładników,
- dużą udarnością,
- wypełniaczem metalowym (stopy Cu) w postaci dużych wiórów,
- małą ilością tlenków Fe w składzie tworzywa.

Do tworzyw o najkorzystniejszych własnościach należą: ZK-VI-19 oraz Textar V-1431.

Na pracę złożyły się między innymi obejmujące problemy tribologiczne części kilku opracowań, jakie wykonano w Instytucie Mechanizacji Górnicztwa Politechniki Śląskiej dla ZUT Zgoda w Świętochłowicach, nad wdrożeniem hamulców tarczowych do maszyn wyciągowych dużej mocy. Opracowania te obejmowały części studialne różnych rozwiązań konstrukcyjnych, analizę warunków pracy hamulców, opracowanie i wykonanie nowych hamulcowych materiałów ciernych (przy współpracy z Wojskowym Instytutem Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku) oraz badania eksploatacyjne na obiektach przemysłowych.

Warunki zalegania złóż ważnych surowców mineralnych zmuszają do budowania maszyn wyciągowych o najwyższych w świecie parametrach technicznych. W hamulcach tych maszyn występuje większe niż w innych maszynach obciążenie frykcyjne, dla tych warunków hamulce tarczowe okazały się najkorzystniejszym, a w wielu przypadkach niezastępczym źródłem momentu hamującego. Ważność zagadnienia dla gospodarki narodowej, bezpieczeństwo i wymagana niezawodność oraz specyfika pracy tych maszyn wymagała osobnego potraktowania problemów tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych.

W pracy pokazano sposób postawienia i rozwiązania zagadnienia tribologicznego dla jednego, konkretnego węzła tarcia. Realizacja teoretyczno-eksperymentalnego programu badań przyniosła dużą ilość faktów empirycznych z badań ilościowych tarcia i zużycia oraz fizykalnych badań zjawisk tribologicznych. Ambicją autora jest, aby otrzymane wyniki były przydatne nie tylko w pracach konstrukcyjnych nad hamulcem maszyn wyciągowych, ale także poszerzały wiedzę o tarcu o zużyciu w parze: tworzywo cierne-metal oraz aby układ pracy był wartym naśladowania modelem dowolnego eksperymentu tribologicznego i teoretyczno-utilitytarnym przeznaczeniu.

Do osiągnięć naukowych pracy należą: dokonana obszerna identyfikacja zjawisk na powierzchniach tarcia elementów ciernych, przy pomocy nowoczesnej aparatury badawczej, opis fenomenologiczny tych zjawisk na modelach oraz zbudowanie modeli matematycznych na podstawie skutków występowania tych zjawisk. Uzyskane informacje rozszerzają strefę poznania między skut-

kiem a przyczyną dla wielu niesprawności eksploatacyjnych w hamulcach oraz powinny być szczególnie przydatne w procesie udoskonalania własności użytkowych tworzyw ciernych lub ich doboru na elementy cierne, np. w środowisku o zagrożeniu wybuchowym w górnictwie podziemnym.

Dalsze prace z tego zakresu powinny być prowadzone w wielu kierunkach obejmujących różne cele naukowe i użytkitarne. Czekaają na głębsze opracowanie takie problemy jak:

- modelowanie tarcia w parze tworzywo cierne-metal,
- elektryzowanie się par tworzywo cierne-metal i rola ładunków elektrostatycznych na przebieg procesu tarcia w tych parach ciernych,
- optymalizacja struktury różnych węzłów tarcia.

LITERATURA

- [1] Aleksandrov M.: Tormoza pod'emno - transportnych mašin. Mašgiz, Moskva 1958.
- [2] Aleksandrov M.: Tormoznyje ustrojstva v mašinoostro'enii. Izd.Mašinoostro'enie, Moskva 1965.
- [3] Antler M.: Processes of metal transfer and wear. Wear, 9, 1966.
- [4] Antoniak J.: Kierunki rozwoju naczyń skipowych. Zeszyt nr 2 IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1972.
- [5] Antoniak J.: Badania charakterystyk rzeczywistych układów hamulcowych do maszyn wyciągowych. Praca NB Katedry Maszyn Górniczych, Gliwice 1968 (praca niepublikowana).
- [6] Antoniak J., Dramski S.: Badania ruchowe układu hamulcowego maszyny wyciągowej czteroliniowej KWK "Bielszowice". Praca NB Katedry Maszyn Górniczych, Gliwice 1968 (praca niepublikowana).
- [7] Antoniak J., Pawelski T., Zmysłowski T.: Rozwój krajowych konstrukcji maszyn wyciągowych. Zeszyt nr 2 IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1972.
- [8] Antoniak J., Ścieszka S., Makselon B.: Problemy hamowania maszyn wyciągowych o bardzo dużych mocach. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 5, 1975.
- [9] Antoniak J., Ścieszka S.: Zastosowanie hydraulicznych hamulców tarczowych w maszynach wyciągowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 2, 1973.
- [10] Antoniak J., Ścieszka S.: Analiza konstrukcji hamulca dla maszyn wyciągowych dużej mocy, badania i próby elementów ciernych dla hamulców osiowych. Praca NB IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1974 (praca niepublikowana).
- [11] Archard J., Hirst W.: The wear of metals under unlubricated conditions. Proc. Roy. Soc. Ser. A, vol. 236, 1956.
- [12] Bartnik R.: Systemy sterowania elektropneumatycznego hamulców maszyn wyciągowych. Zeszyt nr 4 IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1972.

- [13] Basford P., Twiss S.: Properties of Friction Materials. Trans. ASME, February, 1958.
- [14] Bayer R., Ku T.: Handbook of analytical design of wear, Plenum Press, New York 1964.
- [15] Bar S.: Technische Neuerungen auf dem Gebiet der Hauptschachtförderanlage für grosse Teufen. Bergakademie, nr 3, 1969.
- [16] Bark L., Moran D., Percival S.: Chemical changes in asbestosbased friction materials during performance - a review. Wear, 34, 1975.
- [17] Belyi V., Sviridenok A., Petrokovic M.: Trenije polimerov. Izd. Nauka, Moskva 1972.
- [18] Bilik Š., Curkan W.: Vlianie napravlenia stekania električeskich zaradov obrazujuscich pri trenii na iznos metalopolimernoj pary. Sb. Teoria smazocnogo dejstva i noveje materialy. Izd. Nauka, Moskva 1965.
- [19] Bojarski Z.: Mikroanalizator rentgenowski. Wyd. Śląsk, Katowice 1971.
- [20] Bowden F., Tabor D.: The friction and lubrication of solid. Oxford at the Clarendon Press 1964.
- [21] Braun E.: Laboratornyje metody issledovania trenija frikcionnyh par železnodorožnyh tormozov na modelach. Sb. Naučnyje principy i noveje metody ispytaniy materialov dlja uzlov trenija. Izd. ANSSSR, Moskva 1968.
- [22] Braun E., Ovsienko P.: Modelirovanie frikcionnyh charakteristik tormozov sachtnych pod'emnyh masin. Sb. Rasčet i modelirovanie rezima raboty tormoznyh i frikcionnyh ustrojstv. Izd. Nauka, Moskva 1974.
- [23] Broś J., Czaplicki J., Ścieszka S.: Badanie charakterystyk cierno-życiowych tworzyw hamulcowych w warunkach modelowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 3, 1976.
- [24] Broś J., Migas H., Zbertek J.: Niektóre wyniki badań zużycia i stanu powierzchni wysokociernych tworzyw niemetalowych i żeliwa. Materiały III Krajowego Sympozjum Eksploatacji Urządzeń Technicznych. Gdańsk-Getniewo 1972.
- [25] Bykov B.: Laboratornyje ispytaniya frikcionny materialov dlja basmakov magnitrel'sovych tormozov. Sb. Teplovaja dinamika trenija. Izd. Nauka, Moskva 1970.
- [26] Charkiewicz A.: Drgania samowzbudne. PWN, Warszawa 1956.
- [27] Chłosta B., Duda T., Koryciński W.: Hydrauliczne hamulce tarczowe do maszyn wyciągowych i ich sterowanie. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 1, 1974.
- [28] Choma Z.: Hamulec automatyczny zwalniany mechanicznie - analiza zastosowania go w mechanizmach dźwigowych. Problemy Projektowe, nr 3, 1967.
- [29] Cocks M.: Shearing of junction between metal surfaces. Wear, 9, 1966.
- [30] Cocks M.: Interaction of sliding metal surfaces. Journal of Applied Physics, 7, vol. 33, 1962.
- [31] Czaplicki J., Ścieszka S.: O pewnej warunkowej metodzie analitycznego wyznaczania charakterystyk eksploatacyjnych urządzeń. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z 3(19), 1974.
- [32] Čičinadze A.: Rasčet i issledovanie vnešnego trenija pri tormoženii. Izd. Nauka, Moskva 1967.
- [33] Čičinadze A., Zinoviev E.: Nekotoryje aspekty modelirovania trenija asbofrikcionnyh plastmass. Sb. Optimalnoe ispol'zovanie frikcionnyh materialov v uzlach trenija masin. Izd. Nauka, Moskva 1973.
- [34] Čičinadze A., Zinoviev E.: K ocenke značimosti nekotoryh operedelajuscich parametrov trenija pri tormoženii. Sb. Optimalnoe ispol'zovanie frikcionnyh materialov v izlach trenija masin, Izd. Nauka, Moskva 1973.

- [35] Čičinadze A.: Opredelenie temperatury na faktičeskom pjatne kasania w processe tromeżenia. Woprosy trenija i problemy smazki, Izd. Nauka, Moskva 1968.
- [36] Dereń J., Haber J., Pampuch R.: Chemia ciała stałego, PWN, Warszawa 1975.
- [37] Dimas'ko A., Gersikov J., Krevnevič A.: Šachtnyje električeskie lebedki i pod'emnyje mašiny, Izd. Nedra, Moskva 1973.
- [38] Dramski S.: Badania rozkładu obciążenia na poszczególne liny nośne podczas hamowania hamulcem bezpieczeństwa i manewrowym w urządzeniach wyciągowych czteroliniowych. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1972.
- [39] Earles S., Hayler M.: Wear characteristics of some metals in relation to surface temperature. Wear, 20, 1972.
- [40] Elizavetin M.: Povyšenie nadežnosti mašin. Izd. Mašinostroenie, Moskva 1973.
- [41] Ernst H.: Die Habezeuge. Tom I. Braunschweig. 1952.
- [42] Francia G.: Le vibrazioni autocitate nell'attrito radente. ATA, nr 1, 1959.
- [43] Gardulski J., Ścieszka S.: Własności ruchowe hydraulicznych hamulców tarczowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 5, 1974.
- [44] Garkunov D., Kragelskij J., Polakov A.: Izbiratelnyj perenos v uzlach trenia. Izd. Transport, Moskva 1969.
- [45] Georgievskij G., Lebedev L.: Issledovnije kinetiki elektryzacji pri skolzenii frikcionnych plastmass po metallu. Sb. Električeskije javlenia pri trenii. Moskva 1973.
- [46] Georgievskij G., Teoria smazočnogo dejstvija i novye materiały. Izd. Nauka, Moskva 1965.
- [47] Georgievskij G., Olina M.: Ob iznošivanii poverchnostej pri trenii plastmassovyh frikcionnych materiałov po metallu. Sb. Teoria smazočnogo dejstva i novye materiały. Izd. Nauka, Moskva 1965.
- [48] Georgievskij G., Olina M.: O namazyvanii i schvatyvvanii pri trenii plastmass po cugunu. Sb. Woprosy trenija i problemy smazki, Izd. Nauka, Moskva 1968.
- [49] Germančuk F.: Dolgovečnost i effektivnost tormoznych ustrojstv Izd. Mašinostroenie, Moskva 1973.
- [50] Giergiel J., Bednarz S., Sędziwy S.: Wpływ sprzężeń ciernych na drgania układów mechanicznych. Zeszyty Naukowe AGH, nr 18(158), 1967.
- [51] Gierzyńska M.: Studium zjawisk tribologicznych w procesach obróbki plastycznej. Praca habilitacyjna, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1974.
- [52] Ginzburg A., Čičinadze A.: Issledovanie zavisimosti koefficienta trenija ot temperatury pri nestacionarnom rezimie trenija. Sb. Rascet i modelirovanie rezima raboty tormoznych i frikcyjonnych ustrojstv, Izd. Nauka, Moskva 1974.
- [53] Grib W., Łazaziev G.: Laboratornyje ispytanija materialov na frenie i iznos, Izd. Nauka, Moskva 1968.
- [54] Hebda M., Janecki J.: Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. WNT, Warszawa 1969.
- [55] Hebda M., Mazur T.: Modele trwałości elementów maszyn. Materiały Konferencyjne. Problemy i modele eksploatacji urządzeń. OPT Katowice 1974.
- [56] Hebda M.: Metody przyspieszonych badań eksploatacyjnych urządzeń. Mat. Konferenc. Problemy i Modele Eksploatacji Urządzeń. OPT Katowice 1974.

- [81] Makselon B., Ścieszka S.: Hamulce tarczowe do maszyn wyciągowych. Przegląd Górniczy, nr 11, 1969.
- [82] Michin N., Amosov N.: Issledovanie zavisimosti koefficienta vnesnego trenija ot temperatury. Sb. Problemy trenija iznašivaniya. Izd. Technika, Kiev 1974.
- [83] Molgaard J.: The dry wear of metals as a process in an open system. Wear, 32, 1975.
- [84] Müller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego. WNT Warszawa 1961.
- [85] Müller L.: Ciepłne obliczenia hamulców. Problemy Projektowe, nr 6, 1960.
- [86] Najdenko J.: Pod'emnye ustanovki samych glubokich šacht mira. Ugol Ukrainy, nr 12, 1968.
- [87] Newcomb T., Spurr R.: Braking of Road Vehicles. Chapman and Hall, London 1967.
- [88] Nowicki J.: Badania tworzyw sztucznych przeznaczonych na wstawki hamulcowe dla dużych prędkości jazdy. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1970.
- [89] Nowicki J.: Ocena przydatności niektórych tworzyw sztucznych jako materiałów ciernych dla pojazdów szynowych w świetle badań stanowiskowych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 1 (17), 1974.
- [90] Nowicki J.: Rodzaje mechanizmów zużycia żeliwa i wysoko tarciovych tworzyw sztucznych przy wysokich prędkościach poślizgu i zmiennych naciskach. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 3 (19), 1974.
- [91] Orlacz J., Ścieszka S.: Badania nad wpływem nominalnej powierzchni styku na pracę hamulca tarczowego. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 2, 1976.
- [92] Orlacz J.: Problemy teorii hamulca maszyny wyciągowej w ujęciu probabilistycznym. Praca habilitacyjna. Politechnika Śląska, Gliwice 1970.
- [93] Orlacz J.: Problemy hamulca tarczowego do maszyn wyciągowych. Prace ZKMPW, nr 59, Wyd. Śląsk 1968.
- [94] Ovsienko P.: Pressmassovyje kolodki na šachtnych pod'emnych masinach. Ugol Ukrainy, nr 4, 1971.
- [95] Pavelescu D.: Statistical calculation of the wear rate and service life. First European Tribology Congress. London 1973.
- [96] Pavelescu D., Musat M.: Some relations for determining the wear of composite materials, Wear, nr 27, 1974.
- [97] Pavelescu D., Musat M.: On the wear intensity of brake composite materials. Rev. Roum. Sci. Techn.-Hec. Appl. Tom 18, nr 4, 1973.
- [98] Pogosian A.: Novoja metodika laboratornych ispytanij frikcionnych materialov dla tormozov podjemno-transportnyh masin. Sb. Teplovaja dinamika trenija. Izd. Nauka, Moskva 1970.
- [99] Polakov A., Garkunov D.: Vodorod kak uskoritel iznosa. Vestnik Masinstroenia, Nr 6, 1974.
- [100] Polakov A., Kragielskij J., Garkunov D.: O vodorodnom iznosc. DAN SSSR, 3, 195, 1970.
- [101] Popowicz O.: Transport kopalniany, cz. IV. Wyciągi szybwe. WGH Katowice 1957.
- [102] Rabinowicz E.: Friction and Wear of Materials. Wiley, New York 1965.
- [103] Rhee S.: Wear equation for polymers sliding against metal surfaces. Wear, nr 16, 1970.
- [104] Rhee S.: Friction properties of a phenolic resin filled with iron and graphite - sensitivity to load, speed and temperature. Wear, nr 28, 1974.

- [105] Rhee S.: Wear mechanisms for asbestos - reinforced automotive friction materials. *Wear*, nr 29, 1974.
- [106] Romanowski E.: Badania przyczyn zacierania się tulei cylindrowych i pierścieni tłokowych silników spalinowych. *Prace IPPT*, nr 27, Warszawa 1974.
- [107] Sadowski A.: Ocena przydatności wybranych tworzyw niemetalowych na wstawki cierne hamulców pojazdów szynowych w świetle badań laboratoryjnych. *Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1972.*
- [108] Schaele K.: Ermittlung der temperaturverteilung in den Trommeln schwerer Doppelbackenbremsen. *Fördern und Heben*, nr 13, 14, 1969.
- [109] Solski P., Ziemba S.: *Zagadnienia tarcia suchego*, PWN Warszawa 1965.
- [110] Solski P., Ziemba S.: *Zagadnienia zużycia elementów maszyn spowodowanego tarcieniem*. PWN 1969.
- [111] Spaliński K.: *Badania własności tarciovych tworzyw ciernych stosowanych na nakładki hamulcowe*. Praca doktorska, WAT, Warszawa 1973.
- [112] Sworzyński R.: *Metoda badania niektórych własności użytkowych materiałów ciernych*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1973.
- [113] Simorda J., Stroba J.: *Elektryczność statyczna w przemyśle*. WNT Warszawa 1970.
- [114] Šedrov V., Čičinadze A.: *O koefficientie vzajemnogo perekrytia. Povyšenie effektivnosti tormoznych ustrojstv*. ANSSSR, Moskwa 1959.
- [115] Ścieszka S.: *Nowe rozwiązania hamulców dla maszyn wyciągowych dużej mocy*. *ZN Politechniki Śląskiej*, z. 41 (G), 1969.
- [116] Ścieszka S.: *O badaniach niektórych zależności charakterystycznych dla tarcia suchego w hamulcach*. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN*, z. 2 (14), 1973.
- [117] Ścieszka S.: *Badania i próby empirycznego zapisu zjawisk cierno-zużyciowych charakterystycznych dla tarcia suchego w hamulcach*. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN*, z. 1 (17), 1974.
- [118] Ścieszka S.: *Związki liczbowe między własnościami fizykomechanicznymi i użytkowymi materiałów wysokociernych*. *Technika Smarownicza*, nr 2, 1973.
- [119] Ścieszka S.: *Ocena pracy elementów ciernych hamulca maszyny wyciągowej w aspekcie ich wytężenia cierno-zużyciowego*. *Zeszyt nr 5 IMG Politechniki Śląskiej, Gliwice 1972.*
- [120] Ścieszka S.: *Problemy termiczne hamulców tarczowych do maszyn wyciągowych*. *Biuletyn ZUT "Zgoda" Świętochłowice* nr 3 (53), 1973.
- [121] Ścieszka S.: *Udar cieplny w mikro- i makroobszarach elementów hamulców*. *Biuletyn ZUT "Zgoda" Świętochłowice*, nr 4 (54), 1973.
- [122] Ścieszka S.: *Drgania samowzbudne w maszynowych węzłach tarcia*. *Biuletyn ZUT "Zgoda"*, nr 4, 1974.
- [123] Ścieszka S.: *Problemy tarcia suchego w hamulcach maszyn wyciągowych*. *Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1972.*
- [124] Ścieszka S.: *Drgania samowzbudne wywołane tarcieniem suchym w hamulcach*. *Biuletyn OBRD i UT Bytom*, nr 1, 1974.
- [125] Ścieszka S.: *Problemy tarcia suchego w hamulcach maszyn wyciągowych*. *Prace ZKMPW*, nr 92, *Wyd. Śląsk, Katowice 1974.*
- [126] Ścieszka S.: *Badania odporności materiałów hamulcowych na inicjowanie drgań samowzbudnych w procesie tarcia*. *Technika Smarownicza*, nr 1, 1975.
- [127] Ścieszka S.: *Badania własności ciernych materiałów okładziny hamulców maszyn wyciągowych*. *Biuletyn ZUT "Zgoda" Świętochłowice*, nr 4 (58), 1974.

- [128] Ścieszka S.: Termiczne obciążenie elementów hamulców tarczowych w górniczych maszynach wyciągowych. ZN Politechniki Śląskiej (w druku).
- [129] Ścieszka S.: Zagadnienia drgań samowzbudnych w badaniach tribologicznych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN (w druku).
- [130] Tanaka K., Ueda S., Noguchi N.: Fundamental studies on the brake friction of resin - based friction materials. Wear, nr 23, 1973.
- [131] Tartakovskij I.: K rasčetu detalej mašin na iznos. Iznos i anti-frikcionnye svojtva materilov. Izd. Nauka, Moskva 1968.
- [132] Ting-Long Ho, Peterson M., Ling F.: Effect of frictional heating on brake materials. Wear. nr 30, 1974.
- [133] Wise S., Lewis G.: Composition Brake blocks and tyres. Journal of the I. Mech. E. Railway Division, vol. 1/4, 1970.
- [134] Zawalski S.: Badania nad optymalizacją tworzyw na nakładki hamulców tarczowych. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1973.
- [135] Zelcerman J., Onopko A., Kamiński D.: Frikcionnyje mufty i tormoza gušenicznych mašin. Izd. Masinostroenie, Moskva 1968.
- [136] Zinaviev E.: Teplovoj režim i frikcionnye charakterystiki obrazcowa iz polimernych kompozicij pri ispytanii na rozličnych mašinach trenija. Sb. Teplovaja dinamika trenija. Izd. Nauka, Moskva 1970.
- [137] Zmysłowski T.: Opracowanie projektu rozszerzonego typoszeregu dużych wyciągów wielolinowych. ZKMPW. Praca NB 3, Gliwice 1973.
- [138] Z.R-SITPH Ekspertyza: Badanie struktury i identyfikacja faz materiałów ciernych i tarczy hamulcowej, Katowice 1974.

PROBLEMY HAMOWANIA MASZYN WYCIĄGOWYCH.
STUDIUM WAŻNIEJSZYCH ZJAWISK TRIBOLOGICZNYCH W PARZE CIERNEJ:
TWORZYWO HAMULCOWE - STAL

Streszczenie

Przewidywany dalszy wzrost obciążenia elementów ciernych w hamulcach wielolinowych maszyn wyciągowych stwarza konieczność przeanalizowania i przebadania ich warunków pracy oraz przeprowadzenia identyfikacji zjawisk zachodzących w tych hamulcach.

W pracy dokonano przeglądu stanu wiedzy na temat zjawisk tribologicznych w hamulcach oraz scharakteryzowano tworzywa cierne przeznaczone do pracy w hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych.

Na specjalnym stanowisku badawczym - modelu ikonicznym hamulca tarczowego zbadano ilościowe zależności między parametrami tarcia, współczynnikiem wzajemnego przykrycia, intensywnością zużycia i współczynnikami tarcia oraz twardością i udarnością tworzyw.

Badania przeprowadzono na wstępnie wyselekcjonowanych tworzywach ciernych o lepiszczu organicznym, ale o różnej strukturze wewnętrznej. Wyniki z badań ilościowych tarcia i zużycia opracowano analitycznie w formie modelu matematycznego zjawisk tribologicznych. W zakresie zmian objętych pracą najistotniejszy a zarazem powtarzalny dla wszystkich tworzyw był wpływ nacisków jednostkowych na intensywność zużycia. Duży okazał się także wpływ współczynnika wzajemnego przykrycia. Najmniejszy wpływ na wyniki miała prędkość poślizgu. Przy pomocy badań mikroskopowych, mikroanalizy rentgenowskiej i rentgenowskiej analizy fazowej przeprowadzono identyfikację zjawisk tribologicznych na powierzchniach tarcia próbek. Identyfikacja wykazała dużą złożoność zjawisk towarzyszących tarcia elementów hamulca. Tribologiczny system dla takich węzłów ciernych złożony jest z trzech ciał (okładzina, tarcza hamulca, ciało trzecie) oraz otoczenia, które wzajemnie na siebie oddziałują mechanicznie, energetycznie, elektrostatycznie i chemicznie. W hamulcach maszyn wyciągowych, w pełnym zakresie zmian parametrów tarcia, wiodące rodzaje zużycia tworzyw to zużycie ściernie, adhezyjne i cieplne, których udział w ogólnym bilansie mechanizmu zużycia zmienia się w funkcji temperatury i stanu warstwy wierzchniej. W oparciu o wyniki badań fizycznych i analizę stanu wiedzy w pracy opracowano fizyczne modele zjawisk tribologicznych w szczególności opracowano mechanizm metalizowania się wybranej grupy tworzyw ciernych przy współpracy ze stalą. Opracowano także metodykę badań hamulcowych tworzyw ciernych.

ВОПРОСЫ ТОРМОЖЕНИЯ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН.
ИЗУЧЕНИЕ БОЛЕЕ ВАЖНЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ФРИКЦИОННОЙ ПАРЕ:
ТОРМОЗНАЯ ПЛАСТМАССА — СТАЛЬ

Р е з ю м е

Предусматриваемое дальнейшее увеличение нагрузки фрикционных материалов в тормозах многоканатных подъемных машин создает необходимость проанализировать и проверить их условия работы, а также провести идентификацию явлений, происходящих в этих тормозах. В работе сделан просмотр состояния знаний, касающихся трибологических явлений в тормозах, а также определены фрикционные материалы, предназначенные для работы дисковых тормозов подъемных машин. На специальном испытательном стенде — модели дискового тормоза исследованы количественные зависимости между параметрами трения, коэффициентом взаимного перекрытия, интенсивностью износа и коэффициентом трения, а также твердостью и ударной прочностью пластмасс. Исследования проведены на выбранных предварительно фрикционных материалах с органическим вяжущим веществом, но с разной внутренней структурой. Результаты количественных исследований трения и износа обработаны аналитически в форме математической модели трибологических явлений.

В объеме изменений, охваченных работой самое существенное и одновременно повторяемое для всех пластмасс было влияние удельного давления на интенсивность износа. Большим оказалось также влияние коэффициента взаимного перекрытия. Самое меньшее влияние на результаты имела скорость скольжения. С помощью микроскопических исследований, рентгеновского микроанализа и рентгеновского фазового анализа проведена идентификация трибологических явлений на поверхностях трения проб. Идентификация обнаружила большую сложность явлений, сопутствующих трению элементов тормоза. Трибологическая система для таких фрикционных узлов состоит из трех тел (фрикционная накладка, диск тормоза, третье тело), а также среды, которые воздействуют механически, энергетически, электростатически и химически друг на друга. В тормозах подъемных машин, в полном объеме изменений параметров трения, ведущие типы износа — это фрикционный, адгезионный и термический износы, участие которых в общем балансе механизма износа изменяется в функции температуры и состояния поверхностного слоя. Исходя из результатов физических исследований и анализа состояния знаний в работе разработаны физические модели трибологических явлений, в особенности, разработан механизм переноса металла на выбранные группы фрикционных материалов при совместной работе со сталью. Разработана также методика исследований тормозных фрикционных материалов.

PROBLEMS OF APPLYING OF THE BRAKE IN WINDING MACHINES.
A STUDY OF MORE IMPORTANT TRIBOLOGICAL PHENOMENA IN FRICTION COUPLE:
BRAKE COMPOSITE MATERIAL - STEEL

S u m m a r y

The anticipated further increase of the load of frictional elements in the brakes of multirope winding machines makes it necessary to analyse and to investigate their working conditions and to identify all the phenomena occurring in these brakes. The paper reviews the state of knowledge concerning the tribological phenomena encountered in brakes and provides the characteristics of the friction materials used for the disk brakes of hoisting machines. On a special test stand - i.e. an iconic model of a disk brake - the quantitative relations have been investigated which exist between pressure, sliding velocity, the coefficient of reciprocal covering the intensity of wear and the coefficient of friction on the one hand, and the hardness and impact resistance of the material on the other. These investigations were carried out on preselected frictional material with organic binding agents, but differentiated inner structures. The results of quantitative investigations of friction and wear, have been analytically developed in the form of a mathematical model of the tribological phenomena. The range of the investigated changes comprises the most essential effect of the unit pressure upon the abrasive wear, this effect being the same in the case of all kinds of material. Of great influence proved to be also the coefficient of reciprocal covering. The results were least influenced by the sliding speed. The tribological phenomena on the friction face of the samples have been identified by means of microscopic tests, X-ray microanalysis as well as X-ray phase analysis. This identification displayed the great complexity of phenomena accompanying the friction of the brake elements. The tribological system of such friction nodes consists of three elements (the lining, the disk and some third element) as well as of the environment, all of them influence one another mechanically, energetically, electrostatically and chemically. Within the full range of friction parameter changes the most important kinds of wear in the brakes of winding machines are abrasive wear, adhesive wear and thermal wear, whose share in the total balance of the wear and tear mechanism varies in the function of the temperature and condition of the outer layer. Basing on the results of physical investigations and on the analysis of the contemporary state of knowledge, physical models of tribological phenomena have been developed, particularly however, the mechanism of the metallization of some selected frictional materials working with steel. The methodics of investigating the adaptability of frictional materials for use in brakes has been dealt with, too.

WYKAZ OZNACZEŃ I WYMIARY JEDNOSTEK

A — nominalna powierzchnia tarcia próbek, cm^2 ,

E_u — energia kinetyczna wirującego układu, MJ,

HK — twardość, $\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$,

H — głębokość urządzenia wyciągowego, m,

Ig — intensywność zużycia, $\frac{\text{mg}}{\text{m}^2}$,

L — praca tarcia, J,

MH — mikrotwardość, $\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$,

N — obciążenie normalne, N,

Q — masa nosiwa w naczyniach, Mg,

U — udarność, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$,

W — energia adhezji, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$,

$c_{1,2}$ — ciepło właściwe, $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$,

eg — efektywna intensywność zużycia, $\frac{\text{mg}}{\text{MJ}}$,

k_w — współczynnik wzajemnego przykrycia, b-w,

p — nacisk jednostkowy, $\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$,

s — droga tarcia, km,

t — czas, s,

v — prędkość, m/s,

v_p — prędkość początkowa, m/s,

w — liczba lin nośnych,

z — zużycie, ubytek masy próbek, mg,

μ — współczynnik tarcia, b-w,

ϑ — temperatura, K,

Indeksy

1 — dotyczy bieżni hamulca,

2 — dotyczy okładzin hamulca

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P 3351/76/75

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻ-
NA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- Gliwice** — Księgarnia Techniczna, ul. M. Strzody 14b;
Gliwice — Punkt sprzedaży Studenckiej Spółdzielni Pracy, ul. Wrocławska 4/6;
Katowice — Księgarnia nr 004, ul. Warszawska 11;
Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33;
Bytom — Księgarnia nr 048, pl. Kościuszki 4;
Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22;
Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2;
Rybnik — Księgarnia nr 126, Rynek 1;
Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7;
Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288;
Zawiercie — Księgarnia nr 250, ul. 3 Maja 11;
Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw PAN, Pałac Kultury i Nauki.

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.