

5.51 — doświadczalne metody badania
materiałów

7.75 — tarcie

2 / 1983

Edward Romanowski

**BADANIA MIKROSKOPOWE
PRZYSPIESZONEGO NISZCZENIA
STYKU PLASTYCZNEGO
W PARACH KINEMATYCZNYCH
Z RÓŻNYCH METALI**

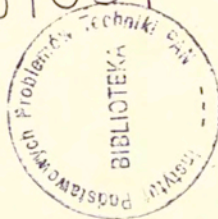
2/1983



WARSZAWA 1983

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 grudnia 1981 r.

57034



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 140 egz. Ark.wyd. 1,25. Ark.druk.1,75
Oddano do drukarni w styczniu 1983 r.
Nr zamówienia 128/o/83 M-13

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul.Sniadeckich 8

Edward Romanowski
ZUM IPPT PAN

BADANIA MIKROSKOPOWE
PRZYSPIESZONEGO NISZCZENIA STYKU PŁASTYCZNEGO
W PARACH KINEMATYCZNYCH Z RÓŻNYCH METALI

1. Wstęp

W dyskusjach naukowych padają zarzuty, że pojęcie zacierania jest zbyt słabo sprecyzowane, a granice jego rozciągłości są rozmyte. Niezależnie jednak od niedoskonałości dotychczasowego poznania zjawisko to występuje, przysparzając wielu strat gospodarce maszynami. Stąd wydaje się celowym prowadzenie badań pierwiastkowych, które być może przyczynią się do lepszego jego poznania.

2. Cel i przedmiot pracy

Celem pracy jest poznanie cech właściwych przyspieszonemu niszczeniu styku plastycznego w parach kinematycznych z różnych metali.

Przedmiotem pracy są badania mikroskopowe przyspieszonego niszczenia styku plastycznego w parach kinematycznych z różnych metali.

3. Materiały badań

Do badań mikroskopowych użyto następujące materiały:

- 1/ stop aluminium PA-2,
- 2/ srebro elektrolityczne,
- 3/ stal łożyskowa,
- 4/ stal stopowa 38HMJA ulepszana i azotowana.

4. Metoda badań

Badania przeprowadzono na mikroskopie elektronowym typu "Cambridge Stereoscan" przy następujących parametrach: - prąd żarnika 2,50 A, - napięcie 30 kV, prąd wiązki około 170 μ A. Obserwacje mikroskopowe uszkodzonych elementów par kinematycznych przeprowadzono

przy powiększeniach obrazu od 20x do 20000x w zależności od budowy materiału warstwy przypowierzchniowej i stopnia uszkodzenia badanej powierzchni.

5. Wyniki badań

5.1. Styk plastyczny ze stopu aluminium PA-2 współpracującego ślizgowo ze stalą 45 w stanie nieobrabanym cieplnie

Z przeprowadzonych badań wynika, że najwcześniej występującymi objawami niszczenia styku plastycznego na skutek tarcia są deformacje plastyczne wierzchołków mikronierówności powierzchni próbek ze stopu PA-2. W miarę wzrostu liczby cykli obciążeń następuje dalsze zmniejszanie się tych mikronierówności aż do całkowitego zaniku rzeźby technologicznej i utworzenia na jej tle nowej rzeźby powierzchni styku ślizgowego w warunkach tarcia. Rzeźbę tą stanowią pasma równoległych względem siebie bruzd pokazanych na rysunkach 3 i 4. Tworzenie się bruzd związane jest z nierównomiernym wyciskaniem plastycznym materiału. W środkowej części ścieżki tarcia obserwowano największe umocnienie zgniotem, połączone z wyciskaniem części zdeformowanego materiału przed czołem ślizgacza. To wyciskanie materiału związane było z nadrywaniem i ścinaniem jego drobnych fragmentów niedostrzegalnych gołym okiem, a zauważalnych dopiero przy odpowiednio dobranym powiększeniu na mikroskopie /rys.3 i 4/. Również przy brzegach ścieżki tarcia obserwuje się plastyczne wyciskanie materiału styku na boki. W miarę usuwania z powierzchni styku rzeźby technologicznej i wyciskania plastycznego coraz to głębszych bruzd, następuje coraz to większe zbliżenie się i dopasowanie wzajemne powierzchni współpracujących elementów pary ślizgowej. Zbliżenie powierzchni przyczynia się do wzrostu oddziaływań mechanicznych i molekularnych między nimi.

W miarę wzrostu stopnia deformacji plastycznych i umacniania materiału warstwy przypowierzchniowej styku z jednej strony, a zbliżeniem powierzchni elementów współpracujących z drugiej, dochodzi do coraz to większego wzrostu oporów poślizgu na pierwotnej granicy rozdziału elementów pary ślizgowej. Występy mikronierówności powierzchni stalowego ślizgacza pod wpływem siły docisku coraz głębiej zanurzają się w materiał styku plastycznego /stop PA-2/. Wciskany materiał styku plastycznego w coraz to większym stopniu wypełnia wgłębienia w powierzchni ślizgacza. Przy powierzchni roboczej ślizgacza

tworzy się przyścienna strefa zastoju z zablokowanego materiału styku plastycznego. Od czoła i dna fali przepływającego zdeformowanego plastycznie materiału styku w coraz to większym stopniu zaczynają odrywać się fragmenty materiału powiększając narost włączony przez ślizgacz. Fakty te dość dobrze ilustrują rysunki 3, 4, 10, 11 i 12.

W tym czasie pod wpływem przykładanych obciążeń zewnętrznych, /w tym głównie stycznych/, szybko rośnie gęstość dyslokacji, coraz liczniej są uruchamiane nowe linie poślizgu. Ponieważ strefa przypowierzchniowa styku plastycznego jest już w znacznym stopniu umocniona zgniotem, dalszy proces rozwoju poślizgów i umacniania materiału zgniotem przesuwają się nieco głębiej i rozwijają pod strefą przypowierzchniową. Na skutek nierównomiernego stanu odkształceń materiał styku w strefie przypowierzchniowej jest poddawany coraz to większym obciążeniom i naprężeniom rozciągającym. To sprzyja ułatwieniu wychodzenia na powierzchnię tarcia położoną z tyłu, za ślizgaczem - linii poślizgu i innych skumulowanych pod nią defektów struktury. W następstwie tego w strefie powierzchni tarcia położonej za ślizgaczem, przy dalszym działaniu siły tarcia pojawiają się mikropęknięcia, które z upływem czasu obciążenia rosną do wymiarów pokazanych na rysunku 1. Długość tych mikropęknięć jest różna i najczęściej wynosi od 0,5mm do około 2,0 mm. Jak to widać z rysunku 1 przeważająca większość tych mikropęknięć jest ułożona w płaszczyznach prostopadłych do kierunku siły tarcia i naprężeń rozciągających materiał warstwy wierzchniej styku plastycznego. Przy wzroście obciążeń stycznych następuje przyspieszenie procesu łączenia się tych mikropęknięć w mikropęknięcia jeszcze większe, dające już ^{początek} lawinowo postępującemu otwieraniu się mikroszczelin w sposób trwały i ścinaniu przypowierzchniowej strefy zablokowanego przez ślizgacz materiału styku plastycznego, co pokazano na rysunkach 1, 7 i 8. Widok ogólny powierzchni ścinania warstwy przypowierzchniowej styku ze stopu aluminium pokazano na rysunku 2. Na podstawie badań tego i wielu innych obrazów powierzchni ścinania w procesach tarcia dochodzimy do wniosku, że początkowo proces kumulacji defektów zachodził na wielu płaszczyznach, a dopiero w miarę łączenia się tych defektów powstawały lokalnie płaszczyzny uprzywilejowane. Szczegółowe badania powierzchni ścinania pozwalają zauważyć na niej wyraźne ukierunkowanie poszczególnych krystalitów oraz płaszczyzn poślizgów występujących między nimi, co pokazano na rysunku 5.

Z badań dna wielu wyrw na powierzchniach styku plastycznego wywnika, że oddzielanie się warstwy przypowierzchniowej w procesach zacierania wywołane jest mechanizmem poślizgowego ścinania, z wyraźnym jednak dość często udziałem rozciągania krystalitów położonych między czynnymi w danej chwili czasu płaszczyznami poślizgów, co można zauważyć na rysunkach 5 i 6 oraz 13 i 14.

Dalszy lawinowy rozwój niszczenia powierzchni styku plastycznego przez zacieranie pokazano w widoku ogólnym na rysunku 9, natomiast szczegóły dotyczące wyciągania i zrywania krystalitów pokazano na rysunkach 13 i 14. Na rysunku 10 pokazano obraz lawinowego mikroprzenoszenia materiału styku plastycznego w procesie zacierania, zaś nalepiania i zgniatania przenieszonego materiału na rysunkach 11 i 12.

5.2. Styk plastyczny powłoki elektrolitycznej ze srebra współpracującego ślizgowo z hartowaną stalą łożyskową

Objawami przyspieszonego niszczenia styku plastycznego ze srebra elektrolitycznego jest zgniot powierzchniowy i wyciskanie plastyczne materiału powłoki, co zostało pokazane na rysunku 15. Na powierzchni pierwotnego styku brak jest oznak wskazujących wyraźnie na hamowanie lub blokowanie ruchu względnego ślizgacza, mimo niezaprzeczalnego istnienia oznak przyspieszonego niszczenia. Na rysunku 16 widoczna jest pojedyncza rysa na powierzchni styku plastycznego ze srebra. Bardziej szczegółowe oględziny tej rysy i jej podobnych niéwskazują na wytwarzanie się w ich obszarze więzi mechanicznych lub molekularnych o dużej wytrzymałości połączenia elementów pary kinematycznej. Brak jest w tym również mikroskopowo dostrzegalnych oznak przenoszenia srebra na ślizgacz stalowy. Na rysunku 17 pokazano obraz pola powierzchni podlegającej przyspieszonemu niszczeniu. W dolnej części obrazu pokazana jest powierzchnia stalowego podłoża na granicy z którym nastąpiło plastyczne ścinanie powłoki srebra elektrolitycznego. Na rysunku 18 pokazano stadium pęknięcia powłoki srebra elektrolitycznego wyciskanego przed czołem ślizgacza, a rozciąganego w strefie położonej z tyłu za nim. Główne linie pęknięć przebiegają/również jak i przy niszczeniu stopu aluminium / w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku siły tarcia i wywołanych nią naprężeń rozciągających powłokę srebra elektrolitycznego. Na rysunku 19 pokazano obraz plastycznego wyciskania powłoki ze srebra elektrolitycznego i pęknięcie jej po przekroczeniu

krawędzi ze ścianką prostopadłą względem powierzchni ślizgowej. Srebro wyciśnięte przez ślizgacz tworzy nawis nad krawędzią.

Rysunek 20 przedstawia obraz powierzchni ślizgowej srebra w stadium przyspieszonego niszczenia objawiającego się rozwojem mikropęknięć powłoki w strefie położonej za ślizgaczem. Również w tym przypadku linie rozwijających się mikropęknięć najczęściej przebiegają w płaszczyznach prostopadłych do kierunku siły tarcia.

5.3. Styk plastyczny ze stali łożyskowej współpracującej ślizgowo ze stalą łożyskową

Typowymi warunkami współpracy tego rodzaju par jest tarcie toczne. Zdarzają się jednak przypadki kiedy tarcie toczne chwilowo przechodzi w tarcie toczne z poślizgiem lub nawet w tarcie ślizgowe. Są to oczywiście warunki nieprawidłowe. W tej pracy nie zamierzamy się zajmować tym, jak te warunki zmienić, ale skoro takie przypadki zdarzają się w praktyce, to pragniemy poznać to, co z tego wynika, jakie są tego skutki. Prezentowana w niniejszej pracy para kinematyczna uległa przyspieszonemu niszczeniu i po przebiegu 7% swej normy pracy w warunkach normalnej eksploatacji wymontowana została z maszyny.

Z analizy zjawiska zacierania, które tu niestety występuje wynika, że jego powstanie przy czystym toczeniu jest w zasadzie niemożliwe. A zatem, w badanej parze powinien wystąpić poślizg. Aby się o tym przekonać popatrzyjmy na rysunek 21 a, na którym przy dwustokrotnym powiększeniu widzimy ślad tarcia ślizgowego trudny jednak do zidentyfikowania. Powiększając ten sam obraz 500x widzimy pasmo deformacji plastycznych styku ślizgowego. Z dalszego powiększenia fragmentu obrazu pokazanego na rysunku 21b widzimy na rysunku 21c, a jeszcze dokładniej na rysunku 21d, że deformacje plastyczne w styku związane są z brzdowaniem i rysowaniem powierzchni, co prowadziło do blokowania ruchu względnego elementów pary kinematycznej. Ponieważ prędkość obrotowa łożyska jest bardzo duża $n = 15.500 \text{ obr./min.}$, dlatego nagłe zblokowanie pierścienia łożyskowego i elementu tocznego na skutek zatarcia może doprowadzić do awarii.

Plastyczne odkształcenia w styku hartowanej stali łożyskowej wskazują na to, że wystąpiło tam lokalne spiętrzenie temperatury. Liczne naderwania i schropowacenie powierzchni brzdowania wskazują, że blokowanie współpracujących elementów pary kinematycznej miało

charakter mechanicznego oddziaływania /zahaczania mikrowystępów/, jakkolwiek w parach materiałowo jednoimiennych nie należy pomijać znaczenia oddziaływań molekularnych.

5.4. Styk plastyczny warstwy wierzchniej azotowanej stali 38HMJA współpracującej ślizgowo z twardym chromem elektrolitycznym

Typowymi warunkami współpracy tego rodzaju par jest tarcie ślizgowe w ruchu posuwisto-zwrotnym w temperaturze około 130°C. W warunkach pracy pary kinematycznej dochodzi niekiedy do lokalnych spiętrzeń termicznych, które są główną przyczyną uplastycznienia styku i przyspieszonego jego niszczenia przez tarcie.

Cechą charakterystyczną przyspieszonego niszczenia tego rodzaju par kinematycznych nie jest, ani umacnianie zgniotem warstwy przypowierzchniowej i bruzdowanie jak to miało miejsce w przypadku 5.1, ani plastyczne wyciskanie jak w przypadku 5.2, czy też duże stosunkowo schropowacenie powierzchni styku i jej blokowanie jak w przypadku 5.3, a szepianie ciepłe powierzchni styku i ścinanie warstwy przypowierzchniowej. Na rysunku 22a pokazano obraz powierzchni ulegającej przyspieszonemu niszczeniu na skutek stick-slip'u. Z kolei na rysunku 22b pokazano bardziej szczegółowo fragment dna uszkodzenia, gdzie oddzielenie materiału strefy przypowierzchniowej związane było z płynięciem plastycznym materiału na nowej granicy rozdziału szepionych elementów pary kinematycznej. Na rysunkach 22c i d pokazano obrazy powierzchni ścinania plastycznego warstwy przypowierzchniowej azotowanej stali 38HMJA.

6. Dyskusja

6.1. Odpowiedzi dla dyskutantów

Fonieważ w dyskusjach naukowych padały zarzuty, że pojęcie zacierania jest zbyt słabo sprecyzowane, a granice jego rozciągłości są rozmyte, dlatego pragnę w tym miejscu ustosunkować się do niektórych z tym związanych pytań bardziej szczegółowych. Prawdą jest, iż jest to zjawisko bardzo złożone i mało jeszcze dotychczas poznane. Niezależnie jednak od niedoskonałości naszego poznania, zjawisko to istnieje i nierzadko występuje w maszynach, przysparzając dużych strat gospodarce. Jak podaje badacz zajmujący się przez wiele lat mechaniką niszczenia par kinematycznych /1/ ponad 30% awarii samych silników lotniczych związanych jest z zacieraniem. Doświadczenia autora pracy z badań maszyn w warunkach eksploatacji pozwalają sądzić, że nie jest

to oszacowanie strat zawyżone. Stąd niezależnie od stanu dotychczasowego poznania i trudności badawczych istnieje potrzeba prowadzenia badań pierwiastkowych i lepszego poznania tego zjawiska. Innej alternatywy na dłuższą metę osobiście nie widzę.

Odpowiedzi na pytania szczegółowe:

Pytanie 1. Co to jest właściwie, to zacieranie?

Odp. Zacieranie jest to ciąg elementarnych zjawisk przyspieszonego niszczenia warstwy wierzchniej w obszarach styku plastycznego elementów pary kinematycznej, który prowadzi do stanu jej zatarcia. Ponieważ pojęcie zatarcia zostało określone w literaturze, dlatego definiowaniem jego nie będę się tu zajmował /2/.

Pytanie 2. Gdzie występuje zacieranie?

Odp. Zacieranie występuje wyłącznie w stykach plastycznych elementów ślizgowych lub toczno-ślizgowych par kinematycznych, ponieważ występowanie poślizgu w ruchu względnym elementów pary kinematycznej jest warunkiem koniecznym do jego powstania.

Pytanie 3. Na jakim poziomie rozwoju niszczenia ciała stałego tworzącego styk plastyczny najsłuszniej byłoby przyjąć początek jego zacierania?

Zdaniem autora za początek zacierania najsłuszniej byłoby przyjąć ognisko przyspieszonego niszczenia, gdy proces ten obejmuje swym zasięgiem co najmniej najmniejszy dostrzegalny gołym, nieuzbrojonym okiem obszar powierzchni styku plastycznego.

Na przykład dla mnie w badaniach stosowanych są to ogniska uszkodzeń o wymiarach około 0,06 x 0,5 mm. Takie minimalne wymiary uszkodzeń jak wielokrotnie stwierdziłem w mikroskopowych badaniach szczegółowych stanowią już ogniska nieodwracalnych procesów przyspieszonego niszczenia styku plastycznego zwanych zacieraniem. To ograniczenie procesu zacierania w postaci umownie przyjętego kresu dolnego zdaniem autora wiąże się z tym, iż na mniejszych obszarach powierzchni styku, nawet te same elementarne zjawiska niszczenia z braku odpowiednio dużej ich koncentracji w jednym skupisku, zwykle wykazują zbyt małą skuteczność swego dalszego rozwoju w przypadkach napotykania na swej dalszej drodze rozwoju przeszkód /barier/ i dlatego ich powstanie i istnienie nie musi budzić naszych obaw o wystąpienie groźby zatarcia. Te drobne rozproszone ogniska uszkodzeń mogą powstawać i zanikać wielokrotnie, w analogiczny sposób jak

jak powstają i zanikają rzeki na pustyni wypływające ze źródeł o zbyt małej wydajności, które płynąc giną w piaskach pustyni nie osiągnąwszy brzegu morza.

6.2. Dyskusja wyników badań

Na podstawie przeprowadzonych badań materiały styków można podzielić na:

- 1/ materiały, których procesy przyspieszonego niszczenia mogą zachodzić w normalnej temperaturze otoczenia lub przy pomijalnie małym jej przyroście,
- 2/ materiały, które ulegają przyspieszonemu niszczeniu dopiero w następstwie nagrzania styku do odpowiednio wysokiej temperatury.

Na podstawie badań autora do pierwszej z wymienionych grup materiałów styku elementów par kinematycznych możemy zaliczyć stop aluminium PA-2, ołów, cynę i im podobne, natomiast do drugiej grupy - stal łożyskową, azotowaną stal 38HMJA, twarde chrom elektrolityczny i tym podobne materiały.

Drugą różnicę stwierdzoną w niniejszych badaniach stanowią cechy charakterystyczne procesu przyspieszonego niszczenia styków plastycznych z poszczególnych materiałów. I tak na przykład, cechą charakterystyczną przyspieszonego niszczenia stopu aluminium PA-2, stali łożyskowej i azotowanej stali 38HMJA jest blokowanie ruchu względnego na powierzchni pierwotnego rozdziału styku elementów pary kinematycznej, gdy natomiast w przypadku przyspieszonego niszczenia powłoki elektrolitycznej srebra tą cechą najbardziej charakterystyczną procesu jest wyciskanie plastyczne. W tym miejscu pragnę zwrócić uwagę, iż jest to cecha wyróżniająca zacieranie stopu aluminium PA-2, stali łożyskowej, azotowanej stali 38HMJA i tym podobnych materiałów, od przyspieszonego niszczenia przez wyciskanie w temperaturze normalnej otoczenia srebra, ołowiu i innych materiałów styku plastycznego elementów par kinematycznych.

Zwraca uwagę także to, że charakter więzi tarciovych wywołujących wzajemne blokowanie ruchu względnego na pierwotnej granicy podziału styku plastycznego elementów pary kinematycznej, może być związany z różnymi w swej istocie oddziaływaniami. I tak na przykład w badaniach stwierdzono, że blokowanie ruchu względnego na pierwotnej granicy rozdziału styków ze stopu aluminium PA-2 współpracujących ze ślizgaczem ze stali 45 nieochrabianej cieplnie, czy styków ze stali

łożyskowej pracującej w parach jednoimiennych pod względem materiału i jego obróbki cieplnej - ma w głównej mierze charakter oddziaływań mechanicznych, które polegają na zaciskaniu materiału styku plastycznego oraz zahaczaniu mikro- i makrowystępów między mikrowystępy nierówności powierzchni ślizgowej ślizgacza, pod łącznym działaniem siły docisku i siły tarcia. Z kolei w poprzednich badaniach autora /3/ stwierdzono, że blokowanie styku plastycznego z azotowanej stali 38HMJA współpracującej ze ślizgaczem z twardego chromu elektrolitycznego ma charakter w głównej mierze oddziaływań molekularnych objawiających się w badanym przypadku szepianiem cieplnym elementów par kinematycznych.

Praca niniejsza stanowi przyczynek do bliższego poznania zjawiska zacierania.

6.3. Mechanizm zacierania stopu aluminium PA-2 współpracującego ze stalą 45 nieobrabianą cieplnie

Warunkiem koniecznym/ale niewystarczającym do/powstania zacierania w/w pary ślizgowej jest wstępna deformacja plastyczna warstwy przypowierzchniowej styku ze stopu PA-2. Rola tych wstępnych deformacji w głównej mierze może być sprowadzona do:

- poprzerywania błon powierzchniowych styku i ułatwienia między nim a ślizgaczem zwiększenia udziału oddziaływań molekularnych, następstwem których jest tworzenie się szepień adhezyjnych I rodzaju;
- umocnienia zgniotem strefy przypowierzchniowej **styku**;
- usunięcia rzeźby technologicznej z powierzchni styku, a na skutek bruzdowania i rysowania wytworzenia nowej struktury mikroschropowacenia tego styku, przez ponadrywanie i poroździeranie bardzo drobnych fragmentów omawianej powierzchni;
- stworzenie bardziej odpowiednich warunków do zbliżenia powierzchni styku elementów pary kinematycznej pod wpływem siły docisku.

Następnym warunkiem koniecznym /ale również samoistnie niewystarczającym do/ powstania zjawiska zacierania w/w pary ślizgowej jest blokowanie /zahamowanie/ ruchu względnego na pierwotnej płaszczyźnie rozdziału styku plastycznego z PA-2 ze ślizgaczem ze stali 45. Dzieje się tak na skutek odpowiednio dużego zbliżenia powierzchni ślizgowych; zahaczania wciśniętych na odpowiednią głębokość w materiał styku plastycznego z PA-2 występów mikronierówności twardszego partnera, jakim jest ślizgacz ze stali 45; wstępnego zaciśnięcia tych mikrowystępów pod działaniem siły stykowej i siły normalnej do nomi-

nalnej powierzchni przylegania elementów pary ślizgowej; sczepiania styków siłami adhezji.

Trzecim warunkiem koniecznym /ale także niewystarczającym do/ powstania zjawiska zacierania w/w styków jest ścinanie plastyczne materiału położonego pod **strefą** przypowierzchniową wstępnie umocnionego zgniotem i zablokowanego przez ślizgacz. To ścinanie plastyczne materiału styku z PA-2 poprzedzone jest:

- uruchomieniem licznych poślizgów w płaszczyznach stycznych do kierunku działania siły tarcia;
- a następnie rozciąganiem materiału w strefie przypowierzchniowej położonej za ślizgaczem;
- wychodzeniem poślizgów na powierzchnię tarcia w strefie położonej za ślizgaczem;
- łączeniem się wyjść tych poślizgów na powierzchni tarcia i tworzeniem mikropeknięć;
- kumulacją tych mikropeknięć na powierzchni tarcia;
- otwieraniem się mikroszczelin aż do stanu krytycznego po przekroczeniu którego następuje ścinanie plastyczne pierwszych mikroobszarów materiału styku z PA-2;
- kumulowaniem się mikroszczelin na powierzchni tarcia;
- lawinowym otwieraniem się wielu mikroszczelin i zapoczątkowaniem lawinowego ścinania makroskopowo obserwowalnych obszarów materiału styku plastycznego z 2-e stopu PA-2.

Na tym właściwie kończy się powstawanie zacierania, a zaczyna w pełni rozwinięty proces przyspieszonego niszczenia pod tą samą nazwą - zacierania.

W piątym etapie rozwoju zacierania wyróżnia się zjawisko zwane z angielska zjawiskiem stick-slip'u. Istota jego polega na kolejno powtarzających się fazach: **sczepianie** - poślizg - **sczepianie** - poślizg. W wyniku tego w znacznym stopniu wzrastają drgania układu, a w następstwie także nadwyżki dynamiczne, co sprzyja procesowi dalszego przyspieszenia niszczenia styku elementów pary kinematycznej. Dalszy proces niszczenia styku ma charakter lawinowy i nieuporządkowany, który jest analogiczny do turbulencyjnego przepływu cząstek cieczy, czy gazów.

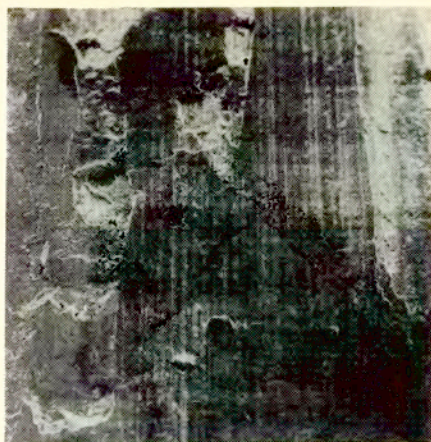
Proces ten rozwijając się w sposób niekontrolowany zazwyczaj kończy się zahamowaniem ruchu względnego elementów pary kinematycznej i ich zniszczeniem /pozbawieniem przydatności do wykonywania pracy do której były przewidziane przez konstruktora maszyny/.

7. Wnioski

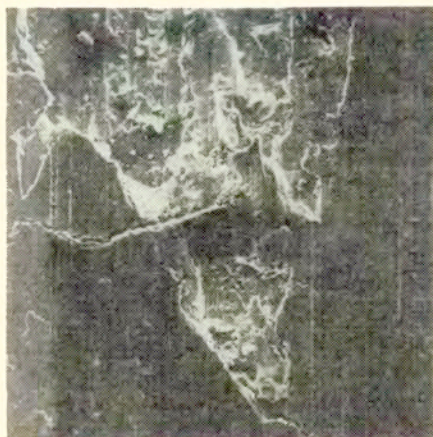
1. Pojęcie przyspieszonego niszczenia styku plastycznego elementów pary kinematycznej nie jest równoznaczne z zacieraniem. Jest to pojęcie szersze, które jak to wykazały badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy obejmuje także i inne rodzaje niszczenia styków jak np. plastyczne ich wyciskanie.
2. Przyrost temperatury w styku nie jest warunkiem koniecznym powstania zjawiska zacierania metali plastycznych w normalnej temperaturze otoczenia.
3. Warunkami koniecznymi powstania zjawiska zacierania metali plastycznych w normalnej temperaturze otoczenia są:
 - 1/ działanie siły docisku i siły tarcia w styku,
 - 2/ wstępne odkształcenia plastyczne styku,
 - 3/ blokowanie przez ślizgacz (zaciśnięty swymi mikronierównościami) przypowierzchniowej strefy wstępnie umocnionego zgniotem materiału styku plastycznego lub przez ich sczepienie siłami adhezji,
 - 4/ ścinanie warstwy przypowierzchniowej styku plastycznego.

8. Literatura

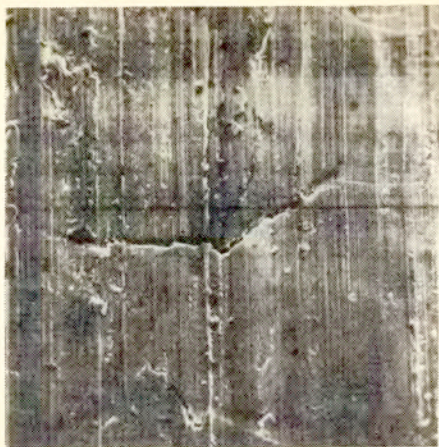
1. N.L.Golego, Schwatywanie v mašinach i metody jego ustranienia. Izd.Technika, Kiev 1967,
2. Praca zbiorowa, Encyklopedia techniki - budowa maszyn. WNT, Warszawa 1976,
3. E.Romanowski, Studium zjawiska zacierania wybranych elementów maszyn. Prace IPPT PAN 67/1977.



Rys.1. Styk plastyczny ze stopu aluminium. W polu widzenia ścieżka tarcia we wczesnym stadium lawinowego niszczenia, które na tym etapie najpierw objawia się wychodzeniem na powierzchnię mikropeknięć /o długości średniej około 1mm/, a następnie ich łączeniem i ścinaniem przypowierzchniowej warstwy materiału styku. Pow.x20. Próbka 2, obszar 2. 268/30



Rys.2. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Obraz dna wyrywy powstałej na skutek ścinania materiału warstwy przypowierzchniowej. Po środku obrazu mikropeknięcie warstwy przypowierzchniowej o długości około 2 mm. Pow.x100. Próbka 2, obszar 3. 268/40



Rys.3. Styk plastyczny ze stopu aluminium. W środku obrazu mikro-pęknięcie o długości około 1mm usytuowane w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku siły tarcia. Tło obrazu przedstawia deformacje plastyczne powierzchni styku w stadium przyspieszonego niszczenia. Pow.x100. Próbką 2, obszar 2. 268/32



Rys.4. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Obraz przedstawiający bruzdowanie powierzchni. Widoczne ślady plastycznego wyciskania na boki oraz mikroprzenoszenia i nalepiania fragmentów oddzielonego materiału. Pow.x500. Próbką 2, obszar 2. 268/36



Rys.5. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Przejście z mikropęknięcia w dno wyrwy. W polu widzenia widoczne ukierunkowanie urwanych krystalitów. Pow.x500. Próbka 2, obszar 3. 268/42



Rys.6. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Obraz dna wyrwy powstałej na skutek ścinania ze zdzieraniem warstwy przypowierzchniowej materiału. Ślady urywania ukierunkowanych krystalitów. Pow.x1000. Próbka 2, obszar 3. 268/44



Rys.7. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Lawinowy rozwój ścinania materiału warstwy przypowierzchniowej, poprzedzony gwałtownym i prawie jednoczesnym otwieraniem się wielu mikroszczelin o długościach około 1 mm. Z boku widoczny wypływ wyciągniętego przez ślizgacz materiału. Pow.x20. Próbką 1, obszar 4. 268/10



Rys.8. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Moment otwierania się mikroszczeliny i ścinania materiału styku plastycznego zablokowanego przez dociskany ślizgacz na pierwotnej płaszczyźnie poślizgu elementów pary kinematycznej. Pow.x100. Próbką 1, obszar 4. 268/12



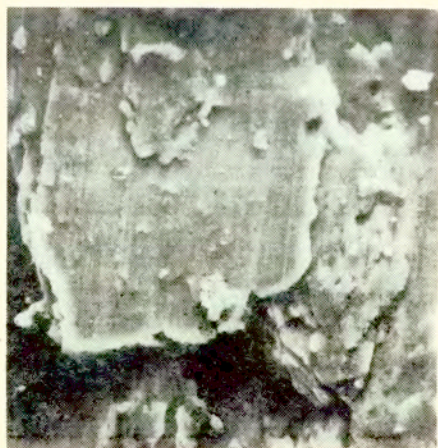
Rys.9. Widok ogólny pasma uszkodzeń styku plastycznego ze stopu aluminium. Pow.x100. Próbka 2, obszar 1. 268/26



Rys.10. Deformacje plastyczne powierzchni styku ślizgowego, charakterystyczne dla rozwiniętego zjawiska zacierania. W polu widzenia ślady wyciągania i zrywania krystalitów oraz ich przenoszenia i nalepiania. Pow.x500. Próbka 2, obszar 1. 268/28



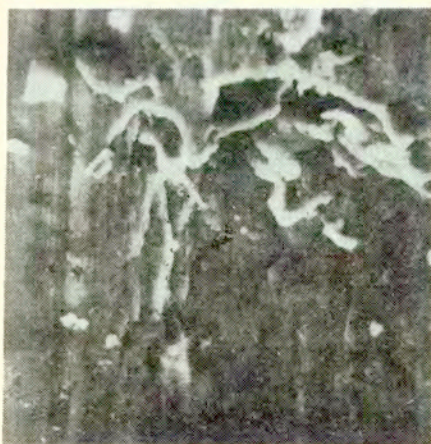
Rys.11. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Stadium lawinowego mikroprzenoszenia materiału. Pow.x500. Próbką 3, obszar 1. 268/50



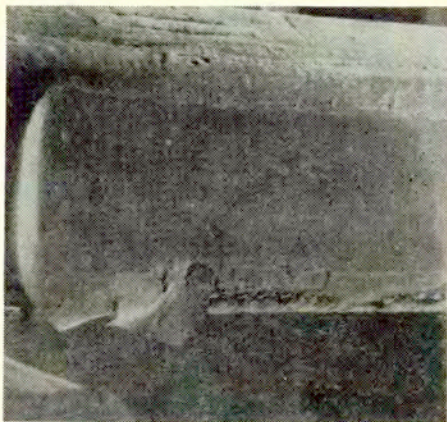
Rys.12. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Obraz przedstawiający jednocześnie lawinowe przenoszenie, nalepianie i zgniatanie przenieszonego materiału. Pow.x500. Próbką 1, obszar 5. 268/20



Rys.13. Styk plastyczny ze stopu aluminium. W polu widzenia lawinowe wyrwania krystalitów w płaszczyźnie ścinania materiału warstwy przypowierzchniowej. Pow.x500. Próbką 6, obszar 2. 269/90



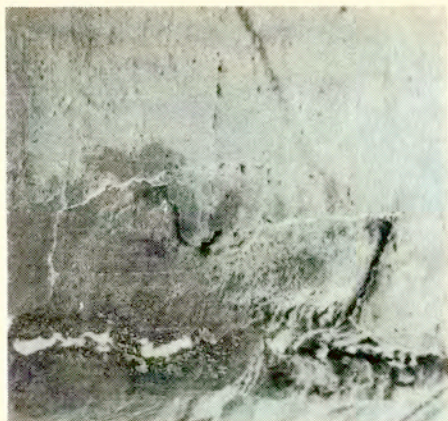
Rys.14. Styk plastyczny ze stopu aluminium. Miejsce po wyrwanej wiązce krystalitów. Pow.x500. Próbką 4, obszar 1. 268/68.



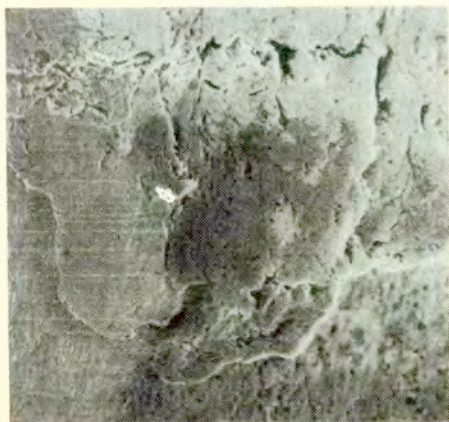
Rys.15. Styk plastyczny srebra elektrolitycznego. Ogólny widok uszkodzonej powierzchni ślizgowej. W polu widzenia ślad plastycznego wyciskania, pęknięcia i obłamywania wypływów. Pow.x20. Próbką 655ak. 236/32



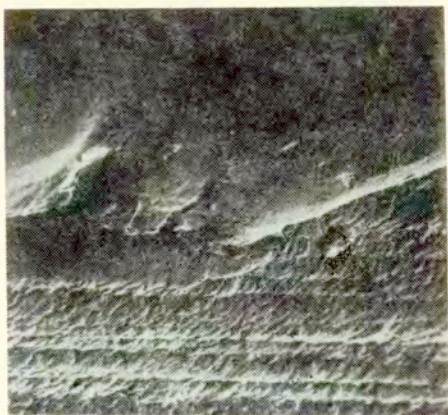
Rys.16. Styk plastyczny srebra elektrolitycznego. Pojedyncza rysa na tle gładkiej powierzchni styku ślizgowego. Pow.x50. Próbką 655ak/190/74. 236/44



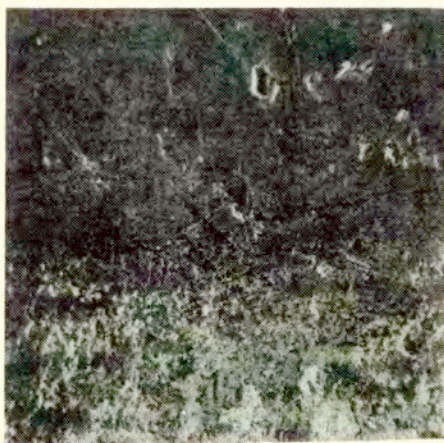
Rys.17. Styk plastyczny ze srebra elektrolitycznego. Obraz przedstawia jedno ze stadiów przyspieszonego niszczenia spowodowanego wyciskaniem plastycznym, a następnie ścinaniem powłoki elektrolitycznej srebra na granicy ze stalowym podłożem. Zwraca uwagę stosunkowo wysoka gładkość powierzchni na pierwotnej granicy rozdziału ze ślizgaczem. Pow.x100. Próbka 655ak. 236/34



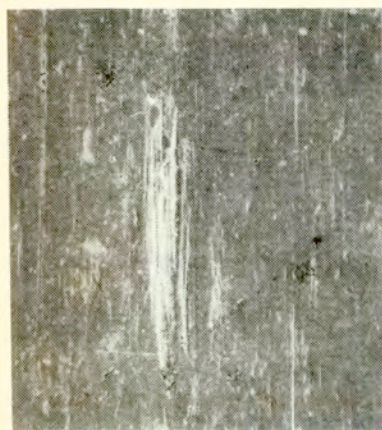
Rys.18. Styk plastyczny ze srebra elektrolitycznego. Pękanie i oddzielanie się płatku srebra od reszty powłoki elektrolitycznej i od podłoża. Pow.x350. Próbka 655ak. 236/36



Rys.19. Styk plastyczny ze srebra elektrolitycznego. Wyciskanie plastyczne i pęknięcie fragmentów powłoki elektrolitycznej. Pow.x200. Próbką 1351ak/79. 265/74



Rys.20. Styk plastyczny ze srebra elektrolitycznego. Mikropęknięcie powłoki elektrolitycznej srebra w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania siły tarcia. Pow.x200. Próbką 1092ak/87. 237/2



a/ pow.x200



b/ pow.x500

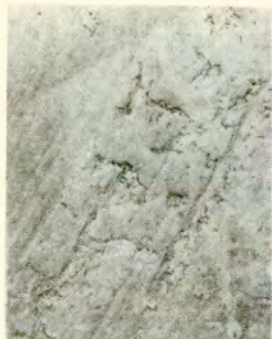


c/ pow.x2000



d/ pow.x5000

Rys.21. Styk plastyczny ze stali łożyskowej pracujący w jednoimien-
nych parach materiałowych. Poszczególne obrazy przedstawia-
ją wstępne stadium przyspieszonego niszczenia styku przy
różnych powiększeniach. Próbkki 1378aw/16/77. 266/64+74



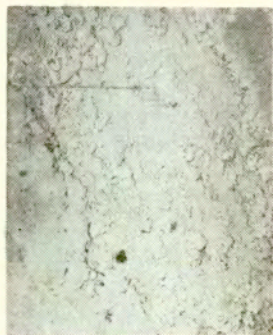
a/ pow.3900



b/ pow.x7000



c/ pow.x6800



d/ pow.x3900

Rys.22. Styk plastyczny stali 38HMJA ulepszanej cieplnie i azotowanej.

- a/ obraz niszczenia wywołanego stick-slipem,
- b/ obraz niszczenia wywołanego płynięciem plastycznym materiału warstwy przypowierzchniowej,
- c/ i d/ obrazy powierzchni ścinania plastycznego materiału warstwy przypowierzchniowej