POWRÓT

WARSTWY CERAMICZNE W UKŁADACH ŁOŻYSKOWYCH

MARIAN SZCZEREK, MAREK WIŚNIEWSKI
Międzyresortowe Centrum Naukowe
Eksploatacji Majątku Trwałego w Radomiu

SŁOWA KLUCZOWE

materiały ceramiczne, powłoki powierzchniowe, indeks plastyczności, charakterystyki cieplno-zużyciowe

STRESZCZENIE

Przeprowadzono analizę warunków styku chropowatych elementów z warstwami powierzchniowymi o własnościach różniących się od materiału podłoża. Wyznaczono wartości indeksu plastyczności dla różnych materiałów skojarzonych ze stalą oraz określono wpływ grubości warstwy ceramicznej. Podano wstępne wyniki badań eksperymentalnych.

WPROWADZENIE

Materiały ceramiczne w postaci monolitycznej oraz jako warstwy nanoszone na powierzchni elementów maszyn znajdują coraz szersze zastosowanie w systemach tribologicznych. Wydaje się, że w najbliższych latach materiały te będą równie rozpowszechnionymi tworzywami konstrukcyjnymi elementów węzłów tarcia, jakimi są obecnie tworzywa sztuczne.

Korzystnym z punktu widzenia wymagań tribologii cechom materiałów ceramicznych, którymi są wysoka twardość i odporność chemiczna oraz cieplna, towarzyszy kruchość, ograniczająca możliwości ich zastosowania. Istnieje również bariera ekonomiczna - wysoki koszt tych materiałów. Oba te ograniczenia można pokonać stosując materiały ceramiczne w postaci warstw nanoszonych na powierzchniach metalowych elementów węzła tarcia.

Narzędzia pokrywane odpornymi na zużycie warstwami ceramicznymi są obecnie szeroko stosowane, również w kraju, pozwalając na podwyższenie parametrów obróbki i jednoczesne zwiększenie trwałości. Warstwy ceramiczne w układach łożyskowych nie są jeszcze tak rozpowszechnione, jednak intensywne prace badawcze prowadzone w wielu ośrodkach powinny pozwolić i w tym przypadku na osiągnięcie dojrzałości wdrożeniowej.

W Międzyresortowym Centrum Naukowym Eksploatacji Majątku Trwałego w Radomiu opracowano szereg technologii nanoszenia warstw ceramicznych na powierzchnie stalowe [1, 2]. Warstwy te znalazły jak dotychczas zastosowanie w narzędziach skrawających i w wyposażeniu medycznym. W tej pracy przedstawiono wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych, których celem utylitarnym jest rozszerzenie obszaru aplikacji ceramicznych warstw przeciwzużyciowych na elementy układów łożyskowych.

ODKSZTAŁCENIA W MIKROOBSZARACH STYKU

Rodzaj odkształceń występujących w mikrobszarach styku elementów maszyn decyduje o intensywności zużycia tribologicznego. Jeżeli w styku występują wyłącznie odkształcenia sprężyste, wówczas możliwymi rodzajami zużycia są zmęczenie (pitting) i zużycie utleniające [3]. W takich warunkach musi wystąpić oczywiście istotne zmniejszenie intensywności zużywania.

Parametrem bezwymiarowym pozwalającym zidentyfikować rodzaj odkształceń w mikrostyku wierzchołków nierówności powierzchni jest wprowadzony przez Greenwooda i Williamsona [4] indeks plastyczności

$$\Psi = \frac{E'}{H} \cdot \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^{1/2},$$

gdzie E' jest zredukowanym modułem sprężystości,

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2},$$

gdzie: H - twardość, s - odchylenie standardowe wysokości wierzchołków nierówności powierzchni, a b - wartość oczekiwaną promienia krzywizny wierzchołków. Dla indeksu plastyczności $Y < 0,6$ w mikroobszarach styku występują odkształcenia sprężyste, dla $Y > 1$ - odkształcenia plastyczne, a przy $0,6 < Y < 1$ mamy obszar przejściowy.

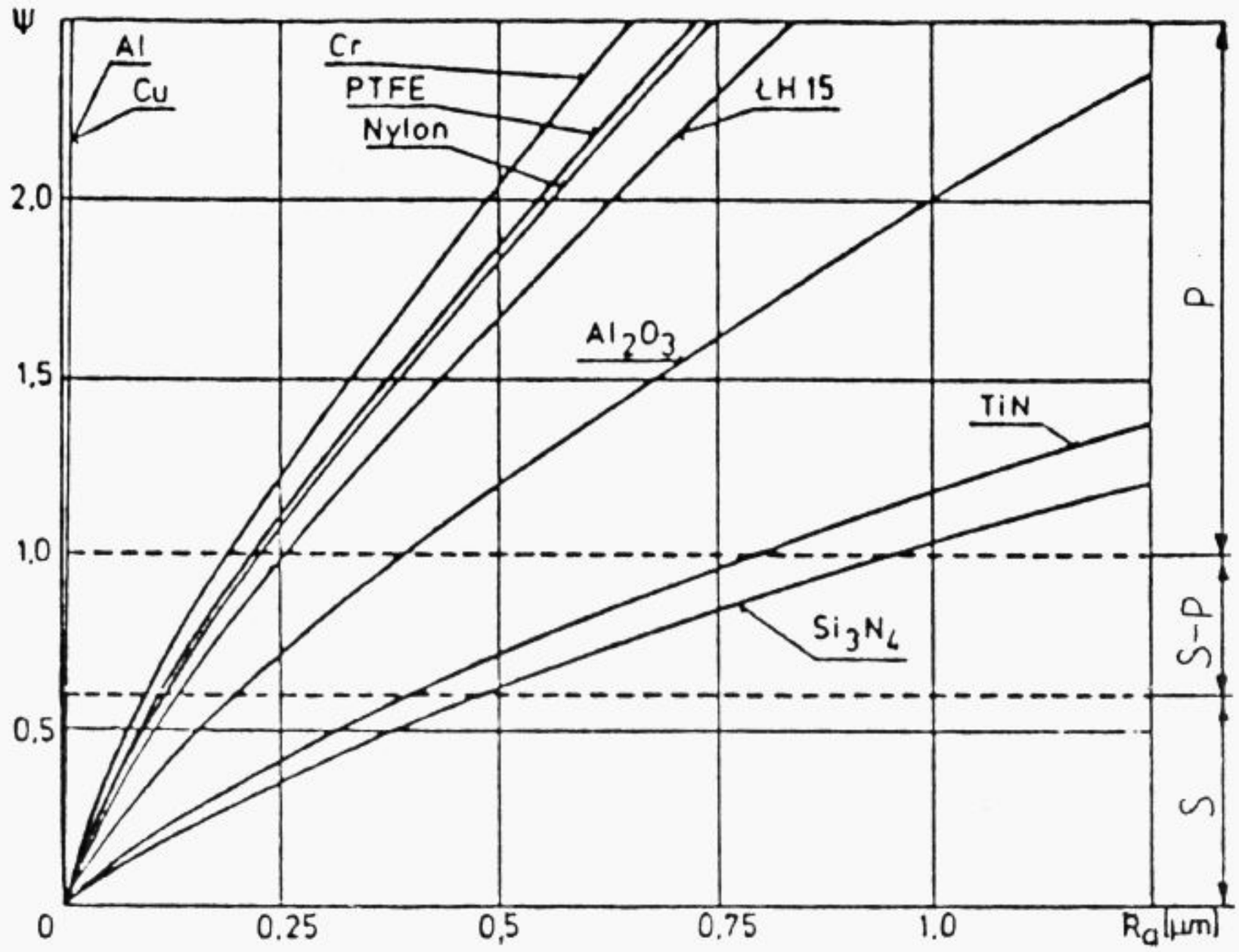
Składowa materiałowa indeksu plastyczności, tzn. stosunek E'/H dla tworzyw sztucznych przyjmuje korzystne, niskie wartości: przykładowo przy współpracy dwu elementów z polichlorku winylu mamy E'/H = 0,037. Oznacza to, że praktycznie niezależnie od chropowatości takich materiałów w mikroobszarach styku nierówności powierzchni występują tylko odkształcenia sprężyste. Niewielka twardość, a stąd niska granica plastyczności tworzyw sztucznych ogranicza jednak nośność wykonanych z nich węzłów łożyskowych. Dla materiałów ceramicznych, z uwagi na wysoką twardość, nie występują problemy z uzyskaniem pożądanej nośności styku, ale stosunek modułu sprężystości do twardości jest

wyższy (np. dla pary TiN/TiN E'/H = 8), chociaż nadal korzystniejszy niż np. dla stali łożyskowej (dla skojarzenia ŁH15/ŁH15 mamy E'/H = 12).

Do wyznaczenia indeksu plastyczności oprócz danych materiałowych potrzebne są parametry mikrogeometryczne, których nie określają profilografometry - podstawowe urządzenia do pomiarów chropowatości powierzchni. W tej sytuacji wykorzystane zostały zależności korelacyjne uzależniające iloraz s/b od średniego arytmetycznego odchylenia profilu. Zależności te wyznaczono metodą punktów szczególnych [5], tj. przy założeniu normalności rozkładu rzędnych profilu obu współpracujacych powierzchni. Dodatkowo wykorzystane zostały empiryczne zależności korelacyjne dla wierzchołków nierówności powierzchni [6].

Rys. 1 przedstawia wartości indeksu plastyczności dla różnych materiałów we współpracy ze stalą łożyskową. Parametr R_a jest tutaj średnim arytmetycznym odchyleniem profilu zastępczego

$$R_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$$



Rys. 1. Indeks plastyczności w funkcji zastępczego średniego arytmetycznego odchylenia profilu dla skojarzenia wybranych materiałów ze stalą łożyskową; S -obszar odkształceń sprężystych; S-P - obszar przejściowy; P - obszar odkształceń plastycznych [7]

Przy identycznych wartościach średniego odchylenia profilu obu współpracujących powierzchni parametr R_a jest więc ok. 1,4 raza od nich większy. Jak wynika z rys. 1 dla np azotku tytanu odkształcenia sprężyste w mikroobszarach styku występują, gdy zastępcze średnie arytmetyczne odchylenie profilu nie przekracza ok. 0,4 mm. Gładkości powierzchni zapewniające istotne zmniejszenie intensywności zużywania nie są więc w przypadku elementów ceramicznych specjalnie trudne do osiągnięcia.

Powyższe rozważania dotyczą współpracy elementów monolitycznych. Ponieważ element z naniesioną powłoką ceramiczną stanowi złożony system

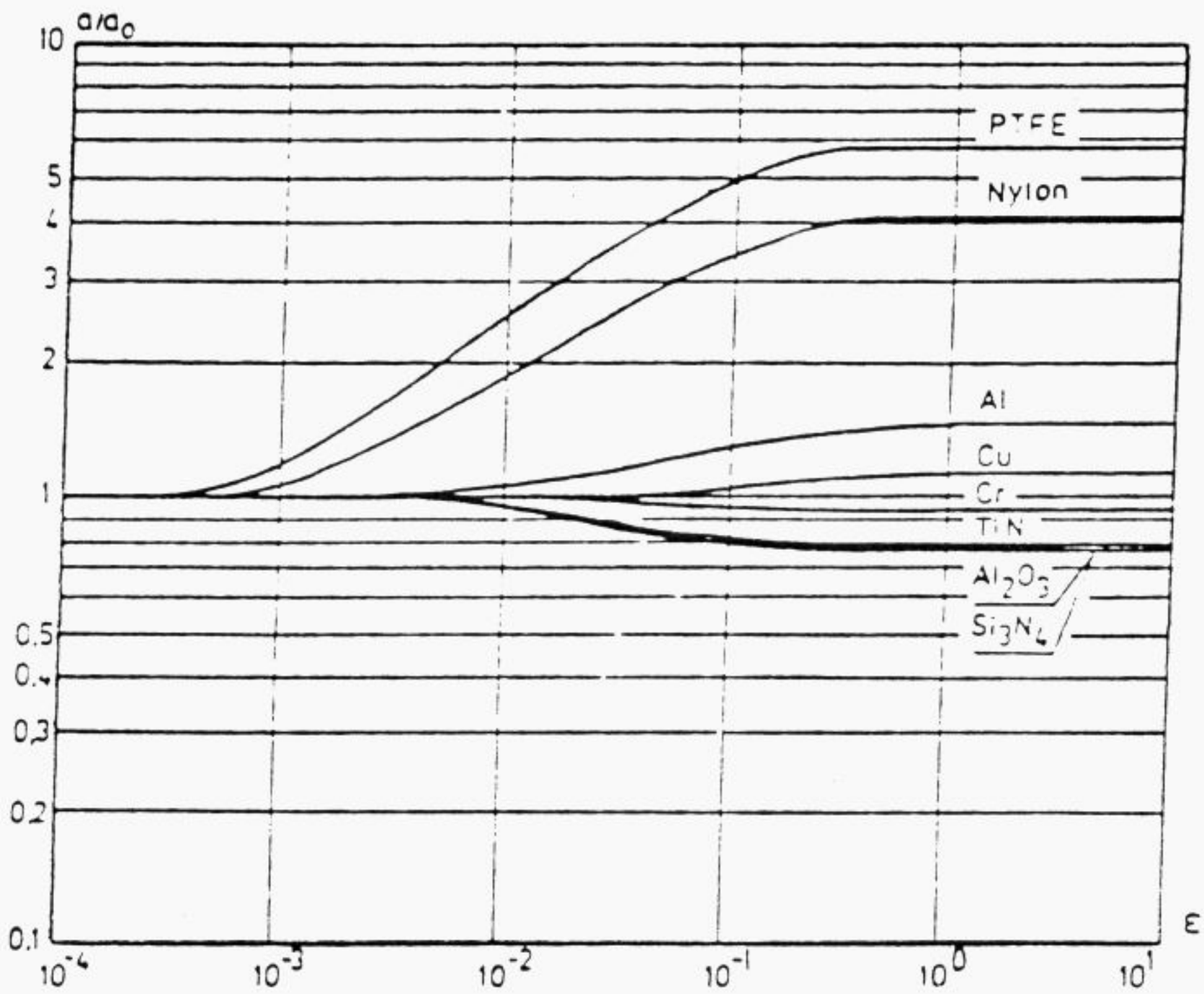
sprężysty, należy więc określić możliwości wyznaczania indeksu plastyczności dla takich układów. Problem styku ciał wielowarstwowych został przeanalizowany we wcześniejszej pracy autorów [7]. Zachowanie sprężyste dwuwarstwowego elementu zależy od dwóch parametrów bezwymiarowych. Są to:
- względna grubość warstwy powierzchniowej

$$\varepsilon = \frac{e}{a_0},$$

gdzie: e - bezwzględna grubość warstwy, a_0 - promień kołowego obszaru mikrostyku przy własnościach materiałowych podłoża,
- parametr własności sprężystych warstwy i podłoża

$$\Gamma = \frac{E_w(1-\nu^2)}{E(1-\nu_w^2)},$$

gdzie: E - moduł sprężystości materiału podłoża, E_w - moduł sprężystości materiału warstwy, n - liczba Poissona materiału podłoża, n_w - liczba Poissona materiału warstwy. Wyniki obliczeń względnego promienia styku a/a_0 (przy czym a oznacza bezwzględną wartość tego promienia) przedstawiono na rys. 2 dla różnych, nie tylko ceramicznych materiałów na podłożu stalowym.



Rys. 2. Warunki styku wierzchołków nierówności powierzchni w funkcji względnej grubości warstwy powierzchniowej z wybranych materiałów [7]

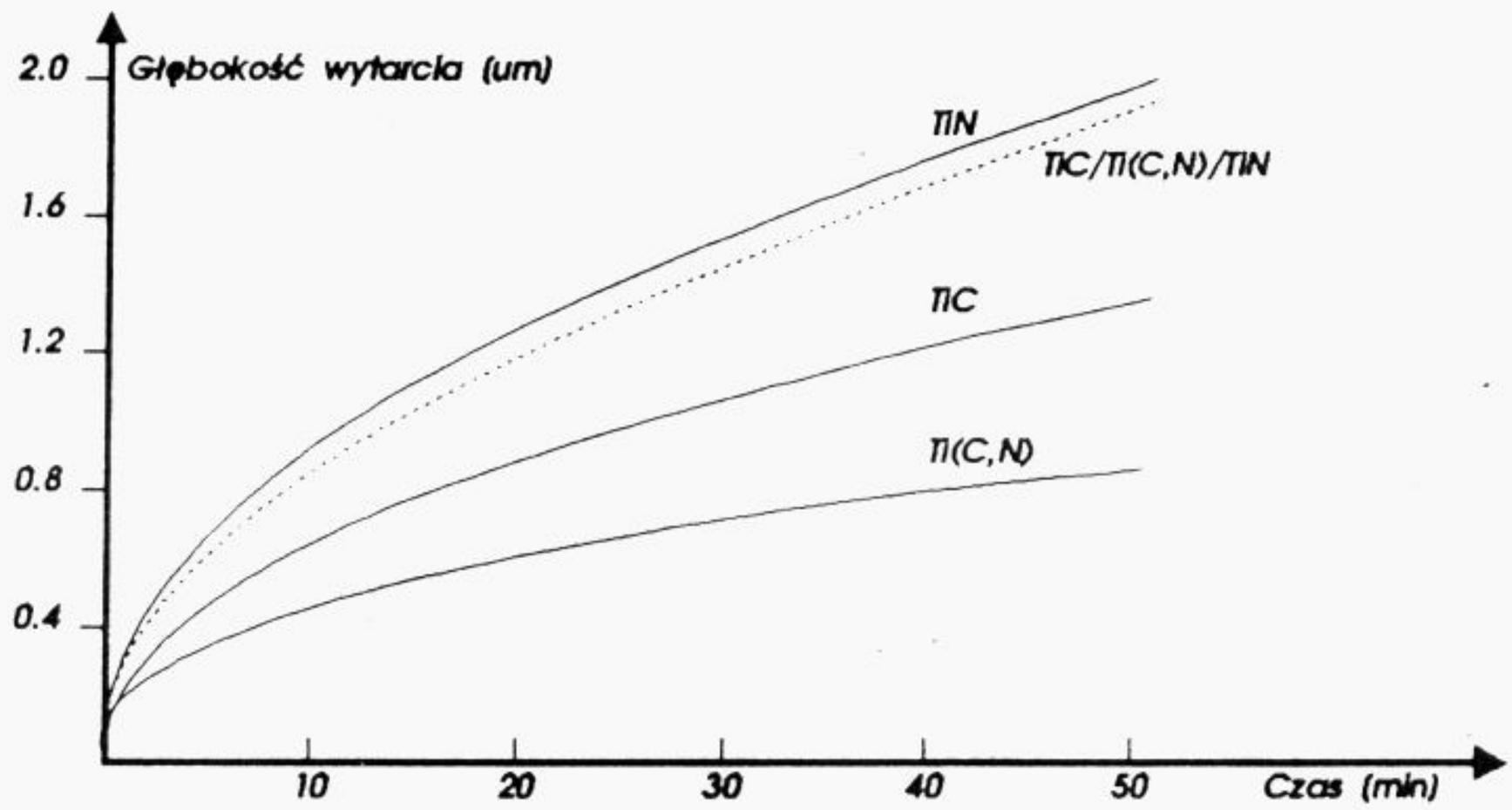
Asymptoty poziome przy większych wartościach parametru e odpowiadają sytuacji, w której odkształcenia układu nie zależą od własności podłoża, a więc ciało zachowuje się jakby całe było wykonane z materiału warstwy. Jak widać

dla warstw ceramicznych początek obszaru asymptotycznego odpowiada względnej grubości e = 0,1.

Analiza warunków kontaktowania się powierzchni chropowatych wykazuje, że promień mikroobszaru styku na wierzchołku nierówności powierzchni jest rzędu 10 μm, a nie przekracza wartości 100 μm. Zatem dla zapewnienia asymptotycznych warunków zachowania się mikrostyku wystarcza ceramiczna warstwa powierzchniowa o grubości rzędu 1 mm. Ponieważ typowe warstwy ceramiczne mają grubość rzędu 10 μm, cały układ pod względem sprężystym musi zachowywać się jak ceramiczne ciało monolityczne.

BADANIA EKSPERYMENTALNE WARSTW CERAMICZNYCH

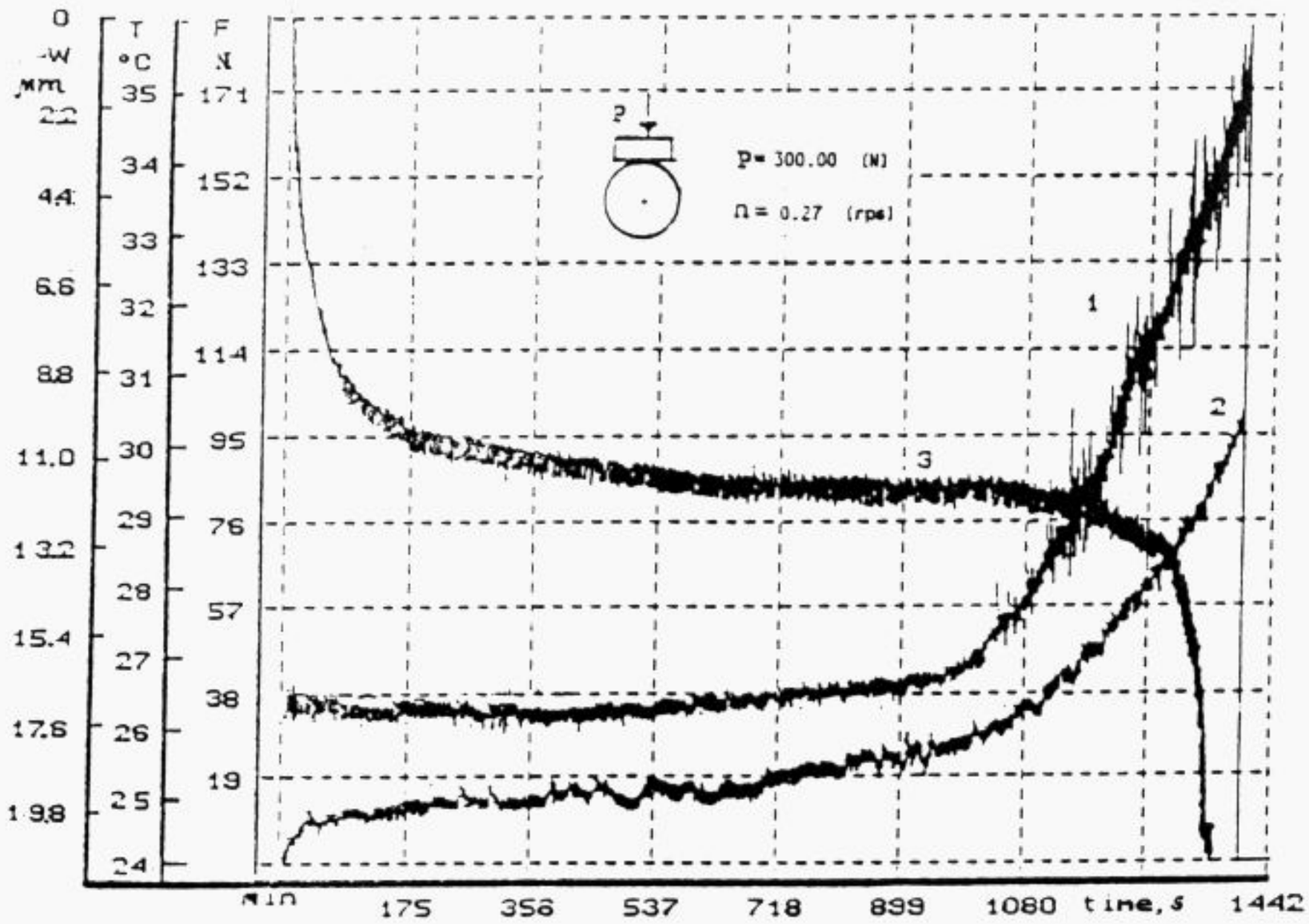
Charakterystyki zużycia dla różnych materiałów powłoki ceramicznej (TiN, TiC, Ti(C,N), TiC/Ti(C,N)/TiN) wyznaczono w pierwszym etapie pod kątem zastosowania na powierzchniach narzędzi skrawających. Badania eksperymentalne w tej fazie przeprowadzono w warunkach tarcia suchego na zmodyfikowanym przyrządzie do pomiaru grubości warstw dla skojarzenia stalowa kula - powierzchnia z naniesioną powłoką ceramiczną. Spośród zbadanych warstw najlepsze własności przeciwzużyciowe wykazała (rys. 3) powłoka wieloskładnikowa Ti(C,N) [8].



Rys. 3. Charakterystyki odporności na zużycie wybranych warstw ceramicznych [8]

Wytypowaną we wstępnych testach warstwę Ti(C,N) poddano badaniom, również w warunkach tarcia suchego, na urządzeniu T-05 [9]. Skojarzenie testowe tworzyły rolka ze stali narzędziowej NC 6 oraz klocek ze stali konstrukcyjnej 45. Dla umożliwienia porównania badania przeprowadzono dla próbek z warstwą ceramiczną i bez warstwy.

Pierwsze wyniki badań współczynnika tarcia oraz charakterystyk cieplno-zużyciowych systemu tribologicznego z wieloskładnikową powłoką ceramiczną Ti(C,N) o grubości 8 mm przedstawiono na rys. 4.

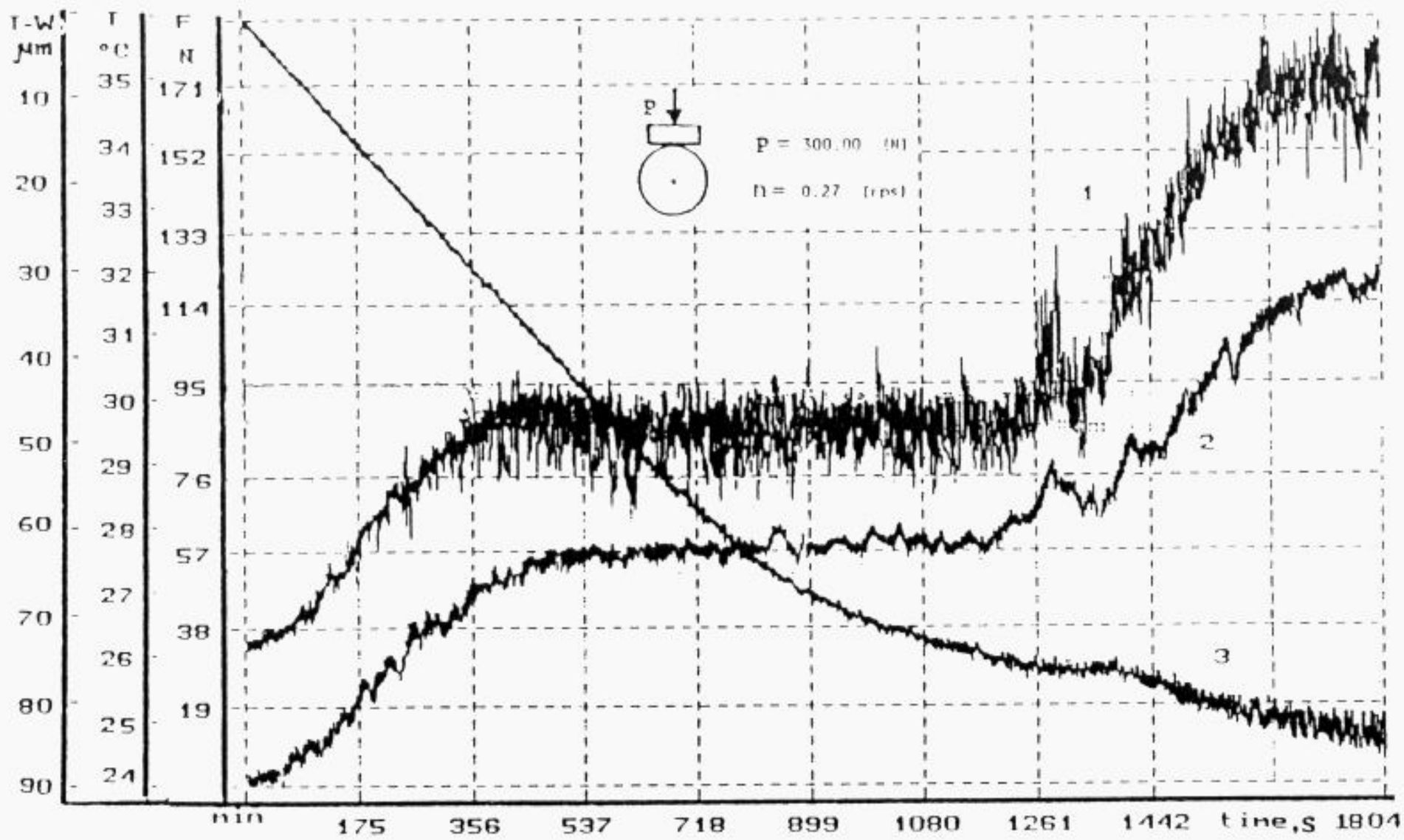


Rys. 4. Charakterystyki cieplno-zużyciowe pary stal narzędziowa - warstwa Ti(C,N) na podłożu stalowym; krzywa: 1 - siła tarcia F, 2 - temperatura masowa próbki T, 3 - przemieszczenie normalne próbki W

Jako odpowiedzi systemu na wymuszenia mierzono siłę tarcia F (krzywa 1), temperaturę masową próbki T (krzywa 2) oraz przemieszczenie normalne próbki W (krzywa 3). Ta ostatnia wielkość, identyfikowana za pomocą analizatora opisanego w pracy [10], jest sumą dylatacji cieplnej współpracujących w styku elementów oraz ich zużycia liniowego. Wydzielenie z sumarycznego przemieszczenia normalnego wartości zużycia jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej procedury - z przerywaniem biegu testowego do momentu ponownego osiągnięcia przez próbki temperatury otoczenia. W przypadku tych badań bieg testowy nie był przerywany.

W badaniach warstw Ti(C,N) stwierdzono, że siła tarcia pozostawała początkowo na niskim, ustalonym w przybliżeniu poziomie, a następnie wzrastała w sposób ciągły. W ustabilizowanym okresie pracy styku współczynnik tarcia wynosił f = 0,11-0,13, a przyrost temperatury masowej nie przekraczał 2 stopni. Przemieszczenie normalne próbek po początkowej dylatacji również stabilizowało się na niemal stałym poziomie - ze zmianą nie przekraczającą 1 mm w ciągu 10 minut.

Charakterystyki cieplno-zużyciowe dla próbki bez warstwy ceramicznej przedstawia rys. 5. Jak widać w tym przypadku siła tarcia jest znacznie wyższa niż dla próbki z powłoką wieloskładnikową. W ustabilizowanym okresie pracy styku współczynnik tarcia wynosił w tym przypadku f = 0,25 - 0,3, a przyrost temperatury masowej sięgał 4 stopni. Przemieszczenia normalne dla próbki bez warstwy ceramicznej (przedstawione na rys. 5 w innej skali niż na rys. 4) nie wykazywały okresu względnej stabilizacji i były wielokrotnie większe niż w przypadku powłoki Ti(C,N).



Rys. 5. Charakterystyki cieplno-zużyciowe pary stal narzędziowa - stal konstrukcyjna (oznaczenia jak na rys. 4)

UWAGI KOŃCOWE

W części teoretycznej pracy, która stanowi już zakończony etap, przeanalizowany został wpływ czynników materiałowych i mikrogeometrycznych na rodzaj odkształceń występujących w obszarach styku wierzchołków nierówności powierzchni skojarzonych w styku elementów. Określono warunki kontaktowania się ciała z warstwą powierzchniową o własnościach różnych od własności materiału podłoża, wykazując że nawet cienkie powłoki mogą poważnie zmienić występujące w styku odkształcenia. Należy przy tym zaznaczyć, że naniesienie warstwy powierzchniowej nie tylko wprowadza do strefy styku materiał o innych własnościach, ale może również oddziaływać poprzez zmianę chropowatości wytworzonej nowej powierzchni.

Przedstawiono wyniki pierwszej serii badań eksperymentalnych przeprowadzonych w liniowym styku skoncentrowanym przy ciągłym ruchu ślizgowym w warunkach tarcia suchego. Porównano warunki współpracy dla elementów z warstwą wieloskładnikową Ti(C,N) oraz bez warstwy. Badana powłoka (sprawdzona uprzednio w zastosowaniu na narzędzia skrawające) wykazała już w opisanych badaniach wstępnych swoje zalety; uzyskano kilkakrotne obniżenie współczynnika tarcia i równie poważne zmniejszenie przyrostu temperatury masowej, a także kilkakrotne ograniczenie przemieszczeń normalnych stanowiących charakterystykę cieplno-zużyciową. Powłoka wieloskładnikowa Ti(C,N) badana w punktowym styku skoncentrowanym wykazała wyższą odporność na zużycie niż monowarstwy TiN i TiC oraz powłoka wielowarstwowa TiC/Ti(C,N)/TiN. W kolejnej przygotowywanej serii badań różnych warstw ceramicznych przewidziano badania towarzyszące testom zużyciowym - analizy mikroskopowe i mi-

krogeometryczne powierzchni próbek. Badania te powinny umożliwić pełniejszą interpretację uzyskanych wyników i w konsekwencji doprowadzić do podwyższenia odporności na zużycie testowanych warstw ceramicznych.

BIBLIOGRAFIA

1. Miernik K., Smolik J., Walkowicz J., Bujak J., Celiński, Z.: Magnetron sputtering of TiN layers on high speed steel. Proc. 5th Int. Conf. CARBIDES-NITRIDES-BORIDES, Kołobrzeg 1990, s. 138-142.
2. Miernik K., Walkowicz J., Smolik J., Celiński Z., Bujak J.: Reactive arc deposition of TiN layers. Proc. 5th Int. Conf. CARBIDES-NITRIDES-BORIDES, Kołobrzeg 1990, s. 143-145.
3. Halling J., Arnell R.D.: Ceramic coatings in the war on wear. WEAR, 100 (1984), s. 367-380.
4. Greenwood J.A., Williamson J.B.P.: Contact of nominally flat surfaces. Proc. ROYAL SOCIETY OF LONDON, A295 (1966), s. 300-319.
5. Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa 1983.
6. Stein-Brzozowska W. Wiśniewski M.: Modele styku powierzchni chropowatych. PROBLEMY EKSPLOATACJI, MCNEMT Radom, nr 1 (1990), s. 49-63.
7. Szczerek M. Wiśniewski M.: Oberflaechenbeschichtung und die dadurch bedingten tribologischen Phaenomene. Proc. 3rd Int. Symp. INTERTRIBO'87, Strbske Pleso 1987, Vol. 2, s. 210-215.
8. Smolik J.: Mechanizmy zużywania się powłok przecizużyciowych na narzędziach sktawających. TRIBOLOGIA, Vol. 25 (1993), nr 4/5, s. 363-368.
9. Szczerek M.: Badania tribologicznych własności materiałów. TRIBOLOGIA, Vol. 25 (1993), nr 4/5, s. 43-70.
10. Szczerek M., Potekha V., Piekoszewski W.: Badanie cieplno-zużyciowych charakterystyk ślizgowego skojarzenia stal-polimer. TRIBOLOGIA, Vol. 25 (1993), nr 3, s. 63-66.

recenzował: Prof. dr hab. inż. Jan Burcan

CERAMIC LAYERS IN BEARING SYSTEMS

Summary

An analysis of the effect of thin cermic layers on the plasticity index of contacting asperities has been presented. The first results of wear and friction investigations performed on both ball/prsm and roller /prism testing machines have been shown.