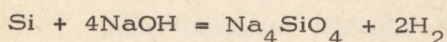


Badanie zależności kinetycznych procesu polerowania płytek krzemowych

Praca dotyczy procesu polerowania płytek krzemowych przy użyciu alkalicznych zawiesin krzemionki. Metoda ta, nazwana później polerowaniem chemiczno-mechanicznym została opatentowana przez R.J. Walsh'a i A. Herzoga w roku 1965 [1, 2] i od tego czasu jest stosowana powszechnie. Sam mechanizm procesu jest jednak słabo poznany, a odnośnie procesów fizykochemicznych zachodzących w czasie polerowania istnieją znaczne kontrowersje.

W pracy E. Mendla [3] określono układ Si-SiO₂-NaOH-H₂O jako bardzo skomplikowany, a sposób usuwania materiału za nie w pełni zrozumiały. Wyrażono przypuszczenie, że zachodzi kilka reakcji chemicznych, z których wymieniono jedną:



Część materiału jest, wg autora, usuwana przez akcję ścierną ziaren krzemionki, pozostaje jednak do wyjaśnienia, czy usuwany jest krzem, czy powstająca na powierzchni warstwa shydrolizowana. Tę drugą możliwość uważa autor za bardziej prawdopodobną.

W pracy R. Meeka i innych [4] podkreśla się, że polerowanie chemiczno-mechaniczne pozwala uzyskać najdoskonalszą ze znanych powierzchnię polerowaną, bez rys i uszkodzeń charakterystycznych dla powierzchni polerowanych proszkami i pastami ściernymi.

F. Jensen [5] omawiając polerowanie chemiczno-mechaniczne związków półprzewodnikowych podkreśla, że ścierniwo używane w tych procesach ma twardość niższą od materiału ściernego, a ziarna mają wymiary submikronowe (tworzące roztwór koloidalny). Roztwór, wg autora, działa jako łagodny środek trawiący, a działanie tkaniny polerskiej i ziarna polega na wygładzaniu powierzchni.

Zupełnie odmienny pogląd na naturę polerowania jest reprezentowany w biuletynie Speciality Chemicals [6] wydanym przez firmę

Quartz Philadelphia i opisującym krzemionkę Quso G32 używaną powszechnie do polerowania krzemu. Krzemionkę tę scharakteryzowano jako materiał miękki, o łatwo rozpadających się aglomeratach, nie mający mierzalnej twardości i nie powodujący ścierania. Polerowanie polega, wg autorów, na szybkim i całkowitym usuwaniu produktów reakcji z warstewki przylegającej do płytki przez działanie adsorbenta o dużej powierzchni (krzemionki). Akcja ścierna, wg autorów, "nie zachodzi i nie jest pożądana".

Podstawowe różnice zdań dotyczą, jak widać, procesu ścierania (zachodzi czy nie zachodzi), oraz roli krzemionki. W artykule przeglądowym na temat polerowania płytek krzemowych P. Burggraaf [7] stwierdza, że do dzisiaj (1979) nie rozumiemy roli koloidu (krzemionki) w tym procesie. Sukces (w polerowaniu) osiąga się przez dobranie mieszaniny polerskiej, tkaniny, nacisku i maszyny.

Z praktyki technologicznej wiadomo, że zarówno jakość powierzchni polerowanej jak i szybkość zbierania materiału (zwana dalej skrótowo szybkością polerowania) zależą od takich czynników jak: nacisk na płytki, liczba obrotów na minutę tarczy polerskiej i krążka, rodzaj tkaniny polerskiej, skład chemiczny i pH mieszaniny polerskiej, temperatura - jednakże charakter tych zależności jest znany tylko fragmentarycznie. W celu lepszego rozeznania procesu podjęto próbę określenia podstawowych zależności kinetycznych polerowania krzemu na przystosowanej do tego celu polerce laboratoryjnej.

Poniżej przedstawiono doświadczalnie zbadane zależności szybkości polerowania od nacisku na płytki, szybkości kątowej tarczy polerskiej oraz pH dwóch różnych mieszanin polerskich. W dyskusji wyników przedstawiono wstępne wnioski dotyczące charakteru procesów fizykochemicznych zachodzących w czasie polerowania.

Metodyka doświadczeń

Polerowanie prowadzono na polerce SP-300 umożliwiającej płynną zmianę obrotów tarczy w zakresie od 20 do 350 na minutę. Średnica tarczy polerskiej wynosiła 282 mm, a średnica krążka polerskiego, do którego przyklejano płytki krzemowe - 137 mm. Ruch krążka był niewymuszony. Tarczę polerki pokrywano tkaniną polerską o nazwie handlowej Polkorfam. Mieszaninę polerską doprowadzono na środek tarczy za pomocą pompki perystaltycznej. W zbiorniku zasilającym pracowało mieszadło w celu zapewnienia jednorodności mieszaniny polerskiej.

Do pomiarów pH stosowano pehametr N-512 Elpo. Standardową mieszaninę polerską stanowiła zawiesina krzemionki Quso G-32 (40 g na litr mieszaniny) w roztworze amoniaku, o pH wynoszącym 10,9.

Do doświadczeń, których wyniki przedstawiono na rys. 3 sporządzono również mieszaniny zawierające KOH zamiast amoniaku, jak również oba typy mieszanin o różnych pH.

Płytki krzemowe używane do doświadczeń pochodziły z jednego monokryształu, o orientacji 111, typu n, o oporności powyżej $40 \Omega \cdot \text{cm}$. Sposób wykonywania doświadczeń przedstawiał się następująco: płytki krzemowe o średnicy 10,5 mm i grubości około 1 mm naklejano za pomocą stopionego wosku na krążek polerski. Liczba naklejonych płytek była różna i wynosiła 4, 6, 8 sztuk. Po naklejeniu na krążek płytki polerowano wstępnie do uzyskania jednolitej i gładkiej powierzchni. Następnie rozpoczynano polerowanie przy ustalonych parametrach. Co 30 minut proces przerywano w celu wykonania pomiaru grubości płytek (bez odklejania płytek z krążka). Z różnicy grubości płytek przed i po polerowaniu obliczano szybkość zbierania materiału (szybkość polerowania) w $\mu\text{m}/\text{min}$. Za szybkość polerowania przyjmowano wynik obliczony na podstawie średniej arytmetycznej pomiarów wszystkich płytek na krążku. Pomiar grubości był wykonywany w środku płytki za pomocą czujnika typu Somet o dokładności $1 \mu\text{m}$. Przy wykonywaniu doświadczeń przyjęto system wielokrotnego polerowania tych samych płytek. Na jednym zestawie płytek przyklejonych do krążka wykonywano od kilku do kilkunastu 30-minutowych doświadczeń. Gdy grubość płytek zmniejszała się do około $200 \mu\text{m}$ zmieniano zestaw płytek.

Tkaninę polerską zmieniano po około 30 godzinach pracy. Po założeniu nowej tkaniny prowadzono przez 2-3 godziny polerowanie wstępne w celu uzyskania stanu tkaniny zbliżonego do stanu tkaniny zdjętej. Z doświadczenia wiadomo, że na nowej tkaninie szybkość polerowania jest początkowo niska, w ciągu paru godzin rośnie, następnie przez okres kilku do kilkadziesiąt godzin pozostaje stała, potem znowu maleje, mniej więcej wtedy, kiedy na tkaninie zaczynają pojawiać się ubytki.

Dozowanie mieszaniny polerskiej było jednakowe dla wszystkich doświadczeń i wynosiło $11 \text{ ml}/\text{min}$. Temperatura mieszaniny polerskiej wynosiła ok. 20°C (temperatura pokojowa). W czasie trwania doświadczeń nie stosowano grzania ani chłodzenia polerki. Temperatura tarczy polerskiej ulegała wahanom w granicach od 20 do 30°C .

Przy każdorazowym pomiarze płytek kontrolowano stan ich powierzchni w celu stwierdzenia, czy proces przebiega prawidłowo (powierzchnia gładka), czy też, i w jakim zakresie parametrów, występują błędy powierzchni typu podtrawienia, naloty, rysy itp. Podtrawienia wystąpiły tylko raz, przy doświadczeniach z mieszaniną polerską o pH powyżej 11 i najniższym ze stosowanych naciskiem jednostkowym. Po zwiększeniu nacisku podtrawienia zniknęły.

W trakcie doświadczeń zmieniano następujące parametry:

- nacisk jednostkowy, czyli wyrażone w kg obciążenie przypadające na 1 cm^2 płytki. Zmianę nacisku uzyskiwano przez nakładanie krążków obciążających oraz zmianę liczby płytek na krążku;
- liczbę obrotów tarczy polerskiej na minutę;
- skład mieszaniny polerskiej.

Każde doświadczenie wykonywane przy określonych parametrach powtarzano 2-3 razy. Za wynik przyjmowano średnią arytmetyczną.

Dyskusja błędu metody

Błędy w ocenie szybkości polerowania, obliczanej jako stosunek różnicy grubości płytki do czasu w jakim różnica ta powstała, wynikają z:

- błędu pomiaru grubości płytki,
- błędu pomiaru czasu.

Z wymienionych powyżej, względny błąd pomiaru różnicy grubości płytki jest znacznie wyższy od względnego błędu pomiaru czasu.

Innego rodzaju błędy, wynikające z błędnego przypisania zmierzzonej szybkości polerowania określonym zadanim parametrom doświadczenia wynikać mogą również z niekontrolowanych zmian niektórych parametrów mających wpływ na szybkość polerowania.

Wymienić tu należy:

- zmiany temperatury (wynikające ze zmienności temperatury otoczenia oraz z różnej ilości ciepła wydzielanego w czasie polerowania),
- zmiany w składzie chemicznym mieszaniny polerskiej (wynikające z zachodzących reakcji),
- zmiany stanu tkaniny polerskiej.

W tym ostatnim przypadku chodzi nie tylko o wzmiankowane już zjawisko zmian szybkości polerowania na nowej tkaninie. Obserwowano bowiem również przypadki, kiedy po wyschnięciu tkaniny (i być mo-

że wykrystalizowaniu krzemionki) szybkość polerowania stawała się nienormalnie wysoka, malejąc później w trakcie nasączania się tkaniny mieszaniną polerską. Zjawiska te są słabo znane i trudne do kontrolowania.

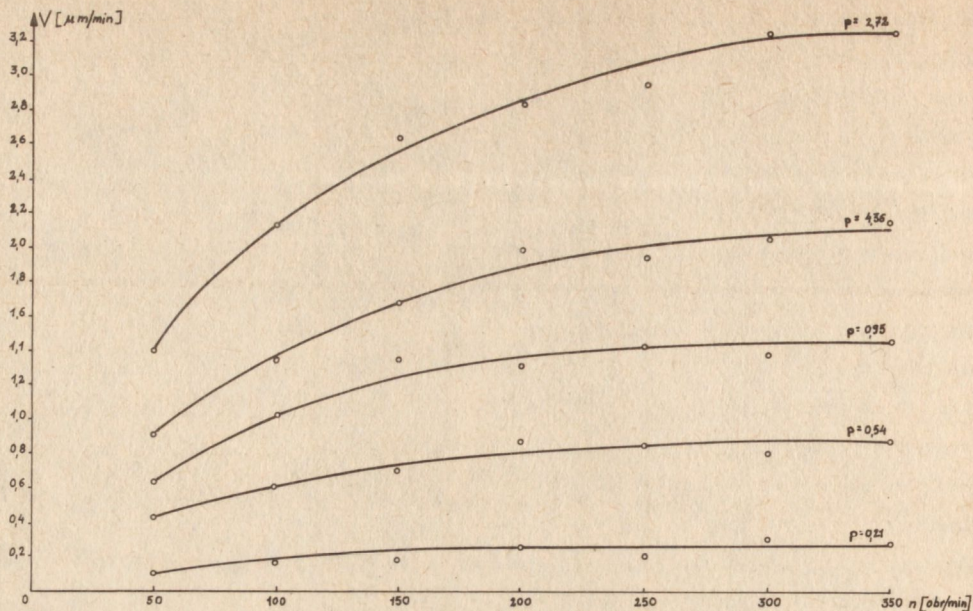
Oceniając za najpoważniejsze źródła błędów pomiar różnicy grubości płytki oraz zmiany stanu tkaniny polerskiej starano się tak zaplanować doświadczenia, aby te właśnie błędy pomniejszyć. Względny błąd pomiaru różnicy grubości płytki zależy od wielkości tej różnicy, przy małych różnicach grubości wzrasta. Aby więc uzyskać zmniejszenie tego błędu trzeba stosować długie czasy doświadczeń lub duże szybkości polerowania. Błędy wynikające ze zmian stanu tkaniny polerskiej, jak również ze zmian innych parametrów niekontrolowanych zmniejszają się dla doświadczeń krótkich, wykonywanych bezpośrednio jedno po drugim, wtedy bowiem zmiany te nie są duże. Jak widać, istotną sprawą był wybór kompromisowego czasu pojedynczego doświadczenia, takiego, który zapewniłby zrównoważony poziom różnego rodzaju błędów wymienionych powyżej. Zdecydowano się przyjąć standardowy czas doświadczenia wynoszący 30 minut. Dodatkowo, aby zmniejszyć błąd względny pomiaru różnicy grubości płytki postanowiono wykonywać pomiary przy naciskach jednostkowych wyższych od stosowanych zwykle dla krzemu, co zapewniało większą szybkość polerowania, a tym samym większą różnicę grubości płytki.

Mankamentem polerki stosowanej do doświadczeń był brak możliwości regulacji temperatury na tarczy polerskiej. Należy się więc liczyć z faktem, że przedstawione wyniki są obarczone prawdopodobnie niewielkim, lecz trudnym do oszacowania błędem wynikającym ze zmian temperatury.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że doświadczenia prowadzone były w innym obszarze parametrów niż to ma miejsce w procesach przemysłowych, nie można więc stosować bezpośrednich porównań.

Dyskusja wyników

Wykres na rys. 1 przedstawia zależność szybkości polerowania V od liczby obrotów na minutę tarczy polerskiej n dla różnych nacisków jednostkowych. Ze wzrostem liczby obrotów tarczy, a tym samym średniej szybkości przesuwu płytki po tarczy, szybkość polerowania wzrasta, ale tylko do pewnej wartości granicznej, różnej dla różnych nacisków jednostkowych. Im większy nacisk tym większą



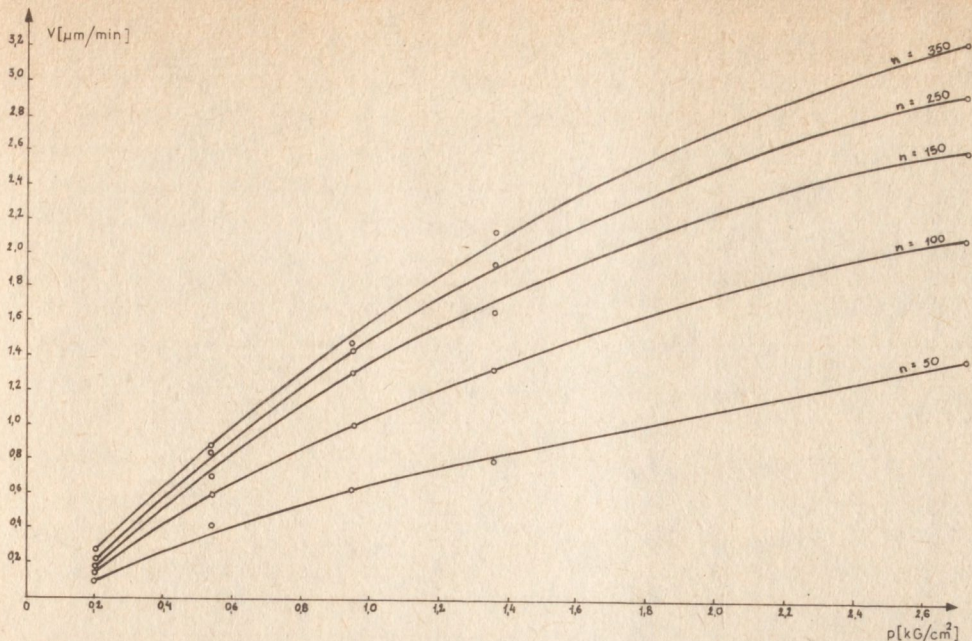
Rys. 1. Zależność szybkości polerowania V od obrotów tarczy polerskiej n dla określonych nacisków jednostkowych p ($1 \text{ kG}/\text{cm}^2 \approx 10^2 \text{ kPa}$)

graniczną szybkość polerowania można uzyskać przez zwiększenie liczby obrotów tarczy na minutę.

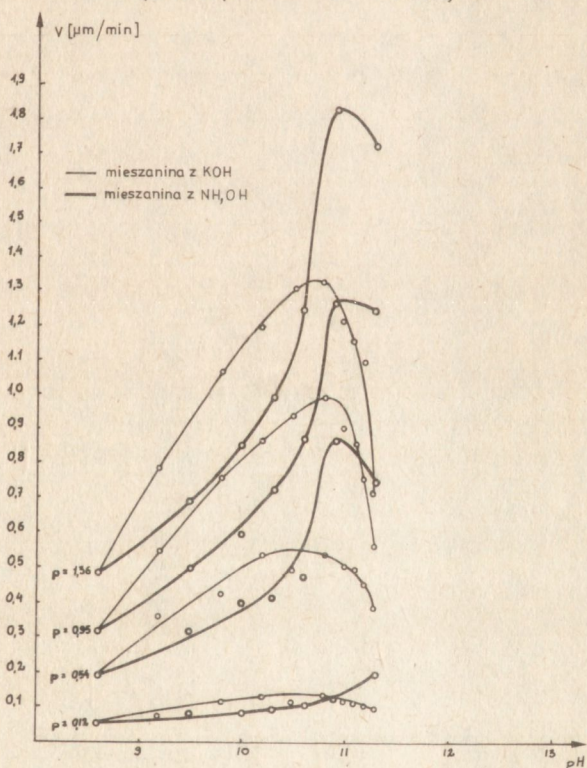
Na wykresie przedstawionym na rys. 2, pokazującym wzrost szybkości polerowania w zależności od nacisku jednostkowego (dla różnej liczby obrotów tarczy na minutę, krzywe przebiegają podobnie chociaż występowanie granicznej szybkości polerowania nie jest tu tak oczywiste. Można jednak spodziewać się, że dla wyższych nacisków jednostkowych dalszy przebieg krzywych byłby prawdopodobnie spłaszczony, podobnie jak na rys. 1.

Na podstawie tych dwóch wykresów sformułować można pierwszy ogólny wniosek określający współzależność wpływu tych dwóch parametrów na szybkość polerowania: w obszarze wysokich nacisków czynnikiem ograniczającym szybkość polerowania jest szybkość przesuwu płytki po tarczy, a w obszarze wysokich szybkości przesuwu płytki, czynnikiem ograniczającym jest nacisk jednostkowy.

Wykres na rys. 3 przedstawia zależność szybkości polerowania od pH dwóch mieszanin polerskich, jednej sporządzonej z NH_4OH ,



Rys. 2. Zależność szybkości polerowania V od nacisku jednostkowego p dla określonych obrotów tarczy na minutę n
 ($1 \text{ kG}/\text{cm}^2 \approx 10^2 \text{ kPa}$)



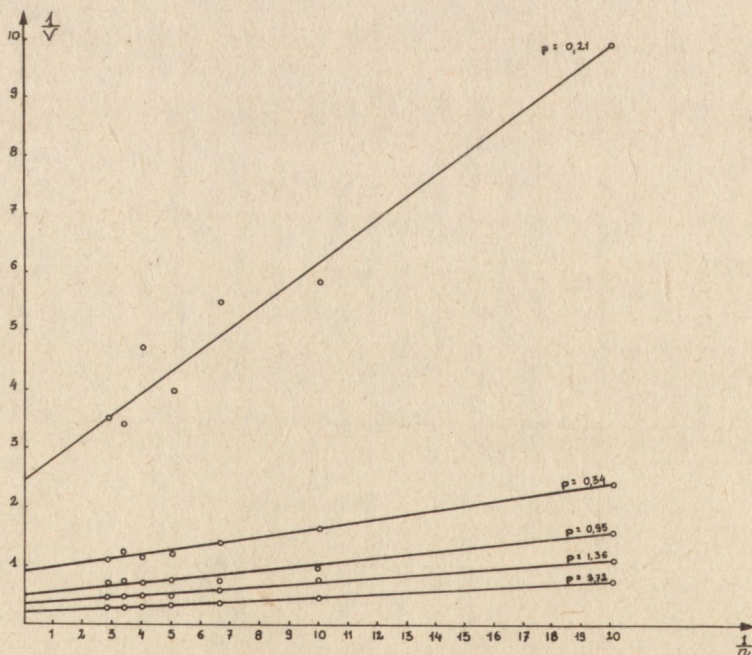
Rys. 3. Zależność szybkości polerowania V od pH mieszaniny polerskiej dla określonych nacisków jednostkowych p i stałej szybkości obrotów tarczy $n = 250 \text{ obr}/\text{min}$
 ($1 \text{ kG}/\text{cm}^2 \approx 10^2 \text{ kPa}$)

a drugiej z KOH (przy zachowaniu takiej samej ilości krzemionki jak w doświadczeniach poprzednich). Zależność ta została określona dla kilku różnych nacisków jednostkowych. Dla obu mieszanin krzywe wykazują maksimum przy pH ok. 11. Po przekroczeniu tej wartości pH następuje najpierw obniżenie szybkości polerowania, po czym - całkowite zahamowanie procesu. Zbieranie materiału ustaje zupełnie. Nie ulega wątpliwości, że fakt ten jest związany z rozpadaniem się koloidalnych cząstek krzemionki w tym właśnie zakresie pH.

Chemia roztworów koloidalnych krzemionki została opisana obszernie przez R. Ilera [8, 9]. Kształt krzywych dla mieszanin z NH_4OH i KOH jest odmienny, co świadczy o tym, że szybkość polerowania zależy nie tylko od pH, lecz również od charakteru kationu zasady.

Ta, tak silnie wyrażona zależność szybkości polerowania od pH i charakteru jonów obecnych w mieszaninie polerskiej potwierdza tezę o istotnej roli procesów chemicznych w polerowaniu chemiczno-mechanicznym.

Pewne wnioski ogólne dotyczące procesów zachodzących w czasie polerowania wyprowadzić można na podstawie interpretacji wykresu odwrotności szybkości polerowania przedstawionego na rys. 4.



Rys. 4. Zależność odwrotności szybkości polerowania $\frac{1}{V}$ od odwrotności obrotów tarczy $\frac{1}{n}$ przy określonych naciskach jednostkowych p ($1 \text{ kg/cm}^2 \approx 10^2 \text{ kPa}$)

Sens wykonania wykresu w takim układzie wynika z próby opisu procesu polerowania jako sekwencji przemian jakim ulegają atomy krzemu na powierzchni polerowanej, efektem których to przemian jest odrywanie się ich od płytki. Przyjmując założenia, że:

- doświadczenia opisane powyżej wykonano w warunkach zbliżonych do stanu stacjonarnego,
- reakcja oderwania się atomu krzemu od płytki jest w danych warunkach nieodwracalna,
- przemiany zachodzą w monowarstwie powierzchniowej płytki, zależność między szybkością całkowitą procesu a szybkościami procesów składowych opisać można równaniem kinetycznym reakcji następujących:

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} + \dots + \frac{1}{V_n} \quad \text{gdzie}$$

V - szybkość polerowania [$\mu\text{m}/\text{min}$],

V_1 do V_n - szybkość procesów składowych [$\mu\text{m}/\text{min}$].

Terminem "proces składowy" określono każdą dającą się wyodrębnić przemianę jakiej ulegają atomy krzemu, niezależnie od charakteru tej przemiany. Myślowo założono tutaj, że jeśli w procesie polerowania zachodzi ścieranie, to jest to ścieranie pojedynczych cząsteczek, a jako takie może być traktowane jako jeden z możliwych procesów składowych.

Z równania wynika, że jeśli szybkość jednego z procesów składowych jest wprost proporcjonalna do czynnika x , to wykres

$$\frac{1}{V} = f \frac{1}{x} \text{ będzie linią prostą.}$$

Na rys. 4 przedstawiono wyniki doświadczeń w układzie

$$\frac{1}{V} = f \frac{1}{n}, \text{ gdzie:}$$

V - zmierzona szybkość polerowania [$\mu\text{m}/\text{min}$],

n - szybkość kątowna tarczy polerskiej wyrażona liczbą obrotów na minutę.

Wykres ten przedstawia zbiór linii prostych, co w myśl uprzednio przytoczonego rozumowania pozwala wnioskować, że szybkość przynajmniej jednego z procesów składowych jest wprost proporcjonalna do szybkości kątowej tarczy, a tym samym do średniej szybkości przesuwu płytki po tarczy polerskiej (ta bowiem wielkość jest przez szybkość kątową tarczy wyznaczana).

Wykres na rys. 4 przedstawia jednocześnie bilans czasu procesu, bowiem odłożona na osi rzędnych odwrotność szybkości polerowania jest niczym innym, jak wyrażonym w minutach czasem spolerowania 1 μm grubości płytki, a każda z prostych pokazuje, jak rośnie ten czas przy zmniejszeniu się liczby obrotów tarczy na minutę. Czas ten wyrazić można wzorem: $T = b + a \cdot \frac{1}{n}$, gdzie wartości b odpowiada na wykresie odcinek rzędnej odcinany przez prostą, a wartość a stanowi współczynnik kierunkowy prostej. W sensie fizycznym wartość b przedstawia otrzymany przez ekstrapolację wyników doświadczalnych minimalny dla danego nacisku czas spolerowania 1 μm grubości płytki przy szybkościach przesuwu płytki po tarczy nieskończenie wielkich. Odpowiada to sytuacji, kiedy czas procesu składowego zależnego od szybkości przesuwu płytki dąży do zera, a szybkość tego procesu nieskończenie wzrasta. Innymi słowy wartość b przedstawia w bilansie czasu udział procesów od n niezależnych, a wartość $a \cdot \frac{1}{n}$ udział czasu procesów od n zależnych. Wartości a i b zmieniają się z naciskiem. Ich wielkości liczbowe obliczone z danych doświadczalnych przedstawiono w tabeli.

Wielkości a i b dla różnych nacisków jednostkowych

Nacisk [hPa(kG/cm ²)]	a	b
212,78 (0,21)	370	2,50
547,15 (0,54)	73	0,90
962,59 (0,95)	48	0,51
1378 (1,36)	37	0,35
2756 (2,72)	23	0,23

Marginesowo można dodać, że dla nacisków najniższych uzyskano wyniki odbiegające nieco od wyników pozostałych serii (prosta o wyraźnie wyższym nachyleniu). Nie jest jasne, czy wynika to z największego relatywnie błędu pomiaru popełnionego w tych doświadczeniach, czy też sam proces polerowania przebiega w tych warunkach odmiennie.

Powstaje zasadnicze pytanie, jakim procesom fizycznym odpowiadają udziały czasowe procesu określone przez wyrażenia b i $a \cdot \frac{1}{n}$?

Zauważmy, że jeżeli w ogóle procesy ścierania zachodzą w czasie polerowania, to są one uwarunkowane ruchem, przesuwaniem czynnika ścierającego względem materiału ścieranego oraz siłami docisku. Zależność wyrażenia $a \frac{1}{n}$ od liczby obrotów tarczy na minutę oraz od nacisku dobrze pasuje więc do wyobrażeń o zależnościach jakich można spodziewać się dla ścierania; w procesach niezależnych od szybkości przesuwu płytek po tarczy należałoby domyślać się reakcji chemicznych.

Przedstawiona interpretacja stanowi w zasadzie potwierdzenie wyrażonej w literaturze opinii, że istotną rolę grają w procesie polerowania zarówno przemiany chemiczne krzemu (pod którymi należy domyślać się utleniania), jak i proces ścierania, z jednym wszelako, ale istotnym uzupełnieniem. Z faktu zależności wielkości b od nacisku wysunąć można hipotezę o istnieniu istotnego dla polerowania procesu, który nie jest ścieraniem (a więc jest to proces o naturze chemicznej lub fizykochemicznej), a którego szybkość jest zależna od nacisku. Prowadzi to do wniosku, że wyrażana przez niektórych autorów opinia sprowadzająca rolę procesów chemicznych do zmiękczenia materiału wygładzanego następnie przez akcję ścierną byłaby opisem niewystarczającym. Wygładzanie, rozumiane jako proces usuwania wypukłości, powinno być w myśl wysuniętej tutaj hipotezy zależne nie tylko od ścierania, lecz również od wspomnianego, zależnego od nacisku procesu chemicznego. Można bowiem przyjąć, że w miejscach wypukłych płytki, gdzie nacisk będzie większy niż w otoczeniu wypukłości, szybciej przebiegać będzie nie tylko ścieranie lecz również wzmiankowana reakcja, obydwa więc procesy będą się przyczyniać do szybkiego zniknięcia wypukłości.

Hipoteza o istnieniu zależnej od nacisku reakcji chemicznej wydaje się prawdopodobna, ponieważ lepiej od dotychczasowych teorii tłumaczy doskonale własności polerskie mieszanin do polerowania chemiczno-mechanicznego krzemu; wymaga jednak potwierdzenia bogatszym materiałem doświadczalnym. Na podstawie przedstawionych badań wstępnych można takie doświadczenia sprawdzające zaprojektować.

Wnioski

1. Na podstawie zbadanych zależności szybkości polerowania od nacisku jednostkowego i szybkości kątowej tarczy można sformu-

łować ogólny wniosek: w obszarze wysokich nacisków jednostkowych czynnikiem ograniczającym szybkość polerowania jest szybkość przesuwu płytki po tarczy, w obszarze wysokich szybkości przesuwu płytki czynnikiem ograniczającym jest nacisk jednostkowy.

2. Stwierdzono, że dla określonego nacisku jednostkowego zależność szybkości polerowania V od liczby obrotów tarczy na minutę n wyrazić można wzorem:

$$\frac{1}{V} = b + a \frac{1}{n}, \quad \text{gdzie:}$$

V - zmienna szybkość polerowania,
 n - liczba obrotów tarczy na minutę,
 a i b - wielkości stałe dla danego nacisku.

3. Na podstawie dyskusji wyników wysunięto hipotezę, że w procesie polerowania chemiczno-mechanicznego krzemu istotną rolę odgrywa proces chemiczny, którego szybkość zależna jest od nacisku na płytki.

(Tekst dostarczono 14.03.1983 r.)

LITERATURA

- [1]. Walsh R.J., Herzog A., Monsanto Co., U.S. Pat. 3, 170, 273, Feb. 23, 1965
- [2]. Siemens und Halske Aktiengesellschaft, British Pat. 987, 971 March 31, 1965
- [3]. Mendel E., SCP and Solid State Technology, 8, 27-39, 1967
- [4]. Meek R.L., Buck T.M., Gibbon C.F., J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology, 120, 9, 1241-1246, 1973
- [5]. Jensen E.W., Solid State Technology, 120, 8, 1973
- [6]. Bulletin 18-25, Philadelphia Quartz Company: Quso-Microfine Silica for Semiconductor Wafer Polishing
- [7]. Burggraaf P.S., Semiconductor International, 2, 8, 1979
- [8]. Iler R.K., The Colloid Chemistry of Silica and Silicates, Cornell University Press, Ithaca, New York, 1955
- [9]. Iler R.K., The Chemistry of Silica, John Wiley and Sons, New York, 1979
- [10]. Laidler K.J., Chemical Kinetics, Mc Graw Hill, New York, 1950
- [11]. Boudart M., Kinetics of Chemical Processes, Prentice Hall, Englewood Cliffs., New Jersey, 1968
- [12]. Walas S.M., Kinetyka reakcji dla inżynierów chemików, WNT, Warszawa, 1963