

**Maciej PASZKOWSKI<sup>\*</sup>, Aleksandra WALASZCZYK<sup>\*</sup>**

## **WPLYW TEMPERATURY NA PRZEPLYW SMARU PLASTYCZNEGO W OBSZARZE WARSTWY PRZYŚCIENNEJ**

### **THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE FLOW OF GREASE IN THE BOUNDARY LAYER**

#### **Słowa kluczowe:**

smar plastyczny, warstwa przyścienna, zjawisko przyścienne, reologia

#### **Key words:**

grease, boundary layer, wall effect, rheology

#### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury na formowanie się warstw powierzchniowej i przyściennej w handlowym smarze plastycznych ŁT4-S2, w pobliżu ścianek wykonanych z sześciu różnych materiałów, tj. tworzyw elastomerowych (70E, 70F), tworzyw termoplastycznych (PTFE, PU) oraz stopów metali (B47, C11000). Badania przeprowadzono na reometrze rotacyjnym pracującym w układzie płytka–płytką. Wyznaczono krzywe zmian lepkości dynamicznej oraz naprężeń stycznych w smarze plastycznym w funk-

---

<sup>\*</sup> Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej, ul. Ignacego Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska, e-mail: maciej.paszkowski@pwr.edu.pl.

cji gradientu prędkości ścinania, w obszarze warstwy przyściennej, w temperaturze od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

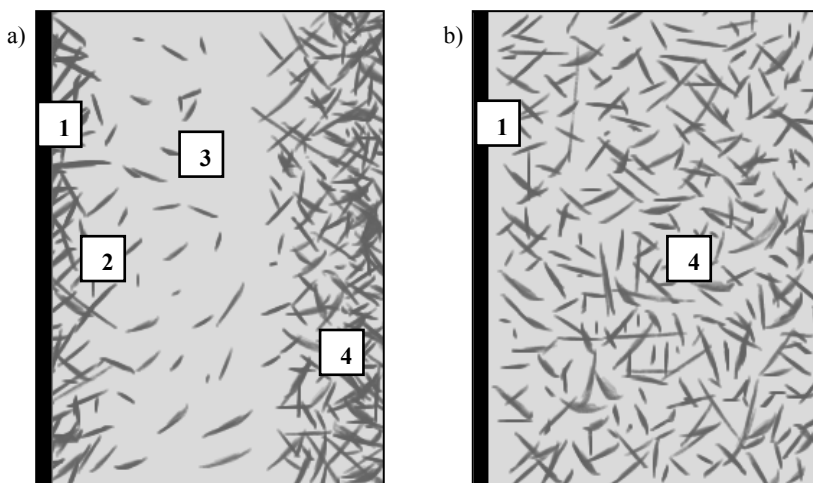
## WPROWADZENIE

Smary plastyczne są złożonymi reologicznie cieczami nienewtonowskimi o budowie dwufazowej wykazującymi właściwości tiksotropowe [L. 1]. Są to układy chemicznie i fizycznie niejednorodne. Fazę dyspersyjną w smarach stanowi olej bazowy, fazę zdyspergowaną natomiast zagęszczacz i, w zależności od potrzeb, dodatki uszlachetniające. Ze względu na rozmiar cząstek zagęszczacza smary przyjmują cechy układu o rozdrobnieniu mechanicznym (suspensyjnym) lub koloidalnym [L. 2]. Smary plastyczne, a w szczególności smary mydlowe charakteryzują się zdolnością tworzenia warstwy powierzchniowej w bezpośrednim sąsiedztwie ścianki materiału, z którą mają one kontakt. Warstwa powierzchniowa powstaje w wyniku oddziaływań fizykochemicznych między cząstkami zagęszczacza i dodatkami uszlachetniającymi (nazywanymi w dalszej części tekstu adsorbantem) a ścianką materiału. Do oddziaływań tych należy zaliczyć m.in.: siły elektrostatyczne, siły van der Waalsa oraz wiązania chemiczne (najczęściej kowalencyjne). Zwiększenie lub zmniejszenie zagęszczenia adsorbantu na powierzchni ścianki zależy od intensywności tych oddziaływań. Efektem zjawisk dyfuzyjnych i adsorpcyjnych jest powstanie warstwy przyściennej znajdującej się w pewnej odległości od ścianki materiału. Warstwa przyścienna w wyniku zubożenia w adsorbant charakteryzuje się odmiennymi właściwościami reologicznymi od masy smaru. Posiada ona mniejszą lepkość dynamiczną, a występujące w niej naprężenia styczne są również mniejsze. Jest to spowodowane tym, że składa się ona głównie z bazy olejowej. Grubość warstwy przyściennej waha się w przedziale od kilku dziesiątych części mikrometra do nawet około 70 mikrometrów. Schemat tworzenia się warstw powierzchniowej i przyściennej w smarach plastycznych przedstawiono na **Rys. 1**.

Powstająca w obszarze kontaktu smaru plastycznego ze ścianką materiału warstwa przyścienna może mieć pozytywne znaczenie w aspekcie smarowania. Może ona stanowić m.in. czynnik zmniejszający opory przepływu smarów plastycznych w elementach konstrukcyjnych układów smarowania maszyn (magistralach smarowych, rozdzielaczach dozujących, przewodach doprowadzających, węzłach tribologicznych), gdyż wymusza ona niejako poślizg smaru w pobliżu ścianki. Zjawisko takie określane jest w literaturze jako *efekt Segré-Silberberga* lub *efekt sigma* [L. 4, 5].

Obecnie istnieje wiele prac naukowych dotyczących formowania się warstw powierzchniowej i przyściennej w smarach plastycznych. Próbę wyjaśnienia tego zjawiska jako jedni z pierwszych podjęli Vinogradov i in. [L. 6, 7]. Badaniom poddali oni smary zagęszczane mydlami litowym i wapniowym. Vinogradov i in. udowodnili, że materiał ścianki ma bezpośredni

wpływ na intensywność zjawisk przyściennych. Podobne badania prowadził Czarny [L. 8–10], wykorzystując w tym celu reometr rotacyjny pracujący w układzie współosiowych cylindrów. W roku 1991 Swartz i Hardy [L. 11] wykazali, że najbardziej intensywne zjawiska dyfuzyjne w smarach plastycznych zachodzą w pobliżu materiałów wykonanych z metali. Badaniem zjawisk zachodzących na granicy faz smar plastyczny–materiał, z wykorzystaniem innych metod pomiarowych niż reometryczne, zajmowali się m.in. Green i in [L. 12, 13]. Stosowali oni metodę zwaną mikroanemometrią obrazową ( $\mu$ PIV). Metoda ta pozwoliła na pomiar profilu prędkości smaru w pobliżu ścianki materiału. Szeroki przegląd aktualnej literatury dotyczącej analizowanego tematu można znaleźć w publikacji [L. 14].



**Rys. 1.** Kształtowanie się warstw powierzchniowej i przyściennej w smarze płynącym w pobliżu ścianki materiału, który a) posiada zdolność do adsorpcji cząstek zagęszczacza, b) nie posiada zdolności do adsorpcji cząstek zagęszczacza, 1 – ścianka materiału, 2 – warstwa powierzchniowa (zaadsorbowane cząstki zagęszczacza smaru na powierzchni ścianki materiału), 3 – warstwa przyścienna (obszar zubożały w zagęszczacz, o mniejszej lepkości dynamicznej), 4 – masa smaru [L. 4]

**Fig. 1.** Formation of superficial layer and boundary layer in grease flowing in vicinity of wall made of material which: a) is able to adsorb thickener particles, b) is not able to adsorb thickener particles, 1 – material wall, 2 – superficial layer (grease thickener particles adsorbed on surface of material wall), 3 – boundary layer (region with reduced thickener concentration and lower dynamic viscosity), 4 – bulk of grease [L. 4]

Ze względu na złożoność procesu formowania się warstwy przyściennej w smarach plastycznych i jego ważność z punktu widzenia tribologicznego, autorzy podjęli się jego zbadania. Oceniono, jaki jest wpływ temperatury na formowanie się warstwy przyściennej w smarze handlowym litowym, w pobliżu ścianek materiałów polimerowych i metalowych.

## MATERIAŁ BADAŃ

Do badań użyto smaru handlowego zagęszczanego mydłem litowym GREASEN ŁT4-S2 (ORLEN, Kraków, Polska) o drugiej klasie konsystencji (wg PN-85/C-04095) wyprodukowanego na bazie oleju mineralnego. Podstawowe właściwości smaru przedstawiono w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Podstawowe właściwości smaru ŁT4-S2**

Table 1. Main properties of grease ŁT4-S2

Zagęszczacz	12-hydroksystearynian litu
Baza olejowa	olej mineralny
Dodatki	antykorozyjne, utleniające
Temperatura zapłonu	>200°C
Temperatura kroplenia	>190°C
Zakres temperatury stosowania	-30°C÷130°C
Klasa konsystencji	2

Formowanie się warstwy przyściennej w smarze plastycznym zbadano w pobliżu sześciu różnych materiałów, tj. dwóch materiałów elastomerowych: 70E (kautczuk etylenowo-propylenowy), 70F (kautczuk fluorowy); dwóch materiałów termoplastycznych: PTFE (politetrafluoroetylen), PU (poliuretan) oraz dwóch stopów metali: B47 (brąz), C11000 (miedź). Średnia wartość wskaźnika chropowatości Ra ścianek materiałów użytych do badań mieściła się w przedziale od 0,93 do 1,77  $\mu\text{m}$ . Pomiar chropowatości odbywał się za pomocą ręcznego profilometru na odcinku 4 mm.

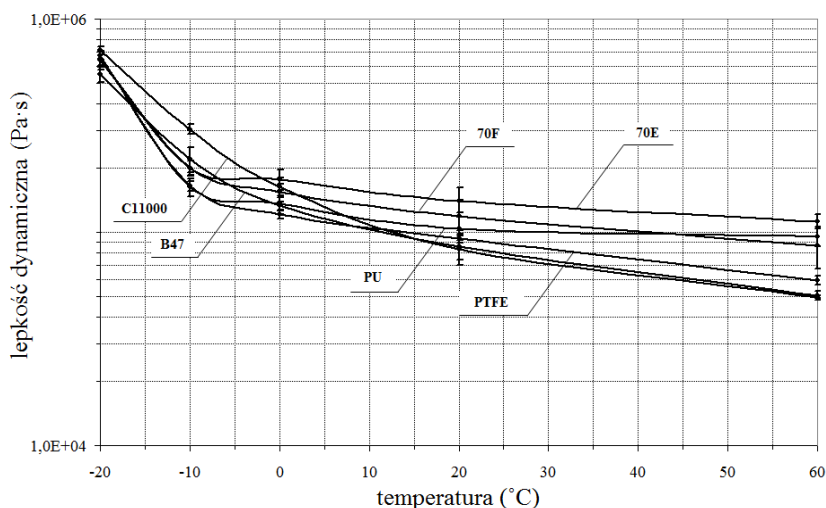
## METODA BADAŃ

Badania reologiczne przeprowadzone zostały z wykorzystaniem reometru rotacyjnego Physica Anton-Paar MCR 101. Reometr pracował w układzie płytka–płytką, przy stałej wysokości szczeliny pomiarowej wynoszącej 1 mm. Dokładność nastawy wysokości szczeliny pomiarowej wynosiła  $\pm 0,001$  mm. W skład reometru wchodził układ grzewczo-chłodzący Peltiera P-PTD200 oraz kołnierzyk izolujący H-PTD200 z cyrkulacją powietrza wewnątrz głowicy pomiarowej. Podczas badań próbki smarów termostatowano w zadanej temperaturze z dokładnością do  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ . Przed każdorazowym pomiarem utrzymywano je w stałej temperaturze w głowicy reometru przez okres 5 minut, po ustabilizowaniu się zadanej temperatury. Do badań użyto płytki o średnicy 50 mm wykonanej ze stali. Na płytkę naklemano próbki badanych adsorbentów. Każdorazowo po naklejeniu próbki wyznaczano moment bezwładności zmodyfikowanego

wrzeciona oraz prowadzano kalibrację rotora. Badany smar plastyczny ścinano przy progresywnie wzrastającej prędkości ścinania od  $10^{-4}$  do  $10^0$  s $^{-1}$ , a następnie rejestrowano zmiany lepkości dynamicznej oraz naprężeń stycznych w warstwie przyściennej. Badania powtarzano pięciokrotnie. Normalność rozkładów wyników pomiarowych oceniano za pomocą testu nieparametrycznego W Shapiro-Wilka.

## WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki badań wskazują na to, że temperatura smaru litowego LT-4S2 w zakresie wartości od  $-20$  do  $60^{\circ}\text{C}$  ma istotny wpływ na właściwości reologiczne warstwy przyściennej tworzącej się w pobliżu badanych materiałów. Najmniejsze różnice w zachowaniu się smaru litowego można było zauważyć w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Wynika to najprawdopodobniej ze zwiększonej gęstości bazy olejowej, co z kolei utrudnia przemieszczanie się cząstek adsorbentu i dyfuzję na powierzchni materiału. Wraz ze wzrostem temperatury różnice wartości lepkości w obszarze warstwy przyściennej tworzącej się w pobliżu materiałów były coraz większe, co jest widoczne na **Rys. 2**.

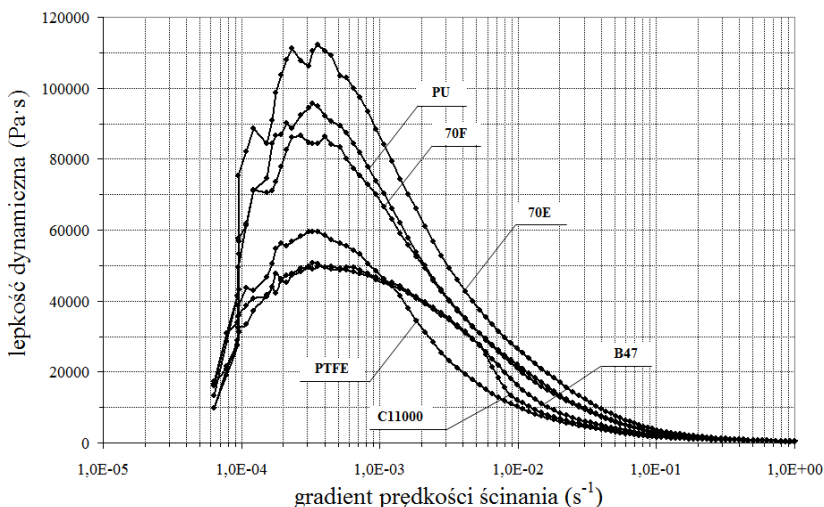


**Rys. 2.** Zależności maksymalnej wartości lepkości dynamicznej smaru LT-4S2 zarejestrowanej w pobliżu badanych materiałów w funkcji temperatury tego smaru. Średnia arytmetyczna z pięciu prób ( $p = 0,95$ )

Fig. 2. Maximum value of dynamic viscosity, measured in vicinity of the tested materials versus temperature of grease. The arithmetic average of five measurements ( $p = 0.95$ )

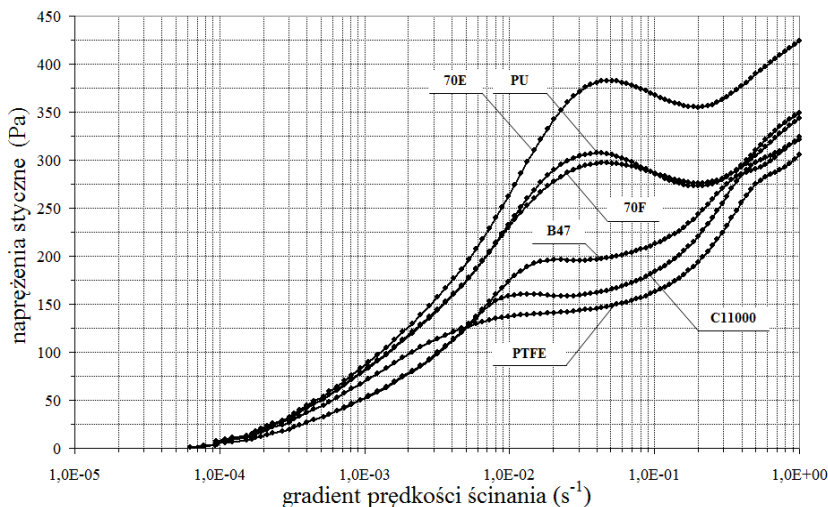
Z **Rys. 2** wynika również, że w prawie pełnym zakresie wartości ujemnych temperatury najmniej intensywne zjawiska dyfuzyjne i adsorpcyjne stwierdzo-

no dla smaru litowego przepływającego w pobliżu miedzi C11000. W pobliżu tego materiału wartość lepkości dynamicznej smaru była największa i wynosiła  $0,711 \cdot 10^6$  Pa·s. Najmniejsze wartości lepkości zarejestrowano z kolei w pobliżu brązu B47 oraz tworzyw elastomerowych 70E i 70F (odpowiednio  $0,550 \cdot 10^6$ ,  $0,641 \cdot 10^6$  oraz  $0,651 \cdot 10^6$  Pa·s). Różnica między największą i najmniejszą zarejestrowaną wartością lepkości dynamicznej w obszarze warstwy przyściennej wyniosła zatem ponad 20%. W dodatnich wartościach temperatury zachowanie się smaru w pobliżu materiałów było zgoła odmienne. Największe wartości lepkości dynamicznej w obszarze warstwy przyściennej w temperaturze  $60^\circ\text{C}$  można było zauważyć w pobliżu materiałów elastomerowych 70E, 70F oraz PU (odpowiednio  $0,112 \cdot 10^6$ ,  $0,087 \cdot 10^6$  oraz  $0,096 \cdot 10^6$  Pa·s). Najmniejszą wartości zarejestrowano dla smaru przepływającego w pobliżu miedzi C11000, tj.  $0,049 \cdot 10^6$  Pa·s. W tych warunkach temperatury adsorpcja cząstek adsorbentu smaru litowego na powierzchniach metalowych była największa. Różnica między największą i najmniejszą zarejestrowaną wartością lepkości dynamicznej wyniosła w tym przypadku aż ponad 55%. Na **Rys. 3 i 4** przedstawiono przykładowe zależności lepkości dynamicznej oraz naprężenia stycznego w funkcji gradientu prędkości ścinania smaru LT4-S2, płynącego w pobliżu badanych materiałów. Badania zostały przeprowadzone w temperaturze  $60^\circ\text{C}$ . W tej temperaturze różnice w zarejestrowanych wartościach lepkości dynamicznej, w obszarze warstwy przyściennej, były największe.



**Rys. 3. Zależności lepkości dynamicznej od gradientu prędkości ścinania smaru LT4-S2 w pobliżu badanych materiałów (temperatura smaru:  $60^\circ\text{C}$ ). Średnia arytmetyczna z pięciu pomiarów**

**Fig. 3. Dynamic viscosity versus shear rate for grease LT4-S2 in vicinity of tested materials (temperature of the grease:  $60^\circ\text{C}$ ). The arithmetic average of five measurements**



**Rys. 4. Zależności naprężeń stycznych od gradientu prędkości ścinania smaru ŁT4-S2 w pobliżu badanych materiałów (temperatura smaru: 60°C). Średnia arytmetyczna z pięciu pomiarów**

Fig. 4. Shear stresses versus shear rate for grease ŁT-4S2 in vicinity of tested materials (temperature of the grease: 60°C). The arithmetic average of five measurements

## KONKLUZJA

Przeprowadzone przez autorów badania reologiczne smaru litowego ŁT4-S2 wskazują na to, że temperatura i materiał ścianki mają istotny wpływ na intensywność tworzenia się zubożałej w adsorbat warstwy przyściennej. Różnica wartości lepkości dynamicznej smaru plastycznego w obszarze warstwy przyściennej, w zależności od materiału, może wynosić nawet ponad 55%. Zjawisko to można wykorzystać przy projektowaniu przewodów smarowniczych, których zadaniem będzie „wymuszenie” poślizgu smaru plastycznego w pobliżu ścianki przewodu smarowniczego, istotnie zmniejszając w ten sposób opory przepływu tego smaru. Zmniejszenie oporów przepływu smarów może mieć ogromne znaczenie w przypadku układów smarowniczych pracujących w środowisku, gdzie panują ujemne wartości temperatury. Dobór odpowiednich materiałów na elementy konstrukcyjne układów smarowniczych, których zadaniem będzie ograniczanie oporów przepływu smarów plastycznych, może pozwolić m.in. na zwiększenie oszczędności energii poprzez chociażby zastosowanie pomp tłokowych o zdecydowanie mniejszej mocy.

**LITERATURA**

1. Paszkowski M., Olsztyńska-Janus S., Wilk I.: Studies of the kinetics of lithium grease microstructure regeneration by means of dynamic oscillatory rheological tests and FTIR–ATR spectroscopy. *Tribology Letters* 56, 2014, 107–117.
2. Paszkowski M., Olsztyńska-Janus S.: Grease thixotropy: evaluation of grease microstructure change due to shear and relaxation. *Industrial Lubrication and Tribology* 66 (2), 2014, 223–237.
3. Paszkowski M.: Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 480, 2014, 462–467.
4. Segré G., Silberberg A.: Behavior of macroscopic rigid spheres in Poiseuille flow. Part II. Experimental results and interpretation, *Journal of Fluid Mechanics* 14, 1962, 136–157.
5. Bramhall A.D., Hutton J.F.: Wall effect in the flow of lubricating greases in plunger viscometers, *British Journal of Applied Physics* 11, 1960, 363–369.
6. Vinogradov G.V., Froishteter G.B., Trilsky K.K., Smorodinsky E.L.: The flow of plastic disperse systems in the presence of the wall effect, *Rheologica Acta* 14 (9), 1975, 765–775.
7. Vinogradov G.V., Froishteter G.B., Trilsky K.K.: The generalized theory of flow of plastic disperse systems with account of the wall effect, *Rheologica Acta* 17 (2), 1978, 156–165.
8. Czarny R., Moes H.: Some aspects of lubricating grease flow, 3<sup>rd</sup> International Tribology Congress – Eurotrib, Warszawa 1981.
9. Czarny R.: Wpływ struktury smaru plastycznego na jego własności reologiczne, *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Zagadnienia tarcia i smarowania oraz komputeryzacji projektowania zespołów maszynowych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
10. Czarny R., Wpływ rodzaju materiału ścianki na kształtowanie się warstwy przyściennej smaru, *Materiały konferencyjne, XXI Jesienna Szkoła Tribologiczna – Smarowanie węzłów tarcia maszyn i urządzeń. Współczesne tendencje rozwoju teorii badań*, Łódź – Arturowek 1996.
11. Swartz C.J., Hardy B.: Mathematical model of grease flow in pipes, *NLGI Spokesman* 55 (3), 1991, 14–17.
12. Green T.M., Baart P., Westerberg L.G., Lundström T.S., Höglund E., Lugt P.M., Li J.X.: A new method to visualize grease flow in a double restriction seal using microparticle image velocimetry, *Tribology Transactions* 54 (5), 2011, 784–792.
13. Li J.X., Höglund E., Westerberg L.G., Green T.M., Lundström T.S., Lugt P.M., Baart P.:  $\mu$ PIV measurement of grease velocity profiles in channels with two different types of flow restrictions, *Tribology International* 54, 2012, 94–99.
14. Paszkowski M.: Some aspects of grease flow in lubrication systems and friction nodes, [w:] *Tribology – fundamentals and advancements*, Wydawnictwo InTech, Rijeka, Chorwacja 2013, 77–106.



## Summary

**The influence of temperature on superficial and boundary layers forming in commercial grease LT4-S2, in the vicinity of walls made of six different materials, i.e. two elastomeric materials (70E, 70F), two thermoplastic materials (PTFE, PU) and two metal alloys (B47, C11000), are presented in this paper. The studies were carried out by means of a rotational rheometer with a parallel plate measuring system. Curves of changes in dynamic viscosity and shear stress in the grease as a function of shear rate in the boundary layer at a temperature from -20°C to 60°C were determined.**