

UNTERSUCHUNG UND ANWENDUNG DER WENDELSTRÖMUNG IN DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG, I. STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE IM SPALT VON DREHDORNWERKZEUGEN

I. MONDVAI, L. HALÁSZ, H. REVESZ* und L. MACSKÁSI

Lehrstuhl für Kunststoff- und Gummiindustrie,
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen: Am 13. März 1984
Vorgelegt von Doz. dr. J. Varga

Summary

In pipe extrusion with traditional dies, melt flow is simple pressure flow through the ring-shaped die clearance. Such flow causes longitudinal and transversal anisotropy; also, weaker places result along the weld seams caused by the supports of the torpedo fitted in the extruder head.

To eliminate the problems caused by traditional dies, dies with rotating cores were constructed. In such dies spiral flow is effectuated, preventing orientation of the molecules. Besides, by virtue of viscosity decrease, flow rate will increase.

In this paper the relationship of spiral flow is applied to describe the processes taking place in dies with rotating cores.

Die Wendelströmung gehört zu jenen viskosimetrischen Strömungen, für die die Konstanz der Deformationsgeschichte charakteristisch ist. Im Falle solcher Strömungen können die Polymerschmelzen — die sich im Allgemeinen wie einfache Flüssigkeiten verhalten — durch drei Materialfunktionen beschrieben werden: durch eine Viskositäts- und zwei Normalspannungsfunktionen. Die Wendelströmung spielt bei Schneckenplastifizierungseinheiten, in Extruderwerkzeugen und in Innenmischern ablaufenden Vorgängen eine wesentliche Rolle.

In unserer vorangegangenen Arbeit [1] haben wir die Anwendung der Wendelströmung bei Schneckenplastifizierungseinheiten untersucht. In der vorliegenden Abhandlung befassen wir uns mit der Anwendung der Wendelströmung bei Strömungen, die in Drehdornwerkzeugen auftreten.

* Laboratorium für Kunststofftechnik LKT—TGM, Wien. Die vorliegende Arbeit entstand durch eine Zusammenarbeit dieser Institute im Rahmen des technisch-wissenschaftlichen Abkommens zwischen Ungarn und Österreich

Bei der mit konventionellen Werkzeugen durchgeführten Rohrextrusion ist der Schmelzenstrom als einfache Druckströmung durch einen Ringspalt zu betrachten. Eine solche Strömung verursacht eine Anisotropie in Längs- und Querrichtung, außerdem treten infolge der Dornhalterstege entlang der Schweißlinien Schwachstellen auf. Bei der Rohrherstellung wird ein homogenes Produkt gefordert mit möglichst geringer Spannungsanisotropie. Um die Probleme, die bei konventionellen Werkzeugen auftreten zu vermeiden, wurden Drehdornwerkzeuge entwickelt [2–5]. In den Drehdornwerkzeugen entsteht eine Wendelströmung, die die Orientierung der Moleküle verhindert; dabei erhöht sich auch der Volumendurchsatz infolge der Abnahme der Viskosität. Der gleiche Volumendurchsatz ist mit geringerer Leistung erreichbar, obwohl die Drehbewegung des Dornes einen zusätzlichen Energiebedarf bedeutet. Die Strömungsverhältnisse in solchen Werkzeugen wurden bisher mit wesentlichen Vereinfachungen der Strömungen untersucht.

Theorie

In der vorliegenden Arbeit werden zur Beschreibung der Vorgänge in Drehdornwerkzeugen die Zusammenhänge der Wendelströmung herangezogen. Zur Beschreibung der Vorgänge wird von den Kontinuitäts-, Impuls- und Energiegleichungen ausgegangen. Diese in dimensionloser Form angeschriebenen lauten:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho_s^* v_r^*) \frac{\bar{v} \rho_s(T_1, p_1)}{R} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_s^* v_z^*) \frac{\bar{v} \rho_s(T_1, p_1)}{L} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\bar{\tau}}{HR\rho} \pi_{P_\varphi} + \frac{\bar{\tau}}{R} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho^2 \tau_{r\varphi}^*) = 0 \quad (2)$$

$$-\pi_{P_z} \frac{\bar{\tau}}{H} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \tau_{rz}^*) \frac{\bar{\tau}}{R} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{Gz}{(\varepsilon-1)^2} v_z^* \frac{\partial \pi_T}{\partial z^*} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \pi_T}{\partial \rho} \right) + \\ &+ \frac{Br}{(\varepsilon-1)^2 R} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{v_\varphi^*}{\rho} \tau_{r\varphi}^* + \tau_{rz}^* \frac{\partial v_z}{\partial \rho} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Von den vier Zusammenhängen kann die Kontinuitätsgleichung vernachlässigt werden, wenn die Polymerschmelze als inkompressibel betrachtet werden kann. Diese Annahme ist für Drehdornwerkzeuge zulässig. Die Bedeutung der einzelnen Glieder der Energiegleichung kann über die Untersuchung der Graetz-Zahl und Brinkmann-Zahl bestimmt werden. Die

Graetz-Zahl ist eine dimensionlose Zahl, die für das Verhältnis des in Strömungsrichtung entstehenden Wärmetransportes und der darauf senkrechten Wärmeleitung charakteristisch ist. Die Brinkmann-Zahl (die fallweise auch Griffith-Zahl oder Nahme-Zahl genannt wird) zeigt an, wie weit die durch die viskose Dissipation verursachte Erwärmung die Viskosität und das Geschwindigkeitsprofil verändert. Bezüglich der Brinkmann- und Graetz-Zahlen werden in der Praxis vier Fälle unterschieden:

1. Wenn die Brinkmann-Zahl kleiner ist als 10^{-1} , ist die Strömung isotherm, und das Geschwindigkeitsprofil kann ohne Berücksichtigung der Temperaturänderung bestimmt werden.

2. Wenn die Graetz-Zahl kleiner ist als 1, dann überwiegt die Wärmeleitung bei dem Wärmeübergang. Die Strömung wird in diesem Fall als thermisch vollständig ausgebildet betrachtet.

3. Wenn die Graetz-Zahl einen Wert um 1 einnimmt, sind sowohl die Wirkung des Wärmetransportes als auch die der Wärmeleitung bedeutsam. Im Falle, daß $Br > 1$ ist, ist auch die Wärmedissipation bedeutsam und es können weder das Temperatur- noch das Geschwindigkeitsprofil als ausgebildet betrachtet werden.

4. Wenn die Graetz-Zahl groß ist, überwiegt der Wärmetransport und obwohl die Wärmeleitung nicht vernachlässigt werden kann, bildet sich das Temperaturprofil nur langsam aus. Das lokal ausgebildete Geschwindigkeitsprofil kann angenommen werden.

Bei den Strömungen durch die Werkzeuge liegt die Brinkmann-Zahl im Bereich von 0,01 . . . 0,5. Die Graetz-Zahl im Bereich von 1 . . . 50. Dies bedeutet, daß beim Durchströmen der Werkzeuge der Einfluß des Dissipationsgliedes gering ist, jedoch spielt der Wärmetransport eine bedeutende Rolle. Aus diesem Grunde wurde der Einfluß der Dissipation über ein mittleres Dissipationsglied berücksichtigt:

$$D = \mu_0 \exp[-b(T_1 - T_0)] \left\{ \left(\frac{v_\varphi}{H} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_z}{H} \right)^2 \right\}^{\frac{n+1}{2}} \quad (5)$$

Die Energiegleichung für die Durchschnittstemperatur gelöst:

$$\frac{d\bar{\pi}_T}{dz} - \frac{(\varepsilon - 1)^2}{a Gz} \bar{\pi}_T + \frac{Br^*}{Gz} \exp(-\bar{\pi}_T) + \frac{(\varepsilon - 1)^2 \Delta T}{a Gz} = 0 \quad (6)$$

Hier bedeuten

$$Br^* = Br \exp[b(T_w - T_1)] \left\{ \frac{\left(\frac{v_\varphi}{H} \right)^2 + \left(\frac{v_z}{H} \right)^2}{\left(\frac{v_\varphi}{2H} \right)^2 + \left(\frac{\bar{v}_z}{H} \right)^2} \right\}^{\frac{n+1}{2}} \quad (7)$$

und

$$a = \frac{1}{12} \frac{\varepsilon^3 - 1}{\varepsilon - 1} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \ln \varepsilon - \varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} - \frac{1}{4} \quad (8)$$

Durch die Lösung der Impulsgleichung ist der Volumenstrom:

$$\pi_0 = \frac{Q}{\bar{v} R^2 \pi} \left(\frac{\bar{\tau}}{\mu_0} \right)^{1/n} \frac{\pi_P R^2}{H \bar{v}} \int_1^\varepsilon (\varepsilon - \rho)^2 \left(\rho + \frac{A_2}{\rho} \right) F^{\frac{1-n}{n}} \Delta T \exp\left(\frac{\pi_T}{n}\right) d\rho \quad (9)$$

wobei

$$F = \left\{ \frac{A_1^2}{\rho^2} + \frac{\pi_P^2 R^2}{4H^2} \left(\rho + \frac{A_2}{\rho} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Versuchs- und Rechenergebnisse

Bei den Versuchen wurden zwei Extruder mit 30 mm Schneckendurchmesser verwendet. Um die Verhältnisse im Drehdornwerkzeug zu simulieren, wurde am Ende der Schnecke ein torsionsempfindlicher Meßkopf angebracht. Es wurden der Volumendurchsatz, das Drehmoment und der Druckgradient entlang dem Werkzeugspalt gemessen. Bei den Versuchen wurden die LDPE-Typen Tipolen FC 2076, Daplen 1840 D und 2425 K eingesetzt. Die Wendelströmung wurde in einem Spaltmaß von 2,5; 2,0; 1,5 und 1,0 mm über eine Spaltlänge von 3,5 cm aufrecht erhalten.

Der Zusammenhang zwischen Volumendurchsatz und Drehzahl ist in den Abbildungen 1-3 für die Fließexponenten $n=0,3$; $0,5$ und $0,7$ und für drei Druckgradienten dargestellt. Mit steigender Drehzahl fällt der bei gleichem Volumendurchsatz auftretende Druckgradient vehement ab. Mit dem Anstieg des Fließexponenten bei Näherung an das newtonsche Verhalten nimmt die Steigung der Kurven zu. Dies bedeutet, daß bei Anstieg des Fließexponenten entlang der zur gleichen Drehzahl gehörenden Kurven, zu den Punkten mit gleichem Volumendurchsatz größere Drücke gehören.

Die Anwendbarkeit der für die Wendelströmung abgebildeten Zusammenhänge wurden mit der Berechnung des Druckgradienten bewiesen. Der Druckgradient wurde aus der Gleichung (8) mit der Iterationsmethode gerechnet, unter Berücksichtigung des auf Grund der Gleichung (7) berechenbaren Temperaturanstieges. Die gerechneten Werte wurden mit den gemessenen Druckgradienten verglichen. Die Ergebnisse wurden für drei Spaltmaße in Abb. 4 dargestellt. Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den berechneten Werten ist zufriedenstellend. Die Gleichungen der Wendelströmung können für die Beschreibung der in Drehdornwerkzeugen entstehenden Vorgänge gut angewendet werden.

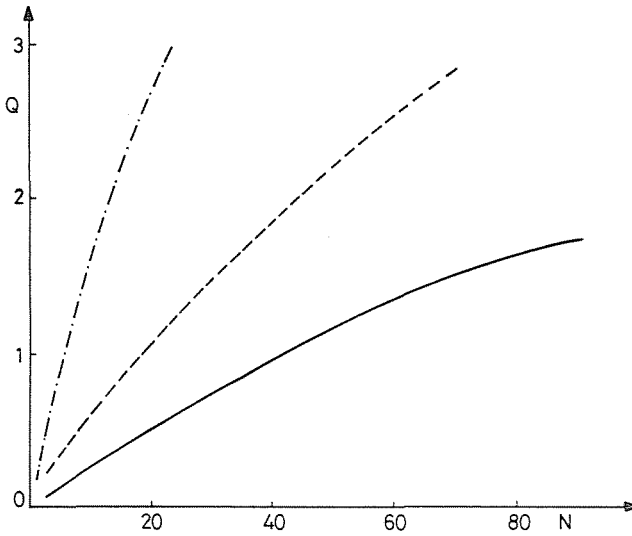


Abb. 1. Zusammenhänge zwischen Volumendurchsatz Q ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$) und Schneckendrehzahl N (min^{-1}) bei $n=0,3$. Druckgradienten: — 5 kPa cm^{-1} , --- 10 kPa cm^{-1} , -.- 20 kPa cm^{-1}

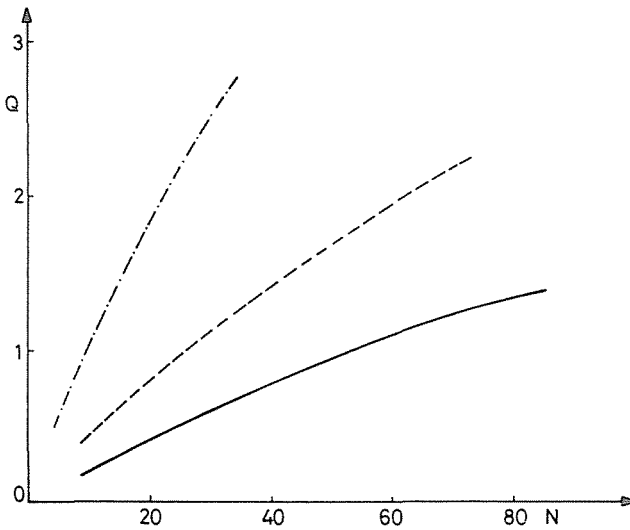


Abb. 2. Zusammenhänge zwischen Volumendurchsatz Q ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$) und Schneckendrehzahl N (min^{-1}) bei $n=0,5$. Die Bezeichnungen sind mit denen der Abb. 1. identisch

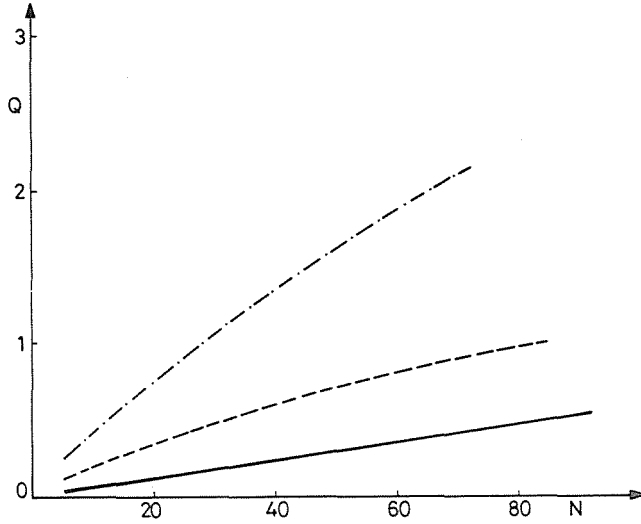


Abb. 3. Zusammenhänge zwischen Volumendurchsatz Q ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) und Schneckendrehzahl N (min^{-1}) bei $n=0,7$. Die Bezeichnungen sind mit denen der Abb. 1. identisch

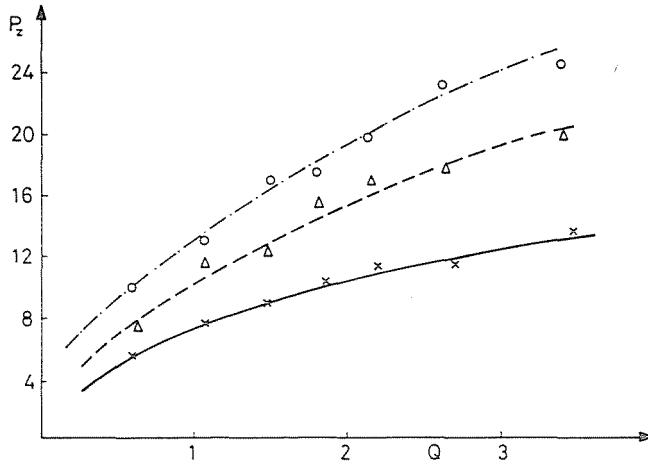


Abb. 4. Zusammenhänge zwischen Druckgradient P_z (kPa cm^{-1}) und Volumendurchsatz Q ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)

Spaltweite	Gemessene Werte	Gerechnete Werte
0,25 cm	×	—
0,15 cm	△	- - -
0,10 cm	○	- · - ·

In Abb. 5 wurden die zum gleichen Volumendurchsatz gehörenden relativen Druckkurven dargestellt. P_{\max} bedeutet den zur Schneckendrehzahl $N=0$ gehörenden Druck. Auf Grund der Kurvenform kann darauf geschlossen

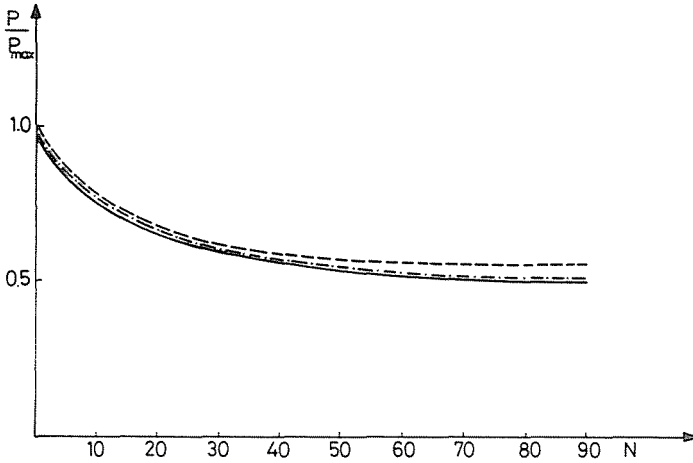


Abb. 5. Zusammenhänge zwischen relativer Druck P/P_{\max} und Schneckendrehzahl N (min^{-1}). Volumendurchsätze: ——— $0,5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$; - - - $1,0 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$; - · - · $3,0 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

werden, daß bei höheren Schneckendrehzahlen unabhängig von dem Einfluß des Volumendurchsatzes der Druck sich bei etwa 50—60% des Druckwertes der axialen Strömung bewegt.

Die Abb. 6 und 7 stellen den Viskositätsverlauf im Spalt zwischen den zwei Zylindern dar. In der Abb. 6 ist die Viskositätsverteilung bei gleicher Drehzahl, jedoch bei verschiedenen Druckgradienten gezeigt. In der Abb. 7 ist

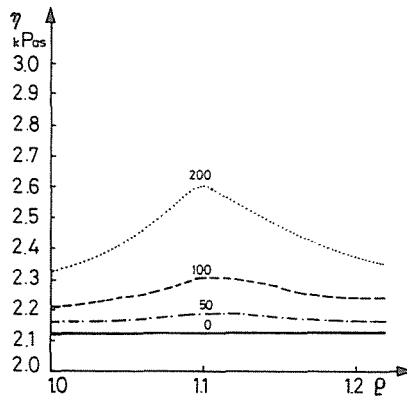


Abb. 6. Viskositätsverteilung im Werkzeugspalt. Schneckendrehzahl 10 min^{-1} , Druckgradienten: ——— 0 kPa cm^{-1} ; - · - · 50 kPa cm^{-1} ; - - - 100 kPa cm^{-1} ; ... 200 kPa cm^{-1}

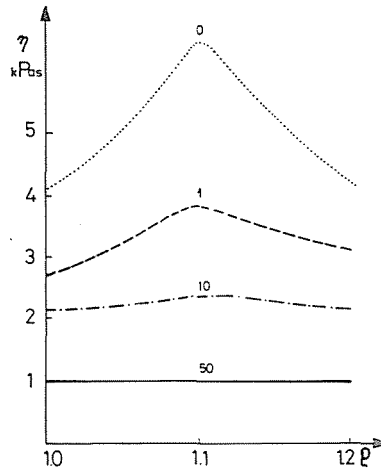


Abb. 7. Viskositätsverteilung im Werkzeugspalt. Druckgradient 50 kPa cm^{-1} , Schneckendrehzahlen: — 50 min^{-1} ; -.- 10 min^{-1} ; --- 1 min^{-1} ; ... 0 min^{-1}

die Viskositätsverteilung bei verschiedenen Drehzahlen, jedoch für einen gegebenen Druckgradienten angeführt. Es ist aus den Abbildungen ersichtlich, daß steigende Drehzahl die Senkung der Viskosität verursacht, und die Steigerung der Drehzahl auch eine homogene Schmelzenviskositätsverteilung ergibt.

Die Vorteile der Drehdornwerkzeuge können auch aus den vorangegangenen Ausführungen beurteilt werden. Sie verringern die Viskosität und bewirken eine größere Homogenität der Schmelze.

Bezeichnungen

$\rho = r/R$ dimensionslosen Koordinate

r, φ und z die Koordinaten eines Punktes im Zylinderkoordinatensystem

R Radius des Drehdorns

ρ_s die Dichte der Polymerschmelze

$\rho_s(T_1, P_1)$ die Dichte bei den T_1 Temperatur- und P_1 Druckwerten

$\rho_s^* = \rho_s / \rho_s(T_1, P_1)$ dimensionslosen Dichte

T_1 die Temperatur

P_1 der Druck

$\bar{v} = [v_z^2 + (v_\varphi/2)^2]^{1/2}$ durchschnittliche Geschwindigkeit

v_r, v_φ und v_z die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors

$v_r^* = v_r / \bar{v}$

$v_\varphi^* = v_\varphi / \bar{v}$ die dimensionslosen Komponenten des Geschwindigkeitsvektors

$$v_z^* = v_z / \bar{v}$$

L die Länge des Werkzeugspalt

$H = R_w - R$ die Spaltweite

R_w der Radius des Werkzeuge

$\bar{\tau} = \mu_0 \exp[-b(T_1 - T_0)] \bar{\gamma}^n$ durchschnittliche Scherspannung

$\bar{\gamma} = \bar{v}/H$ durchschnittliche Schergeschwindigkeit

$\left. \begin{array}{l} \mu_0 \\ n \\ b \end{array} \right\}$ die Parameter der rheologischen Zustandsgleichung

T_0 die Bezugstemperatur

P_φ, P_z Druckgradienten in der Richtung der φ bzw. z Koordinaten

$\left. \begin{array}{l} \pi_{P_\varphi} = P_\varphi H / \bar{\tau} \\ \pi_{P_z} = P_z H / \bar{\tau} \end{array} \right\}$ Reduzierten Druckgradienten

$\bar{\tau}_{ij}^* = \tau_{ij} / \bar{\tau}$ die dimensionlosen Komponenten des Scherspannungsvektors

$\varepsilon = R_w / R$ reduzierter Radius

$Gz = \frac{\rho_s C_v \bar{v} H^2}{kL}$ die Graetz-Zahl

C_v die spezifische Wärme der Polymerschmelze

k die Wärmeleitzahl

$z^* = z/L$ dimensionslosen Längekoordinate

$Br = \frac{bH^2 \bar{\tau}}{k}$ die Brinkmann-Zahl

$\pi_T = b(T_0 - T_1)$ die dimensionslose Temperatur

\bar{v}_z die mittlere Schmelzengeschwindigkeit, die sich als Quotient des Volumendurchsatzes und des Strömungsquerschnittes ergibt

$\bar{\pi}_T = b(T_0 - \bar{T})$ dimensionslose Temperatur aus der Durchschnittstemperatur gerechnet

T_w die Dorntemperatur

$$A_1 = C_1 / R^2$$

$$A_2 = 2C_2 / P_z R^2$$

C_1 und C_2 Integrationskonstanten der Impulsgleichung

Literatur

1. HALÁSZ L., MONDVAI I., REVESZ H.: Rheol. Acta 22, 313 (1983)
2. BORTNIKOV V. G., KUZNECOV E. V., TJABIN N. V.: Plasm. 1967, No. 8. 49.
3. TJABIN N. V., BORTNIKOV V. G., CENTOVSKIJ E. M., VATSAGIN K. D.: Meh. Pol. 1968, No. 3. 531.
4. WORTH R. A.: Pol. Eng. Sci. 19, 198 (1979)
5. WORTH R. A.: Pol. Eng. Sci. 20, 551 (1980)

Dr. Imre MONDVAI
Dr. László HALÁSZ
Dr. Levente MACSKÁSI

} H-1521 Budapest

Dr. Hans REVESZ Laboratorium für Kunststofftechnik LKT-TGM Wien