

УДК 6.004.8:678

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗБУХАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ
В ПРОЦЕССЕ ВАЛЬЦЕВАНИЯ**

**RESEARCH OF SWELLING OF POLYMERIC MATERIALS
IN THE CONDITIONS OF INFLUENCE OF THE ULTRASONIC
FLUCTUATIONS IN THE COURSE OF ROLLING**

Абакачева Е.М., Шулаев Н.С., Фахразов А.Р.
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

E.M. Abakacheva, N.S. Shulaev, A.R. Fakhrazov
FSBEI HPE Ufa state petroleum technological university,
branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: elena-abakacheva@rambler.ru

Аннотация. В представленной работе рассмотрены вопросы вальцевания полимерных материалов сложных профилей с наложением ультразвуковых колебаний. Релаксация накопленных в процессе вальцевания напряжений влияет на качество изделий и проявляется в виде разбухания, происходящего под действием нормальных напряжений – перпендикулярных направлению движения массы расплава. Выявлено, что коэффициент разбухания полимерных материалов зависит от параметров ультразвуковых колебаний, реологических свойств полимера, а также от режимов деформирования расплава, определяющих степень накопления и релаксации высокоэластичных деформаций. Определена аналитическая зависимость для расчета мощности ультразвуковых колебаний, поглощаемых полимером в каналах сложного профиля вальцов для изготовления полимерных профильных листов. В результате воздействия ультразвуковых колебаний на расплав полимера значительно улучшается качество готового изделия и увеличивается массовый расход полимера в процессе вальцевания.

Abstract. In this study, the issues of rolling plastics complex profiles superimposed ultrasonic vibrations. Relaxation accumulated in the process of rolling stress affects the quality of the products and manifests itself in the form of swelling that occurs under the action of normal stresses - perpendicular to the direction of motion of the mass of the melt. Found that the swelling ratio of polymeric materials depends on the parameters of the ultrasonic vibration of the rheological properties of the polymer as well as the modes of deformation of the melt, defining the degree of accumulation and

relaxation elastomeric deformation. The analytic relationship to calculate the power of ultrasonic vibrations are absorbed by the polymer in the channels of complex profile rolls for the manufacture of specialized polymer sheets. As a result of the ultrasonic vibrations at the melt polymer significantly improves the quality of the finished product and increases the mass flow rate of the polymer during rolling.

Ключевые слова: вальцевание, разбухание, полимер, профиль, расплавы, моделирование, ультразвуковые колебания

Keywords: rolling, swelling, polymer, a profile, melts, modeling, ultrasonic vibrations

Явление высокоэластичного восстановления перерабатываемых через формующий инструмент расплавов хорошо известно в практике переработки пластических масс. Описанию этого явления посвящен ряд работ [1-4], в которых обсуждаются модели различной степени сложности, позволяющие количественно оценивать это явление. Однако следует отметить, что использование упрощенных моделей дает приблизительную оценку и недостаточно адекватно соответствует экспериментальным данным. Более сложные модели достаточно громоздки при практическом применении [3], и, как правило, недостаточно эффективны. Более того, ни одна из моделей не рассматривает одну из важнейших эксплуатационных и технологических характеристик – «разбухание» полимерных изделий сложного профиля, получаемых в условиях воздействия ультразвуковых колебаний. Обычно, описание явления «разбухания» ограничивается, как правило, полимерными образцами в виде прутка круглого поперечного сечения или плоского листа [4].

В связи с этим, практический интерес представляет математическая зависимость, позволяющая количественно определить эффект «разбухания» при продавливании расплавов полимеров через каналы любого сложного сечения при использовании интенсивных ультразвуковых вибраций.

На величину «разбухания» полимеров оказывают влияние, в первую очередь, молекулярные характеристики и физические свойства материала, технологические условия переработки (температура, скорость, напряжение сдвига), а также геометрические размеры формующего канала.

Моделируя эффект «разбухания» полимера, будем считать, что при течении полимера через канал его частицы, подвергаясь сдвиговой деформации, удлиняются, а после выхода из канала за счет релаксации сокращаются, при этом растяжение и сокращение частиц носит упругий характер.

Таким образом, в выражении, описывающим математически коэффициент «разбухания» обязательно следует учитывать длину канала L и его площадь S_k . Помимо этих величин обязательно следует учитывать давление P при вальцевании полимерной композиции, эффективную вязкость $\eta_{эф}$, градиент

скорости сдвига $\bar{\gamma}$ и некий параметр Θ , учитывающий высокоэластичные свойства среды:

$$K = A \cdot \bar{\gamma}^{n_1} \cdot \Theta^{n_2} \cdot P^{n_3} \cdot \eta_{\text{ЭФ}}^{n_4} \cdot L^{n_5} \cdot S^{n_6} \quad (1)$$

где A – безразмерный коэффициент, учитывающий природу материала, $n_1 - n_6$ – показатели степеней.

При использовании π -теоремы и теории групп [3] получена зависимость для определения коэффициента «разбухания» полимерного материала в цилиндрическом канале:

$$K = A \cdot (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ЭФ}}}{P \cdot \Theta} \right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{S_K} \right)^{n_3} \quad (2)$$

Постоянная A и показатели степеней $n_1 - n_6$ определяются экспериментально (табл. 1).

Чтобы получить необходимую модель расчета коэффициента K для каналов сложной формы, необходимо в выражение (2) ввести коэффициенты формы канала a и b , также определяемые экспериментально по методу мембранной аналогии [3]:

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ЭФ}}}{P \cdot \Theta} \right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3} \quad (3)$$

где m_1, m_2 – показатели степеней (таблица 1).

При наложении на поток расплава ультразвуковых колебаний наблюдается заметное снижение коэффициента «разбухания». В первую очередь за счет снижения эффективной вязкости расплава $\eta_{\text{ЭФ}}$ до некоторого значения η_{ω} , определяемого из уравнения [5].

$$\eta_{\omega} = \frac{\eta_{\text{ЭФ}}}{1 + \omega^2 \cdot r^2}, \quad (4)$$

где ω – угловая частота ультразвуковых колебаний, с^{-1} ;

r – время релаксации, характеризующее скорость спадания напряжения, с .

$$r = \frac{\eta_{\text{ЭФ}}}{E}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости среды, Па.

Таблица 1. Значения физических величин и постоянных коэффициентов

| Материал | Температура, К | $\bar{\gamma}$, 1/с | Θ , с | η_{ω} , Па·с | n_1 | n_2 | n_3 | A | m_1 | m_2 |
|---------------|----------------|----------------------|--------------|------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Полиэтилен | 338 | 3,546 | 0,1 | 4550 | 0,077 | -0,015 | -0,118 | 2,625 | -0,021 | -0,017 |
| | 403 | 3,548 | 0,1 | 3020 | 0,077 | -0,015 | -0,118 | 2,625 | -0,021 | -0,017 |
| | 418 | 3,548 | 0,1 | 1897 | 0,077 | -0,015 | -0,118 | 2,625 | -0,021 | -0,017 |
| | 433 | 3,548 | 0,1 | 1479 | 0,077 | -0,015 | -0,118 | 2,625 | -0,021 | -0,017 |
| | 488 | 3,548 | 0,1 | 1324 | 0,077 | -0,015 | -0,118 | 2,625 | -0,021 | -0,017 |
| Полистирол | 438 | 3,548 | 0,1 | 4514 | 0,089 | -0,088 | -0,127 | 6,150 | -0,016 | -0,014 |
| | 448 | 3,548 | 0,1 | 3388 | 0,089 | -0,088 | -0,127 | 6,150 | -0,016 | -0,014 |
| | 458 | 3,548 | 0,1 | 2729 | 0,089 | -0,088 | -0,127 | 6,150 | -0,016 | -0,014 |
| | 468 | 3,548 | 0,1 | 2483 | 0,089 | -0,088 | -0,127 | 6,150 | -0,016 | -0,014 |
| | 478 | 3,548 | 0,1 | 2300 | 0,089 | -0,088 | -0,127 | 6,150 | -0,016 | -0,014 |
| ПВХ-пластикат | 403 | 3,548 | 0,1 | 5889 | 0,065 | -0,020 | -0,107 | 2,147 | -0,005 | -0,004 |
| | 413 | 3,548 | 0,1 | 3981 | 0,065 | -0,020 | -0,107 | 2,147 | -0,005 | -0,004 |
| | 423 | 3,548 | 0,1 | 3715 | 0,065 | -0,020 | -0,107 | 2,147 | -0,005 | -0,004 |
| | 433 | 3,548 | 0,1 | 3506 | 0,065 | -0,020 | -0,107 | 2,147 | -0,005 | -0,004 |
| | 443 | 3,548 | 0,1 | 1514 | 0,065 | -0,020 | -0,107 | 2,147 | -0,005 | -0,004 |

Поэтому целесообразно ввести в уравнение (3) вместо $\eta_{эф}$ параметр η_{ω} , характеризующий влияние ультразвука на степень «разбухания» полимерного материала.

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{\omega}}{P \cdot \Theta} \right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3} \quad (6)$$

Полученное выражение представляет математическую модель, описывающую влияние наложения ультразвуковых колебаний на «разбухание» при вальцевании полимерного материала при ультразвуковом воздействии.

Для подтверждения адекватности предложенного соотношения явлению, наблюдаемому на практике, были проведены экспериментальные исследования по оценке коэффициента «разбухания» в зависимости от геометрии канала, параметров процесса вальцевания, физических и некоторых других свойств используемого полимера, а также от частоты ультразвуковых колебаний.

Для проведения экспериментов использовалась лабораторная валковая машина, включающая в себя специальный загрузочный бункер, состоящий из цилиндрической обечайки снаружи и воронки, сходящаяся вниз в виде

прямоугольника, снизу, причем продолжение воронки является каналом. Последняя выполнена прямоугольного сечения 20x150 мм. Прямоугольный канал, выполненный из листа оцинкованного металла, служит своего рода волноводом для ультразвукового преобразователя. Цилиндрическая обечайка и воронка образуют бункер с внутренней полостью. По бокам, поперек стенкам воронки под некоторым углом, установлены сообщающиеся рукава круглого сечения. Рукава служат для установки в них теплового фена для обогрева бункера до температуры выше 130 – 140⁰ С. Для создания ультразвуковых колебаний на волновод бункера был смонтирован пьезоэлектрический преобразователь типа ПЦ-6-0,2, связанные с генератором ультразвуковых колебаний УЗГ 1 - 4. Изменение подводимой ультразвуковой частоты производилось на самом генераторе. Экспериментальные данные снимались для листов полученных на 12 каналах и трёх видов полимеров (полиэтилен, полистирол и поливинилхлоридный пластикат) в интервале температур 403 – 453 К, давлении экструзии до 6 МПа и частотах ультразвука – 18,5; 20,5; 21,6; 22,1; 23,5 кГц.

Сравнение результатов эксперимента и расчетных значений коэффициента «разбухания» К позволило выявить следующие особенности.

1) Для всех форм изученных каналов в вальцах наблюдается снижение коэффициента «разбухания» полимерных материалов при воздействии ультразвука. Расхождение между расчётными и экспериментальными данными составляет порядка 15%;

2) Частота ультразвуковых колебаний влияет и на производительность вальцов, массовый расход полимерных продуктов, при этом наилучшие результаты получены при частоте ультразвука 21,6 кГц;

3) При сравнении влияния формы сечения каналов между валками, наибольшее положительное воздействие ультразвука отмечено для каналов треугольной формы, что объясняется, очевидно, тем, что в этих каналах имеются застойные зоны и острые углы, но при воздействии ультразвука их роль уменьшается;

4) По мере увеличения давления при вальцевании полимера темп роста коэффициента «разбухания» снижается и при давлении свыше 5,0 МПа его значение практически мало изменяется. Резкое увеличение коэффициента «разбухания» при малых давлениях является характерной особенностью для исследуемых полимеров. Это подтверждается и в работах [3,4].

5) Для полимеров, изученных в работе (полиэтилен, полистирол, поливинилхлоридный пластикат), характерно уменьшение коэффициента «разбухания» с ростом длины канала, при этом имеется критическое значение длины, выше которого (110 мм) «разбухание», остается практически постоянным. Это является существенным фактором при конструировании формующего канала;

6) При увеличении температуры вальцевания наблюдается и увеличение коэффициента «разбухания», причем для полистирола увеличение К более заметно, чем для других видов изученных полимеров.

Выводы

Таким образом, полученные результаты по оценке коэффициента «разбухания» K , могут быть использованы при расчете формующего инструмента, как без, так и под влиянием ультразвуковых воздействий, при этом представленные результаты могут быть использованы при проведении процессов вальцевания, при которой изделие, вышедшее из формующей головки, не соприкасается с калибрующим инструментом и не подвергается вытяжке и механической обработке.

Литература

1. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Высшая школа, 1972. 320 с.
2. Басов Н.И., Брой В. Технология переработки пластмасс. М.: Химия, 1985. 530 с.
3. Панов А.К., Анасов А.Р. Гидродинамика потоков аномально-вязких полимерных систем в формующих каналах. Уфа: изд-во Уфим. нефт. ин-т, 1994. 260 с.
4. Киселева О.Ф., Панов А.К. Особенности проектирования формующего инструмента для изготовления полимерных изделий сложного профиля с использованием ультразвука//Сборник тр. респ. науч.-техн. конф. Уфа: «Гилем», 2001. С. 172-175.

References

1. Gul' V.E., Kuleznev V.N. Struktura i mehanicheskie svojstva polimerov. M.: Vysshaja shkola, 1972. 320 s. [in Russian].
2. Basov N.I., Broj V. Tehnologija pererabotki plastmass. M.: Himija, 1985. 530 s. [in Russian].
3. Panov A.K., Anasov A.R. Gidrodinamika potokov anomal'no-vjazkih polimernyh sistem v formujushhих kanalah. Ufa: Ufimsk. Neft. inst., 1994. 260 s. [in Russian].
4. Kiseleva O.F., Panov A.K. Osobennosti proektirovanija formujushhego instrumenta dlja izgotovlenija polimernyh izdelij slozhnogo profilja s ispol'zovaniem ul'trazvuka//Sbornik trudov resp. nauch.-tehn. konf. Ufa: "Gilem", 2001. S. 172-175[in Russian].

Сведения об авторах

Абакачева Е.М., канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов», ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

E.M. Abakacheva, Ph.D, associate professor of chair “Petrochemical equipment”, FSBEI NPE USPTU, branch in Sterlitamak, Russian Federation

Шулаев Н.С. д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Информатика, математика, физика», ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

N.S. Shulaev, Ph.D, prof., head of chair “Informatics, mathematics, physics”, FSBEI NPE USPTU, branch in Sterlitamak, Russian Federation

Фахразов А.Р., аспирант кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация

A.R. Fakhrazov, postgraduate student of professor of chair “Petrochemical equipment”, FSBEI NPE USPTU, branch in Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: elena-abakacheva@rambler.ru