

УДК 620.18:661.666.23

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ МАСС НА ОСНОВЕ КАРБИДНЫХ СИСТЕМ

© 2012 А.А. Нестеров, Л.Д. Сиротенко, Е.В. Матыгуллина, П.Н. Килина,  
В.А. Москалев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 08.11.2012

Представлены результаты численного моделирования процесса экструзии полимерного композита с использованием программного комплекса Ansys. Показано влияние геометрических параметров фильеры на распределение скоростей и напряжений формуемой массы в процессе экструзии.

Ключевые слова: *экструзия, полимерный композит, распределение скоростей и напряжений, численная модель*

Производство широкой гаммы уплотнений с использованием терморасширенного графита (ТРГ) осуществляется на предприятии ООО «Новомет-Силур» [1-3]. К изделиям из ТРГ предъявляются различные требования по форме и размерам. Вопросы формования пространственных структур из пластифицированных неорганических материалов в настоящее время технологически отрабатываются достаточно интенсивно. Совершенствование научных и технических решений в этой области направлено на достижение оптимальных составов и оптимизацию методов формования изделий, поэтому решение вопросов выбора оптимальных методов формования и состава связующих, позволяющих реализовать эти требования, а также сформировать комплекс заданных свойств получаемых изделий, имеет большое значение. Для формования изделий в виде прутков и труб наиболее перспективным является широко применяемый в переработке пластических масс метод экструзии.

*Нестеров Александр Александрович, старший преподаватель кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: pstutmk-03@rambler.ru*

*Сиротенко Людмила Дмитриевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: sirotenko@pstu.ru*

*Матыгуллина Елена Вячеславовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: matik68@rambler.ru*

*Килина Полина Николаевна, ассистент кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: polinaskripova@gmail.com*

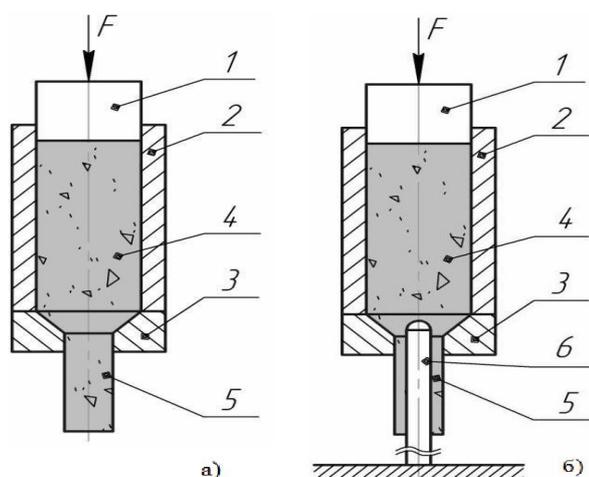
*Москалев Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование машин и технологии обработки материалов». E-mail: detali@pstu.ru*

Основные требования к процессам формования пластифицированных порошковых композиций существенно отличаются от обычной технологии переработки пластических масс. Они заключаются в том, что пластифицированные порошковые композиции с объемным содержанием полимерного и неорганического связующего 30 - 60% должны обеспечить формование изделий в широком интервале температур выгорания полимерного связующего и получение бездефектных изделий после спекания. Понимание сущности реологического поведения формуемого материала позволяет сформулировать условия, необходимые для проектирования технологической оснастки и получения конечного изделия с заданными прочностными и физико-механическими свойствами.

Формирование макроструктуры осуществляется на этапе экструзионного формования, актуальным становится выбор критериальной оценки структурно-механических характеристик пластифицированных масс, позволяющий получать бездефектные полуфабрикаты. Решение этого вопроса позволяет при использовании дисперсных систем, различных по химической природе твердой и жидкой фаз, дисперсности, характеру межфазного взаимодействия избежать большого объема экспериментальной работы, связанной с экструдированием образцов. Изучение реологических характеристик исследуемых составов предполагало рассмотрение вопросов, связанных с их формуемостью, определяющей принципиальную возможность получения из используемой массы изделий с заданными геометрическими параметрами.

Формуемость – это способность концентрированной пластичной массы принимать и сохранять любую заданную форму в условиях

сжатия со сдвигом без нарушения сплошности и дислокации первоначальной структуры. Чем больше диапазон давлений при деформации массы, в котором наблюдается это условие, тем лучше ее формуемость. Для каждого состава пластифицированной массы существует определенный интервал давлений, в области которого возможно получение материалов требуемого качества. Исходная смесь для получения полимерного композита и его дальнейшей переработки включает в качестве наполнителя терморасширенный графит с размером частиц 200-400 мкм с содержанием 50-70% и связующую композицию. Формование цилиндрических и трубчатых образцов производилось в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

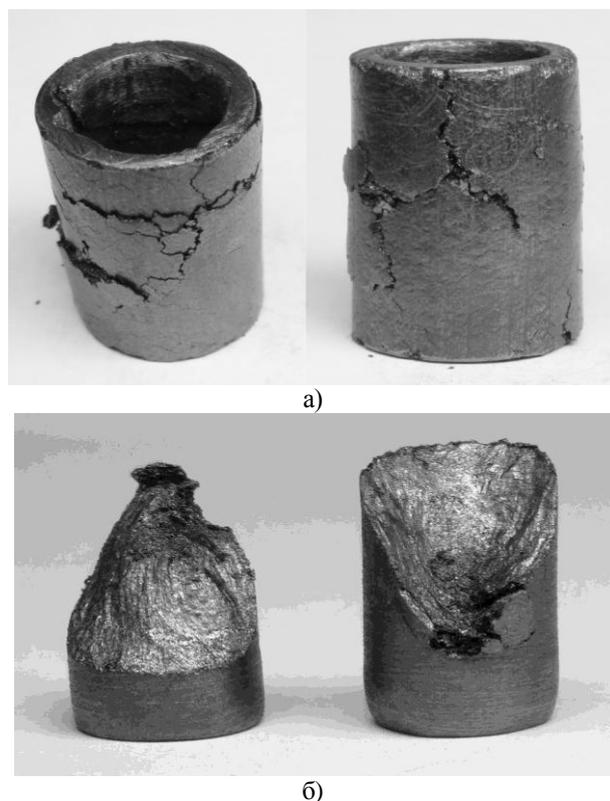


**Рис. 1.** Принципиальная схема экструзии:

а) – получение цилиндрических образцов; б) – получение трубчатых образцов: 1 – пуансон; 2 – цилиндр; 3 – экструзионная головка; 4 – исходная смесь; 5 – изделие; 6 – нижний пуансон

Основные стадии процесса получения изделий из полимерного композита методом экструзии определены в результате ранее проведенных исследований [1-3]. К ним относятся: отсев и термообработка нужной фракции ТРГ-наполнителя; перемешивание связующего и наполнителя до однородного состояния во всем объеме; поэтапное брикетирование рабочей смеси в экструдере для получения компактной заготовки; формование изделия (экструзия); термообработка полученных изделий при температуре 200-400°C в муфельной печи в течение 1 часа с целью отверждения полимерной составляющей композита и снятия внутренних напряжений. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что основной проблемой формообразования пластифицированных композиционных масс является вызываемое сдвигом материала при течении через сложные геометрии расслоение, связанное с неоднородностью

экструдата по диаметру и длине, а также в направлении, перпендикулярном к образующей корпуса, формирующего цилиндрический образец перед входом в узкий канал (рис. 2). Неоднородность формируемой массы обусловлена, в свою очередь, нестабильностью течения, вызванной, прежде всего, такими геометрическими параметрами канала, как конфигурация входа в канал и отношение длины канала к его диаметру. Правильный выбор угла входа в канал позволяет исключить «мертвые зоны» в экструдере с внешней стороны сходящегося потока во входовой канал, в то время как увеличение отношения длины канала к его диаметру позволяет уменьшить степень искажения геометрии экструдата.



**Рис. 2.** Расслоение образцов после экструзии: а) расслоение образцов по диаметру и длине; б) расслоение в направлении перпендикулярном к образующей конуса

Имеющиеся работы по экструдированию пластических масс посвящены главным образом экспериментальным исследованиям, связанным с определением технологических критериев качества материалов [4-6]. Содержание данных работ включает общие рекомендации, которые в каждом конкретном случае предполагают необходимость проведения значительного числа достаточно трудоемких экспериментов. Проектирование технологического процесса экструдирования значительно упрощается при использовании численных методов, позволяющих количественно прогнозировать влияние конструктивных

параметров формообразующей технологической оснастки на реологические процессы при экструзии. Задача течения пластифицированной массы через цилиндрические каналы решалась в осесимметричной постановке, предполагающей совместное решение уравнений непрерывности (1), физических уравнений (2) и уравнений Навье-Стокса (3):

$$\frac{\partial(V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (3)$$

где  $g_x, g_y$  – компоненты ускорения.

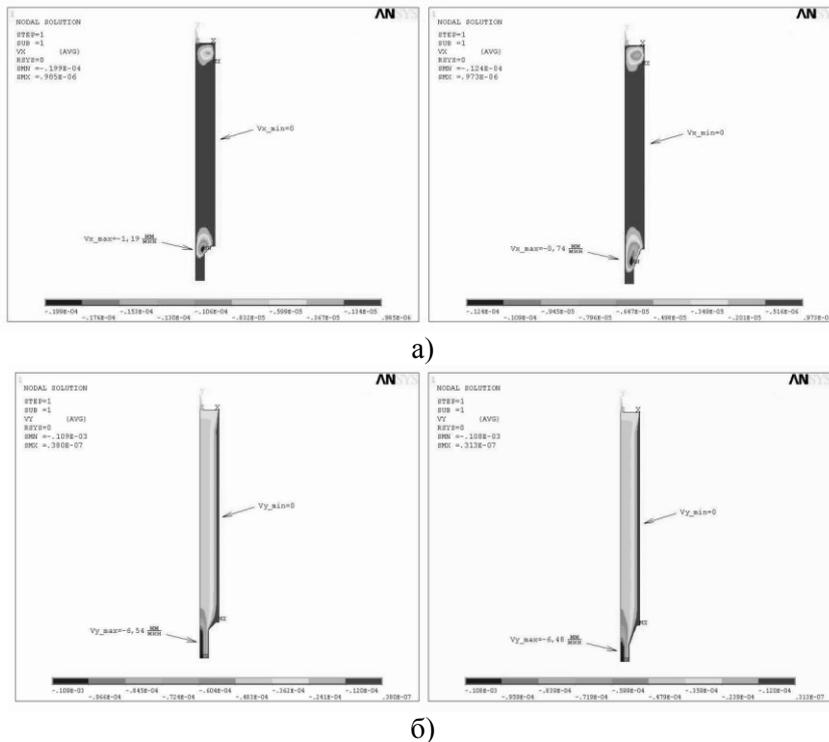
Характер течения пластифицированной массы при ее движении из области экструдера большого диаметра в канал малого диаметра при формовании цилиндрических образцов показан на рис. 3. При уменьшении конусного угла максимальная скорость  $v_x$  в направлении, перпендикулярном центральной оси канала, уменьшается в 1,6 раза, стабилизируя течение пластифицированной массы в процессе экструзии. При этом

где  $V_x, V_y$  – компоненты вектора скорости на оси  $x, y$  соответственно.

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

где  $\tau_{ij}$  – тензор напряжений;  $P$  – давление;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $u_i$  – ортогональная скорость ( $u_1=v_x; u_2=v_y$ )

незначительное уменьшение осевой скорости  $v_y$  сопровождается уменьшением области «мертвой зоны» с внешней стороны сходящегося потока во входной зоне. Незначительное увеличение сдвиговых напряжений на стенке канала при уменьшении конусного угла является результатом уменьшения длины узкой части канала в 1,6 раза.



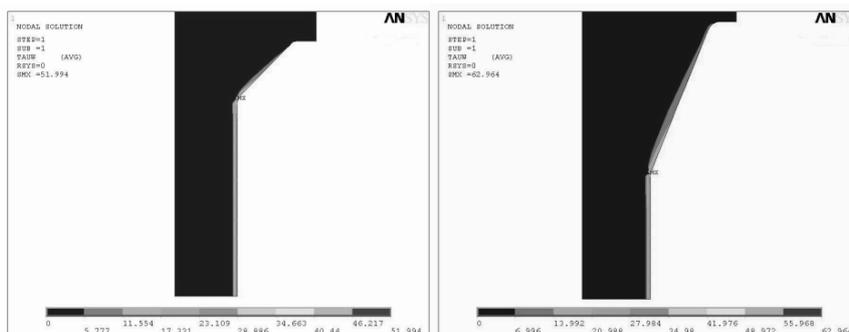


Рис. 3. Распределение скоростей  $v_x$  (а),  $v_y$  (б) и напряжений на стенке канала (в) при различных значениях конусного угла ( $90^\circ$  и  $45^\circ$ ) и длины узкой части канала

Серия численных экспериментов по изучению влияния конфигурации формообразующей области экструдера на реологические процессы была проведена также для экструдирования трубчатых образцов, при этом

варьировались геометрия конусного канала и элемента, формирующего полость трубчатых образцов, а также его размещение по ходу течения пластифицированной массы на реологические процессы в экструдере (рис. 4).

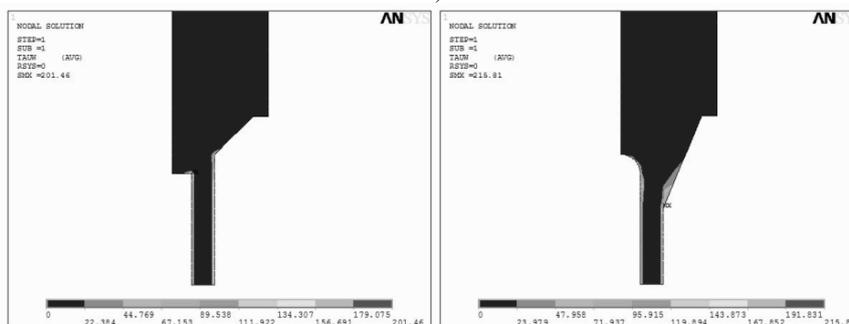
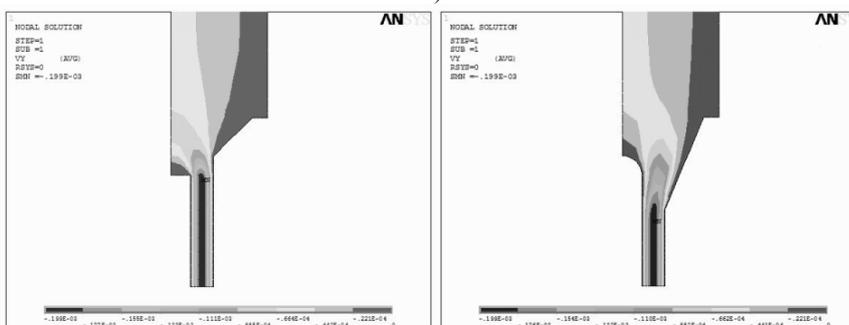
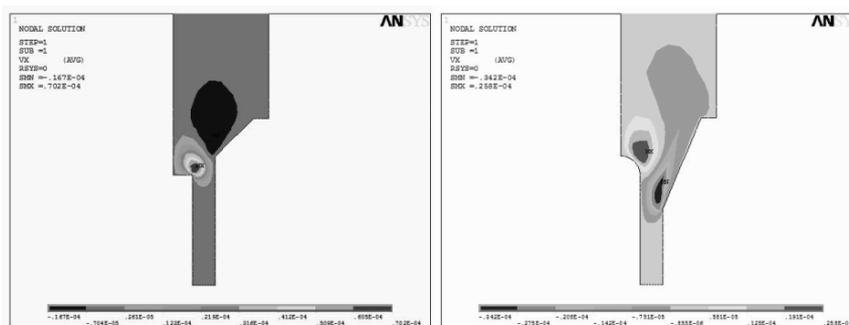


Рис. 4. Влияние геометрии формообразующего узла на реологические процессы экструзии при различных значениях конусного угла ( $90^\circ$  и  $45^\circ$ ): а) поля скоростей  $V_x$ ; б) поля скоростей  $V_y$ ; в) пристеночные сдвиговые напряжения

Сравнительный анализ параметров реологических процессов при различной геометрии элементов формообразующего узла свидетельствуют о том, что уменьшение конусного угла и смещение нижнего пуансона в направлении, обратном движению пластифицированной массы, приводит к уравниванию скоростей  $V_x$  в противоположных направлениях: от центра к периферии около нижнего пуансона и от периферии к центру около конусного профиля формообразующего узла. Если в первом случае на рис. 4 (конусный угол  $90^\circ$ ) положительная скорость  $v_x$  превосходит по абсолютной величине отрицательную скорость  $v_x$  в 4,2 раза, то во втором случае (конусный угол  $45^\circ$ ) это соотношение близко к единице и составляет 0,73. Некоторое повышение пристеночного напряжения (7%) также, как и в случае, представленном на рис. 4, связано с уменьшением длины узкого канала.

**Вывод:** полученные результаты позволяют оптимизировать технологические параметры процесса экструдирования пластифицированных масс посредством изменения геометрических характеристик формообразующего узла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Белова, М.Ю. Модифицированные уплотнения из терморасширенного графита / М.Ю. Белова, И.А. Малкова, А.С. Кольшикин и др. // Арматуростроение. 2006. Вып. №3(42). С. 67-71.
2. Белова, М.Ю. Эксплуатационные свойства изделий из терморасширенного графита с наноструктурными фазами / М.Ю. Белова, И.А. Малкова, О.Ю. Исаев // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология: сб. тез. докл. 6-й междунар. конф., 28-30 окт. 2009 г. – Троицк, 2009. С. 126-127.
3. Исаев, О.Ю. Технология и аппаратное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита / О.Ю. Исаев, Д.В. Смирнов, В.П. Лепихин и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2006. Вып. 4. С. 76-79.
4. Фишер, Э. Экструзия пластических масс. – М.: Химия, 1970. 288 с.
5. Хан, Ч.Д. Реология в процессах переработки полимеров. Пер. с англ. / Под ред. Г.В. Виноградова и М.Л. Фридмана. – М., Химия, 1979. 368 с.
6. Широков, Ю.Г. Механохимия в технологии катализаторов. – Иваново, ИГХТУ, 2005. 350 с.

## THE RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PLASTICIZED MASSES ON THE BASIS OF CARBID SYSTEMS

© 2012 A.A. Nesterov, L.D. Sirotenko, E.V. Matygullina, P.N. Kilina, V.A. Moskalev

Perm National Research Polytechnical University

Results of numerical modeling of polymeric composite extrusion process with the use of Ansys program complex are presented. Influence of extrusion hole geometrical parameters on distribution of speeds and tension of the formed mass during the extrusion process is shown.

Key words: *extrusion, polymeric composite, distribution of speeds and tension, numerical model*

Alexander Nesterov, Senior Teacher at the Department "Machines Design and Technologies of Materials Processing". E-mail: pstutmk-03@rambler.ru

Lyudmila Sirotenko, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Machines Design and Technologies of Materials Processing". E-mail: sirotenko@pstu.ru

Elena Matygullina, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Machines Design and Technologies of Materials Processing". E-mail: matik68@rambler.ru

Polina Kilina, Assistant at the Department "Machines Design and Technologies of Materials Processing". E-mail: polinaskripova@gmail.com

Vladimir Moskalev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Machines Design and Technologies of Materials Processing". E-mail: detali@pstu.ru