

Х.АЛЬТЕНБАХ, докт.техн.наук; *К.НАУМЕНКО*, канд.техн.наук,
Университет им. Мартина Лютера, Галле-Виттенберг, ФРГ;
Г.И.ЛЬВОВ, докт.техн.наук; *С.Н.ПИЛИПЕНКО*,
НТУ "ХПИ", Харьков, Украина

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА КОРОТКО-ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

У статті розглядаються модель, що дозволяє оцінювати пружні властивості й підбирати оптимальні параметри виготовлення тонкостінних конструкцій, виготовлених за допомогою лиття під тиском. Чисельне прогнозування мікроструктури коротковолокнистого композита, наведене в процесі заливальної стадії технологічного процесу, виконується за допомогою комерційної програми Moldflow Plastic Insight®. Результатом моделювання заливання, що характеризує мікроструктуру матеріалу, є тензор орієнтації другого рангу. Пружні властивості матеріалу після виготовлення локально залежать від розподілу орієнтації волокон. Визначальне рівняння формулюється за допомогою орієнтаційного усереднення для заданого тензора орієнтації. Тензор пружних сталей підраховується і переводиться у формат для аналізу напружено-деформованого стану за допомогою скінченно-елементної програми ANSYS®. Вплив технологічних параметрів виготовлення на мікроструктуру композита та його пружні властивості обговорюється на прикладах диска з центральною точкою заливання й оболонки обертавання.

The paper presents a model which allows to estimate the elastic properties of thin-walled structures manufactured by means of injection molding. The starting point is the numerical prediction of the microstructure of the short fiber reinforced composite induced during the filling stage of the manufacturing process. For this purpose the commercial program Moldflow Plastic Insight® is used. The result of the filling simulation characterizing the fiber microstructure is the second rank orientation tensor. The elastic material properties after the processing are locally dependent on the orientational distribution of fibers. The constitutive model is formulated by means of the orientational averaging for the given orientation tensor. The tensor of elastic material properties is computed and translated into the format for the stress-strain analysis based on the ANSYS® finite element code. The influence of technological parameters of manufacture on microstructure and elastic properties is discussed on examples of a centered disk and shell of revolution.

Введение. В последнее время использование полимеров армированных короткими волокнами (длина волокна около 1 мм, диаметр около 0,01 мм, массовое содержание около 15-40%) увеличилось во многих отраслях современной техники, например в авиации, автомобильной и космической промышленности. Армирование полимера короткими волокнами позволяет улучшать жесткостные и прочностные характеристики композитов по сравнению с обычными термопластиками. Однако, упругие свойства композитов существенно зависят от ориентации волокон полученной при производстве таких материалов. В свою очередь, микроструктура композита зависит от технологических параметров изготовления. Поэтому, для проектирования таких конструкции важно опираться как на анализ процесса литья, так и на анализ напряженно-деформированного состояния после изготовления, что позво-

лит подобрать оптимальные параметры изготовления.

1. Теоретическое обоснование. Приведем краткий обзор основных уравнений для потока суспензии содержащей волокна. Детальнее с этими уравнениями можно ознакомиться, например, в работах Advani и Tucker [1, 10].

1.1 Суспензия содержащая волокна. Суспензия рассматривается как вязкая несжимаемая жидкость, в которой содержатся осесимметричные твердые волокна. Введя понятие объемного содержания волокна $\xi = V_f/V$, где V_f является объемом волокон, в элементе объема V , и коэффициент волоконного размера $a = l/d$, где l и d – длина и диаметр волокна соответственно, можно классифицировать суспензии [10] как:

- разбавленные, если $\xi a^2 < 1$;
- полуразбавленные, если $1 < \xi a^2 < a$;
- концентрированные, если $a < \xi a^2$.

В первом случае предполагается, что частицы не взаимодействуют друг с другом, вторая модель предполагает, что только гидродинамическое воздействие имеет место, в третьем случае имеют место и гидродинамическое и кинематическое взаимодействия между частицами.

Ориентация каждого волокна в потоке суспензии, может быть описана единичным вектором \mathbf{p} . Однако, невозможно построить теорию, описывающую ориентацию волокон, основанную на учете движения каждого индивидуального волокна. Кроме того, ориентация волокон должна рассматриваться как вероятностный процесс. Микрографические наблюдения отлитых изделий показали, например [8], что волокна никогда не выравниваются совершенно. Чтобы учесть случайный эффект ориентации волокон, необходимо ввести функцию распределения вероятности. Следуя [6] можно определить функцию распределения $\Psi(r_c, \mathbf{p}, t)$, которая является вероятностью того, что волокно имеет определенное положение r_c и направление \mathbf{p} в момент времени t . Предположим, что волокна равномерно распределены по объему, тогда функция распределения запишется как $\Psi(\mathbf{p}, t)$.

Однако, использование функции $\Psi(\mathbf{p}, t)$ неудобно в численном анализе ориентации волокна, так как это требует больших усилий на дискретизацию области (в каждой материальной точке функция распределения зависит от двух углов Эйлера). Чтобы устранить зависимость от сферических координат, в [1] вводятся структурные тензоры четного ранга. Эти тензоры могут быть сформулированы следующим образом

$$a_2 = \int_p \Psi(\mathbf{p}) \mathbf{p} \otimes \mathbf{p} dp, \quad a_4 = \int_p \Psi(\mathbf{p}) \mathbf{p} \otimes \mathbf{p} \otimes \mathbf{p} \otimes \mathbf{p} dp, \quad \dots \quad (1)$$

Согласно определению (1) структурные тензоры удовлетворяют следующим условиям:

- условию симметрии $a_{ij} = a_{ji}$; $a_{ijkl} = a_{jikl} = a_{kijl} = a_{ilkj} = a_{klij}$,
- из свойств функции распределения следует, что $a_{ii} = 1$; $a_{ijkk} = a_{ij}$.

Используя эти определения и уравнения сохранения и движения одного

волокна, возможно вывести эволюционное уравнение для тензора a_2 [1]

$$\frac{Da_2}{Dt} = (W \cdot a_2 - a_2 \cdot W) + \lambda(D \cdot a_2 + a_2 \cdot D - 2a_4 \cdot D) + D_r(I - 3a_2), \quad (2)$$

где
$$\frac{Da_2}{Dt} = \frac{\partial a_2}{\partial t} + (v \cdot \nabla)a_2, \quad (3)$$

материальная производная,

$$D = \frac{1}{2}[(\nabla_x v)^T + \nabla_x v], \quad W = \frac{1}{2}[(\nabla_x v)^T - \nabla_x v], \quad (4)$$

тензор скорости деформации и тензор поворота, соответственно; v – вектор скорости потока,

$$\lambda = \frac{\xi^2 - 1}{\xi^2 + 1}, \quad (5)$$

коэффициент, зависящий от формы волокон,

$$D_r = C_I |D|, \quad (6)$$

ротативный коэффициент диффузии [1]. C_I – эмпирическая константа, характеризующая случайный эффект взаимодействия между волокнами.

1.2 Аппроксимация замыкания. Аппроксимация функции распределения $\Psi(p, t)$ при помощи тензоров ведет к так называемой задаче замыкания, так как правая часть любого уравнения для тензора $2n$ -го ранга (см. например, уравнение (2)) содержит тензоры $2n$ -го и $2n+2$ -го ранга. Поэтому нужно применить аппроксимацию замыкания, чтобы получить замкнутое множество уравнений. Различные виды аппроксимаций замыкания можно найти в [2,5,7,9]. Самые простые примеры аппроксимаций замыкания

– линейная

$$a_{ijkl}^L \approx -\frac{1}{35}(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \frac{1}{7}(\delta_{ij}a_{kl} + \delta_{ik}a_{jl} + \delta_{il}a_{jk} + \delta_{jk}a_{il} + \delta_{jl}a_{ik} + \delta_{kl}a_{ij}), \quad (7)$$

– квадратичная

$$a_{ijkl}^Q \approx a_{ij}a_{kl}, \quad (8)$$

– гибридная

$$a_{ijkl}^H \approx (1-f)a_{ijkl}^L + fa_{ijkl}^Q, \quad f = 1 - 27|a_2|. \quad (9)$$

Например, в Moldflow Plastic Insight используется гибридная аппроксимация.

1.3 Оценка механических свойств. Как уже отмечалось выше, ориентация волокон в термопластике имеет важное значение для механических характеристик композитного материала. Механические характеристики для волокна и матрицы композита, а также компоненты тензора ориентации a , позволяют получить компоненты тензора упругости композита [1]

$$C_{ijkl} = B_1(a_{ijkl}) + B_2(a_{ij}\delta_{kl} + a_{kl}\delta_{ij}) + B_3(a_{ik}\delta_{kl} + a_{il}\delta_{jk} + a_{jl}\delta_{lik} + a_{jk}\delta_{il}) + B_4(\delta_{ij}\delta_{kl}) + B_5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}), \quad (10)$$

где $B_1 - B_5$ являются скалярными константами, связанными с пятью независимыми компонентами тензора упругости для трансверсально-изотропного материала.

1.4 Основные уравнения начально-краевой задачи потока суспензии.

Предположим, что жидкость занимает ограниченную область Ω и имеет границу Γ . Основные уравнения, описывающие поток суспензии должны включить:

– сохранение импульса

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v - \nabla \sigma = \rho f, \quad (11)$$

где ρ – плотность жидкости, σ – тензор напряжений и f – вектор поверхностных сил,

– сохранение массы $\nabla v = 0$, (12)

– материальное уравнение [7]

$$\sigma = -pI + 2vD + 2v\xi[A_1 a_4 \cdot D + A_2(D \cdot a_2 + a_2 \cdot D) + A_3 D + 2A_4 a_2], \quad (13)$$

где p – давление, v – вязкость растворителя и $A_1 - A_4$ – коэффициенты, зависящие от концентрации суспензии. Они могут быть функциями инвариантов a_4 и D . Частные случаи этого уравнения могут быть связаны с разбавленной, полуразбавленной и концентрированной моделью суспензии, например [7],

– эволюционное уравнение, например (2),

– аппроксимация замыкания, например (9),

– граничные условия на Γ

$$v = \bar{v}, \quad (14)$$

– начальные условия

$$v(x,0) = v^0; \quad a_2(x,0) = a_2^0; \quad (15)$$

Численное решение представленных уравнений, в общем случае, довольно затруднительно. Обсуждения, связанные с численными решениями и возможными упрощениями уравнений могут быть найдены в обзорах [7,10]. Обычно используют Hele-Shaw аппроксимацию, которая применима к анализу потока на небольших интервалах, [3,7]. Hele-Shaw аппроксимация, также является базовой для коммерческих программ моделирования литья изделий из термопластических смол.

2 Численный анализ чувствительности микроструктуры композита.

Жесткость конструкций изготовленных из термопластиков армированных коротким волокном зависит от ориентации волокон. Следовательно, изменяя ориентацию волокон возможно создание изделий с одинаковой геометрией и различной жесткостью.

Провести анализ чувствительности микроструктуры композита для сложной геометрии и выделить тенденции влияния технологических параметров изготовления на ориентацию волокон достаточно сложно. Поэтому необходимо воспользоваться простой геометрией и выделить факторы влияющие на ориентацию волокон. В качестве такой геометрии взят диск с центральной точкой заливки. Для диска использовались следующие

геометрические параметры: радиус $R = 76,2$ мм, толщина $h = 3,18$ мм. (см. рис.1).

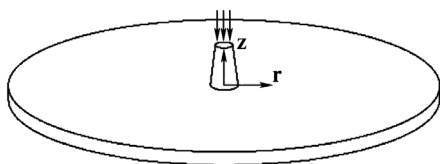


Рис. 1. Диск с центральной точкой заливки

Существуют и другие факторы влияющие на ориентацию волокон, например использование различных материалов, а также вариация расположения и типа литника. Вариация этих параметров несомненно вносит существенное изменение в микроструктуру композитного материала. Однако, такие способы влияния являются достаточно дорогостоящими и не всегда возможна их конструктивная реализация, поэтому они используются редко.

Была проведена серия расчетов с использованием программного комплекса Moldflow Plastics Insight (далее MPI) при различных температурах литейной формы и расплава, а также времени заливки. В качестве материала, взят материал: Du Pont Zytel 70G43L с 43 % стеклянных волокон. Для расчета данной модели была использована конечно-элементная сетка содержащая 1632 элемента.

Как отмечено выше, ориентация волокон определяется тензором второго ранга. Рассмотрим распределение первого главного значения тензора ориентации по толщине диска при изменении технологических режимов. В качестве контрольных взяты две точки расположенные на радиальном удалении от центра диска: $R_1 = 36$ мм, $R_2 = 64$ мм.

Первым этапом работы проведены расчеты при различных температурах расплава. Параметры расчетов:

- $T_{inlet} = 267, 277, 287, 305$ °C;
- $T_{wall} = 74$ °C;
- $t_{fill} = 2,5$ с.

Результаты расчетов в виде графиков распределения первого главного значения тензора ориентации по толщине диска представлены на рис. 2.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о том, что изменение температуры расплава практически не влияет на микроструктуру композитного материала. Это особенно хорошо видно во второй контрольной точке $R_2 = 64$ мм.

Вторым этапом работы проведены расчеты при различных температурах литейной формы. Параметры расчетов:

- $T_{inlet} = 277$ °C;
- $T_{wall} = 64, 74, 84, 120$ °C;
- $t_{fill} = 2,5$ с.

Необходимо определить параметры которые могут повлиять на ориентацию волокон. Основными параметрами в процессе изготовления таких композитных материалов являются:

- Температура расплава T_{inlet} ,
- Температура литейной формы T_{wall} ,
- Время заливки t_{fill} .

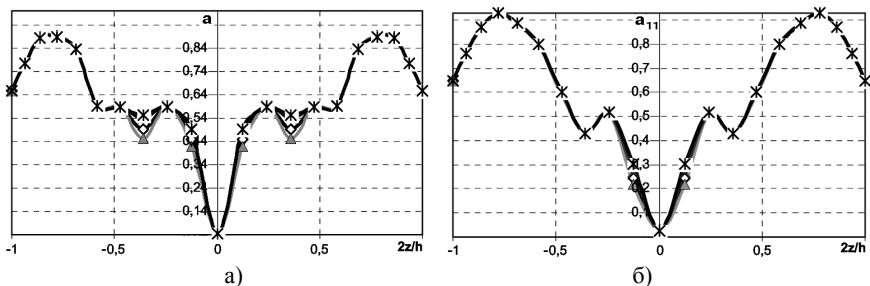


Рис. 2. Вариация температуры расплава. а) точка R_1 , б) точка R_2 .
 ▲ – $267\text{ }^{\circ}\text{C}$, ◇ – $277\text{ }^{\circ}\text{C}$, × – $287\text{ }^{\circ}\text{C}$, * – $305\text{ }^{\circ}\text{C}$.

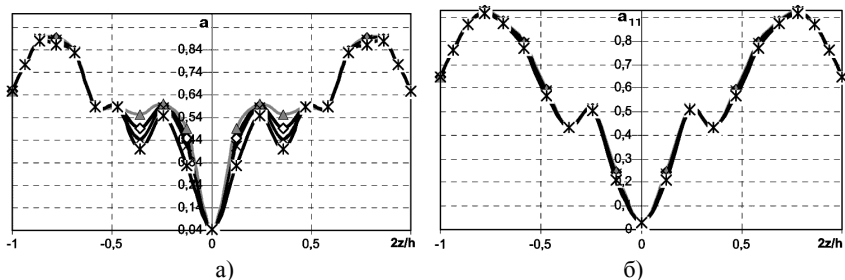


Рис. 3. Вариация температуры литейной формы. а) точка R_1 , б) точка R_2 .
 ▲ – $64\text{ }^{\circ}\text{C}$, ◇ – $74\text{ }^{\circ}\text{C}$, × – $84\text{ }^{\circ}\text{C}$, * – $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты расчетов в виде графиков распределения первого главного значения тензора ориентации по толщине диска представлены на рис. 3.

Результаты расчетов иллюстрируют, что изменение температуры литейной формы, так же, практически не влияет на микроструктуру композитного материала.

Третьим этапом работы проведены расчеты при вариации времени заливки в форму. Параметры расчетов:

- $T_{\text{inlet}} = 277\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_{\text{wall}} = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $t_{\text{fill}} = 0,5; 2; 3; 5\text{ с}$.

Результаты расчетов в виде графиков распределения первого главного значения тензора ориентации по толщине диска представлены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что изменение времени заливки влияет на микроструктуру композитного материала. Это хорошо наблюдается в двух контрольных точках.

На основе проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что качественно повлиять на микроструктуру композитного материала, представляется возможным только варьируя параметр времени заливки в форму. Остальные параметры практически не влияют на микроструктуру. Эти параметры необходимо выбирать на основе рекомендаций производителя материала.

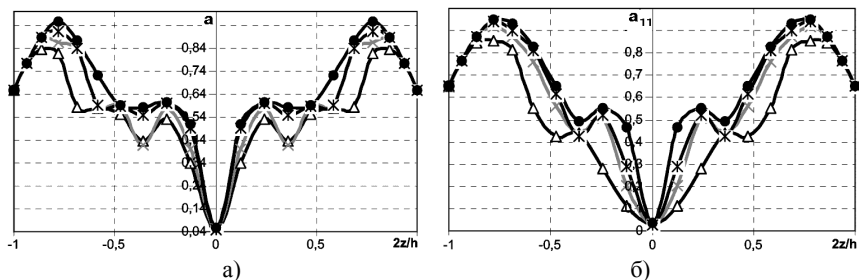


Рис. 4. Вариация времени заливки в форму. а) точка R_1 , б) точка R_2 .

Δ – 0,5 с, \times – 2 с, \ast – 3 с, \bullet – 5 с

3 Численный анализ чувствительности упругих свойств тонкостенной оболочки вращения. Проведенный численный анализ чувствительности микроструктуры композита к технологическим параметрам изготовления для простой геометрии показал, что только время заливки (т.е. скорость потока) влияет на ориентацию волокон. В данной части работы покажем как изменение ориентации волокон в следствии вариации времени заливки повлияет на напряженно-деформированное состояние. Построена модель оболочки представленной на рис. 5. Модель разбита на 7458 элементов, тип элемента SHELL91. Нагрузка: равномерное внутреннее давление $q = 8$ МПа, граничные условия: защемленный фланец.

С помощью разработанной методики анализа подобных изделий, проведена серия MPI-ANSYS расчетов.

С помощью программного комплекса Moldflow Plastics Insight произведены расчеты ориентации волокон для данной модели при следующих параметрах:

- $T_{inlet} = 290$ °C;
- $T_{wall} = 90$ °C;
- $t_{fill} = 0,2; 0,5; 1$ с.

В качестве материала взят: Du Pont Zytel 70G43L с 43 % стеклянных волокон. Распределение ориентации волокон представлено на рис. 6. Получив на основе ориентации волокон упругие характеристики для этой модели, они были переданы в ANSYS и произведены расчеты статического нагружения. Результаты для перемещений, напряжений в цилиндрической системе координат приведены в таблице.

Результаты для максимальных значений прогиба и напряжений в оболочке вращения при вариации времени заливки

Время заливки, с	w_{max} , мм	$\sigma_{r_{max}}$, МПа	$\sigma_{\theta_{max}}$, МПа	$\sigma_{z_{max}}$, МПа
0,2	2,747	521	395	266
0,5	2,776	507	319	260
1	2,785	488	318	269

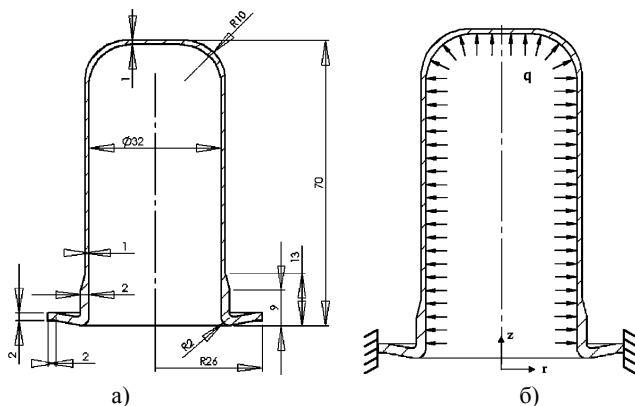


Рис. 5. Геометрия оболочки вращения (а) и модель нагружения (б)

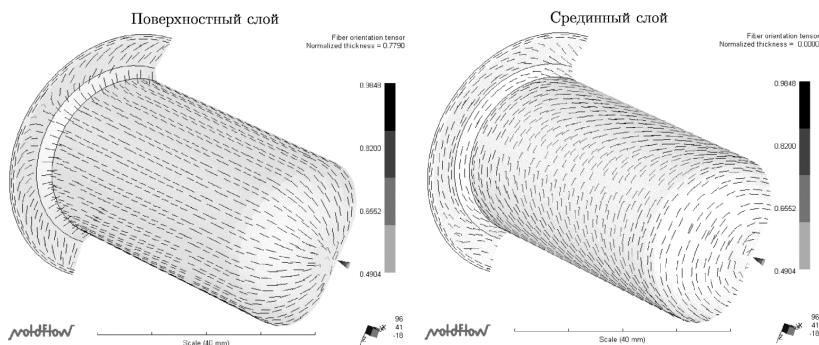


Рис. 6. Ориентация волокон

Полученные результаты иллюстрируют, что изменяющаяся микроструктура композита, в следствии вариации времени заливки, оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние. Изменение времени заливки с 0,2 до 1 секунды привело к снижению радиальных (на 6 %) и окружных (на 19 %) напряжений. Увеличение времени заливки так же приведет к снижению остаточных напряжений в детали в следствии уменьшения давления при заливке.

Качественно картина напряжений и перемещений при этом не изменяется, поэтому для наглядности, на рис. 7, представлено распределение напряжений только для одного случая: $t_{\text{fill}} = 0,2$ с.

Как уже отмечалось ранее, повлиять на ориентацию волокон, а следовательно и на напряженно-деформированное состояние можно еще несколькими способами. Таковыми являются использование другого материала и изменение расположения и типа литника. Оба эти способа являются достаточно дорогостоящими. Использование последнего способа нецелесообразно, так как процесс разработки и изготовления новой формы помимо большой стои-

мости еще и не всегда возможен. При разработке форм для деталей подобных рассматриваемой, литник располагают на оси вращения для предотвращения дефектов в процессе изготовления (воздушных раковин, линий соединения и т.д.). Для данной детали такая точка только одна и следовательно изменить положения литника не предоставляется возможным.

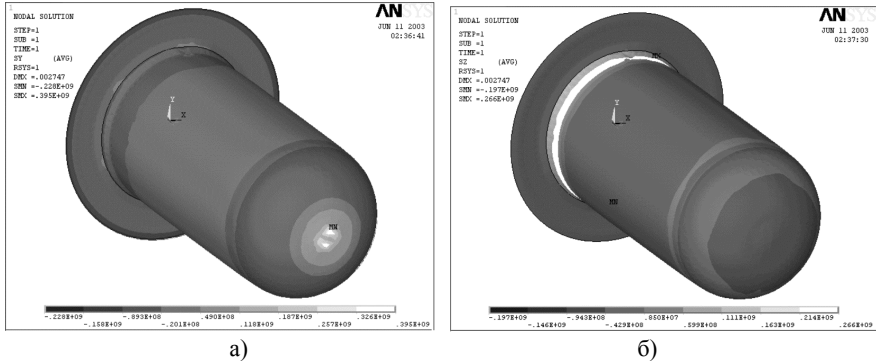


Рис. 7 – Распределение окружных и осевых напряжений для случая $t_{\text{fill}} = 0,2 \text{ с}$
(а – окружные напряжения σ_{θ} , б – осевые напряжения σ_z)

Закключение. Предложенная схема позволяет для известных условий нагружения конструкции провести анализ влияния условий изготовления на ее упругие свойства. Путем вариации условий процесса, например способа заливки, скорости заливки и геометрии формы, можно повлиять на микроструктуру ориентации волокон и следовательно, на локальные упругие свойства материала. Таким образом, для заданных условий работы конструкции под нагрузкой возможно на стадии проектирования подобрать оптимальные технологические параметры изготовления.

Список литературы: 1. Advani S.G., Tucker C.L. The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fibers composites // J.Rheol. 1987 № 31(48). – С. 751-784. 2. Advani S.G., Tucker C.L. Closure Approximations for Three-Dimensional Structure Tensors // J.Rheol. 1990. № 34(3). – С. 367-386. 3. Altan M.C., Subbiah S., Pipes R.B. и др. Numerical prediction of three-dimensional fiber orientation in Hele-Shaw Flows // Polym.Eng.Sci. 1990. № 30(14). – С. 848-859 4. Bay R.S., Tucker C.L. Fiber orientation in simple injection moldings. Part 2: Experimental results // Polym.Comp. 1992. № 13. – С. 332-341. 5. Cintra J.S., Tucker C.L. Orthotropic Closure Approximations for Flow-Induced Fiber Orientation // J.Rheol. 1995. № 39(6). – С. 1095-1122. 6. Dinh S.M., Armstrong R.C. A Rheological Equation of State for Semiconcentrated Fiber Suspensions // J.Rheol. 1984. № 28(3), С. 207-227. 7. Dupret F., Verleye V. Modelling of the Flow of Fiber Suspensions in Narrow Gaps. In: Advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids // Elsevier, 1999. – С. 1347-1398. 8. Mlekusch B. Fibre Orientation in Short-Fibre-Reinforced Thermoplastics II. Quantitative Measurements by Image Analysis // Comp. Sci. Techn.1999. № 59. – С. 547-560. 9. Munganga J.M.W., Reddy B.D., Diatezua K.J. Aspects of the Thermodynamic Stability of Fibre Suspension Flows. J. of Non-Newtonian Fluid // Mech.2000. № 92. – С. 135-150. 10. Tucker C.L., Advani G. Processing of Short-Fiber Systems. In: Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing. // Elsevier. 1994. – С. 147-202.

Поступила в редколлегию 2.07.2003