УДК 621.74.01

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО ТЕНЗОРУ ОРИЕНТАЦИИ

[1]Ковалькова Е.А., [2]Хаймович И.Н.

[1]ФГАОУВО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», Самара, Россия, (443086 Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34), e-mail:kovalkovakaterina92@gmail.com
[2]ЧОУ ВО «Международный институт рынка», Самара, Россия (443030. Самара, ул.Г.С. Аксакова, 21), e-mail: kovalek68@mail.ru

Настоящая статья посвящена оптимизации процесса заполнения пресс-формы коротковолокнистым полимерным композиционным материалом ПЭЭК. Рассматривается подробно новый метод инжекционного литья, относящийся к литью под давлением, в котором используются новое оборудование и новый материал. Для определения параметров инжекционного литья используется метод оптимизации процесса армирования. Основной интегрированной характеристикой процесса инжекционного литья является тензор ориентации внутренних волокон материала. Для принятия решений в области прогноза качества поверхностей деталей, полученных из ПКМ, метод Тагутти показал наибольшую точность прогноза. В статье апробирована технология виртуального моделирования инжекционного литья в CAE – системе, позволяющая получить распределение армирующего волокна по объему литой заготовки в зависимости от технологических режимов и литниковой системы пресс-формы, разработана методика оценки качества литого изделия из ПКМ по конструкционной прочности на основе анализа ориентации армирующего волокна, апробирована методика определения рациональных режимов инжекционного литья на основе робостного планирования по Тагучи и анализа качества литого изделия из ПКМ по виртуальным моделям, разработанные модели и методики верифицированы при проведении натурных экспериментов по инжекционному литью пластин из ПКМ с последующим испытаниями на разрывных машинах.

Ключевые слова: инжекционное литьё, композиционные материалы, полиэфирэфиркетон, статистические методы, метод Тагутти

OPTIMIZATION OF REINFORCEMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR ORIENTATION TENSOR

[1]Kovalkova E.A., [2]Khaimovich I.N.

[1]VPO "Samara State Aerospace University (National Research University) ", Samara, Russia (443021, Samara, Moscow shosse, 34), e-mail:kovalkovakaterina92@gmail.com
[2]POU VO "International Market Institute", Samara, Russia (443030. Samara, ul.G.S. Aksakova, 21), e-mail: kovalek68@mail.ru

This article is devoted to the optimization of the process of filling the mold of short PEEK polymer composites. We consider in detail a new method for injection molding related to injection molding, which uses the new equipment and new material. To determine the parameters of the injection molding method is used to optimize the process of reinforcement. The main characteristic of the integrated process of injection molding is a tensor of the internal orientation of the fibers. For decision-making in the forecast surface quality of parts produced from composite materials, the method Tagutti showed the greatest predictive accuracy. Article proven technology of virtual simulation of the injection molding in CAE - system, allowing us to obtain the distribution of the reinforcing fiber in terms of the cast billet, depending on the technological conditions and the gating system of the mold, the methods of assessing the quality of the molded article of the FRP for structural strength based on analysis of the orientation of the reinforcing fiber, tested method of determination of rational modes of injection molding based on the Taguchi robostnogo planning and analysis of the quality of the molded article from PC to the virtual models, developed models and methods were verified during field experiments on the injection molding of the FRP plates, followed by tests on the tensile testing machine.

Keywords: injection molding, composite materials, polyetheretherketone, statistical methods, the method Tagutti

Новым методом, применяемым в авиационном машиностроении, на сегодняшний день является метод инжекционного литья из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Данный метод подробно рассматривается в статьях иностранных авторов [5,7-10].

Метод исследования

Для анализа процесса инжекционного литья была разработана методика определения параметра качества армирования полимерного композиционного материала по усредненным значениям тензора ориентации армирующего волокна [1,2], которая состоит из следующих этапов:

1. Выбор характерных сечений для анализа картины распределения армирующего волокна.

1.1 Разбиение пластины на характерные области A_{ij}, где i - индекс долевого сечения плоскости пластины в плане; j - индекс поперечного сечения плоскости пластины в плане.

2. Расчет усредненного по объему значения тензора ориентации для группы поименованных областей А.

В связи с тем, что тензор ориентации меняется в основном в долевом направлении для оценки параметров качества были выбраны 3 долевые полосы (центральная и 2 периферийные), в которых рассматривается направление ориентации волокон.

Результаты имитационного моделирования ориентации волокна в сечении представлены в виде распределения по площадям, окрашенным в различные цвета. Каждому цвету соответствует определенная вероятность значения тензора ориентации. Цветовая шкала определена в диапазоне от 0 до 1 значений тензора ориентации.

1. Определение средней величины тензора ориентации Fa для каждой области $A_{i,j}$:

$$F_a = \frac{\%кр + \%зел + \%желт + \%гол + \%син}{100\%}, \qquad (1)$$

где $\%кр$ - процент площади красного цвета, $\%зел, \%желт, \%гол, \%син$ - аналогично для зеленого, желтого, голубого, синего цветов.

2. Определение среднего значения тензора ориентации для группы долевых областей - центральной и периферийной (математическое ожидание в каждой строке j):

$$M(j) = \sum_{i=1}^{N} \frac{Fm(i;j)}{N} \qquad (2)$$

3. Построчно ($j = in\,\mathrm{var}$) для каждой группы долевых областей производим расчет дисперсии, используя усредненные в пределах области A_{ij} ($i = \mathrm{var}$) величины тензора ориентации $\sigma_{Fa} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=N} \frac{(Fm(i,j) - M(j))^2}{N}}$ (3).

4. Определяем характеристики качества армирования дискретным волокном.

Для каждой долевой области (центральная и 2 периферийные области) структура армирования в зависимости от технологических режимов литья будет наилучшей, если рассчитанное математическое ожидание по (.2) средней величины тензора ориентации будет максимальным, а дисперсия этой величины, рассчитанная по зависимости (3), будет минимальной.

Таким образом, в качестве параметров качества по 3-м рассмотренным областям ($j=1,2,3$) можно предложить: а) математическое ожидание $M(j)$ среднего значения тензора ориентации; б) величину $1-\sigma_{Fa}$, где σ_{Fa} - дисперсия среднего значения тензора ориентации.

В этом случае к параметрам качества можно применить принцип оценки Тагучи «больше-лучше».

Данная методика была апробирована для робастного плана Тагучи из серии 18 опытов (таблица 1).

Картина ориентации армирующего волокна (тензор ориентации) в меридиональном сечении для 2-х из 18 режимов робастного плана Тагучи приведена на рисунке 1.

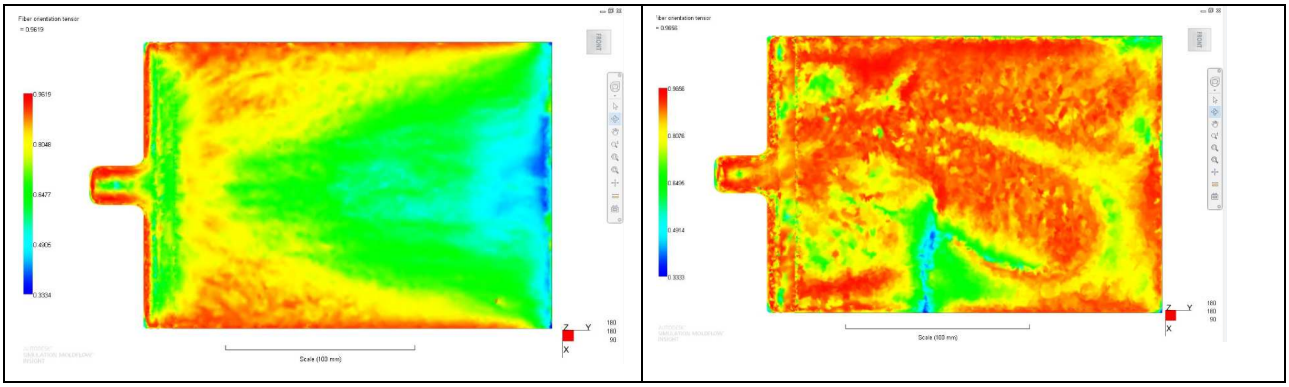

Рисунок 1. Ориентация волокна для 16 и 18 технологических режимов литья

Таблица 1

План эксперимента для 8 факторов, из которых количество двухуровневых факторов -1, двухуровневых -7.

Design Summary (Spreadsheet1d)
L18: 1 factor with 2 levels; 7 factors with 3 levels
(Factors are denoted by numbers)

Standard Run	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Сводная таблица 2 содержит технологические режимы в соответствии с уровнями плана и результаты расчета параметров качества Eta = – 10 x log10 [(1/n) x (1/yi2)] метода Тагучи. Видно, что в соответствии с принципом решения проблемы «больше-лучше» из 18 режимов виртуального эксперимента оптимальным будет тот, для которого значение Eta больше. Это будет режим 18: Eta(max)=-3,3933. Следовательно, параметры этого режима можно считать оптимальными. Данный метод может быть реализован с использованием методик САПР [3,4,6].

Проведем верификацию разработанной методики определения рациональной области инжекционного литья на натурном эксперименте. По результатам эксперимента выбирался оптимальный режим инжекционного литья. Под оптимальным понимался такой режим, который обеспечивает наибольшее значение механических характеристик при минимуме их случайного разброса.

Таблица 2

Технологические режимы

Design Summary (Spreadsheet1d)

Run	**Давление на шнеке, бар 1**	Давление подпрессовки, бар 2	Скорость впрыска, см/сек 3	Время опрессовки, с 4	Температура на шнеке, С 5	Время цикла, с. 6	Относительный объем впрыска, см3 7	V0 8	Eta
1	1000	1000	7	20	340	100	30	1	-13,3780
2	1000	1000	20	25	355	120	60	2	-15,3366
3	1000	1000	30	30	370	140	70	3	-15,4776
4	1000	1250	7	20	355	120	70	3	-15,4051
5	1000	1250	20	25	370	140	30	1	-16,5643
6	1000	1250	30	30	340	100	60	2	-15,9445
7	1000	1500	7	25	340	140	60	3	-9,3400
8	1000	1500	20	30	355	100	70	1	-6,9306
9	1000	1500	30	20	370	120	30	2	-9,0613
10	1250	1000	7	30	370	120	60	1	-10,7122
11	1250	1000	20	20	340	140	70	2	-6,8594
12	1250	1000	30	25	355	100	30	3	-9,3931
13	1250	1250	7	25	370	100	70	2	-10,0969
14	1250	1250	20	30	340	120	30	3	-9,2335
15	1250	1250	30	20	355	140	60	1	-7,1568
16	1250	1500	7	30	355	140	30	2	-10,5963
17	1250	1500	20	20	370	100	60	3	-9,8212
18	1250	1500	30	25	340	120	70	1	-3,3933

Общее количество исследуемых режимов – 12. Режимы отличаются скоростью впрыска, давлением и температурой на шнеке, давлением подпрессовки и относительным объемом впрыска. Каждому режиму литья ставится в соответствие номер пластины. Из каждой пластины вырезается 5 образцов (рисунок 2) 4 из 5 образцов испытываются стандартно на растяжение (рисунок 3) с монотонным нагружением вплоть до разрушения согласно, оставшийся – на повреждаемость. В таблице 3 представлено краткое описание режимов литья, а также приведены статистические данные по прочности образцов, получаемых для каждого из 12 режимов. Зеленым цветом отмечены наилучшие режимы, красным – наихудшие.

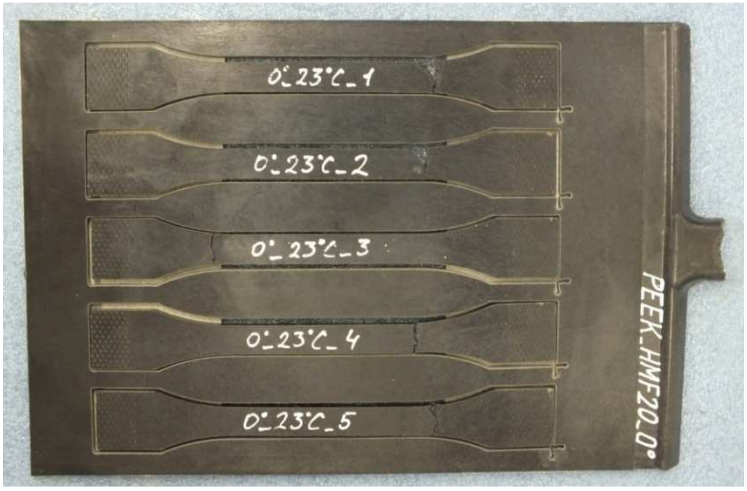

Рисунок 2. Фотография отлитой пластины с вырезанными образцами после испытаний

Рисунок 3. Фотография образца в испытательной машине

Результаты исследования

В результате проведенных исследований (таблица3) было выявлено, что наибольшей прочностью и жесткостью обладают образцы, вырезанные из пятой пластины, а наименьшей – из девятой. На рисунке 4 приводится сравнение диаграмм деформирования образцов, полученных на пятом и девятом режиме.

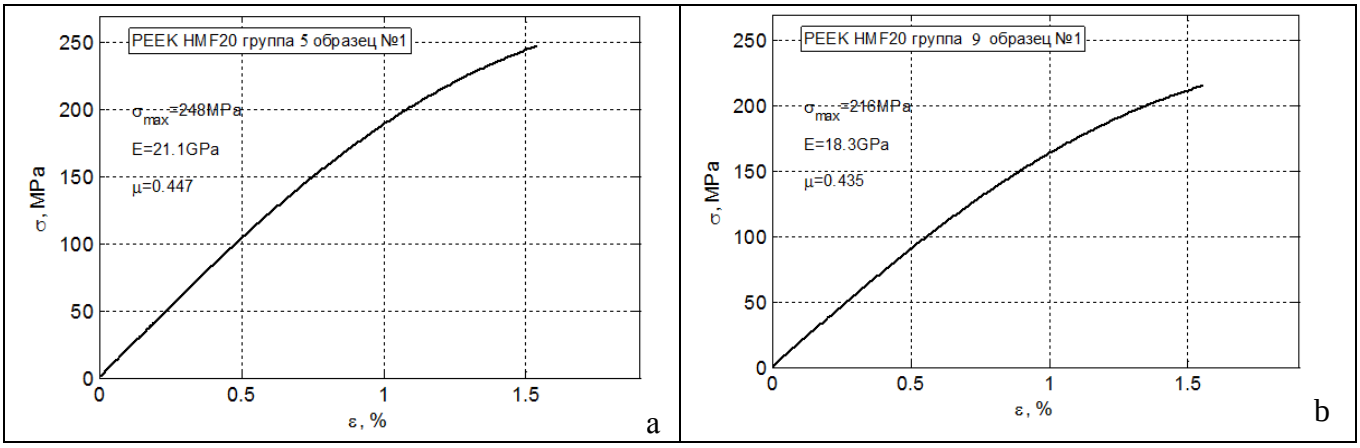

Рисунок 4. Сравнение диаграмм деформирования образцов, полученных на пятом (a) и девятом (b) режиме.

Испытаниями на повреждаемость было также установлено, что в целом, независимо от режима (за исключением 12-го) материал демонстрирует стойкость и сопротивляемость к накоплению и развитию в нем повреждений. Падение секущего модуля упругости (рисунок) при уровне нагрузки 90 % от номинального предела прочности не превышало 0.81 %.

В результате, эксперименты подтвердили адекватность разработанной методики расчета разброса тензора ориентации волокна по данным виртуальной модели литья с целью оценки качества литого изделия по критерию прочности.

Таблица 3

Рассматриваемые режимы инжекционного литья

№ режима	Давление на шнеке, атм.	Давление подпрессовки, атм.	Скорость впрыска	Время подпрессовки, с.	Температура на шнеке, С	Время цикла, с.	Относительный объем впрыска	Средняя прочность, МПа	Ст. откл. МПа
1	1500	1500	50	30	370	120	60	200.95	50.43
2	1500	1500	30	30	360	120	60	204.29	40.18
3	1500	1500	20	30	360	120	60	218.84	28.63
4	1500	1500	10	30	340	120	60	226.12	21.56
5	1500	1500	7	30	340	120	60	228.69	16.22
6	1500	1500	15	30	340	120	60	213.29	28.71
7	1500	1500	15	30	345	120	60	207.34	31.19
8	1000	1000	15	30	345	120	60	204.64	34.86
9	1000	1000	15	30	350	120	80	174.90	36.93
10	1000	1000	15	30	350	120	80	190.50	29.31
11	1000	1500	15	30	350	120	70	195.89	36.19
12	1000	1500	15	30	350	120	70	208.43	31.04

Основные результаты и выводы

1. Апробирована технология виртуального моделирования инжекционного литья в CAE – системе, позволяющая получить распределение армирующего волокна по объему литой заготовки в зависимости от технологических режимов и литниковой системы пресс-формы.
2. Разработана методика оценки качества литого изделия из ПКМ по конструкционной прочности на основе анализа ориентации армирующего волокна
3. Апробирована методика определения рациональных режимов инжекционного литья на основе робостного планирования по Тагучи и анализа качества литого изделия из ПКМ по виртуальным моделям.
4. Разработанные модели и методики верифицированы при проведении натурных экспериментов по инжекционному литью пластин из ПКМ с последующим испытаниями на разрывных машинах.

Список литературы

1. Ковалькова Е. А. Исследование метода инжекционного литья из полимерных композиционных материалов статистическими методами: Автореферат дис. на зв. магистра. - Самара,СГАУ,2015.-16с.
2. Хаймович И.Н., Степаненко И.С. Исследование процесса заполнения пресс-формы при инжекционном литье лопаток из композиционных материалов//Фундаментальные исследования.-2015.- №7 (часть 2).-С. 293-297.
3. Хаймович И.Н., Фролов М.А., Ковалькова Е.А., Дровянников В.И. Совершенствование организации литейного производства авиационного предприятия на основе имитационного моделирования//Фундаментальные исследования.-2015. -№ 2 (часть 14) .- С. 3023-3028.
4. Хаймович, И.Н., Хаймович, А.И. Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых сплавов//Известия вузов. Цветная металлургия. -2015. -№2. -С.37-43.
5. Fetecau C., Postolache I., Stan F. Numerical and experimental study on the injection molding of a thin-wall complex part // ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference.- 2008. -Vol. 1. -P. 85-93.
6. Haimovich I.N. Computer aided design of blanks and dies compressor blades of aircraft engines//Russian Aeronautics (Iz VUZ).- 2014.-N 2.-P. 72-80.
7. Min B.H. A study on quality monitoring of injection-molded parts // Journal of Materials Processing Technology.-2003.- Vol. 136. No 1–3.- P. 1–6.

8. Sadeghi B.H. A BP-neural network predictor model for plastic injection molding process // Journal of Materials Processing Technology. -2000.- Vol. 103. Issue 3.- P. 411–416.
9. Wang Y., et al. Injection molding simulation of plastic impeller and process parameters optimization // Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering. -2013. -Vol. 31. No. 9. -P. 747-751.
10. Yin Y.F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover // Advanced Materials Research. -2012. -Vols. 602-604.- P. 1930-1933.

Рецензенты:

Дровянников В.И., д.э.н., проректор по учебной и воспитательной работе ЧОУ ВО «Международный институт рынка», г. Самара;

Макаров А.А., д.т.н., проф. каф. информационных систем и компьютерных технологий ЧОУ ВО «Международный институт рынка», г. Самара.