

Управление реологическим поведением пропитываемого пучка волокон в процессе пултрузии

77-48211/640967

11, ноябрь 2013

Рапохина С. С., Муранов А. Н., Михайловский К. В., Семенов Б. И.

УДК 620.1::[678.026+678.027.9]

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Rapokhina@yandex.ru

MuranovAlecs@mail.ru

Konst_Mi@mail.ru

SeменовBI@bmstu.ru

Введение

Критический аспект для достижения успеха в конструировании материалов – это доступность оценочных моделей, которые предсказывают взаимосвязь «производство – микроструктура – свойства» в изучаемых материальных системах. К сожалению, при производстве композиционных материалов (КМ), армированных непрерывными волокнами, многие базы знаний по материалам и технологиям построены на основе информации, полученной эмпирическим путем, т.е. методом проб и ошибок. Как результат, в технологической цепочке «филамент – нить – стержень» до настоящего времени не формулируются научно обоснованные ограничения на параметры качества создаваемого продукта. Как следствие, – в полной мере не реализуется комплекс возможных свойств изделия, что не приемлемо, особенно, в элементах конструкций ракетно-космической техники.

Основой любой конструкции ракетно-космической техники из волокнисто-армированных КМ является каркас. Выбор схемы формирования каркаса в КМ определяется следующими факторами: адаптацией анизотропии механических и теплофизических свойств каркаса к действующим нагрузкам и геометрии изделия; формированием такой пористой структуры каркаса, которая позволяет равномерно распределить в ней превращаемый в матрицу прекурсор в процессе жидкофазного или газофазного заполнения им несплошностей каркаса и уплотнения формируемого матричного материала.

Для тонкостенных конструкций обычно применяются каркасы следующих типов: слоистые структуры, образованные слоями мягкой ткани, прошитыми нитью

перпендикулярно слоям; структуры, полученные методом намотки нитей, жгутов, лент; структуры с пространственным плетением. В толстостенных конструкциях применяют трех- и четырех- направленные каркасы, собираемые из жестких стержней (Рисунок 1).

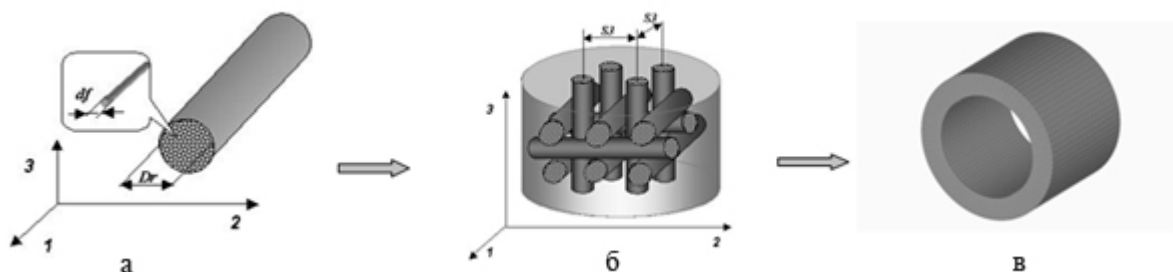


Рисунок 1 - Масштабные уровни рассмотрения композита [1]:

а – представительный элемент композита первого уровня;
б – представительный элемент материала второго уровня; в – готовое изделие

Для достижения более высокого коэффициента реализации свойств в системах «волокно – нить – стержень» и «волокно – нить – ткань» используют различные технологические приемы, направленные на сохранение целостности волокон, выбирают специальную оснастку и оборудование, позволяющие минимизировать разнородность волокон и формировать задаваемое наполнение и геометрическое расположение волокон в пучке, применяют смазывающие технологические жидкости (аппреты и замасливатели). Пултрusion пучка волокон через расплав матричного материала – один из важнейших технологических процессов, позволяющих решать названные задачи. Физические явления, возникающие при перемещении вязкой жидкости и наполняющих её волокон через сложные формообразующие каналы, также как и другие эффекты взаимодействия волокна и матрицы, во многом определяют свойства получаемого материала и должны найти отражение в модели прочности (прогнозируемой диаграмме деформирования пучка волокон) структурного элемента первого масштабного уровня (Рисунок 1).

Параметры формования оказывают значительное влияние на целостность композитного изделия, совместность работы компонентов материала и конечные свойства материала и изделия в целом. В связи с этим, в данной работе, изучалось, как и какие реологические эффекты и параметры процесса пултрusion непрерывной нити влияют на дефектность структуры стержня, и в целом, на его прочность.

Моделирование процесса изготовления стержней с учетом его реологических особенностей

Математическая модель (ММ) технологического процесса (ТП) изготовления стержневых армированных каркасов (АК), представляет собой совокупность уравнений и ограничений на те или иные аргументы уравнений в виде конкретных значений или неравенств, описывающих взаимосвязь между векторами внутренних, внешних и выходных параметров [2], [3]. Для решения задач моделирования и оптимизации их полезно представить в виде структурной математической модели ТП, как, например, предложено в работе [4] в виде схемы, показанной далее (Рисунок 2).

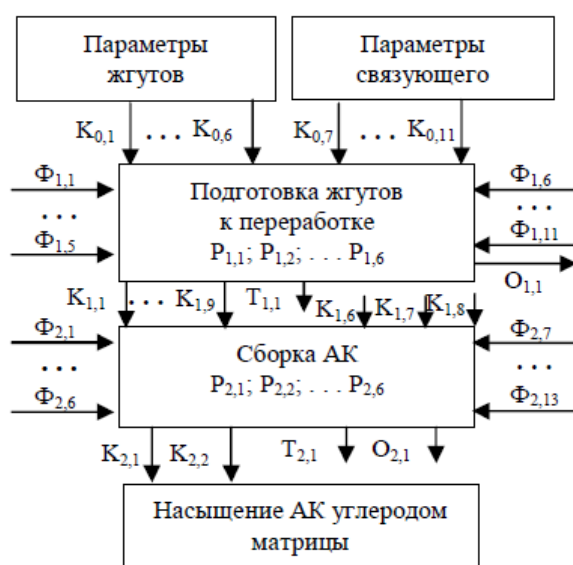


Рисунок 2 - Модель взаимодействия ТП изготовления стержневых армирующих каркасов [4]

В структурной ММ взаимодействия этапов ТП обозначены входные и выходные показатели через Φ_{ij} , K_{ij} , T_{ij} , O_{ij} , где Φ_{ij} – факторы воздействия на осуществляемый ТП; K_{ij} – показатели качества изделия; T_{ij} – производительность ТП; O_{ij} – отходы производства; P_{ij} – функции взаимодействия этапов и режимов рабочего процесса. Через i обозначен номер ТП, j – порядковый номер анализируемого параметра в данном ТП.

Показателями качества получаемых стержней в работе [4] названы следующие входные показатели: диаметр стержня, наполнение стержня волокном, устойчивость стержня при сжатии, дефектность структуры стержня, прочностные характеристики и др.

Анализ литературных источников показал, что нет четкого определения, что именно стоит за этими качественными характеристиками. Важная задача данного исследования

состоит в том, чтобы корректно сформулировать характеристики качества углепластиковых стержней малого диаметра (первый структурный уровень композита) как одного из первых этапов в моделировании ТП получения стержневых АК, и выявить технологические факторы воздействия, определяющие показатели качества на этапе определения параметров жгутов (Рисунок 3), то есть описать зависимость вектора $K_{0,j}$ от векторов $\Phi_{0,j}$ и $\Phi_{0,j}^*$. В терминах, описывающих свойства математических моделей [2], [3], модель, представленная в работе [4] и на рисунке 2, не обладает достаточной полнотой. Нами предлагается и рассматривается математическая модель (Рисунок 3), обладающая большей полнотой, в сравнении, с математической моделью ТП из работы [4].

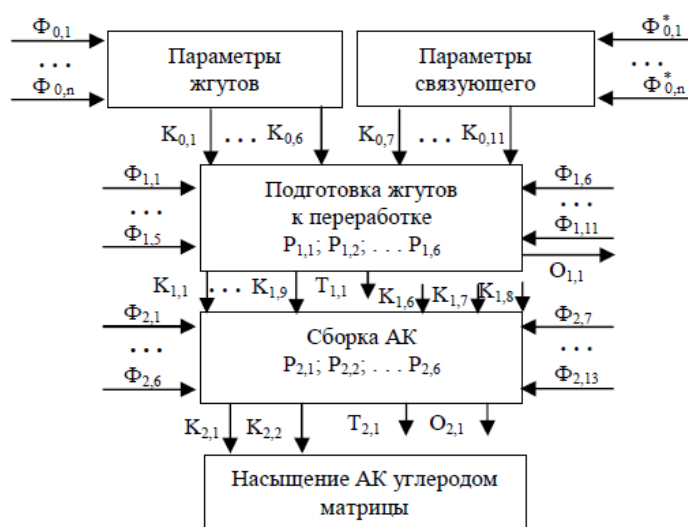


Рисунок 3 – Усовершенствованная модель взаимодействия ТП изготовления стержневых армирующих каркасов

Изменения направлены на то, чтобы управлять дефектностью стержня. Под дефектностью будем понимать различные отклонения от регулярного распределения волокон в сечении стержня. Ряд типичных дефектов микроструктуры представлен далее (Рисунок 4).

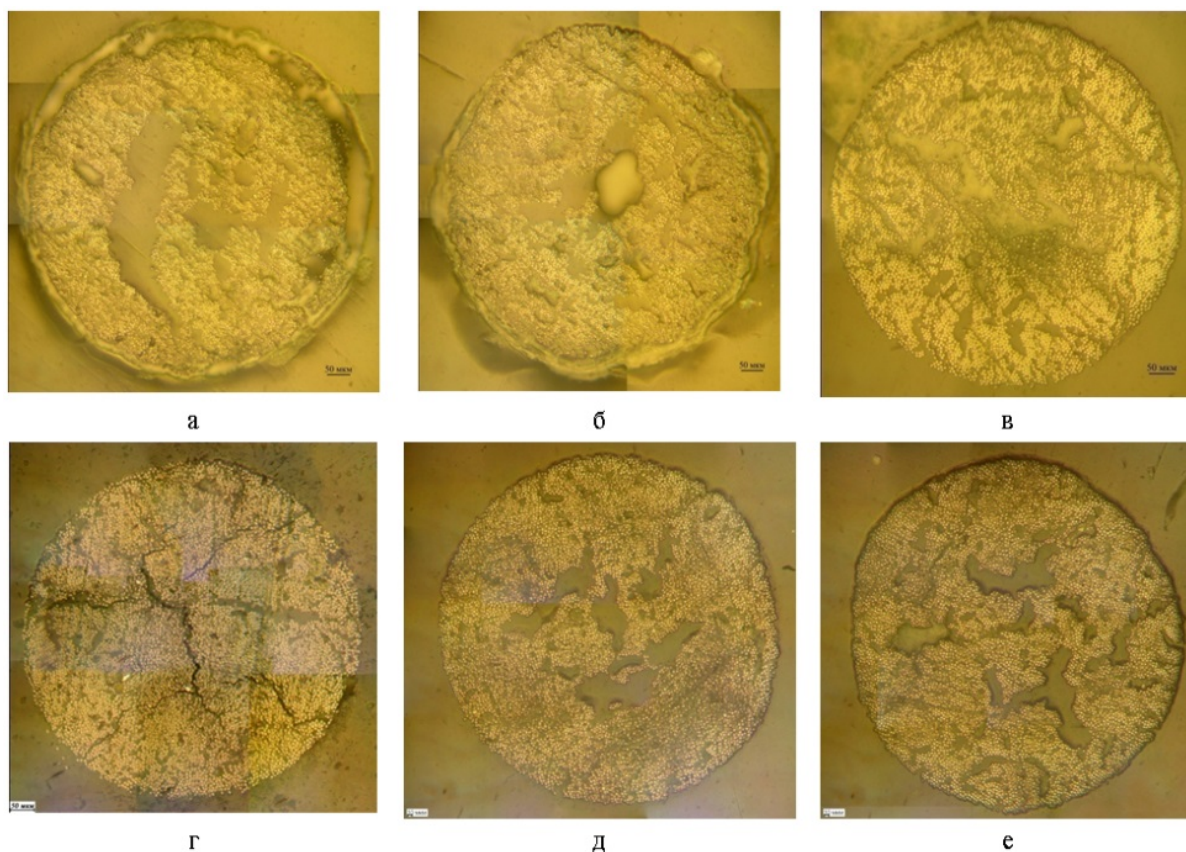


Рисунок 4 - Типичные дефекты микроструктуры стержня:

а - кабельный эффект; б - пористость; в - уменьшение плотности укладки к центру стержня;
г- появление трещин; д, е - появление неармированных участков

Хорошо видно, что, в конечном счете, реальная структура стержня (Рисунок 4) характеризуется наличием следующих несовершенств: случайным характером элементарной ячейки, появлением неармированных участков, пористости и трещин. Даже минимизируя отклонения от взаимной параллельности и прямолинейности волокон, отклонение волокон от оси стержня, а также их неоднородность, можно тем не менее получить материал с существенно не реализованным комплексом прочностных свойств. С позиций статистической механики в используемых конструкционных однонаправленных композиционных материалах представляет интерес получение статистически изотропных структур с локально-эргодическими свойствами [5], [6]. Следует отметить, что получение статистически изотропной структуры с локально-эргодическими свойствами должно оказать существенное улучшающее воздействие и на процесс формирования конечной матрицы в композиционном материале.

Следовательно, именно на иерархическом уровне формирования микроструктуры должна быть осуществлена оптимизация технологии получения материала. Это значит, что должны быть учтены реологические эффекты возникающие в процессе пултрузии стержня.

Анализ публикаций показал, что большинство реологических моделей процесса пултрузии непрерывных волокон имеют в своей основе упрощенную модель процесса. Одна из таких моделей представлена на рисунке 5.

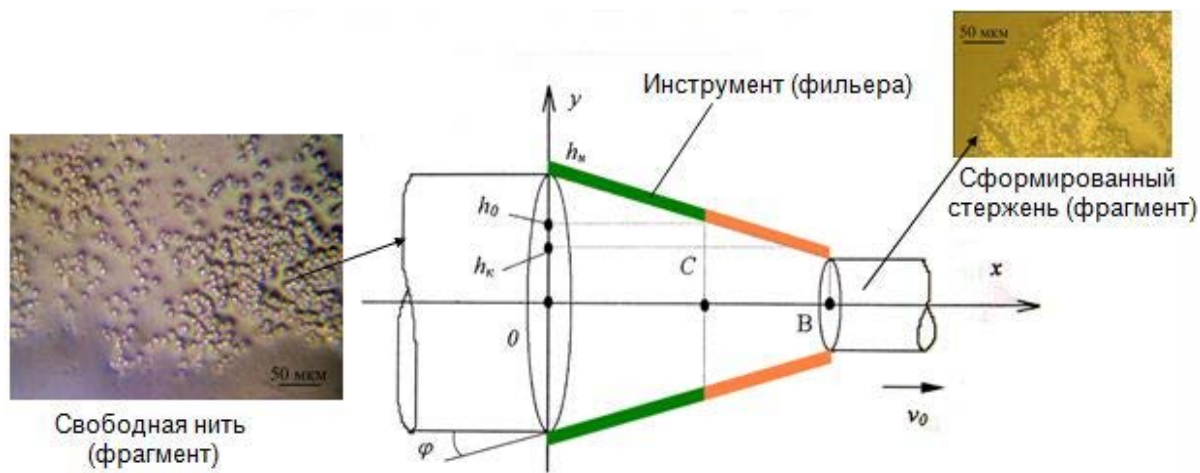


Рисунок 5 - Моделирование реологических процессов при пултрузионном формовании [7]

В представленной физической модели [7] пултрузионного формования стержня, основным технологическим параметром названа линейная скорость протяжки (1):

$$v_0 = \frac{P_0 \cdot (h_0 - h_k)}{\mu \cdot \operatorname{tg} \phi} \cdot \left(\frac{d_k^{\text{эф}}}{4 \cdot l_{\max}} \right)^2 \quad (1),$$

где v_0 - линейная скорость протяжки; P_0 - давление пропитки при $x=C$, максимальное в принятой модели процесса; μ - динамическая вязкость полимера; $d_k^{\text{эф}}$ - эффективный диаметр капилляра; $l_{\max}$ - глубина поперечной пропитки.

В данной модели реологический процесс жидкофазной пропитки межволоконного пространства, а следовательно, и формирование структуры стержня начинается в точке C , но уже на выходе из фильеры формируемая среда представляет собой твердое тело. В действительности стержень малого диаметра выходит из фильеры в твердожидком состоянии. Это значит, что в реологической модели, прежде всего, должны быть учтены эффекты, возникающие в вязких жидкостях при истечении из канала в окружающую среду.

Эффект раздутия струи вязкой жидкости, истекающей из канала (The die swell phenomenon) [8], известный также, как Барус-эффект, отражает влияние вязкости стесненной жидкой среды на гидродинамику вытекающей струи на срезе формирующей фильеры. Механизм формирования анализируемой дефектности стержня проиллюстрирован схемами течения струи вязкой жидкости, вытекающей из цилиндрического канала (Рисунок 6). Изменение профиля скоростей течения вязкой жидкости после выхода из

формообразующего канала сопровождается увеличением диаметра жидкой струи, расхождением линий тока в центральной части потока и сближением их у периферии струи. Наполнение струи вязкой жидкостью свободно перемещаемыми в радиальном направлении твердыми волокнами не изменяет общей картины истечения.

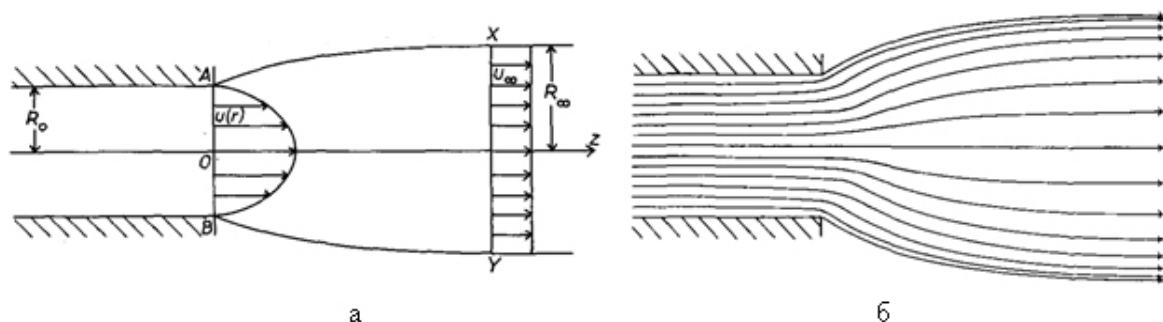


Рисунок 6 - Иллюстрация проявления эффекта раздутия струи [8]:

- а – распределения скоростей течения в струе вязкой жидкости, истекающей в свободное пространство из цилиндрического канала;
- б – плотность линий тока в струе вязкой жидкости, истекающей в свободное пространство из цилиндрического канала

В рамках данной работы проведены эксперименты [9], в результате которых были получены три партии стержней. При производстве первой партии стержней на ROD-линии был использован набор инструментов типа 1. Во второй и третьей серии применялся инструмент типа 2, но при различных технологических параметрах процесса пултрузии. В каждой серии испытаний изготавливали шлифы стержней в различных их сечениях. Для всех партий измеряли разброс величины «действительного» диаметра поперечного сечения. При вычислении диаметра использовали метод трех точек: по периметру сечения стержня случайно выделяются 3 точки и в автоматическом режиме вычисляется величина диаметра окружности, проходящей через эти точки и описывающей анализируемое сечение.

Для получения достоверной оценки величины усредненного действительного диаметра стержня для каждого изображения сечения производилось не менее 20-ти измерений. Результаты измерений подтверждают существование эффекта раздутия стержня (Рисунок 7). Анализируя микроструктуру и зависимость среднего диаметра стержней от длины (от времени процесса, на рисунке от номера стержня), установлено, что в системе формирующих устройств самопроизвольно возникает и поддерживается случайный незатухающий колебательный процесс, сопровождаемый перемещением свободно плавающих волокон в полимерной матрице.

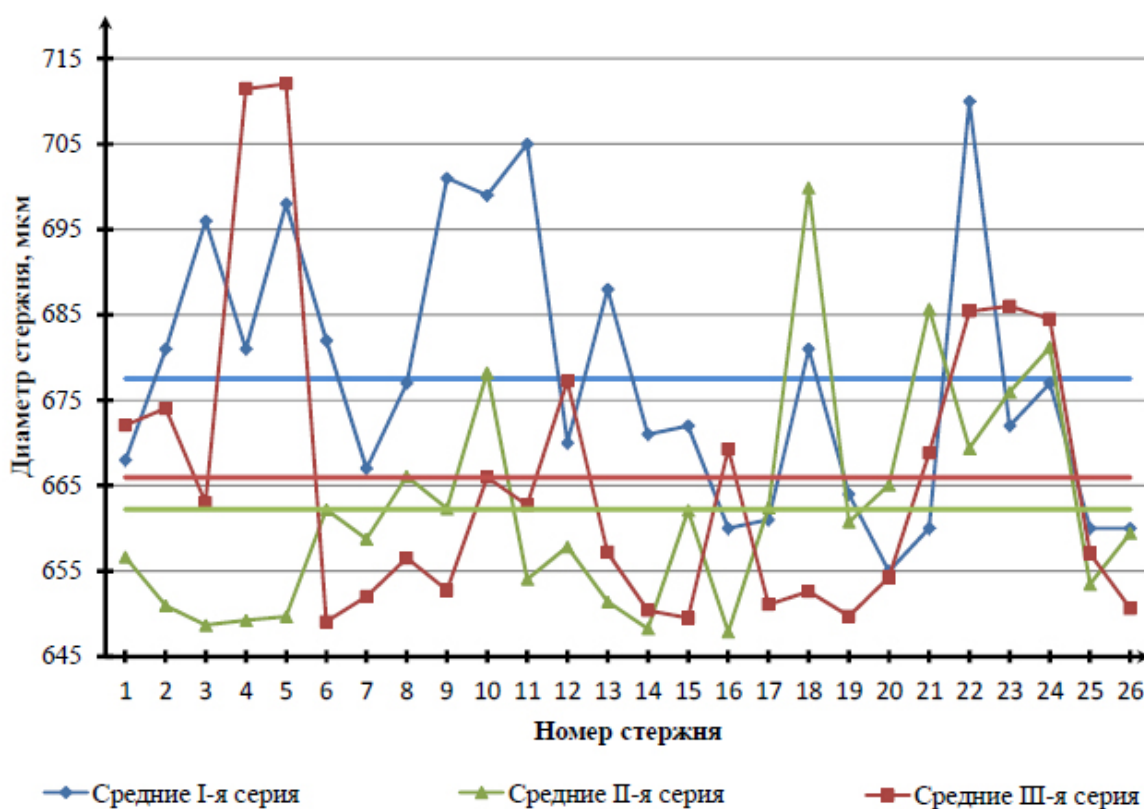


Рисунок 7 – Колебания действительных диаметров стержней, отражающие незатухающий колебательный процесс во время их формования

Управление прочностными характеристиками

Хорошо известно, как на базе стандартных статистических испытаний формируется база данных о монофиламенте в состоянии поставки, затем, на основе этой базы данных формируется модель прочности волокна - модель Вейбулла **Ошибка! Источник ссылки не найден.**2). Таким образом на основе модели Вейбулла формируется база знаний, пригодная для моделирования прочности пучка волокон, являющегося основой представительного объема однонаправленного элемента КМ.

$$G(\sigma) = 1 - \exp \left[-L_0 \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^\beta \right] \quad (2),$$

где L_0 – размер базы испытания; β – параметр формы распределения; σ_0 – параметр размаха распределения и σ_u – сдвиговой параметр, определяемые по экспериментальным данным.

Если экспериментально определена средняя прочность нити на одной базе L_0 , то эта же характеристика может быть спрогнозирована для любой произвольной длины L образца. Такое представление, может быть использовано для оценки прочности однонаправленного пучка углеродных волокон (стержня), сформированного пултрузией нити.

Ниже (Рисунок 8) показана эволюция дефектной структуры стержней в более совершенную в результате применения ряда управляющих воздействий и варьирования технологических параметров процесса пултрузии стержня.

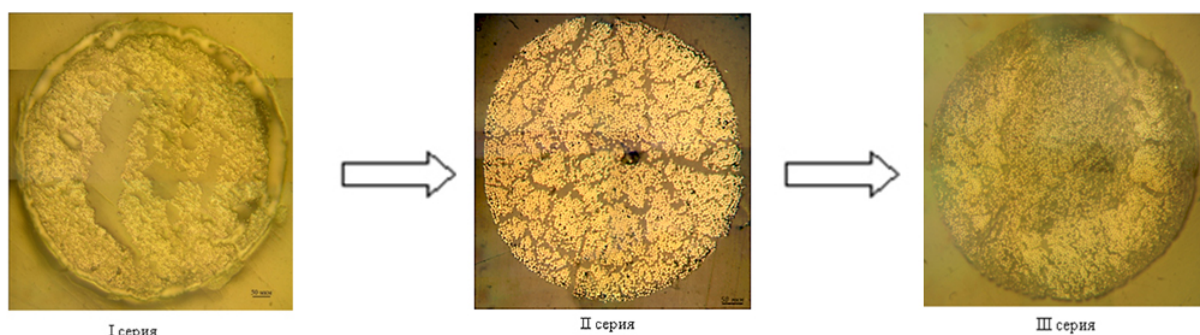


Рисунок 8 - Эволюция структуры и дефектности стержня малого диаметра при пултрузии непрерывной нити в результате оптимизации параметров технологического процесса

Контроль прочностных характеристик осуществлялся с использованием модели Вейбулла. На рисунке 9 показана эволюция прочностных свойств получаемых стержней. Хорошо видна определяющая роль формирующего устройства и меньшее влияние параметров технологического процесса.

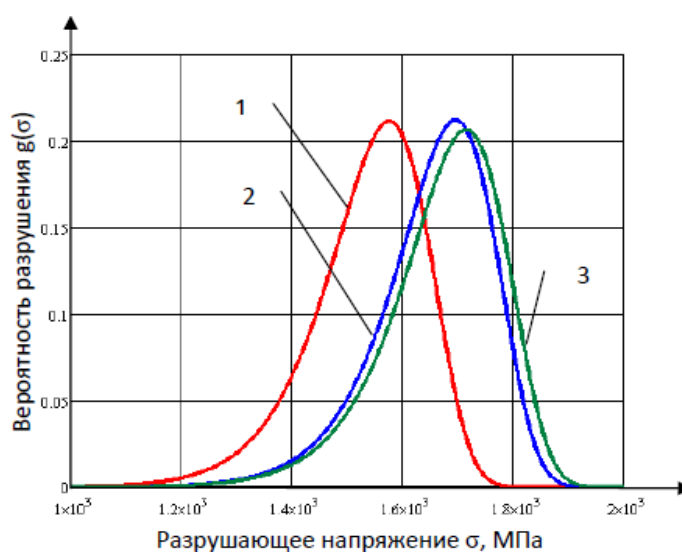


Рисунок 9 – Эволюция прочностных свойств (вероятности разрушения) стержней от высоко дефектного стержня к малодефектному:

1- стержень 1-ой серии; 2- стержень 2-ой серии; 3- стержень 3-ей серии

Закключение

Путем оптимизации условий пултрузионного процесса формования стержня малого диаметра из одной непрерывной углеродной нити, удалось regularизовать его

микроструктуру и увеличить прочность при растяжении производимого изделия более чем на 10 %.

Сборка каркасов из прошедших пултрузию стержней может стать основным методом изготовления многонаправленных структур в интеллектуальных технологиях производства КМ.

Геометрический и температурный профиль фильеры, совместимость волокон и полимерной матрицы, организация пропитки полимером, реологические свойства наполненного волокном полимера, приводящие к равноудаленности волокон в пучке и, более того, к формированию статистически изотропной локально-эргодической микроструктуры стержня, являются ключевыми факторами, определяющими качество продукта.

Список литературы

1. Татарников О.В., "Трехуровневое проектирование пространственно-армированных композитных конструкций," Все материалы. Энциклопедический справочник, № 7, июль 2012. С. 21-26.
2. Маркелов Г.Е., "Особенности построения математических моделей," Инженерный журнал: наука и инновации, № 4, 2012. С. 138-144.
3. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов. 2-е изд., стереотип.-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 496 с.
4. Чесноков А.В., "Модель взаимодействия технологических процессов изготовления стержневых армирующих каркасов," Технология производства летательных аппаратов, Т. 68, № 1, 2010. С. 16-21.
5. Зайцев А.В., Лукин А.В., Трефилов Н.В., "Статистическое описание структуры двухфазных волокнистых композитов," Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета, № 10, 2002. С. 52-62.
6. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Вотинов А.М., Постных А.М., Чекалкин А.А. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций. М.: Физматлит, 1996. 240 с.
7. Головкин Г.С., Дмитриенко В.И. Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М.: РУСАКИ, 2005. 472 с.
8. Richardson S., "The die swell phenomenon," Rheologica Acta, Vol. 9, No. 2, 1970. P. 193-199.
9. Семенов Б.И., Михайловский К.В., Рапохина С.С., Седых А.М., "Управление формированием микроструктуры и свойств стержневых элементов УУКМ (УККМ) при изготовлении методом пултрузии промышленной нити," Все материалы. Энциклопедический справочник, № 9, 2012. С. 2-12