

УДК 669-419.8:539.378.2:669.715-416:669.781-426  
DOI: 10.12737/24205

**И.В. Кочешков**, к.т.н.  
(МГТУ имени Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)  
E-mail: kiv5104@yandex.ru

## **Имитационное моделирование структуры волокнистого композитного материала, получаемого с использованием разных типов листовых полуфабрикатов**

*Предложен алгоритм, который с помощью имитационного моделирования позволяет воспроизводить особенности структуры композитов, получаемых из разных типов листовых полуфабрикатов. Проведенные исследования показывают, что при помощи разработанного алгоритма может имитироваться структура близкая к реальной. Это подтверждается экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** волокнистые композитные материалы; имитационное моделирование; модель структуры волокнистого композита; листовые полуфабрикаты.

**I.V. Kocheshkov**, Can. Eng.  
(Bauman STU of Moscow, B. 1, 5, 2-d Baumanskaya Str, 105005, Moscow)

## **Structure simulation of fiber-composite material made with use of different types of sheet semi-products**

*Strength properties of fiber composites depend upon fiber location in them. The fiber location in composite is defined by the conditions of its production, for instance, by a type of sheet semi-product used. In spite of the significance of the factor mentioned above the mathematical methods describing the peculiarities of the structure of composites manufactured under different conditions are absent. That is why, the creation of simulators allowing the manifestation of an actual structure of fiber composites is of actual interest. At the production of fiber composites made of different types of sheet semi-products the peculiarities of fiber location are defined by their random displacements from the initial ordered position in a semi-product. For the creation of structure simulators of such composites the approaches can be used which are contained in the simulation. In this work there is supposed an algorithm which allows reproducing the peculiarities of the structure of composites made of different types of sheet semi-products with the aid of simulation. The investigations carried out show that with the aid of the algorithm developed the structure close to an actual structure can be imitated. It is confirmed by experimental data. The fiber composite structure models formed with the aid of the simulation can be an initial base for the strength properties prognostication of material taking into account its structure.*

**Keywords:** fiber composite materials; simulation; model of fiber composite structure; sheet semi-products.

При экспериментальных исследованиях структуры волокнистых композитных материалов (ВКМ), представленных в работе [1], установлено, что существует зависимость характера расположения волокон в композите от вида полуфабриката, использованного при его изготовлении. Наблюдаемые различия в характере расположения волокон в ВКМ объясняются тем, что в процессе уплотнения пакета

листовых полуфабрикатов наблюдается система случайных смещений волокон от их исходного положения в полуфабрикате.

Для разных видов полуфабриката величины случайных смещений и параметры их распределения различны [1]. Это приводит к образованию особенностей формируемой структуры композита.

Для описания случайных (стохастических)

процессов хорошие результаты дает использование подходов, содержащихся в имитационном моделировании [2]. Поэтому целью данной работы является создание алгоритма, который позволяет с помощью имитационного моделирования воспроизвести особенности структуры ВКМ, образующиеся при получении композитов из разных видов листовых полуфабрикатов.

В работе [1] показано, что при изготовлении волокнистого композита из листовых полуфабрикатов имеется три типа смещения волокон, отличающихся по направлению смещения, его величине и параметрам распределения этих величин. А именно, наблюдается следующее:

- Внутрислоевое (в плоскости слоя волокон, образованного листовым полуфабрикатом) смещение отдельных волокон  $S_{bc}$  относительно их исходного положения в полуфабрикате. Это смещение приводит к появлению колебания величины внутрислоевого шага расположения волокон  $S_{bc}$  в каждом отдельном слое, который задан типом используемого полуфабриката, от некоего минимального  $S_{bc}^{min}$  до максимального  $S_{bc}^{max}$  значения.

При этом наблюдается нормальный закон распределения с определенным значением среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{Sbc}$  внутрислоевого шага расположения волокон при средней величине внутрислоевого шага расположения волокон  $\bar{S}_{bc}$  равной или близкой к

шагу расположения волокон в используемом полуфабрикате.

- Смещение отдельных волокон перпендикулярно слою, образованному листовым полуфабрикатом  $S_{\perp сл}$ . Величины этих смещений также характеризуются определенным значением среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{S_{\perp сл}}$ .

- "Согласованное" смещение волокон, находящихся в близлежащих слоях, относительно друг друга  $SS_{сл}$  в направлении параллельном слоям, образованным листовыми полуфабрикатами. Величины этих смещений подчиняются равномерному закону распределения.

Кроме того, в результате неравномерности распределения слоя матричного материала по площади полуфабриката и неравномерности деформации матрицы в процессе прессования, наблюдается колебание величины межслоевого шага расположения волокон в композите  $S_{mc}$  относительно его усредненной величины  $\bar{S}_{mc}$  от некоего минимума  $S_{mc}^{min}$  до максимума  $S_{mc}^{max}$  при нормальном законе распределения и определенном значении среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{S_{mc}}$ .

Экспериментальные данные, характеризующие величины этих разных видов смещения отдельных волокон и слоев, образованных полуфабрикатами с плазменно-напыленной и фольговой матрицами, представлены в табл. 1.

1. Параметры смещений отдельных волокон и их слоев в композитах, полученных из разных видов листовых полуфабрикатов [1]

Вид листового полуфабриката	Виды смещений отдельных волокон и их слоев, образованных листовыми полуфабрикатами						
	Внутри слоя ( $S_{bc}$ )		Перпендикулярно слою		«Согласованное» смещение слоев	Расстояние между слоями	
	$\frac{S_{bc}^{min} - S_{bc}^{max}}{S_{bc}}$ мкм	$\sigma_{Sbc}$	$S_{\perp сл}$ мкм	$\sigma_{S_{\perp сл}}$	$SS_{сл}$ мкм	$\frac{S_{mc}^{min} - S_{mc}^{max}}{S_{mc}}$ мкм	$\sigma_{S_{mc}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Фольговый <sup>1</sup>	$\frac{160-184}{171}$	5,3	± 2,5	1,2	40...62	$\frac{135-140}{138}$	1,7
Плазменно-напыленный <sup>2</sup>	$\frac{167-202}{182}$	8,8	± 6,5	6,3	52...180	$\frac{138,5-152}{145,9}$	5,9

Примечания: <sup>1</sup> – изготовлен из фольги толщиной 50 мкм и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 170 мкм; <sup>2</sup> – изготовлен с применением плазменно-напыленной матрицы и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 180 мкм.

Для использования при имитационном моделировании данных, содержащихся в табл. 1, необходимо задаться исходным расположением волокон в поперечном (перпендикулярном оси волокон) сечении композита. При этом под исходным сечением композита понимается сечение, в котором отсутствуют смещения волокон, возникающие в процессе изготовления композита.

Поскольку на исследованных шлифах поперечного сечения композита преобладает расположение волокон близкое к гексагональному [1], то исходное состояние поперечного сечения, целесообразно представить в виде последовательных слоев волокон, образованных листовыми полуфабрикатами, с относительным смещением близлежащих слоев относительно друг друга на половину внутрислоевого шага (рис. 1).

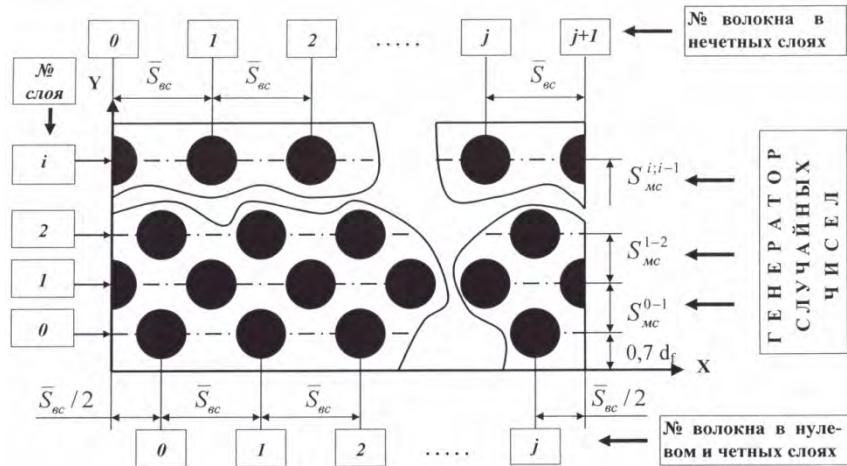


Рис. 1. Исходная упорядоченная структура композита

В исходном состоянии внутри каждого слоя все волокна расположены с усредненным шагом  $\bar{S}_{ср}$ , который, как отмечалось ранее, равен или близок по величине шагу расположения волокон в используемом полуфабрикате  $S_{ср}$ . В отличие от внутрислоевого шага расположения волокон, расстояния между отдельными слоями волокон  $S_{мс}$  носят случайный характер, параметры которого отражены в двух последних (7-м и 8-м) столбцах табл. 1. Экспериментальные данные, содержащиеся в этих столбцах, характеризуют колебания межслоевого шага расположения волокон в композите для разных видов полуфабриката.

Использование, в соответствии с методиками, изложенными в [2, 3], генератора случайных чисел и экспериментально определенных параметров нормального распределения межслоевого шага расположения волокон в композите (табл. 1) позволяет задать значения расстояний между конкретными слоями волокон (см. рис. 1).

Зная шаг расположения волокон в слоях, и, определив расстояния между близлежащими слоями, можно сформировать массив данных с координатами каждого волокна относительно

но осей  $X$  и  $Y$ . Расположение осей  $X$  и  $Y$ , а также индексация волокон в массиве аналогичны принципам, изложенным в работе [1], и отображены на рис. 1. Сформированный таким образом массив координат волокон по существу является математической моделью исходной упорядоченной структуры поперечного сечения композита.

Эта модель отражает особенности полуфабрикатов, используемых для изготовления композита, но не учитывает реально существующие случайные смещения волокон, которые возникают при получении композита уплотнением пакета листовых полуфабрикатов.

С помощью имитационного моделирования можно спрогнозировать элементарные акты случайных смещений отдельных волокон и скорректировать координаты расположения каждого волокна относительно их положения в исходном массиве. Преобразованный таким образом массив будет являться математической моделью поперечного сечения композита, отражающей его реальное строение.

Для корректировки координат волокон относительно исходной упорядоченной структуры поперечного сечения композита с учетом возможного случайного смещения каждого волокна при прессовании пакета листовых по-

луфабрикатов, предлагается алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 2.

В соответствии с этой блок-схемой имитация смещения каждого волокна от его положения в упорядоченной структуре (см. рис. 1) осуществляется послойно путем последовательного перебора волокон каждого слоя. Перебор начинается с волокна имеющего нулевое значение индекса  $j$  и заканчивается волокном с максимальным значением индекса  $j$  (для нулевого и четного слоя) или  $j+1$  (для нечетных слоев).

Имитация смещений волокон начинается с нулевого слоя ( $i = 0$ ). Особенностью этого слоя волокон является то, что ниже него нет других слоев. Поэтому для волокон этого слоя нет смысла имитировать их «согласованное» смещение относительно нижнего близлежащего слоя и, в данном случае,  $CC_{мсл}$  можно считать равным нулю. Для всех последующих слоев волокон «согласованное» смещение относительно нижнего близлежащего слоя задается в пределах значений, указанных в столбце 6 табл. 1. При этом согласованное смещение слоя может быть осуществлено как вправо, так и влево от исходного положения волокна на величину, не превышающую половину диапазонов смещений, приведенных в столбце 6 табл. 1.

Кроме того, для каждого волокна (как нулевого, так и всех последующих слоев) имитируется внутрислойное смещение волокон  $С_{мвс}$  и их смещение перпендикулярно слою, образованному листовым полуфабрикатом  $С_{м\perp сл}$ . Для имитации этих смещений также используется генератор случайных чисел и экспериментально определенные параметры их нормального распределения, представленные в столбцах 2–5 табл. 1.

Внутрислойное смещение волокна  $С_{мвс}$  и согласованное смещение слоя  $CC_{мсл}$ , в котором оно находится, дает величину суммарного смещения волокна  $\Delta X$  по оси  $X$ , а смещение перпендикулярно слою, образованному листовым полуфабрикатом, величину смещения волокна  $\Delta Y$  по оси  $Y$  (см. рис. 2).

В результате происходит изменение координаты расположения волокна в упорядоченной структуре (см. рис. 1), на величины, которые учитывают случайное смещение волокна в процессе изготовления композита:

$$X_{ij} = X_{ij} + \Delta X.$$

В работе [1] экспериментально установлено, что для волокнистых композитных мате-

риалов, полученных из разных видов полуфабриката, минимальное расстояние между поверхностями волокон  $b^*$  имеет свое характерное значение. Например, в композите с плазменно-напыленной матрицей оно составляет 3 мкм, а в композите с фольговой матрицей – 7 мкм. Поэтому при имитационном моделировании структуры для композитов, полученных из разных видов полуфабриката, задается соответствующее значение минимального расстояния между центрами волокон  $R_{min}$ , меньше которого оно быть не может.

$$Y_{ij} = Y_{ij} + \Delta Y.$$

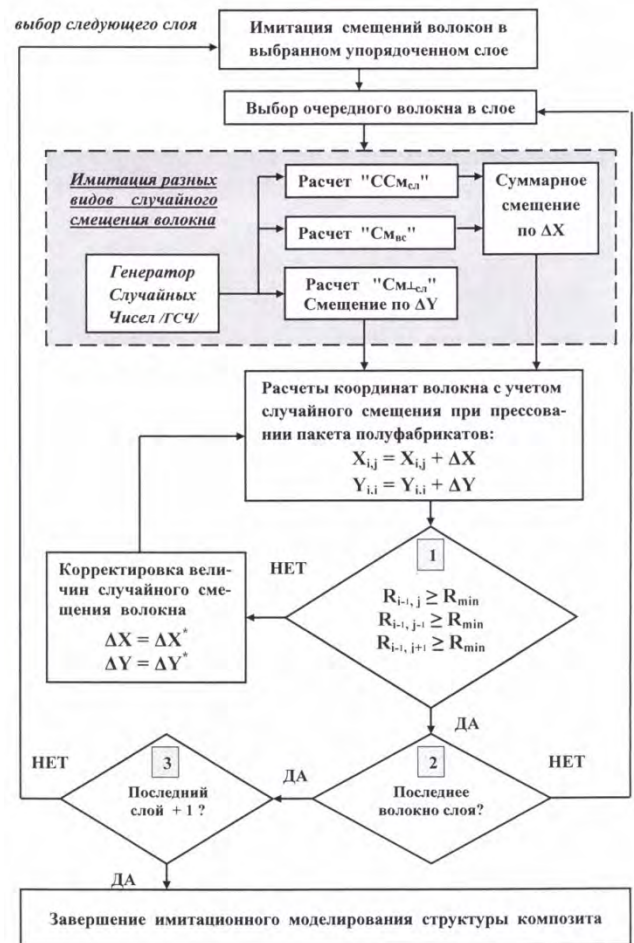


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления координат волокон с учетом их случайного смещения при прессовании пакета листовых полуфабрикатов

Это расстояние равно диаметру волокна  $d_f$ , используемому при получении композита, плюс минимально допустимое расстояние между поверхностью волокон  $b^*$ .

$$R_{min} = d_f + b^*.$$

С целью проверки выполнения этого условия, после вычисления координат, учитываю-

щих случайное смещение волокна в процессе изготовления композита, определяются расстояния  $R$  от этого волокна до близлежащих волокон ближайшего нижнего слоя. Таким образом, для волокон, находящихся в слоях с четным номером, расстояние до волокон с индексами  $i-1; j$  и  $i-1; j+1$  ( $R_{i-1, j}$  и  $R_{i-1, j+1}$ ), а для волокон, находящихся в слоях с нечетным индексом – до волокон с индексами  $i-1; j-1$  и  $i-1; j$  ( $R_{i-1, j}$  и  $R_{i-1, j-1}$ ). Если выполняются условия блока 1 на блок-схеме рис. 2, а именно:

$$R_{i-1, j} \geq R_{\min};$$

$R_{i-1, j-1} \geq R_{\min}$  (для слоя с нечетным номером);

$R_{i-1, j+1} \geq R_{\min}$  (для слоя с четным номером), то осуществляется переход к выбору очередного волокна в слое для имитации его смещения.

В противном случае уменьшаются величины смещений волокна по оси  $X$  ( $\Delta X$ ) и оси  $Y$  ( $\Delta Y$ ) до значений, соответственно,  $\Delta X^*$  и  $\Delta Y^*$ , которые обеспечивают равенство расстояния между центрами соответствующих волокон величине минимально возможного расстояния  $R_{\min}$  между ними (см. рис. 2). Практика расчетов показывает, что корректировки значений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  незначительны и необходимость их проведения достаточно редка.

После имитации случайного смещения первого волокна в слое, описанная ранее процедура, в соответствии с условием блока 2 на блок-схеме (см. рис. 2), последовательно применяется ко всем последующим волокнам данного слоя. Затем осуществляется переход к следующему по номеру слою волокон, и процедура имитации случайных смещений волокон, находящихся в выбранном слое, повторяется (см. рис. 2). И так, до тех пор, пока не будут обчислены случайные смещения волокон в последнем слое исходной упорядоченной структуры композита.

В процессе реализации описанного алгоритма, массив с координатами волокон упорядоченной структуры поперечного сечения композита (см. рис. 1) преобразуется в качественно новый массив координат волокон. В этом массиве отражается случайное смещение волокон, которое происходит при изготовлении композитного материала путем уплотнения пакета с заданным видом листовых полуфабрикатов. Сформированный таким образом массив с уточненными координатами волокон поперечного сечения композита отражает особенности реальной структуры волокнистого композитного материала.

Проверка достоверности математической модели реальной структуры волокнистого композита, получаемой с помощью описанного алгоритма, проводилась на примере волокнистого композитного материала алюминий-бор из полуфабрикатов с плазменно-напыленной и фольговой матрицей. Чтобы результаты расчетов можно было сравнивать с имеющимися экспериментальными данными, в процессе имитационного моделирования использовались те же самые параметры полуфабрикатов, что и при изготовлении композита в работе [1], а именно:

– полуфабрикат из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 170 мкм;

– полуфабрикат из плазменно-напыленной алюминиевой матрицы и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 180 мкм.

Как видно из экспериментальных данных, представленных в столбцах 2–6 табл. 1, использование разных видов полуфабриката характеризуется разными величинами смещений отдельных волокон и их слоев. Существенно различаются и среднеквадратичные отклонения этих смещений от усредненных величин. Алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 2, позволяет учесть все эти особенности.

Графическая интерпретация расчетов, выполненных с помощью этого алгоритма, представлена на рис. 3 и 4.

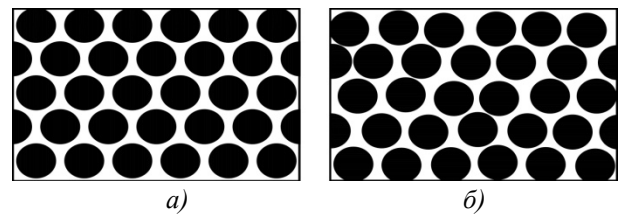


Рис. 3. Фрагменты поперечного сечения волокнистого композитного материала, полученного из фольговых листовых полуфабрикатов, с исходной упорядоченной структурой (а) и наличием случайных смещений волокон, которые возникли при изготовлении композита (б)

На рис. 3, представлены фрагменты поперечного сечения волокнистого композитного материала, полученного из фольговых листовых полуфабрикатов, с исходной упорядоченной структурой (рис. 3, а) и с наличием случайных смещений волокон, которые возникли при изготовлении композита (рис. 3, б).

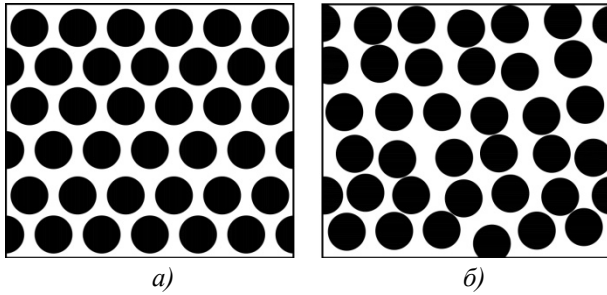


Рис. 4. Фрагменты поперечного сечения волокнистого композитного материала, полученного из плазменно-напыленных листовых полуфабрикатов, с исходной упорядоченной структурой (а) и наличием случайных смещений волокон, которые возникли при изготовлении композита (б)

На рис. 4, соответственно, фрагменты поперечного сечения волокнистого композитного материала, полученного из плазменно-напыленных листовых полуфабрикатов, с ис-

ходной упорядоченной структурой (рис. 4, а) и с наличием случайных смещений волокон, которые возникли при изготовлении композита (рис. 4, б). Качественно фрагменты поперечных сечений композита рис. 3, б и 4, б соответствуют расположению волокон на шлифах волокнистого композита алюминий бор с фольговой и плазменно-напыленной матрицей, представленные в работе [1].

Количественная оценка идентичности характера расположения волокон в поперечном сечении реального композита, изготовленного из разных видов полуфабриката, и структурной модели композита, сформированной при имитационном моделировании, основывалась на сравнении средних величин расстояния до близлежащих волокон и параметров их распределения относительно этих усредненных величин (табл. 2).

2. Характер расположения близлежащих волокон в реальном композите и в структурной модели, соответствующей этому композиту

Вид листового полуфабриката	Результаты, основанные на исследовании шлифов композита [1]		Обработка структуры, сформированной при имитационном моделировании	
	$\frac{R_{\text{Э}}^{\min} - R_{\text{Э}}^{\max}}{\bar{R}_{\text{Э}}}$ ; мкм	$\sigma_{R_{\text{Э}}}$	$\frac{R_{\text{ИМ}}^{\min} - R_{\text{ИМ}}^{\max}}{\bar{R}_{\text{ИМ}}}$ ; мкм	$\sigma_{R_{\text{ИМ}}}$
1	2	3	4	5
Фольговый <sup>1</sup>	$\frac{146,7 - 185,3}{165,9}$	8,8	$\frac{146 - 199}{164}$	9,7
Плазменно-напыленный <sup>2</sup>	$\frac{142,7 - 253,8}{182}$	26,4	$\frac{142,7 - 248,6}{183}$	26,8

Примечания: <sup>1</sup> – изготовлен из фольги толщиной 50 мкм и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 170 мкм; <sup>2</sup> – изготовлен с применением плазменно-напыленной матрицы и волокон бора диаметром 140 мкм, расположенных с шагом 180 мкм.

Близлежащими волокнами, также как и в работе [1], считались 6 волокон при характере их расположения близком к гексагональному, и 8 волокон при характере расположения близком к тетрагональному, или 7 волокон при смешанном характере их расположения. Для указанных волокон определялись значения:

- минимального  $R_{\text{Э}}^{\min}$ , максимального  $R_{\text{Э}}^{\max}$  и среднего  $\bar{R}_{\text{Э}}$  расстояний между центрами близлежащих волокон, определенных при исследовании шлифов композита из разных типов полуфабриката (физический эксперимент);

- минимального  $R_{\text{ИМ}}^{\min}$ , максимального  $R_{\text{ИМ}}^{\max}$  и среднего  $\bar{R}_{\text{ИМ}}$  расстояний между центрами близлежащих волокон для структуры композитного материала, сформированной при имитационном моделировании;
- среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{R_{\text{Э}}}$  расстояния между центрами близлежащих волокон от его средней величины, полученного при исследовании шлифов композита из разных типов полуфабриката;
- среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{R_{\text{ИМ}}}$  расстояния между центрами близлежащих волокон от его средней величины, полученного при обработке структуры композитного материала, сформированной при имитационном моделировании.

Экспериментальные данные, основанные на исследовании шлифов композита [1] (столбцы 2, 3) и результаты расчета, полученные при обработке структуры, сформированной при имитационном моделировании (столбцы 4, 5), представлены в табл. 2. Сравнение этих результатов показывает их хорошую сходимость. Значения минимального  $R_{\varepsilon}^{\min}$ , максимального  $R_{\varepsilon}^{\max}$  и среднего  $\bar{R}_{\varepsilon}$  расстояний между центрами близлежащих волокон определенных при исследовании шлифов композита из разных типов полуфабриката, а также соответствующие величины минимального  $R_{IM}^{\min}$ , максимального  $R_{IM}^{\max}$  и среднего  $\bar{R}_{IM}$  расстояний между центрами близлежащих волокон для структуры композитного материала, сформированной при имитационном моделировании, отличаются совсем незначительно.

Разность соответствующих параметров существенно меньше (10 %) относительно значения их средних величин. Различия между экспериментальной величиной среднеквадратичного отклонения  $\sigma_{R_{\varepsilon}}$  расстояния между центрами близлежащих волокон и соответствующего значения  $\sigma_{R_{IM}}$ , полученного при обработке структуры композитного материала, сформированной при имитационном моделировании, также не превышают 10 %.

**Заключение.** Практическим результатом представленной работы является создание алгоритма, позволяющего дать математическое описание той реальной структуры волокнистого композита, которая образуется при использовании полуфабрикатов конкретного вида и параметров. Сформированная с помощью разработанного алгоритма структурная модель композита является необходимым элементом расчетного метода оптимизации условий получения волокнистого композита с требуемым уровнем свойств [3, 4].

Использование разработанного алгоритма в расчетных методах оптимизации условий получения волокнистого композита с требуемым

уровнем свойств должно повысить точность оценки прочностных характеристик композитов и объяснить причины достижения разного уровня прочности и диапазонов её разброса в композитах, полученных из разных видов листового полуфабриката.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кочешков, И.В.** Особенности структуры волокнистого композитного материала с металлической матрицей, получаемого с использованием разных типов листовых полуфабрикатов // *Научные технологии в машиностроении*. – 2016. – № 8(62). – С. 12–19.
2. **Имитационное моделирование:** учеб. пособ. / В.П. Строгалева, И.О. Толкачева.– 2-е изд. испр. и доп. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 295 с.
3. **Овчинский, А.С.** Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро и макромеханизмов на ЭВМ. – М.: Наука, 1988. – 278 с.
4. **Кочешков, И.В.** Структурный подход в понимании сущности композиционных материалов и разработке процессов получения композитов с требуемыми свойствами // *Научные технологии в машиностроении*. – 2014. – № 10 (52). – С. 3–9.

## REFERENCES

1. Kocheshkov, I.V. Peculiarities of fiber composite material structure with metal matrix obtained using different types of sheet semi-products // *Science Intensive Technology in Mechanical Engineering*. – 2016. – № 8(62). – pp. 12–19.
2. *Simulation: textbook* / V.P. Strogaleva, I.O. Tolkachyova.– 2-d ed. revised and supplemented. – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2015. – pp. 295.
3. Ovchinsky, A.S. *Processes of Composite Destruction: Computer-Aided Imitation of Micro- and Macro-mechanisms*. – M.: Science, 1988. – pp. 278.
4. Kocheshkov, I.V. Structural approach in comprehension of composite essence and development of processes of composite production with required properties // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – № 10 (52). – pp. 3–9.

Рецензент д.т.н. А.П. Амосов

