

П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич. – Минск: Бел. наука, 2012. – 452 с.

9. **Технологии** конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева. – Минск: Бел. наука, 2011. – 283 с.

10. **Хейфец, М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки/ М.Л.Хейфец. - М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

11. **Алексеева, Ю.С.** Получение методом центробежного литья градиентных композиционных материалов / Ю.С.Алексеева, Л.И.Кобелева, А.Г.Колмаков, И.Е.Калашников, П.А.Витязь, М.Л.Хейфец, В.Т.Сенють // Инженер-механик. 2016. № 1.– С. 35–38.

12. **Витязь, П.А.** Создание алмазных инструментальных материалов на основе анализа термодинамики процессов синтеза / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, В.Т.Сенють // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012. № 10(16). – С. 3–8.

## REFERENCES

1. Vityaz, P.A. Effect of phase composition of nanostructured refractory modifier on structure and tribological behavior of AK12M2MgN alloy / P.A. Vityaz, A.I. Komarov, V. I. Komarova et.al. // Journal of Friction and Wear, 2013, V.34, no 5, pp. 329–338.

2. Heifets, M.L. Synergetic analysis of structure formation in metals at thermal, deformation and combined effects // *Proceedings of NAS of Belarus*, 2014, Vol. 58, № 3. – 2014. – pp. 106–111.

3. Vityaz, P.A. *Material and Coating Modification with Nano-dimensional Diamond-containing Additions*/ P.A. Vityaz, V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, A.I. Komarov, V.T. Senyut. – Minsk: Bel. Science, 2011. – pp. 522.

4. Chernyshova, T.A. On modification of cast aluomatrix composites by refractory nano-dimensional particles / T.A. Chernyshova, L.I. Kobleleva, I.E. Kalashnikov // *Metals*, 2009. № 1. – pp. 79–87.

5. Kalashnikov, I.E. Alumo-matrix composites with fillers of schungite rocks / I.E.Kalashnikov, V.V. Kovalevsky, T.A.Chernyshova et al. // *Metals*. – 2010. – № 6. – pp. 85–95.

6. Vityaz, P.A. Aspects of nano-structured composite modifiers for aluminum alloys / P.A. Vityaz, A.I. Komarov, V.I. Komarova et al. // *Proceedings of NAS of Belarus*, – 2011. Vol.55. – № 5. – pp.91–96.

7. Vityaz, P.A. *Nano-diamonds of Detonation Synthesis: Manufacturing and Application* / P.A. Vityaz, V.I. Zhornik, A.F. Iliyushchenko et al. Minsk: Bel. Science, 2013. – pp. 381.

8. Vityaz, P.A. *Resource Increase in Tribo-joints by Activated Methods of Surface Engineering* / P. A. Vityaz, V.I. Zhornik, M. A. Belotserkovsky, M. A. Levantsevich. – Minsk: Bel. Science, 2012. – pp. 452.

9. *Techniques of Constructional Nano-structured Materials and Coatings* / under the general editorship of P.A. Vityaz and K.A. Solntsev.– Minsk: Bel. Science, 2011. – pp. 283.

10. Heifets M.L. *Combined Working Designing*/ M.L.Heifets. - M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 272.

11. Alekseyeva, Yu.S. Gradient composite manufacturing by spun casting method / Yu.S.Alekseyeva, L.I.Kobleleva, A.G.Kolmakov, I.E.Kalashnikov, P.A.Vityaz, M.L.Heifets, V.T.Senyut // *Mechanical Engineer*. 2016. № 1.– pp. 35–38.

12. Vityaz, P.A. Creation of diamond tool materials based on analysis of thermodynamics in synthesis processes / P.A. Vityaz, M.L. Heifets, V.T.Senyut // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2012. № 10(16). – pp. 3–8.

Рецензент д.т.н. А.П. Амосов

УДК 669-419.8:539.378.2:669.715-416:669.781-426

DOI: 10.12737/20799

**И.В. Кочешков**, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э.Баумана, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)

E-mail: kiv5104@yandex.ru

## Особенности структуры волокнистого композитного материала с металлической матрицей, получаемого с использованием разных типов листовых полуфабрикатов

*Представлено количественное описание характера расположения волокон в композитных материалах, полученных при использовании листовых полуфабрикатов с фольговой и плазменно-напыленной матрицей.*

**Ключевые слова:** волокнистые композитные материалы (ВКМ); листовые полуфабрикаты; имитационное моделирование; строение; структура композита.

**I.V. Kocheshkov**, Can.Eng.

(Bauman State Technical University of Moscow)

## Structural peculiarities in fibrous composite with metal matrix manufactured using various sheet half-finished products

*A quantitative description of fiber location pattern in composites manufactured with the use of sheet half-finished products with a foil matrix and plasma-sprayed matrix is presented.*

**Keywords:** fiber composites (FC); sheet half-products; simulation; structure; composite structure.

Имеется большое количество работ показывающих, что характер расположения волокон в поперечном сечении волокнистого композита оказывает существенное влияние на его прочностные свойства. Наиболее благоприятными являются гексагональная или тетрагональная укладка волокон, а отклонения от упорядоченной структуры приводит к снижению прочности материала [1]. На практике характер расположения волокон в поперечном сечении волокнистого композита определяется величиной диаметра используемых волокон и способом их введения в матричный материал.

Волокна малого диаметра (существенно меньше 100 мкм) поставляются в виде многоволоконных нитей и для их введения в матричный материал используются жидкофазные или газофазные технологии. При этом не удается добиться сколь-либо упорядоченного расположения волокон в поперечном сечении композита. Волокна или, применительно к металлам, проволоки большего диаметра (порядка 100 микрон и более) поставляются в виде отдельных (единичных) волокон. Для их введения в матричный материал применяются не только жидкофазные или газофазные технологии, но и твердофазные технологии с использованием разных типов листовых полуфабрикатов, в которых волокна расположены с заданным шагом относительно друг друга. Поэтому применение листовых полуфабрикатов позволяет добиваться относительно упорядоченного расположения волокон в поперечном сечении композита.

Целью данной статьи является исследование характера расположения волокон в композитных материалах, получаемых при использовании разных типов листовых полуфабрикатов, и математическое описание своеобразия укладки волокон в подобных композитах. Исследования проводились на примере получения волокнистого композитного материала (ВКМ), состоящего из алюминиевой матрицы и волокон бора диаметром 140 микрон.

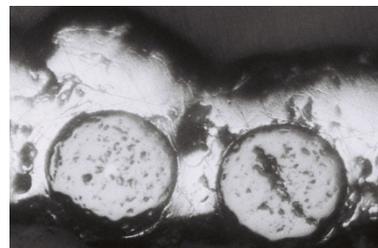
#### Описание видов и особенностей листовых полуфабрикатов, использованных для получения ВКМ алюминиевая матрица – волокна бора

Листовые полуфабрикаты для проведения исследований, отличающиеся особенностями строения матричного материала и его соединения с волокнами, получались двумя разными способами. Подготовительной операцией для обоих способов является намотка волокна на барабан, с нарезанной на нем винтовой ка-

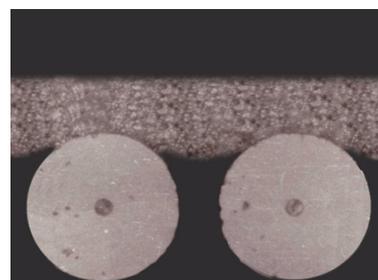
навкой для укладки в нее волокна. Это позволяет расположить волокна относительно друг друга с требуемым шагом в направлении оси барабана. Затем использовались два разных метода введения дозированного количества матричного материала, который соединяет и фиксирует между собой намотанные на барабан волокна.

При первом методе использовалось плазменное напыление алюминиевой матрицы на поверхность барабана с намотанным на него волокном. Напыляемые алюминиевые частицы образуют очаги схватывания с соседними частицами и поверхностью волокон бора. При этом алюминиевая матрица проникает глубоко в межволоконное пространство, и охватывает волокна бора по большей части их поверхности (рис. 1, а).

Это приводит к фиксации положения волокон относительно друг друга и обеспечивает такую прочность плазменно-напыленного слоя матрицы, которая позволяет выполнять дальнейшие необходимые технологические операции с полученным таким образом листовым полуфабрикатом. После разрезания волокон по образующей барабана волокна бора, с нанесенным на них слоем матрицы, распрямляются, и получается листовый полуфабрикат, в котором волокна расположены с заданным шагом.



а)



б)

Рис. 1. Фрагмент листового полуфабриката алюминий–бор с плазменно-напыленной (а) и фольговой (б) матрицей

Отличительной особенностью второго способа получения листового полуфабриката являлось использование вместо плазменно-

напыленного слоя матричного материала слоя алюминиевой фольги. Барабан, с намотанным на него волокном, оборачивается фольгой, а затем, под действием равномерного давления при повышенной температуре, осуществляется частичное впрессовывание волокон (примерно на одну треть диаметра) в алюминиевую фольгу (рис. 1, б).

Каждое волокно играет роль рабочего инструмента, клина с переменным углом заточки, и при впрессовывании их в алюминиевую матрицу достигается прочность соединения волокон с матричным материалом [2, 7, 8] достаточная для того, чтобы надежно удерживать волокна на поверхности фольги. Так же как и в первом случае, после разрезания волокон по образующей барабана получается листовая фольговая полуфабрикат, волокна которого расположены с заданным шагом и достаточно прочно соединены с матричным материалом.

Характеристики плазменно-напыленного и фольгового слоя матричного материала в листовых полуфабрикатах существенно отличаются. Плазменно-напыленный матричный материал имеет исходную пористость около 15 % и на порядок более низкую прочность, по сравнению с прочностью того алюминиевого сплава, который используется при плазменном напылении [3, 4].

Кроме того, на поверхности плазменно-напыленного слоя матричного материала наблюдаются неровности и неравномерность его распределения по площади полуфабриката (см. рис. 1, а). Это приводит к тому, что в процессе уплотнения пакета листовых полуфабрикатов, полученных плазменным напылением матрицы, может происходить существенное смещение волокон относительно друг друга.

В отличие от плазменно-напыленного матричного материала, в фольге отсутствует пористость и прочностные свойства, несмотря на воздействие повышенных температур, не опускаются ниже свойств отожженного материала. Толщина фольги достаточно стабильна по всей её площади. В соответствии с ГОСТом на алюминиевую техническую фольгу колебания ее толщины не могут превышать 10 %. Поэтому в процессе уплотнения пакета листовых фольговых полуфабрикатов смещение волокон относительно друг друга должно быть существенно меньше, чем в случае плазменно-напыленного листового полуфабриката.

Данное утверждение проверялось в ходе

эксперимента по получению волокнистого композита путем прессования пакетов листовых полуфабрикатов с плазменно-напыленной и фольговой матрицей.

### **Выбор параметров листовых полуфабрикатов с фольговой и плазменно-напыленной матрицами, а также условий изготовления из них волокнистых композитов**

Высокие прочностные свойства волокнистых композитных материалов достигаются при достаточно большой объемной доле упрочняющих волокон. Поэтому практическое значение имеют исследования характера расположения волокон при их объемной доле не менее 50 %. В связи с этим, в проводимых в данной работе исследованиях, применялись листовые полуфабрикаты, параметры которых позволяют обеспечивать указанную выше объемную долю содержания волокон.

При оценке объемной доли волокон в волокнистом композитном материале, получаемого при использовании листовых полуфабрикатов, целесообразно использовать формулу, содержащую значение шага расположения волокон внутри слоя, образованного полуфабрикатом (внутрислоевой шаг  $S_{вс}$ ), и шага между близлежащими слоями волокон, образованных полуфабрикатами (межслоевой шаг  $S_{мс}$ ), (рис.2):

$$V_f = \frac{\pi d_f^2}{4 S_{вс} S_{мс}}, \quad (1)$$

где  $d_f$  – диаметр волокон;  $S_{вс}$  и  $S_{мс}$  – среднее значение внутрислоевого и межслоевого шага расположения волокон соответственно.

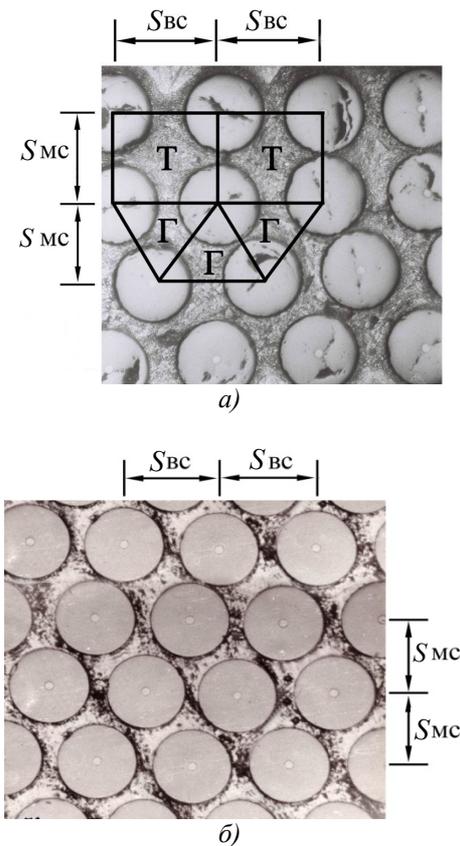
При этом необходимо учитывать, что величины внутрислоевого  $S_{вс}$  и межслоевого  $S_{мс}$  шагов расположения волокон в композите могут колебаться по объему материала за счет неравномерности распределения матричного материала и смещения волокон от их исходного расположения в полуфабрикате.

Исходя из вышесказанного, для обеспечения объемной доли волокна, в волокнистом композитном материале превышающей 50 %, использовались листовые полуфабрикаты со следующими параметрами:

– фольговые полуфабрикаты с использованием фольги толщиной 50 мкм из алюминиевого сплава АМг2 и волокон бора диаметром

140 мкм с шагом их расположения в полуфабрикате равном 170 мкм, что обеспечивает получение волокнистого композита со средним значением расстояния между слоями волокон  $S_{mc} \approx 138$  мкм;

– плазменно-напыленные полуфабрикаты с использованием плазменно-напыленной матрицы из алюминиевого сплава АМг6 и волокон бора диаметром 140 мкм с шагом их расположения в полуфабрикате 180 мкм, что позволяет обеспечить получение волокнистого композита со средним значением расстояния между слоями волокон  $S_{mc} \approx 146$  мкм.



**Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения ВКМ алюминий–бор с плазменно-напыленной (а) и фольговой (б) матрицей:**

"Т" и "Г" – элемент тетрагонального и гексагонального характера расположения волокон соответственно;  $S_{bc}$  и  $S_{mc}$  – внутрислойной и межслойной шаг расположения волокон соответственно

Несмотря на существующую разницу усредненных значений объемной доли волокон в волокнистых композитах, полученных из этих разных типов полуфабрикатов (65,6 % при фольговой и 58,6 % при плазменно-напыленной матрице), максимально достигаемые значения доли волокна в отдельных объемах этих материалов близки. Это получается,

из-за больших колебаний внутрислойного  $S_{bc}$  и межслойного  $S_{mc}$  шага расположения волокон в композите при использовании плазменно-напыленной матрицы.

Далее из полуфабрикатов, с указанными выше параметрами, нарезались карточки, которые собирались в пакеты по 15 слоев и прессовались в пресс-форме, препятствующей растеканию прессуемого пакета в направлении перпендикулярном направлению оси волокон. Температура и давление прессования плазменно-напыленного полуфабриката выбирались исходя из условия полного уплотнения плазменно-напыленной матрицы (то есть практически до полного исчезновения исходной пористости в плазменно-напыленном алюминиевом слое и заполнению зазоров между слоями полуфабриката), а режимы прессования пакета листовых фольговых полуфабрикатов назначались из условия полного заполнения алюминиевой матрицей межволоконного пространства. В соответствии с проведенными ранее исследованиями [3, 4, 5] давление прессования пакетов из листовых плазменно-напыленных и фольговых полуфабрикатов составляло 50 МПа при 520 °С в течение 15 мин.

Затем, от полученных по указанным режимам пластин волокнистого композитного материала, методом электроискровой резки в плоскости перпендикулярной оси расположенных в композите волокон отрезались образцы длиной 15 мм. Из этих образцов по поверхности реза изготавливались металлографические шлифы, на которых исследовались особенности характера взаимного расположения волокон в волокнистых композитах, полученных из плазменно-напыленного и фольгового полуфабрикатов. Фрагменты поперечного сечения волокнистого композита алюминий–бор с плазменно-напыленной и фольговой матрицами представлены на рис. 2.

**Исследования характера расположения волокон в композитах, полученных из разных типов листовых полуфабрикатов**

Качественный анализ шлифов волокнистого композита алюминий–бор (см. рис. 2) позволяет сделать следующие выводы:

1. На всех исследованных шлифах преобладает расположение волокон близкое к гексагональному см. (рис. 2 а, б). Однако на шлифах волокнистого композитного материала, полученного с использованием полуфабриката с плазменно-напыленной матрицей, помимо

гексагонального встречается и тетрагональный характер расположения волокон (см. рис. 2, а).

2. Фиксированный шаг расположения волокон, заданный в листовых полуфабрикатах при изготовлении волокнистого композитного материала, нарушается. Это происходит по двум причинам. Во-первых, в процессе получения композита из-за неравномерного течения матрицы и/или ее неравномерного уплотнения при использовании плазменно-напыленного полуфабриката наблюдается произвольное смещение вдоль слоя каждого волокна относительно его первоначального положения в полуфабрикате.

Во-вторых, в результате того, что при сборке пакета листовых полуфабрикатов, из которого формируется композитный материал, полуфабрикаты случайным или установленным образом могут быть смещены относительно друг друга, то в композите присутствует "согласованное" (т.е. близкое по направлению и величине) смещение одного слоя волокон относительно другого близлежащего слоя волокон.

3. У волокон, расположенных в каждом конкретном слое, наблюдается смещение в направлении перпендикулярном этому слою. Особенно сильно это заметно на шлифах волокнистого композита, полученного из полуфабрикатов с плазменно-напыленной матрицей.

4. Можно констатировать, что усредненные расстояния между отдельными слоями волокон, характеризующие межслоевой шаг расположения волокон в композите  $S_{мс}$ , имеют разную величину.

Таким образом, в процессе изготовления композита происходит отклонение волокон от того упорядоченного расположения, которое имеет место в листовых полуфабрикатах.

Нарушение упорядоченности расположения волокон в поперечном сечении композита является следствием трех видов (направлений) смещения волокон:

- внутрислоевого смещения отдельных волокон относительно их исходного положения в полуфабрикате;
- смещения отдельных волокон перпендикулярно их положению в листовом полуфабрикате;
- "согласованного" смещения волокон, находящихся в близлежащих слоях, относительно друг друга в направлении параллельном слоям.

Для математического описания величин и

закономерностей, присущих каждому из перечисленных выше видов смещений волокон, была использована следующая методика проведения исследований:

I. Каждому волокну на исследуемой поверхности шлифа присваивался свой индивидуальный индекс ( $i; j$ ), исходя из слоя, в котором волокно находится (слои нумеровались от 0 до  $i$ -го значения), и порядкового номера данного волокна в  $i$ -м слое (волокна в слое нумеровались от 0 до  $j$ -го значения).

II. Назначались две базовые линии, параллельная ( $X$ ) и перпендикулярная ( $Y$ ) слоям волокон. Относительно этих линий проводились соответствующие измерения  $i$ -х и  $j$ -х координат каждого волокна на шлифе. Базовая линия параллельная слоям волокон ( $X$ ) располагалась ниже нулевого (нижнего) слоя волокон (примерно на 0,7 диаметра волокна от центра самого нижнего волокна в слое). Базовая линия перпендикулярная слоям ( $Y$ ) располагалась левее центра самого "левого" волокна на исследуемой поверхности шлифа.

III. Формировалась таблица, в которую путем проводимых измерений на исследуемом шлифе для каждого волокна с индексом  $i; j$  заносились соответствующие значения координат волокна, измеренные относительно базовых линий.

IV. Координаты волокон относительно линии  $X$  (в направлении линии  $Y$ ) использовались для расчета средних расстояний от базовой линии до каждого слоя волокон, усредненных расстояний между соседними слоями, а также величин и характера смещений каждого волокна от срединной линии каждого слоя, которому это волокно принадлежит.

V. Координаты волокон относительно линии  $Y$  (в направлении линии  $X$ ) использовались для определения расстояния между соседними волокнами, находящимися в каждом отдельном слое, образованном листовыми полуфабрикатами. Полученные данные позволяют оценить среднее расстояние между волокнами в слоях, образованных листовыми полуфабрикатами, а также величины и характера смещений каждого волокна внутри слоя, к которому они относятся, от их исходного положения в полуфабрикате. Необходимо отметить, что при этом не учитывается возможное согласованное смещение близлежащих слоев волокон в композите относительно друг друга.

VI. Величина согласованного смещения близлежащих слоев волокон в композите относительно друг друга определялась на основе

анализа возможного смещения отдельных слоев волокон в композите относительно друг друга. При этом учитывались значения внутрислоевого  $S_{bc}$  и межслоевого  $S_{mc}$  шагов расположения волокон в композите, а также величины наблюдаемого минимального расстояния между поверхностями волокон ( $b^*$ ).

Значение минимального расстояния между поверхностями волокон ( $b^*$ ) существенно влияет на величину максимально возможных согласованных смещений слоев волокон при изготовлении композита. Так как для уменьшения расстояния между поверхностями волокон в процессе получения композита требуются все возрастающие удельные нагрузки [5], то возникают такие условия, когда дальнейшее смещение волокон за счет их сближения становится практически невозможным. Замеры, проведенные на исследуемых шлифах, показали, что в нашем случае минимальное расстояние между поверхностями волокон составляет 3 микрона для композита с плазменно-напыленной матрицей и 7 микрон для композита с фольговой матрицей.

Величина максимально возможных смещений слоев волокон, образованных полуфабрикатом, различна в случаях, когда межслоевой шаг расположения волокон  $S_{mc}$  больше и меньше эффективного диаметра волокна  $d_f^{эф}$ , величина которого равна диаметру волокна  $d_f$  плюс половина минимально допустимого расстояния между волокнами  $b^*$ .

Если межслоевой шаг расположения волокон  $S_{mc}$  больше указанной величины, то согласованному смещению слоев полуфабриката в процессе изготовления композита ничего не препятствует и максимальное смещение слоя  $C_{max}^{сл}$  можно считать равным среднему шагу расположения волокон в слое.

Если же межслоевой шаг расположения волокон  $S_{mc}$  меньше эффективного диаметра волокна, то чем меньше  $S_{mc}$ , тем в большей степени волокна ближайшего слоя препятствуют согласованному смещению соседнего слоя волокон.

Из чисто геометрических соображений можно записать, что в этом случае максимальное смещение слоя составит:

$$C_{max}^{сл} = S_{bc} - 2\sqrt{(d_f^{эф})^2 - S_{mc}^2}. \quad (2)$$

В отличие от отдельных волокон, которые имеют предварительное фиксированное положение в листовом полуфабрикате, сами листовые полуфабрикаты при сборке пакета для последующего прессования не фиксиру-

ются каким-либо способом относительно друг друга. Поэтому можно считать, что согласованное смещение одного соседнего слоя волокон относительно другого слоя подчиняется равномерному закону распределения.

VII. Для интегральной характеристики характера взаимного расположения волокон в композите у каждого волокна вычислялись расстояния до центров близлежащих волокон. Близлежащими считаются 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 (см. рис. 2, а). Полученный массив данных по расстоянию до близлежащих волокон использовался для оценки среднего расстояния между волокнами, а также величин и характера отклонений расстояний между волокнами от среднего значения.

#### Результаты, полученные при анализе металлографических шлифов волокнистого композитного материала, изготовленного с использованием листовых полуфабрикатов с фольговой матрицей

Исследования металлографических шлифов волокнистого композитного материала с фольговой матрицей на основе описанной выше методики показали, что:

– Среднее расстояние между волокнами внутри слоев, образованных листовыми полуфабрикатами  $S_{bc}$ , составляет 171 микрон, что практически равно величине шага расположения волокон в полуфабрикатах (170 мкм), использованных для изготовления композита.

– Реальные значения расстояний между волокнами в отдельных слоях, образованных листовыми полуфабрикатами, находятся в диапазоне от 160 до 184 микрон. Каждое конкретное значение внутрислоевого шага расположения волокон  $S_{bc}$  можно рассматривать как случайную величину, подчиняющуюся определенному закону распределения. Данные по замеренным значениям расстояний между волокнами в слоях композита удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{Sbc} = 5,3$ .

– Расстояния между слоями волокон в композите  $S_{mc}$  колеблются в диапазоне от 135 до 140 микрон при средней величине равной 137,7 микрон и удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{Smc} = 1,7$ .

– Смещения отдельных волокон перпендикулярно срединной линии слоя составляет примерно  $\pm 2,5$  мкм и удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{смfn} = 1,2$ .

– Максимальное согласованное смещение близлежащих слоев волокон относительно друг друга не превышает 62 микрона и зависит от фактического значения расстояния между слоями волокон.

– При обработке данных по расстояниям до близлежащих волокон  $R$  установлено, что они изменяются от 146 до 185 микрон при среднем значении расстояния между волокнами в композите  $R_{ср}$  равном 166 микрон. Данные по замеренным значениям расстояний между соседними волокнами в сечении композита удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_R$  равным 8,8.

### Результаты, полученные при анализе металлографических шлифов волокнистого композитного материала, изготовленного с использованием листовых полуфабрикатов с плазменно-напыленной матрицей

– Среднее расстояние между волокнами в слоях, образованных листовыми полуфабрикатами  $S_{вс}$ , составляет 182 микрона, что близко по значению к величине шага расположения волокон в полуфабрикатах (180 мкм), использованных для изготовления композита.

– Реальные значения расстояний между волокнами в отдельных слоях, образованных листовыми полуфабрикатами, находятся в диапазоне от 167 до 202 микрон и удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{Sвс}$  равным 8,8.

– Расстояния между слоями волокон в композите  $S_{мс}$  колеблются в диапазоне от 138,5 до 152 микрон при средней величине равной 145,9 микрон и удовлетворительно описываются законом нормального распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{Sмс} = 5,9$ .

– Смещения отдельных волокон перпендикулярно срединной линии слоя составляет примерно  $\pm 6,5$  мкм и удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{смfn} = 6,3$ .

– Максимальное согласованное смещение близлежащих слоев волокон относительно друг друга зависит от фактического значения

расстояния между слоями волокон и в случае, когда межслоевой шаг расположения волокон  $S_{мс}$  превышает величину диаметра используемых волокон  $d_f$ , может достигать величины среднего расстояния между волокнами в слое  $S_{вс}$ .

– При обработке данных по расстояниям до близлежащих волокон  $R$  установлено, что они изменяются от 142,7 до 248,6 микрон при среднем значении расстояния между волокнами в композите  $R_{ср}$  равном 183 микрона. Данные по замеренным значениям расстояний между соседними волокнами в сечении композита удовлетворительно описываются нормальным законом распределения со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_R$  равным 26,4.

### Сравнение характера расположения волокон в композитах, изготовленных из разных типов листовых полуфабрикатов

Результаты исследований показывают, что композиты, изготовленные из листовых полуфабрикатов с плазменно-напыленной матрицей, по сравнению с композитами, изготовленными из листовых полуфабрикатов с фольговой матрицей, имеют:

– в 1,7 раза большее значение среднеквадратичного отклонения шага расположения волокон в слое  $\sigma_{Sвс}$  от его среднего значения  $\bar{S}_{вс}$ .

– в 3,5 раза большее значение среднеквадратичного отклонения межслоевого шага расположения волокон  $\sigma_{Sмс}$  от его среднего значения  $\bar{S}_{мс}$ .

– в 5,3 раза большее значение среднеквадратичного отклонения отдельных волокон в перпендикулярном направлении относительно срединной линии слоя  $\sigma_{смfn}$ .

– в 2,1 раза большую величину максимального возможного согласованного смещения близлежащих слоев волокон относительно друг друга.

– в 3 раза большее значение среднеквадратичного отклонения расстояния до близлежащих волокон  $\sigma_R$  относительно его средней величины  $R_{ср}$ .

### Заключение

1. Проведенные исследования показывают, что, в композитах, изготовленных из полуфабрикатов с плазменно-напыленной матрицей, по сравнению с композитами сформированными

рованными из фольговых полуфабрикатов, волокна в большей степени смещаются от того упорядоченного расположения, которое им задается в полуфабрикате.

В результате композит с плазменно-напыленной матрицей имеет менее упорядоченное расположение волокон и в нем наблюдается не только структура характерная для гексагонального расположения волокон (как это имеет место в композитах из фольговых полуфабрикатов), но и области с тетрагональным расположением волокон (на тех участках, где межслоевой шаг расположения волокон ( $S_{мс}$ ) превышает величину диаметра используемых волокон  $d_f$ ).

2. Математическое описание своеобразия расположения волокон в композитах, полученных из разных типов листовых полуфабрикатов, может быть использовано для имитационного моделирования различных типов структуры волокнистых композитов с целью последующего прогнозирования их свойств на основе походов, изложенных в работах [1, 9].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинский, А.С. Процессы разрушения композиционных материалов: имитация микро и макромеханизмов на ЭВМ. – М.: Наука, 1988 – 278 с.
2. Кочешков, И.В. Применение расчетных методов при разработке технологии получения изделий клинопрессовой сваркой давлением // Ремонт, Восстановление, Модернизация. 2011. №1. – С.39 – 44.
3. Кочешков, И.В. Влияние режимов прессования и отжига на механические свойства плазменно-напыленного алюминиевого сплава АМг6 // Производство проката. 2012. №9. – С. 32 – 37.
4. Кочешков, И.В. Исследование кинетики роста прочности плазменно-напыленного АМг6 при разных условиях температурно-силового воздействия // Ремонт, Восстановление, Модернизация. 2014. №2. – С. 25 – 31.
5. Кочешков, И.В. Анализ силовых условий процесса горячего прессования заготовок, предназначенных для получения волокнистых композиционных материалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. №4. С. 10 – 15.
6. Кочешков, И.В. Анализ образования физического контакта между компонентами композита при уплотнении заготовки, состоящей из слоев алюминиевой фольги и волокон бора // Производство проката. 2013. №12. – С. 15 – 19.
7. Кочешков И.В. Исследование кинетики роста прочности соединения волокон бора с фольговым материалом из алюминиевого сплава АМг2 в процессе изготовления волокнистого композиционного материала методами об-

работки давлением // Производство проката. 2014. №4. – С. 32 – 37.

8. Кочешков, И.В. Расчет прочности соединения компонентов композита при его изготовлении горячим прессованием пакета чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон бора // Производство проката. – 2014. – № 5. – С. 35–40.

9. Кочешков, И.В. Структурный подход в понимании сущности композиционных материалов и разработке процессов получения композитов с требуемыми свойствами // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014.– № 10(40). – С. 3–9.

## REFERENCES

1. Ovchinsky A.C. *Processes of Composite Destruction: Micro- and Macro-mechanism Imitation by Computer*. - M.: Science, 1988 – pp. 278.
2. Kocheshkov I.V. Design method application at techniques development for product manufacturing by wedge-pressure welding // *Repair, Restoration, Modernization*, 2011, №1 - pp.39-44.
3. Kocheshkov I.V. Impact of pressing and annealing modes upon stress-strain properties of plasma-sprayed AMg6 aluminum alloy // *Rolled Metal Production*, 2012, №9 - pp. 32-37.
4. Kocheshkov I.V. Investigation of durability growth kinetics in plasma-sprayed AMg6 alloy under different conditions of temperature-force impact // *Repair, Restoration, Modernization*, 2014, №2 - pp. 25-31.
5. Kocheshkov I.V. Power conditions analysis of hot-pressing process of blanks meant for fiber composite manufacturing // *Press-Forging Production. Metal Forming*, 2011, №4, pp.10-15.
6. Kocheshkov I.V. Analysis of physical contact formation between composite components at sealing of blank consisting of aluminum foil layers and boron fibers // *Rolled Metal Manufacturing*, 2013, №12 - pp. 15-19.
7. Kocheshkov I.V. Investigation of strength growth kinetics in connection of boron fibers with foil material made of AMg2 aluminum alloy during fiber composite manufacturing by shaping // *Rolled Metal Manufacturing*, 2014, №4 – pp. 32-37.
8. Kocheshkov I.V. Durability computation for composite component joint at its manufacturing by hot-pressing of alternate layers package of aluminum foil and boron fibers // *Rolled Metal Manufacturing*. – 2014. – № 5. – pp. 35–40.
9. Kocheshkov I.V. Structural approach to comprehension of composite essence and process development for manufacturing of composites with required properties // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014.– № 10(40). – pp. 3–9.

Рецензент д.т.н. А.П. Амосов