

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 бóльшего 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.

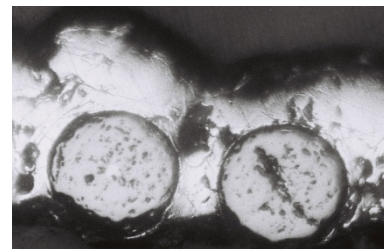
Описание видов и особенностей листовых полуфабрикатов, использованных для получения ВКМ алюминиевая матрица – волокна бора

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-

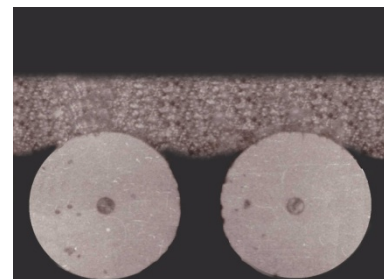
навкой для укладки в нее волокна. Это позволяет расположить волокна относительно друг друга с требуемым шагом в направлении оси барабана. Затем использовались два разных метода введения дозированного количества матричного материала, который соединяет и фиксирует между собой намотанные на барабан волокна.

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 впредсоединение 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 впредсоединении 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 полуфабрика, 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.

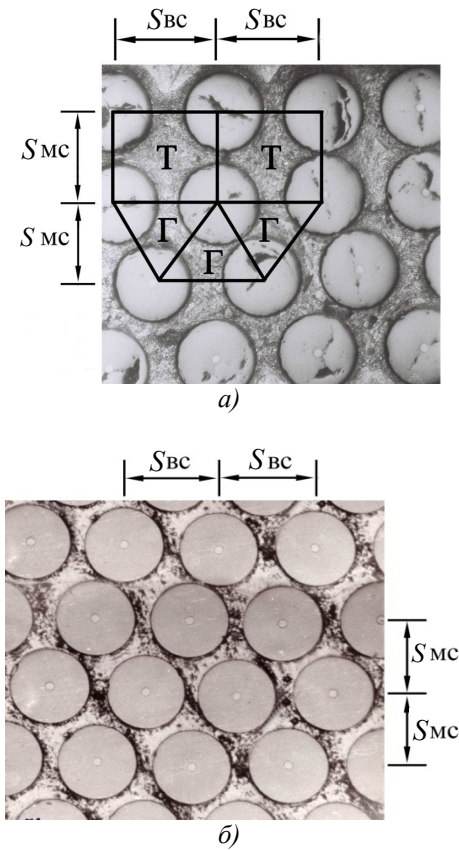


Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения ВКМ алюминий–бор с плазменно-напыленной (а) и фольговой (б) матрицей:

"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 σ_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 σ_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 σ_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