

Закономерности проявления анизотропии свойств в трех взаимно перпендикулярных сечениях стеклоуглепластика

Patterns of manifestation of anisotropy of properties in three mutually perpendicular sections of glass-carbon fiber

Е.А. ВЕШКИН, В.И. ПОСТНОВ, В.В. СЕМЕНЫЧЕВ, Е.В. КРАШЕНИННИКОВА

E.A. VESHKIN, V.I. POSTNOV, V.V. SEMENYCHEV, E.V. KRASHENINNIKOVA

Ульяновский научно-технологический центр федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (Россия, г. Ульяновск)

Ulyanovsk Research and Technology Centre of the All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials Federal State Unitary Enterprise (Russia, Ulyanovsk)

untcviam@viam.ru

На образцах из гибридного композиционного материала толщиной 4,8 мм, в котором в качестве наполнителя использованы стекло- и углеволокна, а в качестве матрицы – связующее УП-2227Н, проводили исследования, оценивающие закономерности изменения величин микротвердости по толщине образцов. Измерения микротвердости проводили только в зонах матрицы на поперечных шлифах при нагрузке на индентор микротвердомера, равной 10 грамм (0,1 Н). Проведенными исследованиями установлено, что величина микротвердости образцов стеклоуглепластика по их толщине от лицевой поверхности образца к оборотной изменяется по параболическому закону, причем максимальные значения микротвердости приходятся на середину высотного сечения, а минимальные – на подповерхностные зоны.

Ключевые слова: стеклоуглепластик, матрица, наполнитель, микротвердость, экзотермические эффекты, структура композиционного материала

Studies evaluating the patterns of changes in microhardness over the thickness of samples were carried out on samples of a hybrid composite material 4.8 mm thick, in which glass and carbon fibers were used as a filler, and UP-2227N binder was used as a matrix. Microhardness measurements were carried out only in the zones of the matrix in transverse sections with a load on the indenter of the microhardness meter equal to 10 grams (0.1 N). It was found that the microhardness of the samples of fiberglass changes according to a parabolic law from the front surface of the sample to the reverse one, with the maximum values of microhardness in the middle of the altitude section, and the minimum in the subsurface zones.

Keywords: fiberglass, matrix, filler, micro-hardness, exothermic effects, structure of the composite material

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-5-6-15-19

Введение

В разработке полимерных композиционных материалов (ПКМ) наиболее полно реализована концепция единства «материал-технология-конструкция» [1, 2]. Объемы применения ПКМ в промышленности быстро растут, а возросший интерес к ним приводит к росту объемов проводимых исследований в части всестороннего изучения их механических и физических свойств, а также технологических режимов и приемов получения тех или иных композиционных полуфабрикатов [3, 4].

Объемы применения ПКМ в авиационных конструкциях постоянно растут, что позволяет обеспечивать снижение массы планера самолета до 20–25%. В настоящее время производство конструкций из композиционных материалов в условиях рынка подвержено жесткой конкуренции, и вопрос снижения издержек при сохранении высокого качества деталей при изготовлении летательных аппаратов выходит на первый план. Это заставляет производителей искать пути снижения их себестоимости за счёт внедрения новых материалов и энергосберегающих и прогрессивных технологий [5, 6].

Уровень свойств современных ПКМ во многом определяется применяемыми полимерными связующими, наполнителями и технологическими процессами формования конструктивного элемента, которые были выбраны или специально разработаны для изготовления детали [7–9]. Резонно, что процесс разработки новых материалов всегда сопровождается всесторонними исследованиями их свойств. Только комплексные всесторонние исследования каждого материала могут дать ему объективную характеристику и гарантировать его работоспособность [10–12]. Вместе с традици-

онными, десятилетиями апробированными методами исследования тех или иных свойств материалов все чаще находят применение и нетрадиционные, и стандартные методы, но используемые для других целей. Все это позволяет значительно расширить круг измеряемых характеристик изучаемого объекта [13–15], и, естественно, повысить достоверность получаемых сведений об объекте.

Материаловеды, конструкторы и технологи широко применяют математические методы исследования, которые позволяют получать материалы с заранее заданными свойствами и характеристиками. Методическое обеспечение проводимых разработок и исследований позволит значительно снизить разбросы и повысить повторяемость результатов [16–18]. В связи с постоянным ростом ресурса авиационной техники и объемов применения ПКМ в ней большое внимание уделяется и разработке специальных покрытий, которые создавались специально для конструкций из композиционных материалов и обладают особыми свойствами [19].

Величина микротвердости является дифференциальной характеристикой материала, и она характеризует свойства исследуемого образца в определенной конкретной зоне изучаемого материала [20, 21]. В последнее время в научно-технических журналах появились публикации, посвященные исследованиям изменения значений микротвердости матрицы композиционного материала по его толщине. Установлен факт, что всегда экстремальные значения микротвердости находятся в середине высотного сечения образца и зависят от природы отвержденного связующего [22, 23]. Данное явление может быть объяснено тем, что процесс полимеризации связующего в объеме композиции происходит не одновременно, и в

нем вполне возможно проявление анизотропии свойств по его толщине. Некоторые исследователи объясняют анизотропию свойств связующего в ПКМ сочетанием аморфности и кристалличности материала [24]. Таким образом, целью настоящей работы являются исследования закономерностей изменения микротвердости матрицы по толщине гибридных образцов из стеклоуглепластика.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [25].

Методическая часть

В качестве объекта исследований выбраны образцы лонжерона из стеклоуглепластика толщиной 4,8 мм, где в качестве наполнителя использовали стеклянные и углеродные волокна, а в качестве связующего – УП-2227Н.

Микротвердость матрицы гибридных образцов определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3М на шлифах двух взаимно перпендикулярных плоскостей, условно названных боковой и торцевой. Нагрузка на индентор микротвердомера составляла 10 грамм (0,1 Н), в каждой зоне проводили по 12 измерений диагоналей отпечатков.

Линии, по которым производили измерения микротвердости, располагались на следующих глубинах от лицевой поверхности образцов: 0,1 – 1,2 – 2,4 – 3,6 – 4,7 мм.

Следовательно, образцы по своей толщине делились на пять симметричных зон: на глубине 0,1 и 4,7 мм – подповерхностные зоны, на глубине 1,2 и 3,6 мм – полусредние зоны и на глубине 2,4 мм – сердцевинная зона. На рисунке 1 показаны плоскости, на которых производили оценку микротвердости.

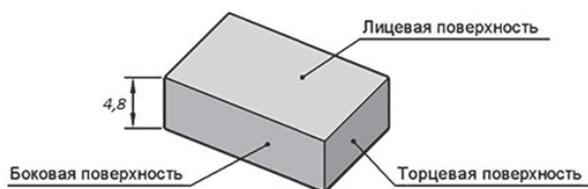


Рис. 1. Схема измерения микротвердости на образце.

Третья плоскость, на которой оценивали микротвердость матрицы образцов, представляла собой лицевую поверхность образца или плоскость, полученную в результате её шлифования. Причем шлиф изготавливали таким образом, что заливали одновременно два образца, один из которых устанавливали к плоскости шлифа лицевой стороной, а второй – обратной. Таким образом, получалось, что при шлифовке одной плоскости получали фактически одновременное уменьшение толщины образцов со стороны лицевой и обратной стороны, и так до сердцевинной зоны.

Следует отметить, что при измерении микротвердости матриц в ПКМ укол индентора приходился только на матрицу, и отпечаток не касался волокон наполнителя во избежание искажения результатов измерения. Микроскопические исследования шлифов проводили на металлографическом инвертированном микроскопе Olympus при различных увеличениях с обязательным указанием масштаба.

Предложена новая характеристика материала «Коэффициент объемной анизотропии» (B), который рассчитывается по формуле:

$$B = (H_{\text{ис}} - H_{\text{уп}}) / H_{\text{ис}}$$

где B – коэффициент объемной анизотропии;
 $H_{\text{ис}}$ – значение микротвердости в сердцевинной зоне образца (МПа);
 $H_{\text{уп}}$ – значение микротвердости в подповерхностной зоне образца (МПа).

Коэффициент объемной анизотропии является безразмерной величиной и свидетельствует о различиях в значениях микротвердости отвержденного связующего в высотном направлении. Коэффициент объемной анизотропии может принимать положительные, отрицательные или нулевые значения.

Экспериментальные материалы и их обсуждение

На рисунке 2 показан внешний вид лицевой стороны гибридного образца.

Результаты проведенных измерений диагоналей отпечатков индентора и полученных значений микротвердости для различных зон торцевой плоскости образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследований торцевой плоскости.

Зона	Значения диагонали отпечатка, мкм	Среднее значение диагонали отпечатка, мкм	Микротвердость, МПа
Подповерхностная (0,1 мм)	24,30; 23,73; 24,29; 23,88; 23,99; 24,02; 24,32; 24,31; 24,02; 24,29; 23,99; 24,30	24,12	313
Полусредняя (1,2 мм)	22,30; 22,77; 22,17; 22,47; 22,17 22,50; 21,91; 22,88; 22,00; 22,50; 22,48; 22,79	22,41	362
Сердцевинная (2,4 мм)	20,35; 20,65; 20,38; 20,96; 20,35; 21,01; 20,99; 21,26; 20,68; 21,01; 20,97; 20,96	20,80	420
Полусредняя (3,6 мм)	22,49; 22,77; 22,47; 22,33; 22,20; 22,24; 22,47; 22,77; 22,50; 22,18; 22,54; 22,17	22,43	362
Подповерхностная (4,7 мм)	24,29; 23,99; 24,31; 24,29; 24,61; 24,00; 24,31; 24,02; 24,02; 23,69; 23,68; 23,99	24,10	313

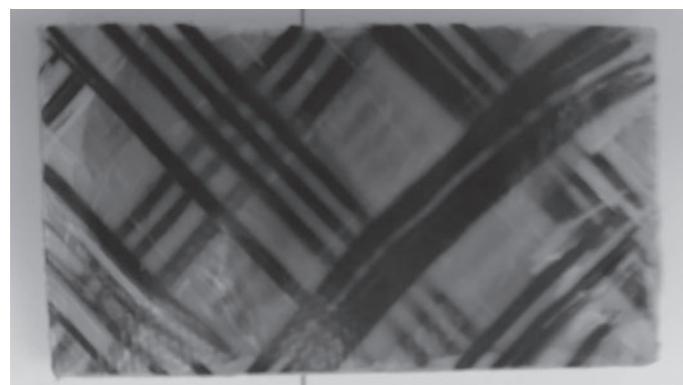


Рис. 2. Внешний вид лицевой стороны образца.

Анализ представленных данных показал, что для торцевой плоскости образца текущие значения диагоналей отпечатков индентора в одноименных зонах мало отличаются друг от друга. Микротвердости матрицы гибридного образца в подповерхностных и полусредних зонах попарно равны, максимальные значения микротвердости получены в сердцевине высотного сечения образца.

В таблице 2 приведены результаты измерений текущих значений диагоналей отпечатков индентора, их средние значения и величины микротвердости матрицы для различных зон боковой плоскости.

Таблица 2. Результаты исследований боковой плоскости.

Зона	Значения диагонали отпечатка, мкм	Среднее значение диагонали отпечатка, мкм	Микротвердость, МПа
Подповерхностная (0,1 мм)	24,29; 25,52; 25,20; 25,50; 25,50; 25,22; 24,91; 24,61; 25,51; 25,55; 24,90; 25,21	25,16	287
Полусредняя (1,2 мм)	23,08; 23,23; 23,38; 23,13; 23,09; 23,08; 23,39; 23,38; 23,09; 23,23; 23,11; 23,08	23,18	338
Сердцевинная (2,4 мм)	22,17; 21,88; 21,88; 22,18; 22,17; 22,22; 22,20; 22,17; 22,27; 22,21; 22,20; 22,17	22,14	371
Полусредняя (3,6 мм)	23,38; 23,13; 23,38; 23,08; 23,30; 22,80; 23,03; 23,30; 22,97; 23,08; 23,38; 23,12	23,16	339
Подповерхностная (4,7 мм)	24,93; 24,60; 25,25; 25,51; 25,21; 24,92; 25,22; 25,20; 25,20; 25,81; 25,20; 24,98	25,17	287

Текущие значения диагоналей отпечатков индентора микротвердомера в одноименных зонах достаточно плотные, значения микротвердости матрицы в подповерхностных зонах равны, так же как

и в полусредних зонах, а максимальные значения микротвердости получены в сердцевине высотного сечения образца, так же как и в торцевой плоскости.

Графическая интерпретация значений микротвердости матрицы, полученных в высотном сечении образцов в двух взаимно перпендикулярных сечениях (боковая и торцевая поверхности), приведена на рисунке 3.

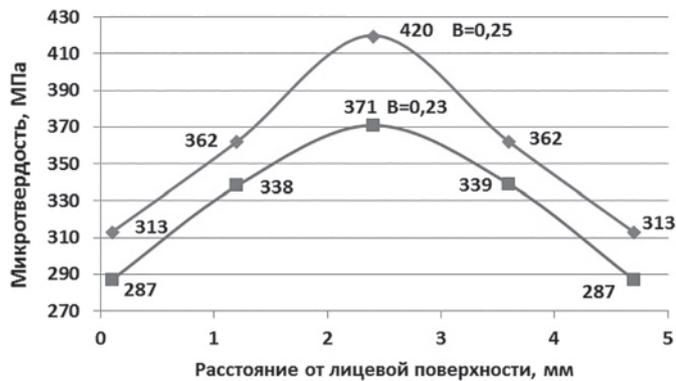


Рис. 3. Изменение микротвердости по толщине образца: \blacklozenge – торцевая плоскость, \blacksquare – боковая плоскость.

Следует отметить, что значения на разных графиках, имеющих вид парабол, различаются достаточно существенно. Так, в вершине параболических кривых значения микротвердости матрицы в торцевой и боковой поверхностях равны 420 и 371 МПа соответственно, т.е. различаются практически на 50 МПа. В подповерхностных зонах отмечены минимальные значения микротвердости матрицы и наименьшие различия микротвердости во взаимно перпендикулярных плоскостях. В районе вершин параболических кривых зависимости изменения микротвердости показаны значения коэффициентов объемной анизотропии: в торцевой плоскости коэффициент $B = 0,25$, а в боковой плоскости $B = 0,23$. Незначительное различие коэффициентов объемной анизотропии объясняется тем, что графики расположены эквидистантно друг к другу, и лишь вершины параболических кривых имеют более существенную разницу значений микротвердости по сравнению с другими зонами.

Таким образом, проведенные исследования по изучению изменения микротвердости по толщине образца в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (торец и бок) позволили установить существенные различия микротвердости в одноименных зонах. В каждом прямоугольном параллелепипеде, а именно такие геометрические фигуры представляют собой исследуемые образцы стеклоуглепластика, существует еще и третья плоскость в трансверсальном направлении – это лицевая поверхность. В таблице 3 показаны результаты измерения микротвердости матрицы на поверхности образца в трансверсальном направлении после нескольких процессов шлифования его поверхности с лицевой и оборотной стороны. В таблице 3 столбец с названием «Толщина образца» обозначает оставшуюся толщину образца. После каждой шлифовки образца измерялась его толщина и на полученной плоскости проводилось последующее измерение микротвердости.

Таблица 3. Микротвердость образцов в трансверсальном направлении с лицевой и оборотной стороны.

Состояние поверхности	Толщина образца, мм	Диагональ отпечатка, мкм		Микротвердость, МПа	
		Сторона образца		Сторона образца	
		Лицевая	Оборотная	Лицевая	Оборотная
Исходная	4,8	22,25	22,27	367	367
I шлифовка	3,8	21,52	21,54	392	391
II шлифовка	2,8	20,65	20,62	427	428
III шлифовка	2,4	20,24	20,22	444	444

Из представленных данных видно, что для измерения микротвердости были выбраны лицевая и оборотная стороны образца, а также его сердцевинная плоскость. Кроме этого, для измерения микротвердости были использованы еще две промежуточные плоскости, которые расположены от лицевой (оборотной) на расстоянии 1 и 2 мм (I и II шлифовки). Плотность результатов измерений диагоналей отпечатков индентора и расчета значений микротвер-

дости в одноименных плоскостях высокая, а величины микротвердости в плоскостях после каждой шлифовки практически равны.

На рисунке 4 представлена графическая зависимость микротвердости образца по различным сечениям в трансверсальном направлении.



Рис. 4. Микротвердость полимерной матрицы стеклоуглепластика в различных сечениях трансверсального направления образца.

И здесь эффект изменения микротвердости матрицы по параболической зависимости сохраняется. Так же как и в случае с торцевыми и боковыми поверхностями, максимальные значения микротвердости получены в середине высотного сечения. В таблице 4 приведены значения микротвердости, полученные в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Для краткости показаны значения, соответствующие показателям одной ветви параболы, так как они полностью симметричны.

Таблица 4. Микротвердость матрицы в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

Плоскость	Микротвердость в зонах, МПа		
	Подповерхностная	Полусредняя	Сердцевинная
Торцевая	313	362	440
Боковая	287	338	371
Трансверсальная	367	400	444

Представленные здесь значения микротвердости имеют общую тенденцию: микротвердость образца растет от поверхности к его сердцевине, при этом минимальные значения микротвердости приходится на поверхностные слои, а максимальные значения – на сердцевину образца. Причины изменения микротвердости в вертикальном сечении образцов ненаполненных и наполненных пластиков по параболической зависимости авторами были подробно разобраны ранее [6, 13, 14, 22, 23], где отмечалось, что такой характер изменения микротвердости объясняется экзотермическими эффектами отверждения полимерного связующего в процессе формирования стеклоуглепластика и различными условиями теплопередачи в объеме изготавливаемой детали.

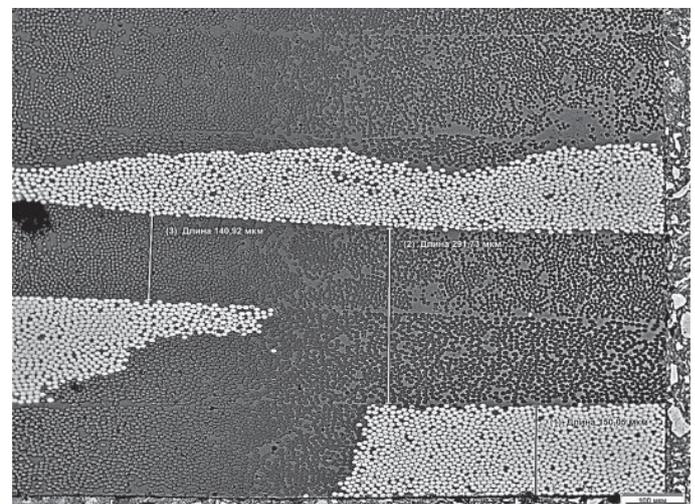


Рис. 5. Структура стеклоуглепластика по торцевой плоскости.

Необходимо остановиться на заметных различиях величин микротвердости образцов во всех взаимно перпендикулярных плоско-

стях и дать объяснения полученным фактам. Рассматриваются две гипотезы, объясняющие полученные эффекты. Первая: отверждение матрицы, наряду с аморфным строением, может проявлять и кристаллические свойства, причем свойства кристаллических зон в разных плоскостях могут существенно отличаться. Вторая: объединение массива однородных элементов матрицы может рассматриваться как самостоятельная единица «кластер», обладающая определёнными свойствами в данной плоскости.

Микроскопические исследования структуры образцов из гибридного композиционного материала проводили во всех трех исследованных плоскостях, так, на рисунке 5 показана фотография микрошлифа стеклоуглепластика, изготовленного по торцевой плоскости.

Из приведенной структуры видно, что наполнитель в виде стеклянных (светлые окружности) и углеродных (темные окружности) волокон ориентирован перпендикулярно плоскости шлифа. Зоны распределения волокон приведены с размерами отдельных структурных составляющих. На рисунке 6 показан фрагмент структуры боковой плоскости образца, здесь волокна наполнителя ориентированы под некоторым углом к плоскости шлифа, на снимке хорошо виден массив стекловолокон толщиной более 600 мкм.

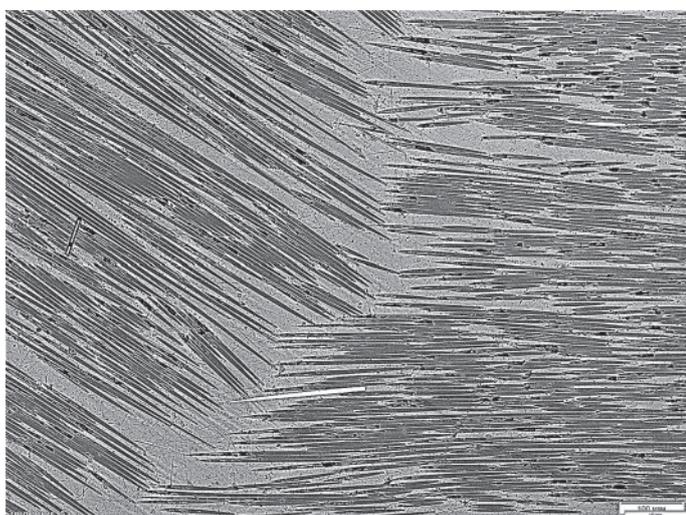


Рис. 6. Структура стеклоуглепластика по боковой плоскости.

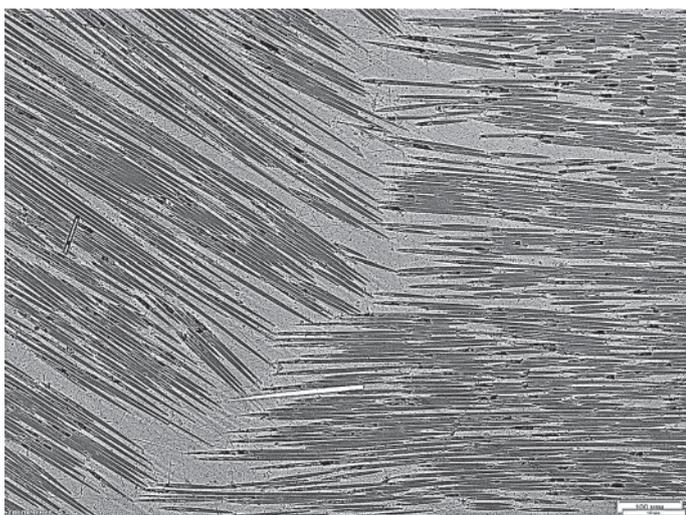


Рис. 7. Структура стеклоуглепластика в плоскости трансверсального направления образца.

На рисунке 7 представлена структура стеклоуглепластика с плоскостью в трансверсальном направлении образца: углеродные волокна, уложенные друг к другу под тупым углом, стеклянные волокна в этой зоне практически отсутствуют, но присутствуют обширные зоны матрицы. На рисунке 8 приведена структура стеклоуглепластика в сердцевинной плоскости: хорошо видны углеродные волокна, образовавшие треугольник, заполненный стекловолокном, здесь также хорошо заметны зоны матрицы, пригодные для оценки микротвердости. В качестве общего замечания при

проведении оценки микротвердости следует отметить высокую трудоемкость поиска участков матрицы достаточных размеров, где возможно произвести укол индентором, в отличие от зон, показанных на рисунках 5 и 6.

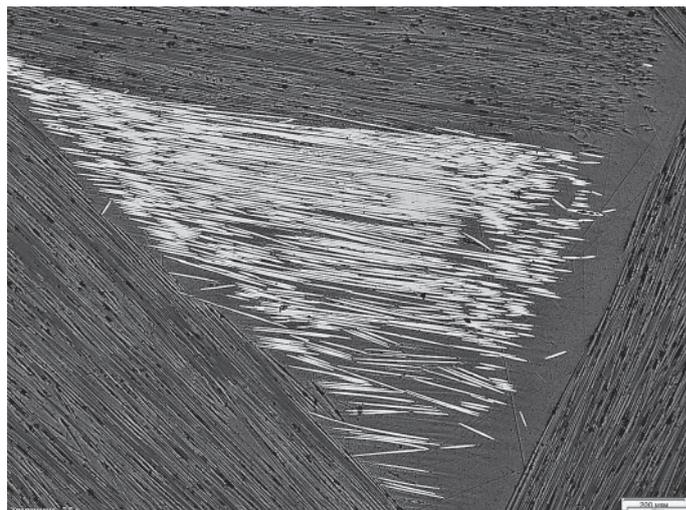


Рис. 8. Структура стеклоуглепластика в сердцевинной плоскости трансверсального направления образца.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

- микротвердость матрицы во всех трех исследованных взаимно перпендикулярных плоскостях по толщине изученного стеклоуглепластика изменяется по параболической зависимости с максимальными значениями микротвердости в середине высотного сечения образцов;
- параболический характер кривых изменения микротвердости матрицы может быть объяснен экзотермическими эффектами, происходящими при отверждении полимерного связующего в процессе формования пластика, и различными условиями теплопередачи в объеме изготавливаемого композиционного материала;
- величины микротвердости матрицы в одноименных зонах и плоскостях образцов стеклоуглепластика не одинаковы и имеют существенные различия, что возможно при наличии структурных неоднородностей в полимерной матрице;
- проведенные микроскопические исследования структуры стеклоуглепластика во всех исследуемых плоскостях показали высокую плотность заполнения объема образца армирующими волокнами.

Литература

1. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*, 2012. №S. С. 7–17.
3. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия-Буран». / Под общей редакцией академика РАН Каблова Е.Н. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
6. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Баранников А.А. Анизотропия свойств в высотном сечении образцов стеклопластиков, отформованных прессовым и автоклавным способами // *Композиты и наноструктуры*, 2019. Т. 11. №2 (42). С. 51–58.
7. Платонов А.А., Коган Д.И., Душин М.И. Изготовление трехмерноразмерных ПКМ методом пропитки пленочным связующим // *Пластические массы*, 2013. №6. С. 56–61.

8. Аристов В.М., Аристова Е.П. Влияние структурной неоднородности на физические свойства частично кристаллических полимеров // Пластические массы, 2016. № 3–4. С. 15–17. DOI: 10.35164/0554-2901-2016-3-4-15-18.
9. Мостовой А.С., Леденев А.Н. Модифицирование эпоксидных полимеров нанодисперсным кремнием // Физика и химия обработки материалов, 2017. №4. С. 61–66.
10. Аткарская А.Б., Зайцев С.В., Кабанов С.Ю., Шеманин В.Г. Микротвердость многослойных композитов // Материаловедение, 2018. №11. С. 41–43. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-11-41-43.
11. Лавров Н.А., Киёмов Ш.Н., Крыжановский В.К. Свойства неполненных эпоксидных полимеров // Пластические массы, 2019. № 1–2. С. 37–39.
12. Екименко А.Н. Перспективы использования полимерных композитов, гибридно-армированных синтетическим и растительным волокном // Материаловедение, 2018. № 7. С. 18–24. DOI: 10.301044/1684-579X-2018-0-7-18-24.
13. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В. Оценка микротвердости образцов на основе связующего ВСТ-1210, отвержденного по различным режимам, как способ тестирования // Материаловедение, 2018. №6. С. 3–6.
14. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Микротвердость и склерометрия, как критерии степени отверждения связующего ЭДТ-69Н // Материаловедение. 2018. №10. С. 3–7. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-10-3-7.
15. Мостовой Г.Е., Карпов А.В., Шишков И.В. Механические свойства конструкционного слоистого углерод-углеродного материала при высоких температурах // Перспективные материалы, 2019. №2. С. 53–60. DOI: 10.30791/1028-978X-2019-2-53-60.
16. Федулов Б.Н., Сафонов А.А., Кантор М.М., Ломов С.В. Моделирование отверждения термопластических композитов и оценка величин остаточных напряжений // Композиты и наноструктуры, 2017. Т. 9. №2. С. 102–122.
17. Дубинский С.В., Севастьянов Ф.С., Сафонов А.А., Абаимов С.Г., Розин Н.В., Федулов Б.Н. Метод расчётного определения прочностных свойств конструкций с учётом образования микро- и макропор при вакуумной инфузии // Композиты и наноструктуры, 2016. Т. 8. №3. С. 151–159.
18. Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления. Упрощенные методы оценивания и проверки: Справочник. М.: Статистика. 1979. 69 с.
19. Дринберг А.С., Бабкин О.Э., Недведский Г.Р., Ястребов С.П. Исследования специальных покрытий для полимерных композиционных материалов // Композиты и наноструктуры, 2018. Т. 10. №4. С. 141–144.
20. Курицына А.Д. Применение метода микротвердости для определения некоторых свойств полимерных материалов // Методы испытания на микротвердость. М.: Наука, 1965. С. 255–260.
21. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
22. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В., Ершов В.В. Оценка кинетики отверждения полиэфирной смолы во времени стандартными и нестандартными методами // Пластические массы, 2018. №11–12. С. 42–46. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-11-12-42-46.
23. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Анизотропные свойства отвержденных связующих // Клеи. Герметики. Технологии, 2018. №8. С. 20–24. DOI: 10.31044/1684-579X-2018-0-8-20-24.
24. Калистратова Л.Ф., Егорова В.А. Упорядочение аморфной фазы как одна из характеристик надмолекулярной структуры аморфно-кристаллического полимера // Материаловедение, 2019. №1. С. 3–8.
25. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии, 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.