

УДК 629.7:628.762

В.Е. ГАЙДАЧУК¹, В.А. КОВАЛЕНКО²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина*

УРОВНИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Проведен анализ дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства. Установлен и обоснован их иерархический порядок возникновения и воздействия на несущую способность изделия, проявляющийся в снижении трещиностойкости при статических воздействиях и долговечности при многократном силовом нагружении. Предложена схема обнаружения трех уровней дефектов структуры полимерных композиционных материалов прямыми и опосредствованными методами контроля степени дефектности материала. Показана необходимость разработки математических моделей и реализующих их методов идентификации наблюдаемых дефектов.

Ключевые слова: *дефекты структуры, изделия из полимерных композиционных материалов, уровни дефектности, схема обнаружения.*

Введение

Известно, что интегральная несущая способность конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) связана с повышением их исходной монолитности, от которой зависят эксплуатационные свойства изделия, обеспечивающие его трещиностойкость при статических нагрузках и последующую долговечность при повторно-переменных воздействиях [1].

Именно степень монолитности (сплошности) ПКМ лежит в основе обеспечения всех видов несущей способности любых конструкций, содержащих в себе элементы из ПКМ, являясь первым уровнем комплексных параметров качества их структуры [1].

Уровни дефектов структуры ПКМ и их компонентов

Аналізу возникновения и влияния дефектов структуры ПКМ и их компонентов посвящено большое количество статей и монографий, например, [2-10] и др. И поры и микротрещины определяют степень монолитности ПКМ, трещиностойкости [2, 11 – 21] и долговечности (усталости) [11, 22 – 24]. Отсутствие этих дефектов обеспечивает сплошность компонентов-волокон и связующего и композита в целом.

Независимо от вида нагружения ПКМ условия сплошности описываются системой числовых неравенств между физико-механическими характеристиками (ФМХ) и прочностными параметрами волокна

и связующего, прочностью их сцепления при сдвиге и отрыве, обеспечивающих совместную работу.

При этом обязательно выполнение всех условий монолитности, приведенных в работе [1], в которой даны откорректированные условия монолитности, впервые полученные А.Л. Рабиновичем [25].

Полной монолитности (сплошности) ПКМ практически достичь не удастся. Провоцируют снижение монолитности исходные ФМХ, теплофизические и прочностные свойства компонентов, соотношения их уровней, проявляющиеся посредством технологических параметров производства конструкций из ПКМ (температура, давление, время и их соотношения), а также природа самих компонентов: наличие испаряющихся летучих, приводящих к образованию пор, изначальные и увеличивающиеся технологической переработки разрывы микроволокон, не полная адгезионная связь на границе «волоконно-связующее» и др. факторы.

Таким образом, уровень монолитности является первым уровнем снижения качества структуры ПКМ, определяющим несущую способность композитных конструкций.

Вторым уровнем снижения качества структуры ПКМ при нагружении композитной конструкции статическими силовыми воздействиями является трещиностойкость, которая определяет сопротивление ПКМ росту трещин под действием трещинодвижущих сил, вызывающих рост трещин.

Наличие дефектов I уровня определяет снижение уровня трещиностойкости ПКМ.

Уровень трещиностойкости ПКМ количественно определяется с помощью различных критериев. В [26] отмечается, что в соответствии с линейной упругостью механики разрушения (ЛУМР) используют критерий интенсивности напряжений K_c как наиболее удобный для расчетов и проще определяемый экспериментально.

Третьим уровнем снижения качества структуры ПКМ является уровень долговечности изделия. При числе циклов $N_{ц} > 10^7$ разрушающее напряжение является, как известно, пределом усталости материала.

Очевидно, что дефекты I и II уровня предопределяют снижение долговечности (предела усталости) ПКМ. Таким образом, первоисточником дефектности изделий из ПКМ являются дефекты I уровня.

В указанных выше источниках [2 – 10] обсуждаются различные классификации дефектов, возникающих в производстве конструкций из ПКМ. Наиболее полная классификационная схема этих дефектов приведена в [6]. Несколько отличающаяся от этой классификации схема приведена в [8] (рис. 1). Основное ее отличие состоит в том, что все дефекты I уровня, в большинстве своем содержащиеся и в схеме [6], разделены на микродефекты, минидефекты и макродефекты. Кроме того, в схеме добавлены эксплуатационные повреждения.

Появление дефектов в конструкциях из композитов, армированных непрерывными волокнами или

ткаными материалами, может быть связано не только с отсутствием достаточно совершенного оборудования, но и с рядом других причин, связанных с субъективными факторами. В табл. 1 представлены технологические методы переработки ПКМ и наиболее характерные дефекты, присущие тому или иному методу [8].

Размеры микродефектов сравнимы с размерами армирующих элементов (элементарными волокнами) или с толщиной связующего между этими элементами. К микродефектам можно отнести также дефекты, возникающие в элементарных армирующих волокнах, в прослойках связующего между этими волокнами, а также на границе раздела «волокно-матрица» [8].

Наиболее характерными дефектами этой группы можно назвать микропоры, микротрещины, включения инородных кристаллов в структуру элементарных волокон, искривления фибрилл, разориентацию микрофибрилл и др.

Как уже отмечалось выше, наличие дефектов на поверхности и в структуре элементарных армирующих волокон приводит к снижению их ФМХ и к увеличению их разброса. Дефекты миниуровня сравнимы с размерами толщины элементарного слоя композиционного материала. Они встречаются в виде структурных несовершенств и нарушений сплошности в элементарных слоях материала.



Рис. 1. Классификационная схема производственных дефектов и эксплуатационных повреждений в конструкциях из ПКМ

Таблица 1

Характерные дефекты типовых методов формования изделий из ПКМ

№ п/п	Метод формования	Характеристика изделий	Дефекты формирования
1	Контактное формование (без прикатки, с прикаткой, с уплотнением)	Крупногабаритные изделия сложной формы, оболочки, листы больших размеров	Пористость, расслоения, разнотолщинность, неравномерное распределение связующего, участки неполного отверждения, увеличение разброса ФМХ, складки, разориентация волокон, участки с низким содержанием связующего, коробление изделия, риски на поверхности
2	Формование эластичной диафрагмой	Крупно- и среднегабаритные листы сложной формы	Неравномерное распределение связующего, разориентация волокон, расслоения, складки, участки неполного отверждения связующего, локальная пористость
3	Авто- и гидроклавное формование	Крупно- и среднегабаритные листы простой и сложной формы	Расслоения, пористость, складки, разориентация армирующего материала
4	Вакуумное формование	Среднегабаритные листы простой и сложной формы	Пористость, складки армирующих слоев, неравномерное распределение связующего, разориентация слоев
5	Метод сухой и мокрой намотки (однонаправленная)	Крупно- и среднегабаритные изделия типа тел вращения (цилиндрические, сферические, конические, оваловидные, тороидальные оболочки), длинномерные конструкции в виде замкнутого профиля прямоугольной или другой формы	Расслоения, пористость, неравномерное распределение связующего, утолщения в зоне нахлестов витков, участков неармированного связующего в зазорах между соседними витками, инородные включения, обрывы и искривления волокон

К ним можно отнести [3, 5, 8]:

- риски и царапины, соизмеримые с толщиной элементарного слоя;
- нарушение адгезионных связей на границе раздела «волокно-матрица»;
- волокнистость и крутку армирующих волокон, разориентацию и их искривление;
- неравномерное распределение связующего в элементарном слое композита; разную степень натяжения армирующих волокон или нитей;
- обрывы отдельных элементарных волокон или нитей и др.

Мини-дефекты связаны либо со структурным строением армирующего наполнителя, либо возникают в процессе технологической переработки составляющих компонентов композиционного материала в изделии. Наиболее характерные мини-дефекты, связанные с нарушением сплошности структуры ПКМ, – поры и мини-трещины в матрице.

Появление пор связано с наличием в связующем большого количества растворителя или влаги, с неправильным выбором режимов термообработки (большая скорость нагрева, низкое давление). Кроме этого, на этапе пропитки материала при мокром методе формования его структуры, могут образоваться воздушные пузырьки, запирающие каналы между

волокнами и препятствующие капиллярному движению по ним связующего. Особенно большое количество мелких пузырьков, пор и раковин возникает при ручной выкладке конструкций из ткани, пропитанной связующим.

Анализ композиционных материалов с различной пористостью показывает, что с ростом длины пор и их содержания степень реализации прочностных и других параметров армирующих волокон в композитах уменьшается. Причем, наиболее опасны вытянутые поры, длина которых превышает критическую длину элементарного волокна в композиционном материале. Особенно пористость сказывается на сопротивлении слоистых материалов сдвиговым нагрузкам и в меньшей степени – изгибающим и растягивающим.

Наряду с этим, поры являются концентраторами напряжений в матрице и при внешнем воздействии на конструкцию или возникновении внутренних остаточных напряжений в материале могут быть источниками образования микро- и мини-трещин как в самой матрице, так и вдоль границы раздела «волокно-матрица».

Микродефекты и большинство мини-дефектов статистическим образом распределены по объему композита и охватываются нижним пределом механических свойств ПКМ.

Конструкции из композитов очень чувствительны также к технологическим дефектам, например, к расслоениям, непрочностям и трещинам, а также ко вновь образовавшимся дефектам (например, к надрезам поверхностных слоев) [25].

Расслоение вдоль разрушенного волокна (отделение волокна от полимерного связующего) может распространяться неограниченно вдоль значительной части волокна, уменьшая, таким образом, эффективность армирования. Примеры расслоения показаны на рис. 2 – 3, изображающих результаты испытания на растяжение образцов из эпоксидной смолы, армированным одним слоем толстых параллельных одиночных волокон [2].



Рис. 2. Распространение трещины в полимерной матрице и расслоение системы «волокну-полимерная матрица», вызванное разрушенным волокном

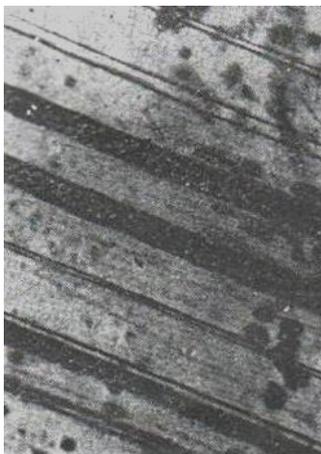


Рис. 3. Расслоение системы «волокну-полимерная матрица»; черные полосы показывают трещину, распространяющуюся вдоль волокон (длина ее во много раз превышает диаметр волокна)

Расслоение может довольно быстро прекращаться, как это показано на рис. 4 и 5, то есть может быть локализовано. Разрушение полимерного связующего, распространяется перпендикулярно на-

правлению армирования от концов разрушенных волокон в направлении к соседним.

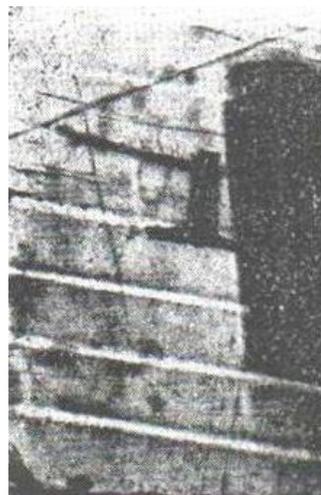


Рис. 4. Растрескивание полимерной матрицы по направлению к соседним волокнам и ограниченное расслоение композиции, вызванное разрушенным волокном



Рис. 5. Растрескивание полимерной матрицы по направлению к соседним волокнам, вызванное разрушенным волокном, но сопровождающееся очень малым расслоением композиции (локализация расслоения)

При достижении трещиной соседних волокон ее дальнейшее распространение сопровождается расслоением связующего у этих волокон. Расслоение может распространяться неограниченно (рис. 3) или распространяться, как это показано на рис. 6, вдоль волокна до его разрушения (вызванного дефектом волокна и концентрацией напряжений, существовавшей в этом месте до начала расслоения); оно может также прекращаться, локализоваться (рис. 5) [2].

Соседние волокна могут разрушаться при достижении их трещиной вследствие концентрации напряжений в ее вершине (рис. 6 – 7).

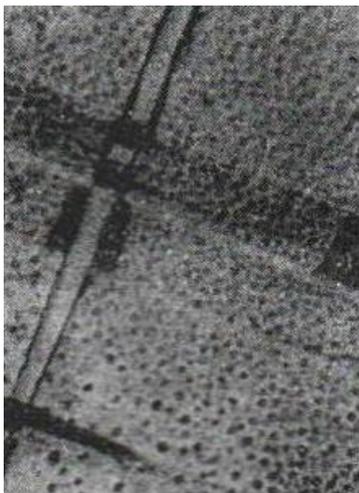


Рис. 6. Разрушенное волокно, вызывающее трещину в полимерной матрице (распространяется по диагонали направо вверх). Расслоение у волокна (внизу) вызвало разрушение соседнего волокна (темная область у левого края рисунка)



Рис. 8. Разрушение полимерной матрицы, распространяющееся вокруг одного волокна за другим без их разрушения, но сопровождающееся ограниченным расслоением композиции (на это указывают черные полосы вдоль волокон)

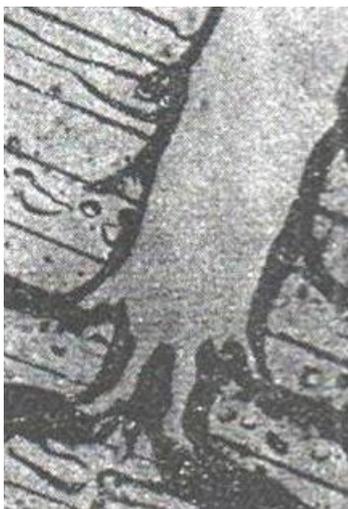


Рис. 7. Разрушение полимерной матрицы (трещина идет от верхней правой части рисунка к нижней левой части) вызывает разрушение всех волокон подряд. Процесс продолжается до тех пор, пока трещина не переходит в расслоение (в левой нижней части рисунка)

Растрескивание полимерного связующего может продолжаться вокруг соседних волокон без их разрушения. Это явление вызывается малым объемным содержанием арматуры или низкой пластичностью полимерного связующего. При достижении трещинами соседних волокон возможно расслоение на участке ограниченной длины и случайное разрушение волокна, но главное то, что трещина в полимерном связующем продолжает развиваться, обнажая короткие отрезки ряда волокон (рис. 8).

Разрушение полимерного связующего может быть приостановлено соседними волокнами, если, как это показано на рис. 5, не происходит ни расслоения, ни разрушения полимерной матрицы, ни разрушения волокна.

В ПКМ всегда имеются трещины, возникающие в местах концентрации напряжений по концам волокон конечной длины. Для того, чтобы реализовать хорошие потенциальные механические свойства ПКМ, необходимо стремиться к тому, чтобы размеры трещин были минимальными. Поскольку склонность к распространению у этих трещин наименьшая, они могут быть достаточно эффективно локализованы.

Разрушения волокон вызывают и нарушение сплошности матрицы. Поэтому одновременно с разрушениями волокон в [2] было рассмотрено и сопровождающее их трещинообразование в полимере.

Были рассмотрены виды разрушения матрицы, первопричиной которых не является разрушение волокон. Для этой цели в [12] проанализировано поведение ПКМ при действии нагрузки в направлении, параллельном армирующим волокнам и перпендикулярном им. В первом случае нагружения армирующие волокна воспринимают действующие нагрузки. Во втором случае армирующие волокна образуют разрывы в полимерной матрице. Установлено, что эти разрывы совместно с другими дефектами, такими, как инородные вещества, пузырьки воздуха, частицы пыли и поверхностные царапины, уменьшают несущую способность материала.

Таким образом, выше дан краткий анализ современного состояния I уровня снижения качества структуры ПКМ.

Анализ дефектов II и III уровня связан с рядом научных направлений в механике композиционных материалов и конструкций, неподъемных для освещения в рамках данной статьи. Поэтому представляется оправданным ограничиться схемой обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ методами контроля степени их дефектности, показанной на рис. 9.

Методы, представленные в правой части схемы реализуются, хотя и на образцах-свидетелях, предназначенных для воспроизведения полномасштабных уровней дефектности изделия из ПКМ, тем не менее, способны только констатировать эти уровни

в готовой конструкции и не могут повлиять на предотвращение в той или иной мере этих дефектов.

То же относится и к методам неразрушающего контроля (обнаружения) дефектности ПКМ, приведенных в левой части схемы. При этом прямые методы, непосредственно обнаруживающие дефекты в изделии, относятся только к их I уровню

Непосредственное обнаружение дефектов II и III уровня этими методами принципиально невозможно, а косвенное (опосредственное) обнаружение находится только в зачаточном состоянии и по точности, зависящей от реализуемых математических моделей идентификации наблюдаемого дефекта I уровня с прогнозируемыми дефектами II и III уровня, не могут считаться достаточными и достоверными и требуют дальнейших комплексных исследований.

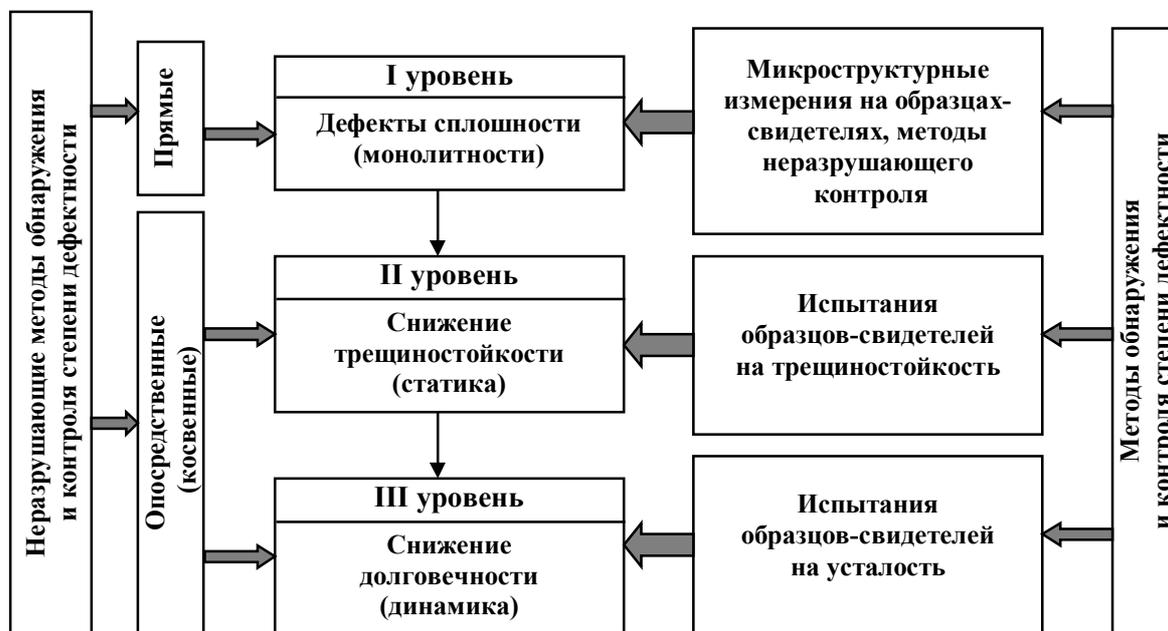


Рис. 9. Схема обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ методами контроля степени дефектности

Выводы

1. Установлен иерархический порядок трех-уровневой системы дефектов структуры ПКМ, возникающих в процессе подготовки и производства изделий из композитов:

- дефекты сплошности (монолитности);
- снижение трещиностойкости при статических воздействиях на структуру ПКМ;
- снижение долговечности конструкций из ПКМ при многократных силовых воздействиях.

2. Проведен анализ причин возникновения и типовых видов дефектов сплошности ПКМ, являющихся первопричиной снижения эксплуатационного

качества элементов композитных конструкций и их ресурса.

3. Предложена схема обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ прямыми и опосредствованными методами контроля степени дефектности материала и показана необходимость проведения исследований в плане разработки надежных математических моделей и реализующих их методов идентификации наблюдаемых дефектов первого уровня с прогнозируемым снижением трещиностойкости и долговечности ПКМ и композитных конструкций.

Литература

1. Коваленко, В.А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2. Допуски на нарушения сплошности материала и локальные поводки изделия [Текст] / В.А. Коваленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – Вып. 4(91). – С. 5 – 15.
2. Кортен, Х.Т. Разрушение армированных пластиков [Текст]: пер. с англ. / Х.Т. Кортен. – М.: Химия, 1967. – 168 с.
3. Гайдачук, В.Е. Теоретические основы технической подготовки производства авиаконструкций из композиционных материалов: дис. ... докт. техн. наук: 05.07.04 – технология производства летательных аппаратов / Гайдачук Виталий Евгеньевич. – Х., 1979. – 438 с.
4. Гайдачук, В.Е. О возможности регламентации технологических несовершенств в конструкциях из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, Н.Б. Воронцов, А.И. Рукавишников // *Прочность конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-а*. – Х., 1981. – Вып. 6. – С. 124 – 129.
5. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів [Текст]: підруч. / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.С. Гайдачук та ін. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.
6. Гайдачук, А.В. Технологические дефекты сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, М.В. Сливинский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – Вып. 4(20). – С. 5 – 8.
7. Гайдачук, А.В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – Вып. 3(70). – С. 40 – 49.
8. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций [Текст] / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 400 с.
9. Бугаков, И.С. Расчетно-экспериментальная оценка несущей способности многослойных композиционных конструкций летательных аппаратов с учетом внутренних дефектов, определенных компьютерным томографом: дис... канд. техн. наук: 05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов / Бугаков Игорь Сергеевич. – Казань, 2006. – 171 с.
10. Bouc, C.A. Microscopic Study of Mode of Fracture in Filament Wound Glass-Resin Composites [Текст]: TAM Report / C.A. Bouc. – University of Illinois, 1962. – № 234. – 135 p.
11. Черепанов, Г.П. Механика разрушения композиционных материалов [Текст] / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
12. Композиционные материалы [Текст] / под ред. Л. Браутмана // справ.: в 6 т. – М.: Мир, 1978. – Т. 5: Разрушение и усталость. – 483 с.
13. Разрушение [Текст] / под ред. Г. Либовица // справ.: в 7 т. – М.: Мир, 1976. – Т. 7: Разрушение неметаллов и композиционных материалов. – Ч. 1. – 433 с.
14. Разрушение [Текст] / под ред. Г. Либовица // справ.: в 7 т. – М.: Мир, 1976. – Т. 7: Разрушение неметаллов и композиционных материалов. – Ч. 2. – 469 с.
15. Механика композитных материалов и элементов конструкций [Текст] / под общ. ред. А.Н. Гузя // справ.: в 3 т. – К.: Наукова думка, 1982. – Т. 1: Механика материалов. – 368 с.
16. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике [Текст] / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1965. – 278 с.
17. Панасюк, В.В. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, С.Е. Ковчик. – К.: Наукова думка, 1977. – 227 с.
18. Разрушение конструкций из композитных материалов [Текст] / под ред. В.П. Тамужа, В.Д. Протасова. – Рига: Зинатне, 1986. – 264 с.
19. Розен, Б. Механика упрочнения композиций [Текст] / Б. Розен // *Волокнистые композиционные материалы*. – М.: Мир, 1967. – С. 54 – 96.
20. Тамуж, В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов [Текст] / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. – Рига: Зинатне, 1978. – 294 с.
21. Фудзии, Т. Механика разрушения композиционных материалов [Текст] / Т. Фудзии, М. Дзако. – М.: Мир, 1982. – 232 с.
22. Малмейстер, А.К. Сопроотивление жестких полимерных материалов [Текст] / А.К. Малмейстер, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс. – Рига: Зинатне, 1967. – 398 с.
23. Разрушение [Текст] / под ред. Г. Либовица // справ.: в 7 т. – М.: Мир, 1976. – Т. 3: Инженерные основы и воздействие внешней среды. – 469 с.
24. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довід. посіб. [Текст] / О.П. Остап, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін.; під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Сполах, 2007. – 1068 с.
25. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров [Текст] / А.Л. Рабинович. – М.: Наука, 1970. – 482 с.
26. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.

Поступила в редакцию 10.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. авиационного материаловедения Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

РІВНІ ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ У ВИРОБАХ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ПРОЦЕСІ ЇХ ВИРОБНИЦТВА

В.Є. Гайдачук, В.О. Коваленко

Проведено аналіз дефектів структури у виробках із полімерних композиційних матеріалів, що виникають в процесі їх виробництва. Встановлено та обґрунтовано їх ієрархічний порядок виникнення та впливу на несучу здатність виробу, що виявляється в зниженні тріщиностійкості при статичних впливах і довговічності при багаторазовому силовому навантаженні. Запропоновано схему виявлення трьох рівнів дефектів структури полімерних композиційних матеріалів прямими і опосередкованими методами контролю ступеня дефектності матеріалу. Показано необхідність розробки математичних моделей ідентифікації спостережуваних дефектів та методів що їх реалізують.

Ключові слова: дефекти структури, вироби із полімерних композиційних матеріалів, рівні дефектності, схема виявлення.

LEVELS OF STRUCTURAL DEFECTS THAT ARISE DURING MANUFACTURING PRODUCTS MADE OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

V.E. Gajdachuk, V.A. Kovalenko

The analysis of the structural defects that arise during manufacturing products made of polymeric composite materials has been shown. The hierarchical order of their occurrence and impact on the carrying capacity of the product, which is appear in the reduction of crack resistance under static effect and durability at repeated loading has been defined and validated. The detection scheme of three levels of structural defects of polymer composites by direct and mediated methods of control the degree of defectiveness of the material has been proposed. The necessity of developing mathematical models and implement their methods of identification of the observed defects.

Key words: structural defects, products made of polymeric composite materials, defects levels, detection scheme

Гайдачук Віталій Євгеньевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектування ракетно-космічних апаратів, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: k403@d4.khai.edu.

Коваленко Виктор Александрович – канд. техн. наук, начальник лаборатории, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.