

ОПЫТ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННОГО И ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДОВ

Ключникова Марина Александровна (bvn@vniitf.ru), Атавин Владислав Георгиевич, Узких Алексей Андреевич, Борисов Виктор Николаевич, Исхужин Ринат Робертович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В последние годы одним из основных направлений технического прогресса является разработка материалов обладающих высокой прочностью при малом весе. Одним из таких материалов является углепластик, состоящий из полимерной матрицы и армирующих элементов. Учитывая ответственность применяемых изделий из углепластика в атомной промышленности, необходимо обеспечение производства изделий эффективными методами неразрушающего контроля их качества.

В настоящей работе показана возможность применения рентгентелевизионного и вихретокового методов неразрушающего контроля качества образцов углепластиков на этапе отработки технологии изготовления изделия. Также приведены результаты исследований по измерению толщины лакокрасочного покрытия на углепластике вихретоковым методом.

Ключевые слова: углепластик, дефекты, толщина лакокрасочного покрытия, неразрушающий контроль, рентгентелевизионный контроль, вихретоковый контроль.

NON-DESTRUCTIVE TESTING PRACTICE FOR CARBON COMPOSITE MATERIALS USING X-RAY TELEVISION AND EDDY CURRENT TESTING TECHNIQUES

Klyuchnikova Marina Aleksandrovna (bvn@vniitf.ru), Atavin Vladislav Georgievich, Uzkiikh Aleksei Andreevich, Borisov Viktor Nikolaevich, Iskhuzhin Rinat Robertovich

FSUE «RFNC-VNIITF named after academ. E. I. Zababakhin»,
Snezhinsk Chelyabinsk region

Recently, development of the materials exhibiting high strength while having a light weight is one of the leading areas of technical progress. Such materials include, among others, carbon composite materials consisting of polymer matrix and reinforcing elements. Considering responsibility to apply the products made of carbon composite materials in nuclear industry, manufacturing of such products should be supported by effective non-destructive testing techniques to control their quality.

The present work demonstrates the opportunity to use X-ray television and eddy current testing techniques for non-destructive testing of carbon composite samples at the stage of manufacturing technology maturation. Also, the work presents the results of paint coating thickness measurements using eddy current technique for the coated carbon composite samples.

Keywords: carbon composite materials, defects, paint coating thickness, non-destructive testing, X-ray television testing, eddy current testing.

Введение

В связи с ускоренным развитием различных отраслей промышленности, происходит обширное внедрение полимерных композиционных материалов (КМ) в детали и конструкции.

Наиболее распространенными в настоящее время являются КМ на полимерной матрице с углеродными материалами в качестве наполнителей (волокнами, лентами, тканями). Правильный подбор состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя, а также

выбор метода изготовления углепластика (УП) позволяют получить материалы с требуемым сочетанием технологических и эксплуатационных свойств. При этом, характерной особенностью УП является существенная неоднородность структуры, обусловленная неравномерным распределением наполнителя и связующего, анизотропией свойств и существованием специфических для КМ дефектов.

В связи с этим одним из значимых этапов разработки технологии изготовления деталей, моделей и конструктивно-подобных элементов из УП является выбор эффективного метода неразрушающего контроля (НК) их качества.

Вопросы НК изделий из полимерных КМ рассмотрены в ряде публикаций, в частности, в работах [1–7]. В работах [1, 2] описаны характерные дефекты изделий из УП, возникающие при их изготовлении. Основными проблемами в процессе изготовления УП являются пористость, расслоения, посторонние включения, непроклеи, трещины и складки, которые присущи любой технологии изготовления.

Выявление дефектов и определение их границ представляется важной технической задачей для обеспечения надежности изделий из УП.

В рамках данной работы рассмотрены результаты применения рентгенотелевизионного (РТ) и вих-

ретокового (ВТ) методов НК качества полимерных конструкций, армированных тканями из углеродного волокна. А также вопросы выбора оптимальных параметров контроля.

Материалы

Для проведения исследований по оценке возможностей выявления дефектов в материале УП и измерения толщины нанесенного лакокрасочного покрытия (ЛКП) были изготовлены образцы УП линейными размерами 250×250 мм и 90×60 мм, соответственно. Характеристики образцов УП приведены в табл. 1 и 2.

Для проведения исследований по оценке чувствительности методов контроля к различным типам дефектов был изготовлен образец УП с имитаторами дефектов – пластина 250×250 мм толщиной 2,7 мм, выполненная из 14 слоев волокна Т 1000/240, пропитанная компаундом ЭПС-И-108, изготовленная прямым прессованием. На образце выполнены такие имитаторы дефектов как: области непроклея и пазов, имитирующих трещины, поверхностные дефекты, нарушения укладки углеродного волокна, посторонние металлические включения (алюминиевая фольга).

Таблица 1

Характеристики образцов УП

Количество образцов	Метод формования	Углеродная ткань	Наименование эпоксидного связующего	Количество слоев ткани	Толщина образца, мм
3	прямое прессование	Т 1000/240	ЭПС-И-102	8	1,38
			ЭПС-И-108		1,44
			ЭПС-П-201		1,48
5	прямое прессование		ЭПС-И-102	14	2,73
			ЭПС-И-108		2,74
			ЭПС-П-201		2,67
3	вакуумная инфузия		ЭПС-И-102	14	3,39
			ЭПС-И-108		3,31
			ЭПС-П-201	12	3,28
3	прямое прессование	препрег АСМ102-С200Т		14	4,6

Таблица 2

Характеристики образцов УП с нанесенным ЛКП

Номер образца	Тип УП (ткань, кол-во слоев, связующее, метод прессования)	Лакокрасочное покрытие			
		Грунтовка	Количество слоев	Эмаль	Количество слоев
1	Т1000/240, 12, ЭПС-П-201, прямое	АК-С70	1	АС-1115	2
2		КО-0170	1	КО-5189	2
3		ЭП-0104	1	ЭП-140	2
4		ЭП-0104	1	ФП-5190	2

Методы и результаты НК

Для НК качества образцов УП на этапе обработки технологии изготовления изделия были применены РТ и ВТ методы контроля.

РТ метод контроля

РТ контроль – современный вид радиографического контроля, использующего проникающее излучение для обследования внутреннего состояния и характеристик материалов и конструкций. Данный метод позволяет отказаться от промежуточных носителей информации (пленок) в пользу использования цифрового детектора, в котором, с помощью рентгенооптических преобразователей, прошедшее через объект излучение преобразуется в оптическое, которое выводится на экран монитора компьютера, что обеспечивает мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения. Возможности применения РТ метода для анализа качества различных КМ показаны в работах [2, 3].

РТ метод в НК УП применяют для выявления пор, металлических и неметаллических включений, структурных неоднородностей, обрывов армирующих элементов, а также трещин, при условии, что плоскость раскрытия трещины будет совпадать с направлением пучка излучения. Отметим, что недостатком РТ метода при контроле УП является сложность

его применения для выявления расслоения – самого распространенного технологического дефекта.

Контроль качества образцов УП проводили на РТ комплексе FILIN-271: фокус – 15 мкм, максимальное напряжение на трубке 130 кВ, цифровой детектор на основе аморфного кремния с размером пикселя 123 мкм и разрядностью оцифровки 16 бит. Данный комплекс микрофокусной рентгенографии позволяет получать информативные увеличенные рентгеновские изображения с высокой степенью детализации.

В процессе выполнения исследований были найдены оптимальные параметры контроля: напряжение на трубке 60 кВ, выходной ток с мишени 0,2 мА, расстояние от источника излучения до образца 200 мм, расстояние от образца до детектора 110 мм. Область контроля при выбранных параметрах составила 85×85 мм. Схема РТ контроля образцов УП приведена на рис. 1.

Поиск оптимального режима РТ контроля производили с помощью контрольных образцов чувствительности, изготовленных из УП на фемтосекундной лазерной установке. Для определения чувствительности были изготовлены 3 пластинчатых образца 38×13 мм толщиной (h) 0,3, 0,5 и 1,5 мм с цилиндрическими отверстиями, диаметры которых соответствуют – $2h$, h и $4h$, схематический вид образцов приведен на рис. 2,а.

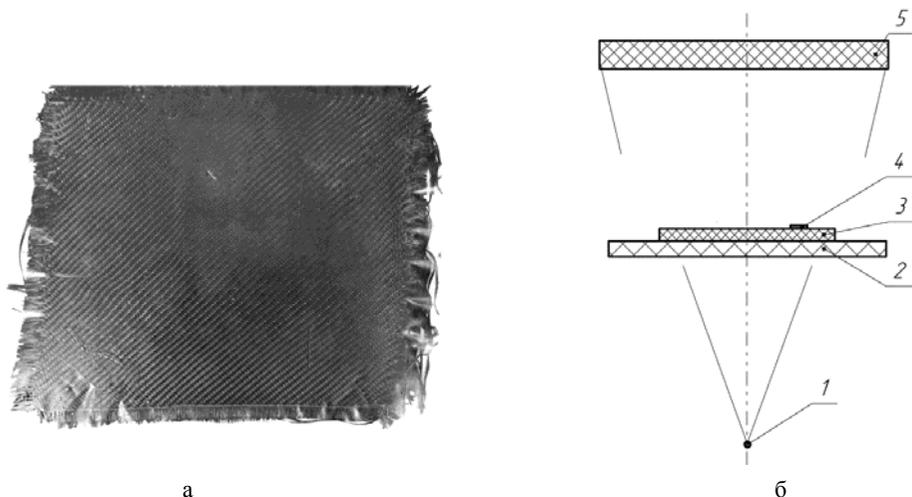


Рис. 1. Схема РТ контроля УП: а – образец УП, б – схема контроля; 1 – источник рентгеновского излучения, 2 – стол манипулятора, 3 – образец УП, 4 – эталон чувствительности, 5 – цифровой детектор

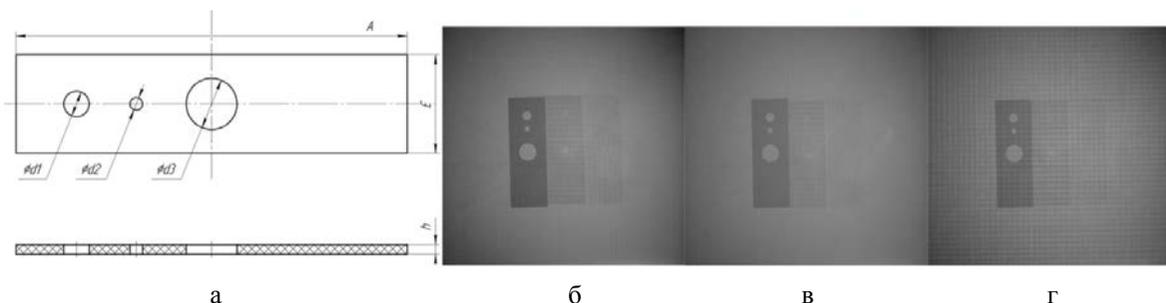


Рис. 2. Эталоны чувствительности: а – схема, б – рентгеновский снимок образца УП толщиной 1,2 мм, в – рентгеновский снимок образца УП толщиной 3,2 мм, г – рентгеновский снимок образца УП толщиной 4,6 мм

Абсолютная чувствительность контроля в данном случае определялась как наименьшая толщина пластинчатого эталона, при котором на рентгеновском снимке выявляется отверстие с диаметром равным удвоенной толщине эталона. Рентгеновские снимки образцов чувствительности для различных толщин УП приведены на рис. 2,б–г.

Выявляемость дефектов УП РТ методом контроля отрабатывали на образце УП с искусственными дефектами. Образец УП был разделен на 9 участков контроля. Сводное рентгеновское изображение образца приведено на рис. 3.

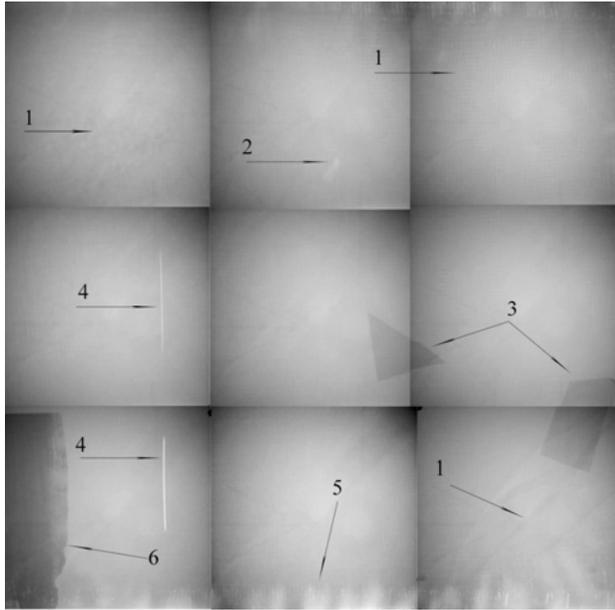


Рис. 3. Рентгеновское изображение участков образца УП с имитаторами дефектов: 1 – нарушение укладки волокон, 2 – вмятина, 3 – включение (металлическая фольга), 4 – разрыв волокна (трещина), 5 – поры на торце образца, 6 – изменение толщины

По результатам РТ контроля образца УП с искусственными дефектами все заложенные в образец дефекты были выявлены с высокой точностью. Чувствительность контроля образца с дефектами составила 0,5 мм.

На выбранных режимах контроля, с учетом опыта контроля образца с искусственными дефектами, был проведен контроль образцов УП (см. табл. 1) и выявлены основные типы дефектов, рентгеновские изображения которых показаны на рис. 4.

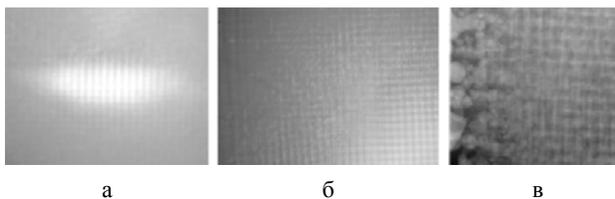


Рис. 4. Рентгеновские изображения дефектов, выявляемых РТ контролем: а – непровод, б – изменение плотности, в – поры

ВТ метод контроля основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) с электромагнитным полем возбуждаемых им вихревых токов. Характер вихревых токов зависит от электромагнитных параметров объекта контроля (ОК), размеров, формы, наличия несплошностей, а также от взаимного расположения ВТП и ОК. Регистрируя напряжение на катушке индуктивности ВТП или измеряя ее полное сопротивление, можно получить информацию о свойствах исследуемого объекта [5, 6].

Исследования по оценке качества образцов из УП ВТ методом выполняли с использованием вихретокового дефектоскопа «Вектор-скан». Сигналы с экрана дефектоскопа, полученные при регистрации дефекта, могут фиксироваться и передаваться на компьютер для дальнейшего документирования.

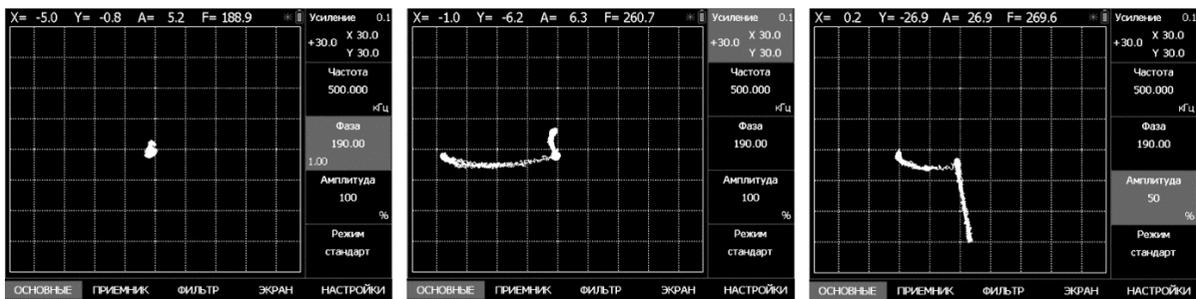
В процессе контроля выполнялось сканирование пластины УП с имитаторами дефектов различными ВТП на разных режимах контроля.

Для проведения исследований использовалось несколько абсолютных ВТП различной конструкции и один дифференциальный. В качестве основного критерия при выборе ВТП и режима контроля была оценка соотношения сигнал/шум при выявлении дефектов. Исследования проводились в диапазоне частот от 25 кГц до 2 МГц, в зависимости от полосы пропускания используемого преобразователя.

На рис. 5 показаны сигналы дефектоскопа, полученные с использованием абсолютного ВТП ПВД-200-3,5К на частоте контроля 500 кГц.

Как видно из рис. 5, при выбранном режиме контроля надежно выявляются такие отклонения, как граница УП двойной толщины, наличие в УП металлических включений, а также сквозные трещины и несквозные трещины, выходящие на контролируемую поверхность (фас). Хуже выявляются трещины, выходящие на внутреннюю поверхность (тыл). В этом случае сигнал от трещины практически не выходит за пределы центрального пятна на экране дефектоскопа. Обратим внимание, что сигнал дефектоскопа от металлического включения настолько высок, что для того, чтобы зафиксировать его в пределах экрана дефектоскопа, амплитуда генератора в настройках дефектоскопа была снижена в два раза (рис. 5,в).

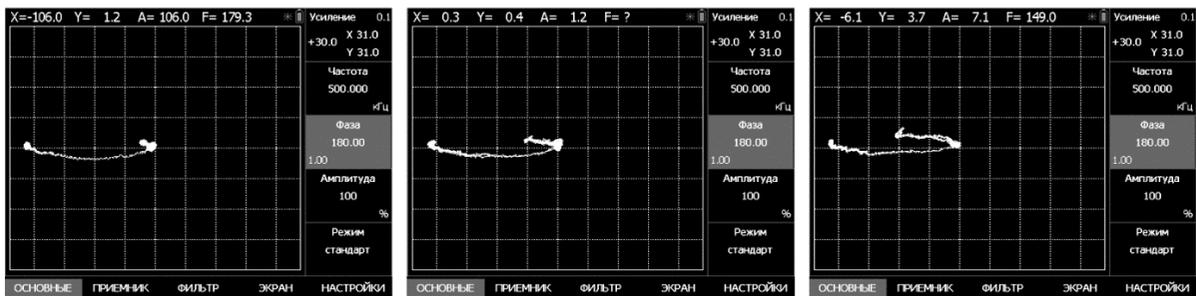
На рис. 6 показаны сигналы дефектоскопа, полученные с использованием дифференциального ВТП ПВДТ-500-7Р на частоте контроля 300 кГц. Сигнал дифференциального ВТП, в отличие от абсолютного, определяется не абсолютными сигналами отдельных обмоток, а разностью сигналов близко расположенных обмоток, включенных по мостовой схеме. За счет такой конструкции дифференциальные ВТП обеспечивают повышенную чувствительность к локальным дефектам, но, в то же время, нечувствительны к абсолютным электрофизическим параметрам исследуемых материалов (электропроводность, магнитная проницаемость) ОК, а также – к наличию зазора между ВТП и ОК.



а

б

в

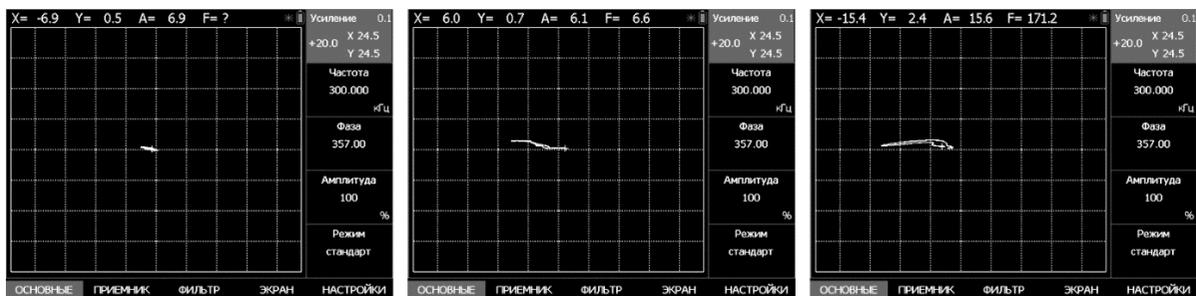


г

д

е

Рис. 5. Экран дефектоскопа при сканировании образца УП на частоте контроля 500 кГц: а – бездефектная область, б – граница двойной толщины, в – граница фольги, г – трещина 1/2 толщины (тыл), д – трещина 1/2 толщины (фас), е – сквозная трещина



а

б

в



г

д

Рис. 6. Экран дефектоскопа при сканировании образца УП на частоте контроля 300кГц: а – бездефектная область, б – трещина 1/2 толщины (тыл), в – трещина 1/2 толщины (фас), г – сквозная трещина, д – граница фольги

Как видно из рис. 6, при выбранных параметрах контроля дифференциального ВТП обеспечивается надежное выявление металлических включений в УП, а также дефектов типа трещин, причем, выходящих как на внутреннюю, так и на наружную поверхность контролируемого объекта.

При изготовлении конструкций из УП необходимо обеспечить стабильность технологии заполне-

ния материала углеродным волокном и подтвердить данный параметр НК. Для этой цели в рамках данной работы выполнена регистрация сигналов ВТП при его установке на образцы УП, изготовленные по различным технологиям. Исследования проводились с различными ВТП абсолютного типа.

Сигналы дефектоскопа, полученные на различных образцах УП, приведены на рис. 7. Тонкие ли-

нии в виде дуг (так называемые линии отвода) соответствуют приближению/удалению ВТП от объекта контроля. При установке ВТП на объект контроля, сигнал на экране фиксируется в виде некоторого пятна на конце дуги.

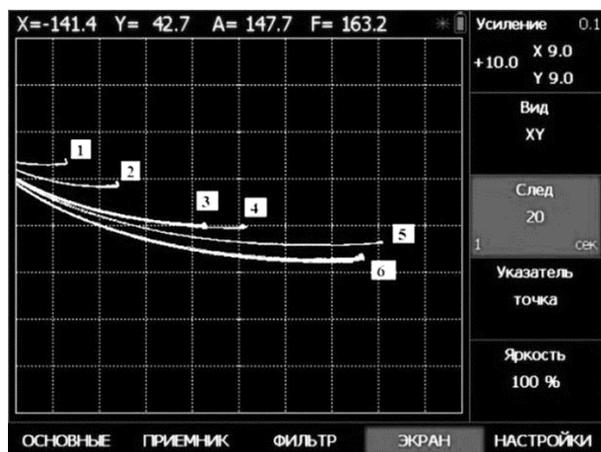


Рис. 7. Сигналы при выполнении измерений на образцах УП, изготовленных по различным технологиям: 1 – RTM (ткань T1000/240, 12 слоев, ЭПС-И-108), 2 – вакуумная инфузия (ткань 2/2-1000-12К-400, 10 слоев, ЭПС-П-201), 3 – в вакуумном мешке (препрег АСМ102-С200Т с покрытием толщиной 105 мкм), 4 – в вакуумном мешке (препрег АСМ102-С200Т), 5 – прямое прессование (ткань T1000/240, 8 слоев, ЭПС-И-102), 6 – прямое прессование (ткань T1000/240, 12 слоев, ЭПС-П-201)

Как видно из рис. 7, технология изготовления УП оказывает значительное влияние на результаты измерений, что подтверждает возможность контроля качества конструкций из УП в части плотности его заполнения углеродной нитью.

Одной из задач, которая решалась при выполнении представляемой работы – оценка возможности НК толщины ЛКП, нанесенного на УП.

Для решения поставленной задачи выполнен поиск оптимального типа ВТП и режимов настройки дефектоскопа. Основным критерием для этого, как и ранее, была оценка соотношения сигнал/шум при измерении толщин покрытий в требуемом диапазоне. В качестве имитаторов покрытий использовались меры толщины типа МТ из комплекта толщиномера покрытий «Константа».

На рис. 8,а приведена градуировочная кривая, полученная для образцов, изготовленных из УП, полученного методом прямого прессования ткани T1000/240 (12 слоев) со связующим ЭПС-П-201.

В процессе отработки технологии нанесения покрытий выполнялось сопоставление результатов измерений толщины покрытия ВТ методом с измерениями на поперечных шлифах с использованием измерительного микроскопа MarVison. Фотография поперечного шлифа одного из образцов приведена на рис. 8,б.

Поскольку углеродная основа УП имеет волокнистую структуру, проявляющуюся и на его поверхности, то фактические величины толщин покрытия,

как по результатам ВТ контроля, так и полученные оптическими измерениями на шлифах, имеют существенный разброс, который достигает 70 мкм при средней толщине покрытия 30-60 мкм.

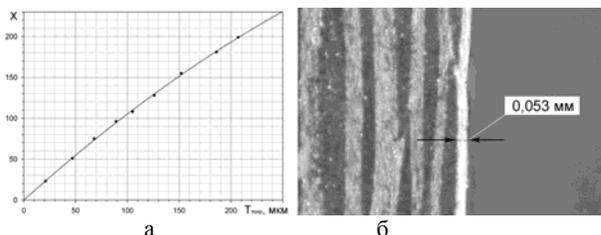


Рис. 8. Измерение толщины ЛКП на УП: а – градуировочная кривая измерений, б – измерение на поперечных шлифах микроскопом

Заключение

По результатам проведенных исследований были отработаны методы РТ и ВТ НК качества УП на этапе разработки технологии изготовления. Составлен перечень дефектов УП, выявляемых представленными методами НК, приведенный в табл. 3.

Таблица 3

Дефекты, выявляемые методами РТ и ВТ контролей в УП

Дефект	Метод контроля	
	РТ	ВТ
Металлические включения	+	+
Повреждение нитей (трещина)	+	+
Расслоение	—	—
Изменение плотности	+	—
Деформация (вмятина)	+	—
Нарушение соосности волокна	+	—
Поры	+	—
Изменение толщины	+	+
Примечания:		
1 + – выявляет.		
2 — — не выявляет.		

Показана возможность и определены оптимальные параметры ВТ метода контроля толщины ЛКП, нанесенного на детали из УП.

На последующих этапах работ планируется разработка и метрологическая аттестация инструкций по НК качества УП.

Список литературы

1. Босси Р. Х., Джорджесон Г. Е. Неразрушающий контроль композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т. 22, № 4. С. 46–53.
2. Троицкий В. А., Карманов М. Н., Троицкая Н. В. Неразрушающий контроль качества компо-

зиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2014. № 3. С. 29–33.

3. Аношкин А. Н., Сальников А. Ф., Осокин В. М. и др. Неразрушающий контроль изделий из полимерных композиционных материалов / IV Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники // Сборник докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. С. 85–90

4. Борисенко В. В. Автоматизация неразрушающего контроля композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23, № 2. С. 4–7.

5. Кузнецов А. О. Обнаружение малоразмерных металлических включений в изделиях из композитных материалов вихретоковым методом / ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли // Сборник докладов. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт

авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2018. С. 144–148.

6. Шкатов П. Н., Дидин Г. А., Михеев П. В. Использование метода вихревых токов для дефектоскопии конструкционных материалов на основе углеродных волокон / ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли // Сборник докладов. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2018. С. 188–194.

7. Узких А. А., Исхужин Р. Р., Атавин В. Г. Опыт применения акустических дефектоскопов ИД-91М и АД-60К при оценке качества многослойных конструкций // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 9. С. 56–63.