

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НЕЯВНЫХ ДЕФЕКТОВ И ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. О. Козельская^{1,2}, М. Ю. Федотов^{3,4}

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
Kozelskaya.sofik1977@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;*

*АО «ЦНИИ специального машиностроения» (2),
Московской обл., Хотьково, Россия;*

*Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) (3), Новосибирск, Россия;
Российская инженерная академия (РИА) (4), Москва, Россия*

Ключевые слова: диагностика качества; полимерные композитные материалы; неразрушающий контроль; ресурс эксплуатации; силовая нагрузка.

Аннотация: Приведены результаты исследований по разработке технологий для выявления «неявных» дефектов – «сомкнутых» дефектов, микротрещин, пор и т.п. Показаны возможности оценки ресурса эксплуатации изделий по результатам неразрушающего контроля: технологии ультразвуковой термотомографии, электросиловой термотомографии, на основе анализа параметров поля точечных источников тока на поверхности контролируемого изделия, оптического контроля с использованием волоконных Брэгговских решеток, измерения толщины композитных слоев вихретоковым и магнитно-индукционным методами с использованием интеллектуальных преобразователей. Представлена возможность оценки ресурса конструкции на основе результатов неразрушающего контроля с использованием искусственных нейронных сетей.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в последнее время находят широкое применение и являются перспективными во многих отраслях промышленности (газовой, нефтяной, машиностроении, авиационной, космической, энергетике и др.), так как не подвержены коррозии, обеспечивают минимальную массу конструкций при заданных требованиях к прочности, устойчивости к агрессивным воздействиям, а по некоторым характеристикам, особенно по массогабаритным показателям, значительно превосходят металлы.

Особенностью ПКМ является то, что формирование самого материала и конструкции изделия из них осуществляется в едином технологическом цикле, что повышает вероятность образования в материале различных дефектов – нарушений сплошности, которые могут проявляться как на стадии изготовления изделий, так и в условиях их эксплуатации под действием нагрузок – силовых динамических, циклических, ударных.

Следует отметить, что физико-механические характеристики ПКМ зависят от условий эксплуатации (температуры, влажности, механических воздействий

и т.п.). Это также влияет на образование дефектов в изделиях из ПКМ и снижает их ресурс эксплуатации.

В виду сложности самих ПКМ, особенностей технологии производства изделий из них и эксплуатации, как показали исследования, в материале могут образовываться различные типы дефектов с широким диапазоном характеристик: расслоения, трещины, поры, микродефекты структуры, сомкнутые дефекты, каверны, деформации слоев при прошивке, расхождение полотна и др. Поэтому важный аспект применения изделий из ПКМ связан с необходимостью своевременного выявления дефектов на всех стадиях их жизненного цикла – при изготовлении, испытании, эксплуатации с оценкой ресурса с учетом выявленных дефектов и, соответственно, с разработкой и внедрением аппаратуры и методов неразрушающего контроля (НК).

Исследования и опыт практической работы показал, что существующие методы и средства НК не всегда обеспечивают обнаружение и идентификацию всех возникающих в ПКМ типов дефектов, например, дистанционный НК «неявных» дефектов в ПКМ («сомкнутые» – дефекты, не имеющие раскрытия – трещины, расслоения, поры малых размеров и т.п.), которые могут проявляться в процессе их эксплуатации, то есть во время приложения к изделию различных нагрузок; «критичных» дефектов, непосредственно влияющих на надежность функционирования изделий, измерение толщины слоев изделий из ПКМ и др.

Однако в настоящее время акцент делается на изготовление различной аппаратуры НК, которую правильно было бы назвать аппаратурой регистрации различных видов излучений (акустического, инфракрасного, радиоволнового и т.п.) и практически мало работ, посвященных непосредственно технологиям НК.

Практически отсутствуют работы по оценке ресурса эксплуатации изделий из ПКМ на основе результатов их НК. При этом перспективными методами оценки ресурса эксплуатации являются методы теории распознавания образов, основанные на сравнении фактических диагностических признаков (например, результатов НК) с эталонными, представляющими классы возможных дефектов и на концепциях технической диагностики с использованием искусственных нейронных сетей. Их способности к прогнозированию напрямую следуют из свойств нейронной сети к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными (результатами НК) и выходными данными (ресурс эксплуатации). После обучения нейронная сеть способна прогнозировать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений или каких-то существующих факторов. Поэтому разработка и внедрение технологий НК и соответствующей аппаратуры для обнаружения и идентификации нарушений сплошности (неявных дефектов) материала, влияющих на эксплуатационную надежность, которые не выявляются достоверно существующими методами НК, а также методов оценки ресурса эксплуатации изделий по результатам их НК являются в настоящее время актуальной задачей.

Цель работы – систематизация результатов экспериментальных исследований по разработке технологий и аппаратуры НК неявных дефектов в ПКМ и возможности оценки ресурса эксплуатации изделий из ПКМ по результатам НК.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Оценка «качества» технологий НК и их сравнение между собой осуществляется на основе их метрологической аттестации путем выявления неких «эталонных» дефектов, которые имитируют реальные дефекты в контролируемом изделии. Эти же дефекты используют при «настройке» аппаратуры НК, перед проведением реального контроля.

В настоящее время, как правило, параметры эталонного дефекта задают исходя из возможностей методики и аппаратуры контроля, требований разработчика изделия, возможности изготовления самого эталонного дефекта для конкретного изделия метода НК либо назначаются волевым способом. Однако такой подход ведет к появлению погрешности обнаружения реального дефекта и определения его характеристик, а в дальнейшем к искажению оценки качества технологий контроля. Поэтому актуальна задача оценки характеристик эталонного дефекта, достоверно описывающих характеристики реальных дефектов в контролируемом изделии.

Данная задача решена путем разработки технологии определения параметров минимального дефекта в реальном изделии из ПКМ на основе экспериментальных исследований реальных дефектов произвольных размеров и конфигурации, позволяющей с необходимой достоверностью определять минимальный дефект в материале [1]. Результаты работы по данной технологии показали, что в исследуемом изделии 95 % дефектов типа нарушения сплошности имеют раскрытие более 0,2 мм и протяженность более 10 мм. Далее эти параметры использовались при изготовлении эталонного дефекта.

Для выявления «критичных» дефектов, влияющих на надежность функционирования изделий, разработана технология разработки методик НК на основе их верификации в квазиреальных условиях эксплуатации изделий. Структурная схема разработанной технологии приведена на рис. 1. Предлагаемая технология позволяет из всей совокупности дефектов, имеющихся в изделии, выделить те, которые влияют наибольшим образом на качество и ресурс изделия и, соответственно, акцентировать усилие на разработку методик для их выявления и идентификацию. Направление разработки технологий и аппаратуры НК неявных дефектов в композитных материалах с оценкой ресурса эксплуатации приведено на рис. 2.

Экспертный анализ показал, что для достоверной оценки ресурса конструкций из ПКМ существующих и используемых стандартных методов НК недостаточно. Необходимо в дополнение к ним использовать методы, обеспечивающие обнаружение и идентификацию неявных дефектов в материале, как существующих, так и возникающих в процессе изготовления изделий, испытаний и эксплуатации.

Такие технологии возможно разработать на основе интеграции методов контроля: термографического контроля с различными источниками возбуждения динамических температурных полей (УЗ-термотомография, электросиловая термография и их варианты), оптического метода с использованием волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) (для предотвращения «травмирования» изделий при их нагружении), электрического метода на основе трехточечной регистрации полей электрического потенциала, вихревого и магнитно-индукционного методов для измерения толщины слоев конструкций из ПКМ [2 – 8].

Для достоверной оценки качества композитных конструкций актуально выявление дефектов с малыми размерами: «сомкнутых», пор, расслоений, трещин и других, с определением их глубины залегания в материале. Как правило, такие дефекты не выявляются традиционными методами, имеющими предел обнаружения по «минимальному» дефекту. Для выявления названных дефектов и их идентификации по глубине залегания разработан метод УЗ-термотомографии [2, 4], который основан на создании внутреннего источника тепла в области неявных дефектов типа нарушения сплошности за счет введения в объект ультразвуковых колебаний и определении глубины залегания дефекта (как внутреннего источника тепла) по анализу динамических температурных полей на поверхностях изделия.

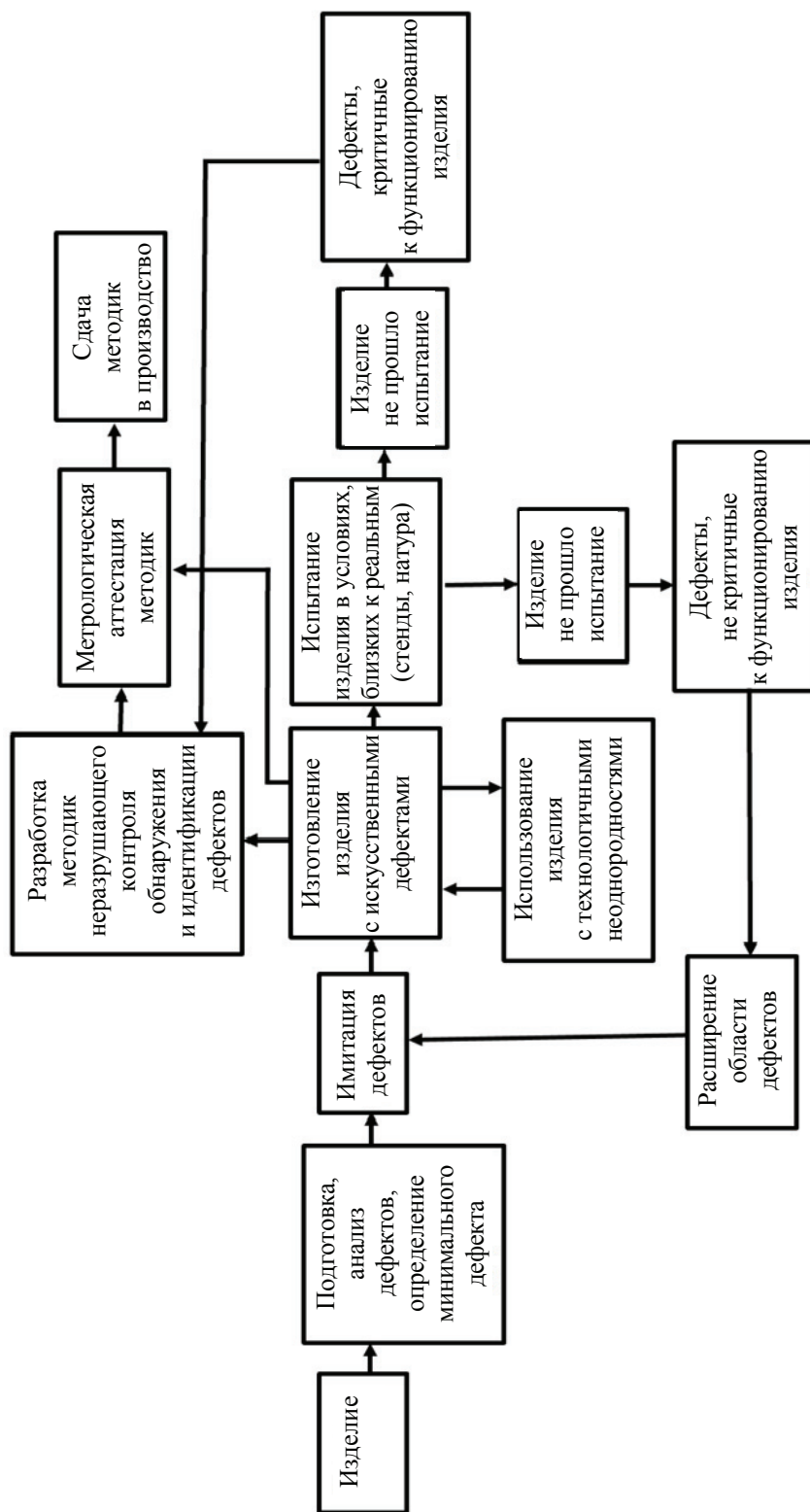


Рис. 1. Структурная схема технологии разработки методик НК критических дефектов

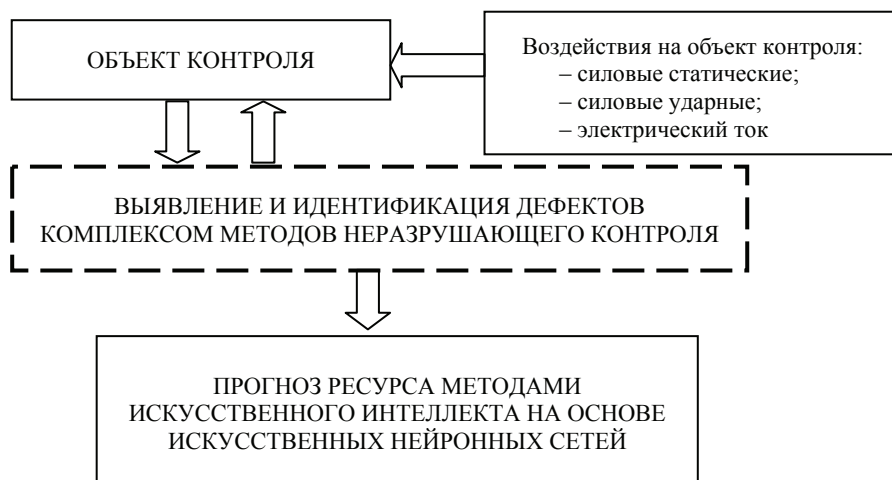


Рис. 2. Схема направления разработки технологий и аппаратуры НК неявных дефектов в ПКМ с оценкой ресурса эксплуатации

Определение глубины залегания дефекта основано на одновременной регистрации и специальной обработке динамического температурного поля на двух противоположных поверхностях изделия.

Теоретические исследования показали, что глубина залегания h внутреннего дефекта как внутреннего источника тепла определяется по формуле

$$h = H \frac{\sqrt{t_{\text{э opt1}}}}{\sqrt{t_{\text{э opt1}}} + \sqrt{t_{\text{э opt2}}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{э opt1}}$, $t_{\text{э opt2}}$ – время достижения максимального значения температуры на противоположных поверхностях контролируемого изделия; H – толщина контролируемого изделия.

Экспериментальные исследования на «эталонном» дефекте, размеры которого определены в соответствии с вышеописанной методикой (протяженность 5 мм), показали, что метод УЗ-термотомографии обеспечивает обнаружение таких «сомкнутых» дефектов и определение их глубины залегания с погрешностью до 16 % от толщины материала, что является вполне приемлемым для практического применения.

В качестве примера, на рис. 3 приведены экспериментальные графики изменения температуры в области дефекта на двух поверхностях контролируемого образца в процессе УЗ-термотомографии пластины толщиной 15 мм и глубиной залегания искусственного дефекта – 5 мм. Метод осуществляет уверенное выявление внутренних «сомкнутых» дефектов протяженностью 5 мм с идентификацией их по глубине залегания.

Отдельной важной задачей стоит обнаружение неявных «сомкнутых» дефектов в электропроводных композитных материалах в изделиях средней толщины в процессе нагружения изделий силовыми нагрузками (например, нагружение баллона внутренним давлением). Такие дефекты проявляются в процессе нагружения изделий, в связи с чем имеются существенные затруднения их обнаружения традиционными методами, так как оператору опасно находиться вблизи изделия.

Для обнаружения и идентификации таких неявных дефектов в электропроводных многослойных ПКМ средней толщины разработана технология НК – электросиловая термография [4 – 6], которая заключается в следующем.

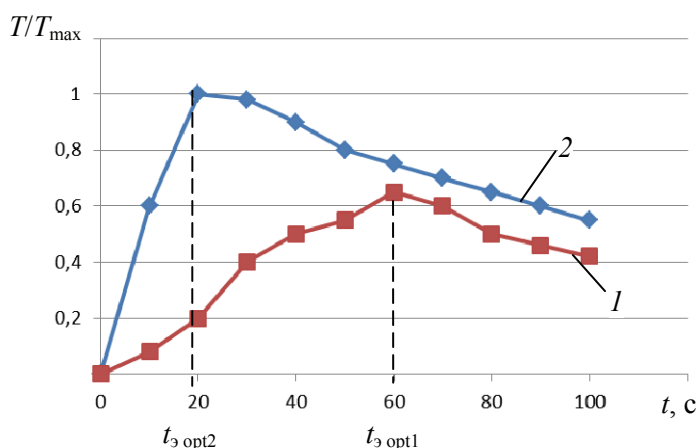


Рис. 3. Графики изменения температуры на «дальней» от дефекта (1) и «ближней» к дефекту (2) поверхностях:

T – текущее значение изменения температуры; $T_{\max}$ – максимальное значение изменения температуры на «ближней» поверхности

При приложении силовой нагрузки к контролируемому изделию из ПКМ происходит его деформация и, следовательно, изменяются геометрические характеристики внутренних дефектов типа нарушения сплошности, явных и неявных, например, увеличение раскрытия (толщины) трещин. Следовательно, изменяется их электрическое сопротивление. При пропускании электрического тока через контролируемое изделие из ПКМ происходит изменение тепловыделения на внутреннем дефекте в соответствии с известными физическими законами (рис. 4). Регистрируя с помощью термографической аппаратуры участки поверхности изделия с измененной температурой, осуществляют обнаружение внутренних дефектов, что дает возможность применения данного метода контроля для изделий, находящихся в режиме испытаний и в процессе эксплуатации.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что с увеличением величины тока I , протекающего через изделие, и времени пропускания тока τ , изменение температуры в области «сомкнутой» трещины протяженностью

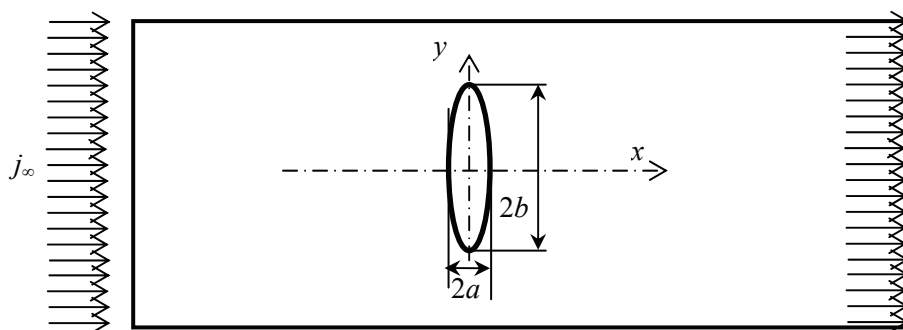


Рис. 4. Схема модельной задачи протекания плоского тока в пластине, содержащей несплошность эллиптической формы:

j_{∞} – плотность тока на удалении от дефекта; a, b – полуоси дефекта в виде эллипса; x, y – оси координат

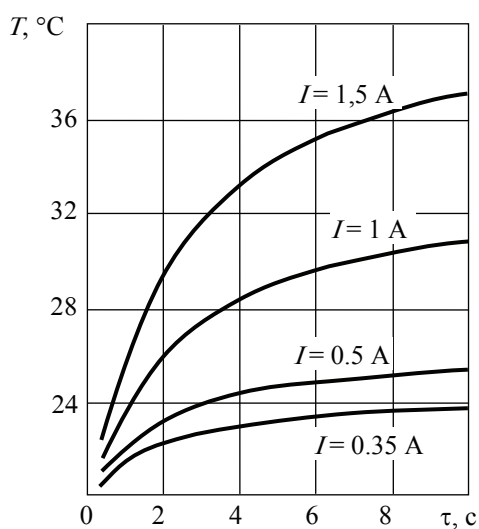


Рис. 5. Зависимость температуры вблизи трещины от времени при различных мощностях теплового источника

от 1 мм и на глубине расположения до 10 мм может достигать $\Delta T = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, что более чем достаточно для уверенного обнаружения дефекта существующими термографическими средствами (рис. 5).

В общем случае, параметры выявляемых дефектов определяются характеристиками контролируемого материала, прилагаемой силовой нагрузкой, параметрами электрического тока и т.п.

При нагружении изделий силовыми нагрузками для раскрытия неявных дефектов либо увеличения их выявляемости при проведении контроля методом электросиловой термографии очень важно не допустить «травмирования» изделия. Такая проблема достаточ-

но эффективно решается путем использования оптического контроля с использованием ВОД на основе ВБР, который позволяет определять величину деформации изделия в реальном времени его нагружения и своевременно остановить данный процесс в случае достижения деформации критической величины [6, 8]. Прикладываемая силовая нагрузка к контролируемому изделию может осуществляться одновременно с рабочей нагрузкой изделия, что позволяет проводить их контроль в процессе прочностных силовых испытаний и эксплуатации.

Для использования на практике разработана промышленная технология (методика) электросиловой термографии.

При практической дефектоскопии часто возникает задача обнаружения в изделиях из ПКМ на основе углеродных армирующих волокон поверхностных и приповерхностных микротрещин, при этом к самому изделию нельзя прикладывать силовые нагрузки. Существующие методы НК, как правило, не дают возможность выявлять такие дефекты. Для решения этой задачи разработана технология электрического метода на основе регистрации поля точечных источников тока [7]. Особенность подобных ПКМ состоит в их электропроводности, поэтому возможно установление закономерностей между параметрами дефектов (протяженностью и раскрытием – толщиной микротрещины), электрофизическими свойствами материала и величиной информационного параметра – изменением величины поверхностного тока.

Технология контроля основана на анализе параметров поля точечных источников тока поверхности изделия путем создания в исследуемом материале электрического поля и измерении потенциала этого поля в различных точках поверхности материала изделия. Изменение величины электрического потенциала является признаком наличия дефектов типа трещин, нарушения сплошности и т.п.

Теоретические исследования показывают, что разность потенциалов в точках поверхности пропорциональна силе тока, зависит от среднего удельного сопротивления материала и наличия дефектов. Таким образом, отношение измеренной разности потенциалов к силе тока (кажущееся сопротивление) при фиксированном расположении электродов зависит только от свойств материала, наличия дефекта и геометрии изделия.

Получены теоретические распределения потенциала, которые позволяют найти отношение разности потенциалов в двух фиксированных точках к силе тока, пропускаемого через оболочку из материала (нормальное поле).

Отклонения фактически измеренной разности потенциалов от этой теоретической величины характеризуют аномалию удельной электропроводности и являются информационным признаком наличия в контролируемом материале дефектов типа нарушения сплошности (микротрещины) или инородных включений.

Исследования показали, что целесообразно проводить НК при пропускании через исследуемый объект низкочастотного переменного тока, например, 50 Гц (5,3 А), так как при этом отсутствуют эффекты накопления электрических зарядов и пренебрежимо мал скин-эффект.

Данный метод позволяет уверенно выявлять дефекты типа микротрещин, выходящие на поверхность и подповерхностные (протяженностью от 10 мм), как в изделиях под силовой нагрузкой, так и в свободном состоянии. Это позволяет использовать его в комплексе с методом электросиловой термографии для выявления неявных дефектов типа «трещина».

Разработана промышленная технология электрического контроля электропроводных композитных материалов.

Важным показателем работоспособности многослойных конструкций из ПКМ является величина их деформация в процессе работы в условиях приложения нагрузок, которая определяется как свойствами самого материала, так и наличием в нем нарушений сплошности (дефектов). Поэтому определение величины деформации по всей толщине пакета материала в процессе эксплуатации и испытаний конструкции из ПКМ является важным этапом процесса отработки конструкций и контроля ее работоспособности.

Существующие методы тензометрии не позволяют решать такие задачи в полном объеме, так как измеряют деформации на поверхности изделия.

В полном объеме эти задачи решены на основе оптического контроля с использованием ВБР [6, 8, 9] на волоконных линиях. Преимущества и достоинства такой технологии заключаются в возможности измерения деформации по всему пакету многослойной конструкции, при этом заложенные в различных слоях оптические волокна с ВБР практически не оказывают никакого влияния на работоспособность конструкции вследствие малой толщины (рис. 6).

Установлено, что интеграция ВБР не снижает прочностные свойства ПКМ: корреляционные зависимости относительного изменения резонансной длины волны ВБР от величины приложенных силовых и температурных нагрузок описываются линейной функцией, а механические свойства ПКМ (углепластиков) с интегрированными ВОД находятся на уровне свойств углепластиков без ВОД в рамках разброса свойств, характерного для данного ПКМ.

Доказана возможность повышения достоверности результатов оптического контроля деформаций на основе ВБР (ориентировочно, на 15 – 25 %), путем специального послойного расположения ВБР в контролируемом изделии и специальной регистрации, и обработке данных при силовом нагружении изделий.

Разработана производственная технология оптического контроля, включающая технологию послойного интегрирования оптических волокон в много-



Рис. 6. Процесс закладки ВОД на основе ВБР в многослойное изделие в процессе его изготовления

слоистую конструкцию из ПКМ, регистрацию послойной деформации и оценку работоспособности конструкции на основе полученных данных.

Важным фактором, влияющим на работоспособность конструкции из ПКМ, является нахождение толщин слоев конструкции в пределах заданных допуском. При этом прямые геометрические измерения этих величин, как правило, не представляются возможным вследствие особенности конструкции. Применение существующих приборов вихретокового измерения толщины осложняется отсутствием сплошной металлической подложки между слоями конструкции. Для решения данной задачи разработаны специальные технологии и малогабаритные технические средства измерения толщины вихретоковым и магнитно-индукционным методами [10, 11] (с интеллектуальными преобразователями), обеспечивающие измерения толщины разнородных по характеристикам слоев многослойных конструкций из ПКМ переменной кривизны, как со стороны выпуклой, так и вогнутой поверхности. Измерение толщины слоев осуществляется в диапазоне толщин 1...45 мм без смены преобразователя с погрешностью не более $\pm 0,3$.

Разработаны и внедрены промышленные технологии измерения толщины вихретоковым и магнитно-индукционным методами резиноподобных слоев в многослойных конструкциях из ПКМ.

Заключительным этапом НК дефектов многослойных конструкций из ПКМ является оценка их ресурса эксплуатации. В настоящее время существует достаточно много технологий оценки ресурса на основе естественного старения конструкции, ускоренных климатических испытаний образцов из ПКМ и др. Они имеют как достоинства, так и недостатки.

Авторами предлагается метод оценки ресурса эксплуатации конструкций из ПКМ на основе методов искусственного интеллекта на базе искусственных нейронных сетей и результатов НК [12, 13]. Преимущество данного метода заключается в возможности оценки ресурса на всех этапах жизненного цикла эксплуатации изделия без его разрушения. Теоретико-экспериментальные обоснования возможности применения данного метода приведены на примере оценки ресурса (до разрушения) композитной пластины при ее циклической и статической одноосевой силовой нагрузке.

Информационный признак (входные данные) – ретроспективное динамическое температурное поле поверхности пластины, регистрация которого осуществлялась термографической аппаратурой, выходные данные – момент разрушения пластины.

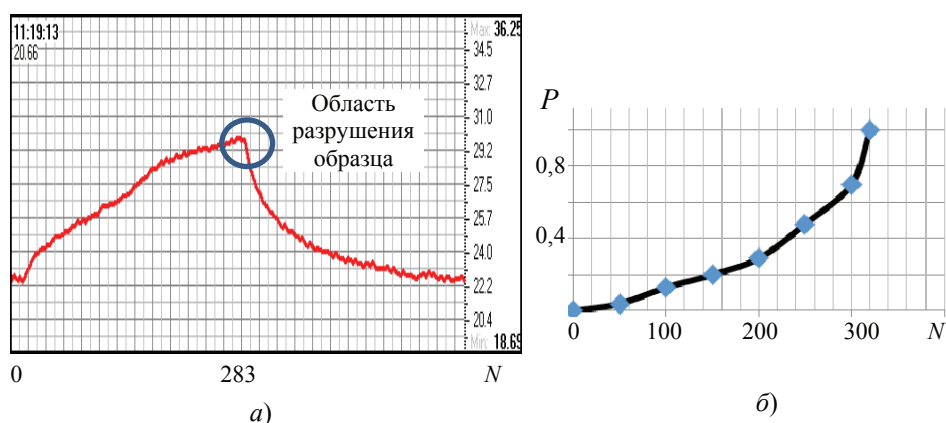


Рис. 7. Зависимости изменения температуры T (а) и вероятности разрушения (аварийного состояния) P (б) от числа циклов нагружения N

Обучение искусственной нейронной сети осуществлялось методом математического моделирования процесса разрушения пластины из ПКМ при циклической и статической одноосевой силовой нагрузке.

После обучения нейронной сети осуществлялись непосредственно эксперименты по оценке возможности применения искусственной нейронной сети для определения ресурса эксплуатации пластины. Пластина нагружалась, в процессе нагружения проводилась в реальном времени оценка ее ресурса (например, определялись вероятность разрушения пластины, то есть вероятность аварийного состояния от текущего цикла силового нагружения), после разрушения пластины сравнивались значения предсказанного цикла разрушения от фактического (см., например, рис. 7).

Заключение

Приведены результаты исследований по разработке технологий и аппаратуры НК неявных дефектов в ПКМ и возможности оценки ресурса эксплуатации изделий по результатам НК.

Разработана технология УЗ-термотомографии на основе генерации внутренних источников тепловой энергии в дефектах путем ввода ультразвукового излучения в материал, термографической регистрации и анализе поверхностных динамических температурных полей для определения характеристик дефектов малых размеров, «сомкнутых» дефектов и других с погрешностью, например, не более 16 % по глубине залегания.

Разработана технология электросиловой термографии конструкций из ПКМ для обнаружения и идентификации макро- и «сомкнутых» дефектов в электропроводных многослойных конструкциях из ПКМ на основе возникновения локальных температурных полей в области дефектов в процессе приложения силовых нагрузок и пропускания электрического тока.

Разработана технология поверхностных и приповерхностных микротрещин в тонкостенных конструкциях из электропроводных ПКМ, основанная на измерении полей электрического потенциала (анализ параметров поля точечных источников тока), при пропускании низкочастотного тока и анализе поля кажущегося сопротивления в области дефектов. Показано, что данной технологией выявляются дефекты типа поверхностных и приповерхностных микротрещин протяженностью от 10 мм.

Предложена технология разработки методик НК на основе обнаружения тех «критичных» дефектов, которые влияют на надежность функционирования изделий на основе верификации методик в квазиреальных условиях эксплуатации изделий.

Разработан теоретико-экспериментальный метод, позволяющий определять с заданной вероятностью размеры реального «наименьшего» дефекта типа нарушения сплошности в ПКМ по анализу реальных внутренних дефектов произвольной формы, размеров и ориентации.

Исследована возможность практического использования метода оценки ресурса эксплуатации изделий из ПКМ на основе искусственных нейронных сетей с применением результатов комплексной технологии НК, обеспечивающей погрешность результатов не более 20 %.

Список литературы

1. Козельская, С. О. К вопросу об определении размеров минимального дефекта типа нарушения сплошности в полимерных композиционных материалах / С. О. Козельская // Вопросы оборонной техники. – 2021. – Вып. 3 (202). – С. 57 – 61.

2. Экспериментальные исследования ультразвуковой тепловой томографии (УЗ-термотомографии) композитных материалов / О. Н. Будадин, Е. С. Вячкин, Е. А. Вячкина [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 6. – С. 58 – 62. doi : 10.14489/td.2019.06.pp.058-062
3. Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения / В. В. Ключев, О. Н. Будадин, Е. В. Абрамова [и др.]. – М. : Спектр, 2017. – 200 с.
4. Козельская, С. О. Развитие интегральных приборов и методов неразрушающего контроля композитных материалов / С. О. Козельская. – М. : Спектр, 2022. – 96 с.
5. Электросиловая термография конструкций из композиционных материалов / В. О. Каледин, Е. А. Вячкина, Д. А. Галдин [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 8. – С. 22 – 27. doi : 10.14489/td.2019.08.pp.022-027
6. Пат. 2736320 Российская Федерация, МПК G01N 25/72 (2006.01), G01J 5/60 (2006.01), G01N 3/18 (2006.01), G01B 11/16 (2006.01), G01N 33/44 (2006.01). Способ электросилового термооптического контроля пространственных объектов и устройство для его осуществления / Козельская С. О. ; заявитель и патентообладатель Козельская С. О. – № 2020118855 ; заявл. 01.06.2020 ; опубл. 13.11.2020, Бюл. № 32. – 36 с.
7. Неразрушающий контроль конструкций из углеродных материалов на основе регистрации поля точечных источников тока / О. Н. Будадин, А. А. Кульков, С. О. Козельская [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 1 (199). – С. 46 – 52. doi : 10.14489/td.2015.01.pp.046-052
8. Федотов, М. Ю. Развитие технологии оптического контроля конструкций из ПКМ волоконно-оптическими датчиками / М. Ю. Федотов, О. Н. Будадин, С. О. Козельская // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 10. – С. 26 – 35. doi : 10.14489/td.2019.10.pp.026-035
9. Пат. 2633288 Российская Федерация, МПК G01N 25/72 (2006.01). Способ диагностики надежности и предельного ресурса эксплуатации многослойных конструкций из композитных материалов / Будадин О. Н., Кульков А. А., Козельская С. О., Каледин В. О. ; заявитель и патентообладатель АО «Центральный научно исследовательский институт специального машиностроения». – № 2016126818/28 ; заявл. 04.07.2016 ; опубл. 11.10.2017, Бюл. № 29. – 40 с.
10. Пат. 2616071 Российская Федерация, МПК G01B 7/06 (2006.01). Способ магнитоиндукционного измерения толщины диэлектрического покрытия и устройство для его осуществления / Будадин О. Н., Кульков А. А., Козельская С. О., Щипцов В. С. ; заявитель и патентообладатель АО «Центральный научно исследовательский институт специального машиностроения». – № 2016104680/28 ; заявл. 11.02.2016 ; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11. – 20 с.
11. Пат. 2577037 Российская Федерация, МПК G01B 7/06 (2006.01), G01N 27/90 (2006.01). Способ вихретокового контроля толщины композитных материалов на неметаллических подложках и устройство для его осуществления / Будадин О. Н., Кульков А. А., Щипцов В. С. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Центральный научно исследовательский институт специального машиностроения». – № 2014149748/28 ; заявл. 09.12.2014 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 7. – 16 с.
12. Новый подход к оценке эксплуатационной безопасности композитных материалов и деталей сложной конструкции на основе методов искусственного интеллекта на базе глубинных нейронных сетей и результатов многокритериального комплексного неразрушающего контроля / Д. А. Акимов, А. Д. Клейменов, С. О. Козельская, О. Н. Будадин // Контроль. Диагностика. – 2020. – Т. 23, № 7. – С. 18 – 27. doi: 10.14489/td.2020.07.pp.018-027

13. Экспериментальные исследования возможности оценки ресурса эксплуатации композитных конструкций при их силовом нагружении и промышленных строительных конструкций / С. О. Козельская, В. В. Котельников, Д. А. Акимов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 132 – 148. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.132-148

The Development of Comprehensive Technology for Non-Destructive Testing of Implicit Defects and Service Life Assessment of Polymer Composite Materials

S. O. Kozelskaya^{1,2}, M. Yu. Fedotov^{3,4}

*Department of Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems (1),
Kozelskaya.sofik1977@yandex.ru, TSTU, Tambov, Russia;
JSC "Central Research Institute of Special Machine Building" (2), Moscow region,
Khotkovo, Russia; Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences (IA&E SB RAS)" (3), Novosibirsk, Russia;
Russian Engineering Academy LLC (RIA) (4), Moscow, Russia*

Keywords: quality diagnostics; polymer composite materials; non-destructive testing; exploitation resource; power load.

Abstract: The results of research on the development of technologies for the detection of "implicit" defects – "closed" defects, microcracks, pores, etc. are presented. The possibilities of evaluating the service life of products based on the results of non-destructive testing are shown: technologies of ultrasonic thermal tomography, electric force thermal tomography, based on the analysis of the parameters of the field of point current sources on the surface of the controlled product, optical control using fiber Bragg gratings, measuring the thickness of composite layers by eddy current and magnetic induction methods using smart converters. The possibility of estimating the service life of a structure based on the results of non-destructive testing using artificial neural networks is presented.

References

1. Kozel'skaya S.O. [On the issue of determining the size of the minimum defect of the type of discontinuity in polymer composite materials], *Voprosy oboronnoy tekhniki* [Questions of defense technology], 2021, Issue 3(202), pp. 57-61. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Budadin O.N., Vyachkin Ye.S., Vyachkina Ye.A., Kaledin V.O., Kozel'skaya S.O. [Experimental studies of ultrasonic thermal tomography (US thermotomography) of composite materials], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2019. no. 6, pp. 58-62. doi : 10.14489/td.2019.06.pp.058-062 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Klyuyev V.V., Budadin O.N., Abramova Ye.V., Pichugin A.N., Kozel'skaya S.O. *Teplovoy kontrol' kompozitnykh konstruktsey v usloviyakh silovogo i udarnogo nagruzheniya* [Thermal control of composite structures under conditions of force and shock loading], Moscow: Spektr, 2017, 200 p. (In Russ.).
4. Kozel'skaya S.O. *Razvitiye integral'nykh priborov i metodov nerazrushayushchego kontrolya kompozitnykh materialov* [Development of integrated devices and methods for non-destructive testing of composite materials], Moscow: Spektr, 2022, 96 p. (In Russ.).

5. Kaledin V.O., Vyachkina Ye.A., Galdin D.A., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. [Electric power thermography of structures made of composite materials], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2019, no. 8, pp. 22-27. doi: 10.14489/td.2019.08.pp.022-027 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kozel'skaya S.O. *Sposob elektrosilovogo termoopticheskogo kontrolya prostranstvennykh ob'yektov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [The method of electric power thermo-optical control of spatial objects and a device for its implementation], Russian Federation, 2020, Pat. 2736320 (In Russ.).
7. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Kozel'skaya S.O., Kaledin V.O., Kryukova Ya.S. [Non-destructive testing of structures made of carbon materials based on registration of the field of point current sources], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2015, no. 1(199), pp. 46-52. doi: 10.14489/td.2015.01.pp.046-052 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Fedotov M.Yu., Budadin O.N., Kozel'skaya S.O. [Development of technology for optical control of PCM structures with fiber-optic sensors], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2019, no. 10, pp. 26-35. doi : 10.14489/td.2019.10.pp.026-035 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Kozel'skaya S.O., Kaledin V.O. *Sposob diagnostiki nadezhnosti i predel'nogo resursa ekspluatatsii mnogosloynnykh konstruksiy iz kompozitnykh materialov* [Method for diagnosing the reliability and limiting service life of multilayer structures made of composite materials], Russian Federation, 2017, Pat. 2633288. (In Russ.).
10. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Kozel'skaya S.O., Shchiptsov V.S. *Sposob magnitoinduksionnogo izmereniya tolshchiny dielektricheskogo pokrytiya i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for magnetic induction measurement of the thickness of a dielectric coating and a device for its implementation], Russian Federation, 2017, Pat. 2616071. (In Russ.).
11. Budadin O.N., Kul'kov A.A., Shchiptsov V.S. *Sposob vikhretokovogo kontrolya tolshchiny kompozitnykh materialov na nemetallicheskih podlozhkakh i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for eddy current control of the thickness of composite materials on non-metallic substrates and a device for its implementation], Russian Federation, 2016, Pat. 2577037 (In Russ.).
12. Akimov D.A., Kleymenov A.D., Kozel'skaya S.O., Budadin O.N. [A new approach to assessing the operational safety of composite materials and parts of complex design based on artificial intelligence methods based on deep neural networks and the results of multi-criteria integrated non-destructive testing], *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2020, vol. 23, no. 7, pp. 18-27. doi: 10.14489/td.2020.07.pp.018-027 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kozel'skaya S.O., Kotelnikov V.V., Akimov D.A., Kutyurin Yu.G., Budarin O.N. [Experimental studies of the possibility of estimating the service life of composite structures under their force loading and industrial building structures], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 132-148. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.132-148 (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung einer integrierten zerstörungsfreien Kontrolltechnologie für implizite Defekte und Bewertung der Betriebsressource von polymeren Verbundwerkstoffen

Zusammenfassung: Es sind Forschungsergebnisse zur Entwicklung von Technologien zur Erkennung von „impliziten“ Defekten – „geschlossenen“ Defekten, Mikrorissen, Poren etc. vorgestellt. Es sind die Möglichkeiten zur Bewertung der Lebensdauer von Produkten anhand der Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen

aufgezeigt: Technologien der Ultraschall-Thermotomographie, Elektrokraft-Thermotomographie, basierend auf der Analyse der Parameter des Feldes punktueller Stromquellen auf der Oberfläche des kontrollierten Produkts, optische Kontrolle mithilfe von Faser-Bragg-Gittern, Messung der Dicke von Verbundschichten durch Wirbelstrom und magnetische Induktionsverfahren mithilfe intelligenter Konverter. Es ist die Möglichkeit vorgestellt, die Ressourcen eines Bauwerks auf der Grundlage der Ergebnisse zerstörungsfreier Prüfungen unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze abzuschätzen.

Mise au point d'une technologie intégrée de contrôle non destructif des défauts implicites et d'évaluation de la durée de vie des matériaux polymères composites

Résumé: Sont cités les résultats des recherches sur la mise au point de techniques permettant d'identifier les défauts «implicites» - défauts «fermés», micro-pores, pores, etc. Sont montrées les possibilités d'évaluer la durée de vie des produits à partir des résultats d'un contrôle non destructif: technologie de thermo-tomographie par ultrasons, thermotomographie électrique, à la base de l'analyse des paramètres de champ des sources de courant ponctuelles à la surface du produit contrôlé, contrôle optique à l'aide de réseaux de Bragg à fibres, mesure de l'épaisseur des couches composites par courants de Foucault et par induction magnétique à l'aide de transducteurs intelligents. Est présentée la possibilité d'évaluer la ressource de la conception à la base des résultats de l'inspection non destructive en utilisant des réseaux de neurones artificiels.

Авторы: *Козельская Софья Олеговна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; старший научный сотрудник, АО «ЦНИИ специального машиностроения», Московской обл., Хотьково, Россия; *Федотов Михаил Юрьевич* – кандидат технических наук, заместитель президента РИА, Российская инженерная академия; главный конструктор проекта, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), Новосибирск, Россия.
