



УДК 678.01:620.179

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ
СОДЕРЖАНИЯ СВЯЗУЮЩИХ В ПРЕПРЕГАХ И ПКМ
(ОБЗОР)**

В.И. Постнов
доктор технических наук

О.Л. Бурхан

А.Э. Рахматуллин

С.М. Качура

Декабрь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№12, 2013 г.

В.И. Постнов, О.Л. Бурхан, А.Э. Рахматуллин, С.М. Качура

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ СВЯЗУЮЩИХ В ПРЕПРЕГАХ И ПКМ (ОБЗОР)

Проведен обзор методов оперативного неразрушающего контроля содержания связующих в составе препрегов в процессе их изготовления на пропиточных машинах различного типа и готовых конструкциях из ПКМ. Дается подробный анализ и область применения этих методов.

***Ключевые слова:** ПКМ; препрег; содержание связующего; вихретоковые, диэлектрические, тепловые, оптические, акустические, радиометрические методы.*

V.I. Postnov, O.L. Burkhan, A. Rackmatullin, S.M. Kachura

NONDESTRUCTIVE METHODS OF VERIFICATION OF THE CONTENTS BINDING IN PREPREGS AND PCM (REVIEW)

The review of methods of an operating non-destructive inspection of the contents of prepregs, binding in a structure, is conducted during their manufacturing on impregnating machines of a different type and off-the shelf designs from PCM. Gives in-depth study and field of application of these methods.

***Keywords:** PCM; prepreg; contents binding; vortexcurrent, dielectric, thermal, optical, acoustic, radiometric methods.*

В связи с ростом объемов производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях производства в настоящее время неотложной задачей становится разработка новых технологий [1] и в связи с этим разработка методик и средств неразрушающего контроля содержания связующего в препрегах и ПКМ на стадии их изготовления [2, 3]. Это диктуется в первую очередь требованием создания систем активного контроля процессов пропитки. Наряду с этим имеется острая потребность в лабораторных экспрессных методах [4], поскольку традиционно используемые в лабораториях методы «выжигания» и экстрагирования нельзя признать удовлетворительными из-за большой длительности процесса выгорания и растворения связующего.

К тому же, в отличие от стеклонаполнителей, применение этих методов для угле- и органиконаполнителей дает большую погрешность измерения содержания связующего вследствие частичного выгорания волокон наполнителя и не полного растворения связующих в растворителях. Так, уже при температуре 250–300°C на воздухе начинается окисление и разрушение углеродных волокон, и потеря их массы может достигать 25% [5].

Использование неразрушающих физических методов для определения содержания связующего основано на существовании функциональной аналитической или устойчивой эмпирической корреляционной взаимосвязи измеряемой физической характеристики препрега и ПКМ с их составом – непосредственно либо косвенным образом через плотность (погонную, поверхностную или объемную). К настоящему времени в практике неразрушающего контроля ПКМ накоплен обширный опыт по использованию физических методов для определения состава и плотности [6–11]. В зависимости от физической природы используемого сигнала и характера взаимодействия его с веществом эти методы подразделяются на вихретоковые, диэлектрические, оптические, тепловые, акустические и радиометрические. Далее приводятся краткая характеристика и анализ возможности применения перечисленных методов контроля состава препрегов.

Вихретоковые методы основаны на взаимосвязи между величиной вносимого импеданса накладного вихретокового преобразователя с содержанием электропроводящей фазы ПКМ. Эти методы в практике ПКМ появились сравнительно недавно и используются для определения содержания углеволокна в препрегах, углепластиках и гибридных композитах. В работах [12, 13] показано, что наиболее чувствительной характеристикой к изменению соотношения компонентов углепластика является реактивная составляющая вносимого импеданса. Однако в гибридных композитах, содержащих помимо углеродных волокон наполнители-диэлектрики, анализ взаимосвязи между изменением реактивной составляющей импеданса и содержанием углеволокна крайне затруднителен. В этом случае предпочтительнее измерять активную составляющую вносимого импеданса R , которая связана с объемным содержанием углеволокна V_Y , корреляционной зависимостью с коэффициентом корреляции 0,9 вида [14]:

$$V_Y = BR^t h^S, \quad (1)$$

где B , t , S – экспериментальные константы; h – толщина ПКМ.

Погрешность определения содержания углеволокна данным методом не превышает 10–15% и определяется структурной неоднородностью, шероховатостью и искрив-

лением контролируемой поверхности. Мешающим фактором является степень полимеризации связующего. Кроме этого, применение метода для непроводящих материалов затруднено.

Ввиду того, что токовые методы могут быть реализованы в бесконтактном варианте, их можно рассматривать как перспективные для целей контроля препрегов на основе угленаполнителей.

Бурное развитие **диэлектрических методов**, отмечающееся в последнее десятилетие [9–11], обусловлено существованием физической взаимосвязи между составом ПКМ и диэлектрическими характеристиками, основными из которых являются: диэлектрическая проницаемость, электропроводность и, в конечном счете, тангенс угла диэлектрических потерь. Область применения данных методов ограничена диэлектриками.

Для однокомпонентных полярных диэлектриков применение диэлектрических методов основано на фундаментальном соотношении Клаузиуса–Мосотти, связывающем плотность ρ с диэлектрической проницаемостью ϵ , поляризуемостью p , дипольным моментом d и молекулярной массой M при температуре T :

$$4\pi N_A \rho (\epsilon + 1) \left[p + \frac{d^2}{3kT} \right] = 3M(\epsilon - 1), \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро; k – постоянная Больцмана.

Для многокомпонентных ПКМ при получении подобного выражения возникают значительные трудности, поэтому более предпочтительно использовать эмпирические зависимости. На практике наиболее часто пользуются взаимосвязью между составом и диэлектрической проницаемостью. Последнюю измеряют электроемкостными [15, 16] или радиоволновыми методами [7, 10].

Для композитов получен ряд классических зависимостей, связывающих диэлектрические проницаемости материала и его составляющих с содержанием компонентов. Так, для ортотропных и трансверсально-изотропных стеклопластиков при отсутствии пор диэлектрическую проницаемость можно рассчитать на основании уравнения Лихтенкера:

$$\epsilon^n = \epsilon_n^n V_n + \epsilon_c^n V_c, \quad (3)$$

где ϵ_n, V_n и ϵ_c, V_c – диэлектрические проницаемости и объемные содержания соответственно наполнителя и связующего; n – показатель степени, учитывающий ориентацию волокон относительно электрического поля и принимающий значения – от +1 в случае ориентации волокон

вдоль поля до -1 при их взаимно перпендикулярной ориентации.

Чувствительность этих методов определения содержания связующего тем выше, чем больше различия между диэлектрическими проницаемостями наполнителя и связующего. Поэтому для органопластиков получаются значительно худшие результаты по сравнению со стеклопластиковыми. По той же причине диэлектрические методы обладают высокой чувствительностью к пористости и особенно к влаге, которые являются мешающими факторами, что определяется выражением (3).

Несмотря на то, что в последнее время появилось большое количество приборов и устройств для измерения диэлектрических характеристик ПКМ, использовать диэлектрические методы для определения содержания связующего в препрегах следует с осторожностью из-за большого количества мешающих факторов, таких как состояние поверхности, шероховатость, пористость, влага, наличие на поверхности пыли, разнотолщинность, находящиеся поблизости металлические предметы и т. п.

Учет мешающих факторов требует введения многопараметровых методов [17], повышающих избыточность информации, что значительно усложняет методику контроля.

Другим направлением повышения информативности диэлектрических методов является метод диэлектрической спектроскопии [10, 11, 18]. В данном методе измеряется комплексная диэлектрическая проницаемость в широком интервале частот (порядка 5–6 декад). Это позволяет проводить экспрессное измерение параметров релаксационных процессов в ПКМ без термостимуляции и использовать аналитические методы для определения состава. В работе [19] проведено экспериментальное исследование информативности спектроскопического метода для определения состава ПКМ на примере сополимера метилметакрилата со стиролом. Показано, что наиболее информативными параметрами для контроля содержания компонентов являются наивероятнейшее время релаксации и инкремент диэлектрической проницаемости. Несмотря на аппаратную и методическую сложность, метод диэлектрической спектроскопии является перспективным для контроля состава препрегов диэлектриков, поскольку позволяет в принципе разделять вклад летучих компонентов растворимого и заполимеризованного связующего.

Диэлектрические методы малоприменимы для контроля электропроводящих ПКМ, содержащих углеродные волокна. Этот недостаток устраняется объединением диэлектрического и вихретокового методов с помощью емкостного контура, называемого контурным преобразователем [20]. Проведенные в работе [21] исследования показали,

что контурный преобразователь обладает наивысшей чувствительностью к объемному содержанию углеродных волокон гибридных ПКМ по сравнению с вихретоковым и емкостным преобразователями. Однако эти методы, как и вихретоковые, пока не получили широкого практического применения в практике ПКМ.

Несмотря на то, что **оптические методы** (инфракрасная и ультрафиолетовая спектрометрия) широко используются в лабораторной практике полимеров, применению их в неразрушающем контроле ПКМ уделяется мало внимания. Это объясняется в первую очередь сложностью физической картины взаимодействия света с такой неоднородной средой, как современные ПКМ, ввиду чего количественная взаимосвязь между характеристиками этого взаимодействия и составом ПКМ может быть описана только эмпирическими корреляционными зависимостями. Тем не менее благодаря очевидным достоинствам оптические методы могут успешно применяться для диагностики качества и состава препрегов [22, 23].

Были проведены исследования по возможности использования оптического метода для диагностики содержания связующего в препрегах с угленаполнителем, основанного на измерении коэффициента светопропускания. Коэффициент светопропускания измеряли по методике, изложенной в работе [24]. Экспериментальная зависимость коэффициента светопропускания от массового содержания связующего представлена на рис. 1.

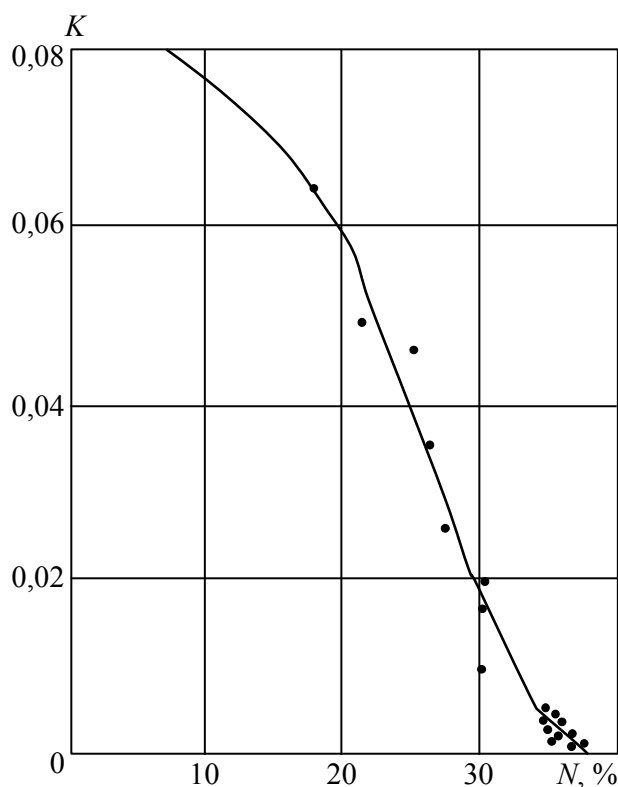


Рисунок 1. Зависимость коэффициента светопропускания K от массового процентного содержания связующего N для препрега на основе угленаполнителя ЛУП-0,1 и связующего 5-211-Б

Изменение содержания связующего осуществляли вымыванием в ацетоне образцов с номинальным содержанием связующего. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования метода светопропускания для контроля содержания связующего в препрегах с непрозрачными наполнителями. Однако из-за повышенной чувствительности к ряду мешающих факторов, таких как пористость, состояние поверхности, неоднородность укладки наполнителя, разнотолщинность и т. п., эти методы можно рекомендовать лишь в качестве дополнительных, повышающих общую информативность диагностики.

Тепловые методы основаны на взаимосвязи между составом и теплофизическими характеристиками ПКМ, преимущественно теплопроводностью, благодаря наличию большого количества аналитических формул, связывающих теплопроводность композитов с их структурой [25, 26]. Наряду с теплопроводностью в последнее время в практике ПКМ используется тепловая активность [27, 28], определяемая произведением теплоемкости, теплопроводности и плотности. Экспериментально полученный график зависимости тепловой активности от массового содержания связующего для препрегов представлен на рис. 2.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются приборы для измерения теплопроводности (ИТ-λ-400) и тепловой активности (ИТА-2103).

В работе [29] исследована возможность использования методов теплопроводности и тепловой активности для определения объемного содержания наполнителя в угле-, органо- и стеклопластиках. Показано, что для измерения содержания волокна можно использовать уравнения, аналогичные выражению (3).

С целью изучения возможности использования тепловых методов для контроля препрегов совместно с ИМП АН Латвии были проведены экспериментальные исследования взаимосвязи тепловой активности с содержанием связующего в препрегах на основе угле-, стекло- и органонаполнителей. Тепловую активность измеряли по методике, изложенной в работе [28]. Полученные экспериментальные кривые в области с содержанием связующего >20% переходят в прямолинейные, что указывает на применимость для этой области выражения типа (3) при $n=+1$.

Основным мешающим фактором при определении содержания связующего тепловыми методами является пористость, сильно снижающая коэффициент теплопроводности. К тому же контактный характер процесса измерения и инерционность не позволяют использовать эти методы в системе активного контроля препрегов. По этим причинам контактные тепловые методы находят применение в основном в лабораторной

практике при контроле пористости ПКМ [27, 30].

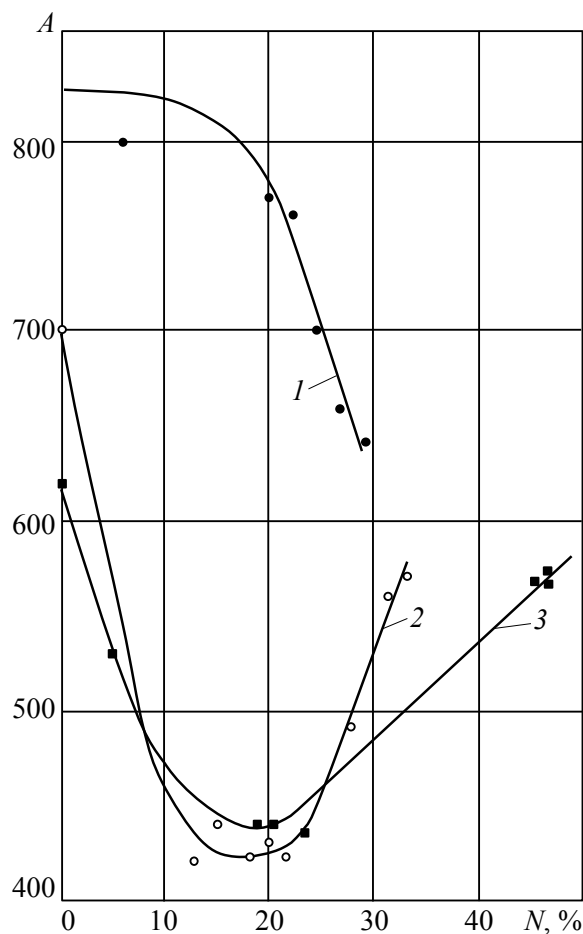


Рисунок 2. Зависимость тепловой активности A от массового процентного содержания связующего N для препрегов на основе углеленты ЛУП-0,1 (1), стеклоткани Т-10 (2), органоткани СВМ (3) и связующего 5-211-Б

Для целей диагностики процессов приготовления препрегов более перспективными являются бесконтактные тепловые инфракрасные методы. Однако ввиду высокой сложности и стоимости область применения этих методов пока ограничивается дефектоскопией крупногабаритных деталей и конструкций из ПКМ [31].

Применение **акустических методов** для контроля состава ПКМ основано на существовании известных аналитических выражений, связывающих скорость распространения и волновое сопротивление для различных типов упругих волн с упругими характеристиками и плотностью среды. В практике неразрушающего контроля ПКМ эти методы получили наиболее широкое распространение благодаря простоте методик измерения и большой номенклатуре ультразвуковых приборов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью [32].

В работе [33] проведено детальное аналитическое и экспериментальное исследование метода, основанного на измерении скорости ультразвука, для определения стекло-

содержания в стеклопластиках. Показано, что для ортотропных стеклопластиков произвольной структуры при стеклосодержании ниже предельного, когда пористость мала, скорость распространения упругих волн определяется соотношением:

$$V=qV_nN_n+V_c(1-N_n), \quad (4)$$

где V_n и V_c – скорость волны соответственно для наполнителя и связующего; N_n – массовое содержание наполнителя в пластике; q – коэффициент, учитывающий тип наполнителя и степень анизотропии пластика.

При содержании пор $>1\%$ пористость вносит заметный вклад в результаты измерений [31, 32] и ее необходимо учитывать в выражении (4) введением соответствующих поправок. Подобные результаты были получены для угле- и органопластиков [30].

Необходимо отметить, что данный метод малоэффективен для композитов с мало различающимися скоростями упругих волн в отдельных компонентах. Для таких материалов в работе [34] разработана методика и аппаратура по измерению плотности, основанные на измерении отношения амплитуд двух волн, отраженных от границы раздела между исследуемой и эталонной средой.

Проводились экспериментальные исследования возможности определения содержания связующего в препрегах на основе угленанполнителей ультразвуковым контактным методом с помощью прибора УКБ-1М. Было установлено, что взаимосвязь между скоростью распространения ультразвука и массовым содержанием связующего описывается уравнением линейной регрессии с коэффициентом корреляции 0,9. Необходимость хорошего акустического контакта между датчиками и препрегом, а также чувствительность к пористости делают данный метод малоперспективным для диагностики процесса пропитки. Тем не менее в комплексе с тепловым методом определения пористости он может стать эффективным экспрессным лабораторным методом контроля содержания связующего.

Для диагностики препрегов более перспективными являются полубесконтактные и бесконтактные акустические методы. В полубесконтактных методах возбуждение ультразвука в движущейся ленте проводится обычным контактным способом, а прием – бесконтактным через небольшой воздушный промежуток с помощью системы акустических преобразователей, установленных на определенном расстоянии от излучателя в направлении движения ленты [35]. При этом изменение величины воздушного промежутка, возникающее вследствие движения ленты, учитывается автоматически. В другом оригинальном варианте этого метода ультразвуковые колебания в виде широкополосного шума возникают в движущейся ленте самопроизвольно за счет трения ее о не-

подвижную рейку, установленную поперечно направлению движения [36]. Прием колебаний осуществляется через воздушный зазор двумя широкополосными преобразователями, расположенными на некотором расстоянии друг от друга вдоль ленты и подключенными к коррелометру. Скорость распространения ультразвуковых колебаний в ленте определяется по максимуму корреляционной функции сигналов от преобразователей, имеющей узкую форму из-за широкого спектра.

Из бесконтактных методов следует выделить методы, основанные на измерении частоты поперечных колебаний f отрезка ленты препрега массой m , движущейся в промежутке l между опорными роликами, в соответствии с формулой:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P}{ml}}, \quad (5)$$

где P – сила натяжения ленты.

Сравнивая частоты колебаний ленты на участках до пропитки f_1 и после пропитки f_2 , при условии их одинаковой длины и натяжения, можно определить массовое содержание связующего N из простого выражения:

$$N = 1 - (f_1/f_2)^2. \quad (6)$$

При этом, в отличие от других методов, отпадает необходимость проведения трудоемкой предварительной тарировки. Устройство для диагностики пропитки, реализующее этот принцип, содержит автогенератор, возбуждающий в ленте бесконтактным образом резонансные колебания в соответствии с выражением (5), и электронный блок, осуществляющий операцию (6) [37]. Изменение силы натяжения, возникающее в процессе пропитки, может быть учтено автоматически в выражении (6) аппаратным образом с помощью датчика натяжения [38]. Имеется ряд усовершенствований данного метода, учитывающих трение ленты о ролики [39] и изменение скорости передвижения ленты [40].

Несмотря на очевидные преимущества описанного метода, он не может локализовать контроль по ширине ленты, поскольку дает величину содержания связующего, усредненную по всей колеблющейся площади, что не всегда желательно. Свободным от этого недостатка является бесконтактный ультразвуковой метод, основанный на измерении амплитуды отраженной от поверхности препрега ультразвуковой волны, падающей из воздуха. Подробное исследование этого метода приведено в работе [41], где получено аналитическое выражение, связывающее относительное изменение коэффициента отражения с массовым содержанием связующего в предположении, что пропитка происходит путем заполнения связующим открытых поверхностных пор рэлеевского типа. Указывается, однако, что из-за сложного характера взаимодействия ультразвуковой

волны с пористой структурой препрега на практике следует использовать тарировочные зависимости. Проведенная экспериментальная проверка чувствительности метода для стеклоткани, а также однонаправленных лент из углеволокон и органожгутов показала возможность использования его для контроля содержания связующего в препрегах.

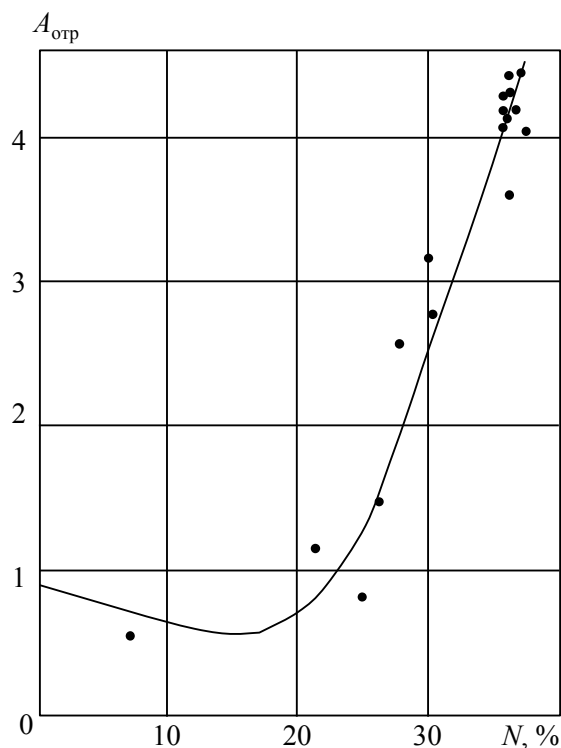


Рисунок 3. Зависимость амплитуды отраженного ультразвукового импульса $A_{отр}$ от массового процентного содержания связующего N для препрега на основе углеленты ЛУП-0,1 и связующего 5-211-Б

Проведено дополнительное исследование данного метода применительно к диагностике препрега на основе углеленты ЛУП-0,1 и связующего 5-211-Б. Исследования проводили на образцах промышленных препрегов. Изменение содержания связующего осуществляли последующим вымыванием образцов в ацетоне. Измерение амплитуды отраженных ультразвуковых импульсов на частоте 150 кГц проводили дефектоскопом ДУК-20. Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о возможности применения метода, однако общий ход полученной кривой значительно отличается от теоретических и экспериментальных зависимостей, представленных в работе [41], имеющих монотонный вид. Кроме того, при поверхностном нанесении связующего (пропитка осуществлялась нанесением связующего на сухую ленту кистью несколькими слоями) вид кривой резко изменялся и чувствительность метода падала. Данные факты свидетельствуют о сильной чувствительности метода к механизму пропитки, что является его серьезным недостатком.

Другой разновидностью бесконтактных методов является метод, основанный на измерении амплитуды проходящей через препрег волны [42]. Однако методу присущи те же основные недостатки, что и предыдущему, поскольку коэффициенты отражения и прохождения взаимосвязаны. Преодоление этих недостатков в какой-то мере возможно за счет увеличения информативности путем одновременного измерения с обеих сторон препрега амплитуд отраженных и прошедших волн. Тем не менее практическое использование методов данной группы для целей диагностики процессов приготовления препрегов возможно лишь после тщательной и всесторонней обработки.

В основе **радиометрических методов** определения содержания связующего в ПКМ лежат процессы взаимодействия проникающего низкоэнергетического излучения (как правило, рентгеновского) с веществом [43]. Перспектива развития этих методов обусловлена созданием эффективных источников и детекторов низкоэнергетического излучения [44].

В методическом плане наиболее простым является метод сквозного просвечивания, основанный на измерении коэффициента поглощения излучения веществом в соответствии с законом Ламберта:

$$I=I_0 \exp(-\alpha h), \quad (7)$$

где I и I_0 – интенсивность соответственно прошедшего и падающего излучения; α – линейный коэффициент поглощения; h – толщина материала.

Линейный коэффициент поглощения пропорционален плотности вещества:

$$\alpha=\mu\rho. \quad (8)$$

Здесь массовый коэффициент поглощения μ зависит от типа излучения и химического состава вещества. Для низкоэнергетического рентгеновского излучения с энергией не выше нескольких десятков килоэлектронвольт, когда поглощение происходит по механизму фотопоглощения, массовый коэффициент поглощения определяется выражением:

$$\mu = c\lambda^3 \sum_i \frac{z_i^4}{A_i} N_i, \quad (9)$$

где c – константа, приблизительно одна и та же для всех веществ; λ – длина волны излучения; z_i , A_i , N_i – соответственно порядковый номер, атомная масса и относительное массовое содержание химических элементов, входящих в состав вещества, причем суммирование производится по всем элементам, участвующим в поглощении.

Формулы (7–9) позволяют определить содержание связующего аналитическим методом по измеренной интенсивности излучения. Отличительной особенностью данного метода, обуславливающей его перспективность, является нечувствительность к мешающим факторам, связанным с физико-химическими изменениями, происходящими в препреге при пропитке. Это объясняется тем фактом, что массовый коэффициент поглощения не зависит от агрегатного состояния вещества, а определяется, согласно выражению (9), общим числом атомов вещества в облучаемом объеме. Поэтому такие сильно мешающие факторы, как пористость и степень полимеризации, присущие большинству остальных методов, не искажают результаты измерения содержания связующего.

В работе [45] на основании хорошего соответствия экспериментальных и расчетных данных массового коэффициента поглощения показана возможность использования метода сквозного просвечивания для определения содержания связующего в углепластиках.

Были проведены исследования применимости данного метода к диагностике препрегов [46]. В этом случае выражение (7) может быть переписано в виде:

$$I = I_0 \exp[-(\mu_n \delta_n + \mu_c \delta_c)], \quad (10)$$

где μ_n , μ_c – массовые коэффициенты поглощения наполнителя и связующего; δ_n , δ_c – масса соответственно наполнителя и связующего, приходящаяся на единицу поверхности препрега.

Тогда массовое содержание связующего N определяется по измеренным интенсивностям излучения, прошедшего сквозь препрег до пропитки I_n и после пропитки I_{np} , из выражения:

$$N = \left[\frac{100}{1 + \frac{\mu_c}{\mu_n} \frac{\ln \frac{I_0}{I_n}}{\ln \left(\frac{I_0}{I_{np}} \right) - \ln \left(\frac{I_0}{I_n} \right)}} \right] \% \quad (11)$$

Как не трудно показать из выражений (9–11), для препрегов оптимальный диапазон энергии излучения составляет 3–8 кэВ при интенсивности $<10^{-9}$ Вт/см². Такое излучение не представляет опасности для окружающих, поскольку железный экран толщиной 0,1 мм полностью поглощает его. Сквозное просвечивание излучением с данными характеристиками осуществляли с помощью рентгеновского аппарата общего назначения ДРОН-3 и специализированных установок, разработанных и изготовленных в Ульянов-

ском НТЦ ВИАМ, серий ИСС-1003 и ИСС-1004 (измеритель содержания связующего в препрегах при их изготовлении на пропиточных машинах (рис. 4) и отформованных конструкциях из ПКМ) при расстоянии между источником и детектором излучения ~ 50 мм.

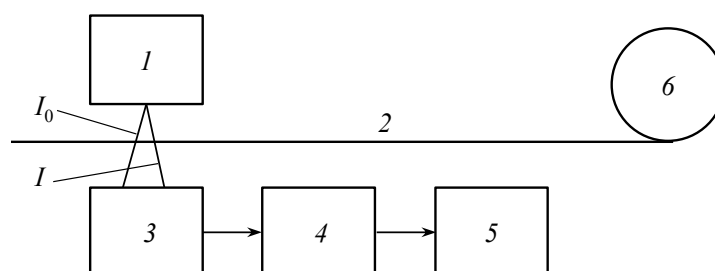


Рисунок 4. Структурная схема установки ИСС-1003:
 1 – источник излучения; 2 – препрег; 3 – детектор; 4 – микропроцессорный блок;
 5 – регистрирующее устройство; 6 – приемная катушка

Основу установки составляет источник излучения 1, обеспечивающий высокостабильное «мягкое» рентгеновское излучение с диаметром пучка 1–2 см. Ослабленное препрегом 2 излучение в виде отдельных квантов преобразуется детектором 3 в электрические импульсы, которые далее поступают в микропроцессорный блок 4 с регистрирующим устройством 5. Источник и детектор размещаются на жесткой вертикальной раме, прикрепленной к станине пропиточной машины непосредственно перед приемной катушкой 6 с готовым препрегом. Полученная экспериментально на установке ИСС-1003 зависимость коэффициента ослабления рентгеновского излучения от содержания связующего представлена на рис. 5.

Исследования проводили на образцах препрегов на основе угленаполнителей ЛУП-0,1 и УКН-П/5000; органонаполнителя СВМ; углеорганонаполнителей – УОЛ-300-1, УОЛ-300-К и связующих 5-211-Б, УНДФ-4А и ВС-25-26. Методика измерения изложена в работах [46–50]. Для всех без исключения исследованных препрегов имели место линейные зависимости логарифма интенсивности от величины δ_c во всем диапазоне, что доказывает справедливость выражений (10) и (11). Абсолютная ошибка величины по формуле (11) не превышала 2% и обуславливалась качеством приготовления образцов. Полученные результаты доказывают эффективность рентгенометрического метода контроля.

В случае, когда невозможно реализовать схему сквозного просвечивания, можно использовать метод рассеяния, обладающий односторонним доступом к контролируемой поверхности [6]. Метод имеет простое аналитическое обоснование и основан на измерении интенсивности рассеянного под некоторым углом к контролируемой по-

верхности узкого пучка излучения, пропорционального плотности рассеивающего вещества.

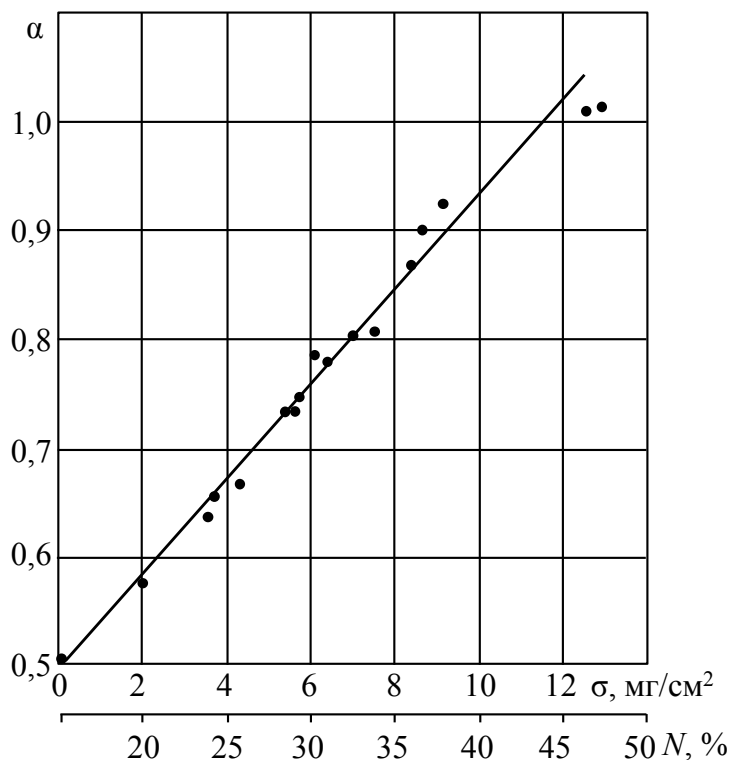


Рисунок 5. Зависимость коэффициента ослабления рентгеновского излучения α от содержания связующего 5-211-Б для препрегов на основе органоткани СВМ

Проведенный анализ известных неразрушающих методов определения содержания компонентов ПКМ показал, что для целей диагностики при процессах изготовления препрегов и готовых конструкций из ПКМ наиболее перспективным и универсальным является низкоэнергетический неразрушающий бесконтактный рентгенометрический метод сквозного просвечивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Стрельников С.В., Застрогина О.Б., Вешкин Е.А., Швец Н.И. К вопросу о создании высокоэффективных технологий изготовления панелей интерьера в крупносерийном производстве //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 18–24.
4. Мурашов В.В. Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического ко-

- рабля «Буран» //Труды ВИАМ. 2013. №4. (электронный журнал).
5. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. М. 1974. 376 с.
 6. Крылов Н.А., Калашников В.А., Полищук А.М. Радиотехнические методы контроля качества железобетона. М.-Л. Стройиздат. 1966. 379 с.
 7. Потапов А.И., Игнатов В.М., Александров Ю.Б. и др. Технологический неразрушающий контроль пластмасс. Л.: Химия. 1979. 288 с.
 8. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение. 1980. 261 с.
 9. Потапов А.И., Пеккер Ф.П. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение. 1977. 192 с.
 10. Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Состояние и задачи. Рига: Зинатне. 1983. 273 с.
 11. Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Проблемы. Рига: Зинатне. 1986. 289 с.
 12. Owston C.N. Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced resins //Materials Evaluation. 1976. №11. P. 237–244.
 13. Зинченко В.Ф., Лукша В.В. Влияние давления прессования на комплекс физико-механических характеристик углепластика //МКМ. 1983. №1. С. 105–109.
 14. Галич В.А., Сандалов А.В., Бергманис К.А. Исследование углеродсодержащих гибридных композитов вихретоковым методом /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Знатнее. 1986. С. 175–178.
 15. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне. 1982. 304 с.
 16. Эме Ф. Диэлектрические измерения. М.: Химия. 1967. 200 с.
 17. Матис И.Г. Новые электроемкостные средства для диагностики качества композитных материалов /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1983. С. 236–241.
 18. Suggest A. Time domain methods /In: Dielectric and related molecular process. London. 1976. V. 1. P. 101–120.
 19. Штраус В.Д. Исследование изменения состава сополимера метилметакрилата со стиролом по спектрометрическим измерениям диэлектрических характеристик //Механика полимеров. 1978. №5. С. 899–902.
 20. Устройство для контроля толщины и диэлектрических постоянных неметалличе-

- ских пластин. А.с. 139081 СССР; опубл. Бюл. 1961. №12.
21. Калпиньш А.В., Ротбахс Ю.Ю., Штраус В.Д. Возможности контроля электропроводящих композитных материалов при помощи контурных преобразователей /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1986. С. 274–278.
 22. Демченко В.В., Бурякин В.И., Любутин О.С., Моисеев Л.К., Масленников И.М. Определение содержания связующего в стеклопластике фотоэлектрическим методом //Пластические массы. 1971. №2. С. 61–62.
 23. Сандалов А.В. Исследование взаимосвязей между различными свойствами материалов и использование результатов этих исследований для диагностики несущей способности изделий /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1986. С. 18–28.
 24. Сандалов А.В., Демиденко Б.Я., Абрамчук С.С. Оптический контроль поврежденности органожгутов //МКМ. 1983. №1. С. 167–169.
 25. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М. 1962. 456 с.
 26. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир. 1968. 472 с.
 27. Зинченко В.Ф., Белова С.Н. Диагностика некоторых показателей структуры и физико-механических свойств стеклопластиков по их тепловой активности //Механика полимеров. 1976. №1. С. 128–132.
 28. Зинченко В.Ф., Негреева С.Н. Методы теплового контроля показателей структуры и свойств композиционных материалов на основе полимеров //Промышленная техника. 1981. №1. С. 74–79.
 29. Негреева С.Н. Влияние параметров структуры гибридных композитных материалов на их теплофизические характеристики /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1986. С. 190–192.
 30. Зинченко В.Ф., Негреева С.Н. Исследование взаимосвязей между некоторыми показателями структуры и физико-механических свойств органо- и углепластиков /В кн.: Методы и средства диагностики несущей способности изделий из композитов. Рига: Зинатне. 1983. С. 158–165.
 31. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник в 2-х кн. /Под ред. Ключева В.В. Кн. 1. М.: Машиностроение. 1986. 488 с.
 32. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник в 2-х

- кн. /Под ред. Клюева В.В.. Кн. 2. М.: Машиностроение. 1986. 352 с.
33. Бобриков Л.П., Медведев М.З. Ультразвуковой метод определения содержания связующего и пористости стеклопластиков //Механика полимеров. 1968. №3. С. 547–554.
 34. Медведев М.З., Бобриков Л.П. Определение модулей упругости и прочностей при растяжении ориентированных стеклопластиков на основе неразрушающего контроля параметров их состава и структуры //Механика полимеров. 1969. №2. С. 332–341.
 35. Устройство для измерения скорости ультразвука в движущемся листовом материале: А.с. 502324 СССР. Бюл. 1976. №5.
 36. Устройство для измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущемся листовом материале: А.с. 489018 СССР. Бюл. 1975. №39.
 37. Устройство для измерения количества связующего в нитевидных материалах: А.с. 974245 СССР. Бюл. 1982. №42.
 38. Устройство для измерения количества связующего в пропитанной ленте: А.с. 125367 СССР. Бюл. 1986. №32.
 39. Устройство для измерения количества связующего в ленточных материалах: А.с. 1206683 СССР. Бюл. 1986. №3.
 40. Устройство для измерения количества связующего в нитевидных материалах: А.с. 1206684 СССР. Бюл. 1986. №3.
 41. Бобриков Л.П., Галич В.А., Сандалов А.В. Возможности диагностики содержания связующего в пропитанном армирующем материале с использованием результатов бесконтактного ультразвукового контроля //МКМ. 1985. №5. С. 916–921.
 42. Wunderer Bernd. Vorrichtung zur Bestimmung des Flächengewichts von blattförmigem Material. EPO 167010 A2.
 43. Рентгенотехника: Справочник в 2-х кн. /Под ред. Клюева В.В. Кн. 1. М.: Машиностроение. 1980. 431 с.
 44. Румянцев С.В., Кулиш Е.Е., Борисов О.И. Источники низкоэнергетического излучения в неразрушающем контроле. М.: Атомиздат. 1976. 128 с.
 45. Martin B.G. An analysis of radiographic techniques for measuring resin content in graphite fiber reinforced epoxy resin composites //Materials evaluation. 1977. №11. P. 65–68.
 46. Никитин К.Е., Постнов В.И., Качура С.М., Рахматуллин А.Э., Бурхан О.Л. Двухканальная компьютерная установка ИСС 1003М для непрерывного мониторинга содержания связующего в препрегах в процессе пропитки //Заводская лаборатория

- рия. 2008. Т. 74. №2. С. 30–32.
47. Бурхан О.Л. Компьютер оптимизирует параметры //Инженерная газета. 2005. С. 2.
48. Никитин К.Е., Постнов В.И., Бурхан О.Л., Качура С.М., Рахматуллин А.Э. Двухканальная компьютерная установка ИСС 1003М для непрерывного мониторинга содержания связующего в препрегах в процессе пропитки //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. №2. С. 30.
49. Никитин К.Е., Постнов В.И., Качура С.М., Рахматуллин А.Э., Бурхан О.Л. Компьютерная установка ИСС 1003М для непрерывного мониторинга содержания связующего в препрегах в процессе пропитки //Авиационные материалы и технологии. 2009. №4. С. 21–23.
50. Способ определения количественного состава композиционных материалов: пат. 2436074 Рос. Федерация; опубл. 10.12.2011. Бюл. №34.

Reference list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Graschenkov D.V., Chursova L.V. Strategiya razvitiya kompozitsionnyh i funktsional'nyh materialov [Development strategy of composite and functional materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
3. Strel'nikov S.V., Zastrogina O.B., Veshkin E.A., Shvets N.I. K voprosu o sozdanii vysokoeffektivnyh tehnologiy izgotovleniya paneley inter'era v krupnoseriynom proizvodstve [On development of highly effective technologies for commercial production of interior panels] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 18–24.
4. Murashov V.V. Nerazrushayuschiy kontrol' zagotovok i detaley iz uglerod-uglerodnogo kompozitsionnogo materiala dlya mnogorazovogo kosmicheskogo korablya «Buran» [Non-destructive testing of carbon-carbon composite billets and parts for the Buran space shuttle] //Trudy VIAM. 2013. №4. (elektronnyj zhurnal).
5. Konkin A.A. Uglerodnye i drugie zharostoykie voloknistye materialy [Carbon and other heat-resistant fibrous materials]. M. 1974. 376 s.
6. Krylov N.A., Kalashnikov V.A., Polischuk A.M. Radiotekhnicheskie metody kontrolya kachestva zhelezobetona [Radio methods for the quality control of reinforced concretes]. M.-L. Stroyizdat. 1966. 379 s.

7. Potapov A.I., Ignatov V.M., Aleksandrov Yu.B. i dr. Tehnologicheskiy nerazrushayuschiy kontrol' plastmass [In-process non-destructive testing of plastics]. L.: Himiya. 1979. 288 s.
8. Potapov A.I. Kontrol' kachestva i prognozirovaniye nadezhnosti konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [Quality control and reliability prediction of composite structures]. L.: Mashinostroenie. 1980. 261 s.
9. Potapov A.I., Pekker F.P. Nerazrushayuschiy kontrol' konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov [Non-destructive testing of composite structures]. L.: Mashinostroenie. 1977. 192 s.
10. Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Sostoyaniye i zadachi [Methods and facilities for diagnostics of load-carrying capacity of composite products. Condition and tasks]. Riga: Zinatne. 1983. 273 s.
11. Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Problemy [Methods and facilities for diagnostics of load-carrying capacity of composite products. Concerns]. Riga: Zinatne. 1986. 289 s.
12. Owston C.N. Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced resins [Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced resins] //Materials Evaluation. 1976. №11. P. 237–244.
13. Zinchenko V.F., Luksha V.V. Vliyanie davleniya pressovaniya na kompleks fiziko-mekhanicheskikh harakteristik ugleplastika [An effect of molding pressure on the complex of physical and mechanical characteristics of carbon fiber reinforced plastics] //MKM. 1983. №1. S. 105–109.
14. Galich V.A., Sandalov A.V., Bergmanis K.A. Issledovaniye uglerodsoderzhaschikh gibridnykh kompozitov vihretokovym metodom [Examination of carbon-bearing hybrid composites by the eddy current method] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1986. S. 175–178.
15. Matis I.G. Elektroemkostnyye preobrazovateli dlya nerazrushayuschego kontrolya. [Capacitance-type transducers for non-destructive testing]. Riga: Zinatne. 1982. 304 s.
16. Eme F. Dielektricheskie izmereniya [Dielectric measurements]. M.: Himiya. 1967. 200 s.
17. Matis I.G. Novyye elektroemkostnyye sredstva dlya diagnostiki kachestva kompozitnykh materialov [New capacitance-type facilities for diagnostics of composite materials quality] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1983. S. 236–241.

18. Sugget A. Time domain methods /In: Dielectric and related molecular process. London. 1976. V. 1. P. 101–120.
19. Shtraus V.D. Issledovanie izmeneniya sostava sopolimera metilmetakrilata so stirolom po spektrometricheskim izmereniyam dielektricheskikh harakteristik [Study of changes in the composition of the copolymer of methyl methacrylate with styrene by spectrometric measurements of dielectric characteristics] //Mehanika polimerov. 1978. №5. S. 899–902.
20. Ustroystvo dlya kontrolya tolschiny i dielektricheskikh postoyannykh nemetallicheskih plastin [Thickness and dielectric coefficients control equipment for non-metallic planes]. A.s. 139081 SSSR; opubl. Byul. 1961. №12.
21. Kalpin'sh A.V., Rotbahs Yu.Yu., Shtraus V.D. Vozmozhnosti kontrolya elektroprovodyaschih kompozitnykh materialov pri pomoschi konturnykh preobrazovateley [Capabilities of conductive composite materials control by means of contour converters] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1986. S. 274–278.
22. Demchenko V.V., Buryakin V.I., Lyubutin O.S., Moiseev L.K., Maslennikov I.M. Opredelenie sodержaniya svyazuyushego v stekloplastike fotoelektricheskim metodom [Determination of binder content in fiber-glass plastics by the photoelectric method] //Plasticheskie massy. 1971. №2. S. 61–62.
23. Sandalov A.V. Issledovanie vzaimosvyazey mezhdu razlichnymi svoystvami materialov i ispol'zovanie rezul'tatov etih issledovaniy dlya diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy [Analysis of relationships between various properties of materials and the use of the results of this analysis for diagnostics of load-carrying capacity of products] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1986. S. 18–28.
24. Sandalov A.V., Demidenko B.Ya., Abramchuk S.S. Opticheskiy kontrol' povrezhdenosti organozhgutov [Optical control of damages of organic yarns] //MKM. 1983. №1. S. 167–169.
25. Chudnovskiy A.F. Teplofizicheskie harakteristiki dispersnykh materialov [Thermal and physical characteristics of dispersed materials]. M. 1962. 456 s.
26. Misnar A. Teploprovodnost' tverdykh tel, zhidkostey, gazov i ih kompozitsiy [Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions]. M.: Mir. 1968. 472 s.
27. Zinchenko V.F., Belova S.N. Diagnostika nekotorykh pokazateley struktury i fi-ziko-mehanicheskikh svoystv stekloplastikov po ih teplovoy aktivnosti [Diagnostics of some

- structure factors and physical and mechanical properties of fiber-glass plastics by their thermal activity] //Mehanika polimerov. 1976. №1. S. 128–132.
28. Zinchenko V.F., Negreeva S.N. Metody teplovogo kontrolya pokazately struktury i svoystv kompozitsionnykh materialov na osnove polimerov [Methods of thermal control of structure parameters and properties of composite materials based on polymers] //Promyshlennaya tekhnika. 1981. №1. S. 74–79.
29. Negreeva S.N. Vliyanie parametrov struktury gibridnykh kompozitnykh materialov na ih teplofizicheskie harakteristiki [Effect of structure parameters of hybrid composites on their thermal and physical characteristics] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1986. S. 190–192.
30. Zinchenko V.F., Negreeva S.N. Issledovanie vzaimosvyazey mezhdu nekotorymi pokazatelyami struktury i fiziko-mehanicheskikh svoystv organo- i ugleplastikov [Analysis of the relationships between some structure factors and physical and mechanical properties of organic- and carbon fiber reinforced plastics] /V kn.: Metody i sredstva diagnostiki nesuschey sposobnosti izdeliy iz kompozitov. Riga: Zinatne. 1983. S. 158–165.
31. Pribory dlya nerazrushayushego kontrolya materialov i izdeliy: Spravochnik v 2-h kn. [Instruments for non-destructive testing of materials and products: Handbook in 2 vol.] /Pod red. Klyueva V.V. Kn. 1. M.: Mashinostroenie. 1986. 488 s.
32. Pribory dlya nerazrushayushego kontrolya materialov i izdeliy: Spravochnik v 2-h kn. [Instruments for non-destructive testing of materials and products: Handbook in 2 vol.] /Pod red. Klyueva V.V.. Kn. 2. M.: Mashinostroenie. 1986. 352 s.
33. Bobrikov L.P., Medvedev M.Z. Ul'trazvukovoy metod opredeleniya sodержaniya svyazuyushego i poristosti stekloplastikov [Ultrasonic method for determination of binding content and porosity of fiber-glass plastics] //Mehanika polimerov. 1968. №3. S. 547–554.
34. Medvedev M.Z., Bobrikov L.P. Opredelenie moduley uprugosti i prochnostey pri rastyazhenii orientirovannykh stekloplastikov na osnove nerazrushayushego kontrolya parametrov ih sostava i struktury [Determination of elasticity modulus and strengths of oriented fiber-glass plastics on the basis of non-destructive testing of their composition and structure parameters] //Mehanika polimerov. 1969. №2. S. 332–341.
35. Ustroystvo dlya izmereniya skorosti ul'trazvuka v dvizhuschemsya listovom materiale [Equipment for measurement of ultrasound velocity in moving sheet materials]: A.s. 502324 SSSR. Byul. 1976. №5.

36. Ustroystvo dlya izmereniya skorosti rasprostraneniya ul'trazvukovyh kolebaniy v dvizhuschemsya listovom materiale [Equipment for measurement of propagation velocity of ultrasonic vibrations in moving sheet materials]: A.s. 489018 SSSR. Byul. 1975. №39.
37. Ustroystvo dlya izmereniya kolichestva svyazuyuschego v nitevidnyh materialah [Equipment for measurement of binder content in filamentary materials]: A.s. 974245 SSSR. Byul. 1982. №42.
38. Ustroystvo dlya izmereniya kolichestva svyazuyuschego v propitannoy lente [Equipment for measurement of binder content in saturated tapes]: A.s. 125367 SSSR. Byul. 1986. №32.
39. Ustroystvo dlya izmereniya kolichestva svyazuyuschego v lentochnyh materialah [Equipment for measurement of binder content in tape materials]: A.s. 1206683 SSSR. Byul. 1986. №3.
40. Ustroystvo dlya izmereniya kolichestva svyazuyuschego v nitevidnyh materialah [Equipment for measurement of binder content in filamentary materials]: A.s. 1206684 SSSR. Byul. 1986. №3.
41. Bobrikov L.P., Galich V.A., Sandalov A.V. Vozmozhnosti diagnostiki sodержaniya svyazuyuschego v propitannom armiruyuschem materiale s ispol'zovaniem rezul'tatov beskontaktnogo ul'trazvukovogo kontrolya [Capabilities of diagnostics of binder content in saturated reinforcing materials using results of the non-contact ultrasonic testing] //MKM. 1985. №5. S. 916–921.
42. Wunderer Bernd. Vorrichtung zur Bestimmung des Flächengewichts von blattförmigem Material. EPO 167010 A2.
43. Rentgenotekhnika: Spravochnik v 2-h kn. [X-ray technology: Handbook in 2 vol.] /Pod red. Klyueva V.V. Kn. 1. M.: Mashinostroenie. 1980. 431 s.
44. Rummyantsev S.V., Kulish E.E., Borisov O.I. Istochniki nizkoenergeticheskogo izlucheniya v nerazrushayuschem kontrole [Sources of low-energy radiation in non-destructive testing]. M.: Atomizdat. 1976. 128 s.
45. Martin B.G. An analysis of radiographic techniques for measuring resin content in graphite fiber reinforced epoxy resin composites //Materials evaluation. 1977. №11. P. 65–68.
46. Nikitin K.E., Postnov V.I., Kachura S.M., Rahmatullin A.E., Burhan O.L. Dvukanal'naya komp'yuternaya ustanovka ISS 1003M dlya nepreryvnogo monitoringa sodержaniya svyazuyuschego v prepregah v protsesse propitki [ISS-1003M two-

- channel computerized unit for continuous monitoring of binder content in prepregs during saturation process] //Zavodskaya laboratoriya. 2008. T. 74. №2. S. 30–32.
47. Burhan O.L. Komp'yuter optimiziruet parametry [Computer optimizes parameters] //Inzhenernaya gazeta. 2005. S. 2.
48. Nikitin K.E., Postnov V.I., Burhan O.L., Kachura S.M., Rahmatullin A.E. Dvuhkanal'naya komp'yuternaya ustanovka ISS 1003M dlya nepreryvnogo monitoringa sodержaniya svyazuyuschego v prepregah v protsesse propitki [ISS-1003M two-channel computerized unit for continuous monitoring of binder content in prepregs during saturation process] //Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2008. №2. S. 30.
49. Nikitin K.E., Postnov V.I., Kachura S.M., Rahmatullin A.E., Burhan O.L. Komp'yuternaya ustanovka ISS 1003M dlya nepreryvnogo monitoringa sodержaniya svyazuyuschego v prepregah v protsesse propitki [ISS-1003M computerized installation for continuous monitoring of binding content in prepregs in saturation process] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2009. №4. S. 21–23.
50. Sposob opredeleniya kolichestvennogo sostava kompozitsionnyh materialov [Method for determination of quantitative composition of composite materials]: pat. 2436074 Ros. Federatsiya; opubl. 10.12.2011. Byul. №34.