

УДК 620.179:678.8

В.В. Мурашов

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЗАГОТОВОК И ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МНОГОРАЗОВОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»**

*Требования к надежности изделий, эксплуатируемых в условиях многоразовых космических полетов, предусматривают стопроцентный контроль качества материалов и изделий из них. Готовые детали можно исследовать только методами неразрушающего контроля. Для углерод-углеродного композиционного материала было разработано несколько способов, одним из которых стал акустический теневой метод контроля, как наиболее эффективный для условий производства. Другие методы контроля (импедансный, свободных колебаний) позволяют проводить контроль качества деталей в условиях эксплуатации изделия при одностороннем доступе к объекту контроля.*

**Ключевые слова:** многоразовый космический корабль, углерод-углеродный композиционный материал, высокотемпературные переделы, неразрушающий контроль, импедансный метод, метод свободных колебаний, теневой метод, пленочный имитатор дефектов, система ориентации преобразователей дефектоскопа.

*The complete quality control of materials and components made from them is an obligatory requirement to define the reliability of reusable spaceships. Finished parts can be examined by the non-destructive methods only. Several methods were worked out to test carbon-carbon composite materials. One of them is the acoustic shadow test method, which is most effective for testing under production conditions. The other control methods (impedance technique, free oscillation technique) allow quality examination of parts in case of the one-side access to the tested object.*

**Key words:** reusable spaceship, carbon-carbon composite material, high temperature processing, non-destructive testing, impedance technique, free oscillation technique, shadow method, film simulator of defects, orientation system of transformers of NDT unit.

В восьмидесятые годы прошлого столетия на Московском электродном заводе было организовано производство деталей из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) – передних кромок крыльев (так называемого «носки крыла», состоящего из 12 секций) и носовой детали фюзеляжа (так называемого «кока») многоразового космического корабля (МКК) «Буран», именованного тогда аббревиатурой БТС – большой транспортный самолет.

Детали из УУКМ являлись одним из трех видов теплозащиты самолета – применялась еще теплозащита в виде плиток из тонкого кварцевого волокна (в основном снизу самолета) и гибкая теплозащита. Особенностью деталей из УУКМ является то, что они в процессе эксплуатации при нагреве свыше 1500°C практически не изменяют своих размеров и, следовательно, остаются прочно закрепленными на самолете. УУКМ под названием «Гравимол» (а в дальнейшем «Гравимол-В») для жесткой теплозащиты был разработан в кооперации ВИАМ с НИИГрафит, НПО «Молния» и ВНИИВПроектом. Гравимол получался из углепластика путем высокотемпературных переделов, при которых органическая часть материала выгорает и превращается в углерод (отсюда и название материала – углерод-углеродный).

Ответственным исполнителем от ВИАМ по вопросам неразрушающего контроля жесткой теп-

лозащиты был назначен автор этой статьи, который несколько лет занимался решением данной проблемы. Стоит упомянуть, что эффективный неразрушающий контроль деталей и конструкций в процессе производства является гарантией надежности изделия, в особенности столь ответственного назначения.

Целью работы было изыскание методов неразрушающего контроля полуфабрикатов и готовых деталей из материалов с углеродной матрицей в условиях производства и эксплуатации изделия. В задачи работы входило опробование различных методов дефектоскопии, уточнение стадии производства, на которой целесообразен контроль, отработка и внедрение методики контроля.

Практика использования акустических методов контроля для дефектоскопии изделий из полимерных композиционных материалов показывает, что акустическими методами можно выявлять такие дефекты, как расслоения, раковины, крупные трещины, скопления пор и др. [1, 2]. Опробование различных акустических методов для определения их возможностей при дефектоскопии углепластиковых полуфабрикатов и углерод-углеродных деталей проводилось на специально изготовленных образцах – плитах размером 220×220 мм (в плане) и толщиной 8 мм.

Искусственные дефекты типа расслоений имитировались путем заложения в плиты-образцы в

процессе их изготовления вкладышей из фольги толщиной 0,2 мм. Материал фольги – коррозионностойкая сталь, форма вкладыша в плане – равнобедренный треугольник с основанием 80 мм и высотой 200 мм. Вкладыши закладывались в середину сечения плиты-образца. Чтобы вкладыши легче удалялись из плиты, они покрывались антиадгезионным составом и закладывались так, чтобы часть вкладыша выступала за кромку плиты-образца.

Плиты-образцы исследовались на каждой стадии изготовления УУКМ: на стадии получения углепластика, карбонизации, пироуплотнения и графитизации. Искусственные дефекты, заложенные в образцах, позволили установить оптимальные режимы настройки дефектоскопов и определить их чувствительность – наименьший размер выявляемого дефекта.

Для проведения предварительных исследований были выбраны следующие низкочастотные акустические методы, опробование которых проводилось на образцах с искусственными дефектами после всех перечисленных выше стадий их изготовления: амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы импедансного метода (дефектоскопы АД-40И и ИАД-3); амплитудный способ импедансного метода, реализуемого с использованием раздельно-совмещенного преобразователя (дефектоскопы АД-60С, АД-10У и АЧД-2М); фазовый и временной способы велосиметрического метода (дефектоскоп АД-10У); спектральный способ метода свободных колебаний (дефектоскопы АД-60С и АД-50У), а также амплитудный способ метода прохождения в теневом варианте (дефектоскопы УД-23УМ, ДУК-66ПМ, УДМ-1М и УДМ-3). В дальнейшем последний метод для краткости будем называть теневым методом.

Результаты предварительных исследований показали, что наиболее эффективными методами контроля полуфабрикатов и деталей из материалов с углеродной матрицей являются импедансный метод в двух его вариантах – при использовании совмещенного и раздельно-совмещенного преобразователей; метод свободных колебаний, реализуемый с использованием преобразователя с микрофонным приемником, и теневой метод, при реализации которого используются преобразователи с эластичными протекторами.

Импедансный метод, так же как и метод свободных колебаний, реализуется при одностороннем доступе к объекту контроля. При контроле этими методами наблюдается глубинная неконтролируемая зона, прилегающая к стороне стенки объекта контроля, противоположной той стороне, с которой ведется контроль. Импедансным методом лучше выявляются подповерхностные дефекты, методом свободных колебаний – глубинные дефекты. Для проверки всего сечения заготовки или детали, необходимо проконтролировать объ-

ект контроля поочередно двумя дефектоскопами с двух сторон. Теневым методом контролируется все сечение объекта контроля, однако для реализации метода требуется двухсторонний доступ к объекту контроля.

Рассмотрим подробно особенности амплитудного способа импедансного метода дефектоскопии, реализуемого с использованием совмещенного и раздельно-совмещенного преобразователей, выбранных по результатам предварительных исследований.

Для обоих вариантов импедансного метода характерным является сухой контакт с объектом контроля, в первом случае – в одной, а во втором случае – в двух очень небольших по площади зонах. Условно такой контакт с объектом контроля называют сухим точечным контактом.

Сухой точечный контакт имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными формами контакта преобразователя с объектом контроля. Он не требует применения контактной смазки, позволяет контролировать заготовки и детали как с плоскими, так и с криволинейными поверхностями, а также повысить производительность контроля благодаря увеличению скорости сканирования объекта контроля.

Однако сухому точечному контакту присущи и некоторые недостатки. Одним из них является наличие значительной контактной гибкости  $C_k$ , которая при вводе и приеме колебаний определяет упругое сопротивление контактной зоны  $X_k$ . Это сопротивление, соединенное цепочкой с импедансом нагрузки  $Z_n$ , уменьшает передачу энергии в объект контроля и обратно, и снижает чувствительность контроля. Контактная гибкость зависит от параметров соприкасающихся тел, т. е. от параметров контактного наконечника и объекта контроля.

Для удобства контроля наконечники импедансных преобразователей имеют сферическую поверхность. В таком случае величина гибкости зоны контакта сферы радиусом  $R_1$  с плоскостью определяется выражением [3, 4]:

$$C_k = \frac{2}{3} \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]^{2/3} (R_1 F_0)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $E_1$  и  $\mu_1$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона контактного наконечника;  $E_2$  и  $\mu_2$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона объекта контроля;  $F_0$  – сила прижатия преобразователя к объекту контроля.

Из формулы (1) следует, что при увеличении модуля упругости объекта контроля  $E_2$  контактная гибкость  $C_k$  уменьшается и чувствительность метода возрастает. С другой стороны, с увеличением модуля упругости объекта контроля возрастает импеданс нагрузки и при значительном его увеличении начинает сказываться шунтирующее влияние контактной гибкости.

Как было отмечено, контактная гибкость при- суща обоим вариантам импедансного метода. Однако она по-разному влияет на эксплуатационные характеристики при использовании совмещенного и раздельно-совмещенного преобразователей.

Как известно, импедансным методом с использованием совмещенного преобразователя можно выявлять дефекты, расположенные не глубже середины сечения по толщине стенки объекта контроля. Поэтому, чтобы проконтролировать все сечение, необходимо проводить контроль заготовки или детали с двух сторон. Кроме того, с увеличением жесткости объекта контроля уменьшается максимальная глубина залегания выявляемого дефекта.

Этим и объясняются экспериментальные факты: на стадии углепластика, карбонизации и пироуплотнения дефекты, заложенные в плитах-образцах, выявляются почти полностью, а после графитизации – в связи с увеличением жесткости материала – площадь выявляемого дефекта получается меньше площади заложенного искусственного дефекта. Дефекты меньшей площади на этой глубине вообще не будут выявлены.

Разделение излучателя и приемника дает преимущество – в этом случае метод позволяет выявлять дефекты на значительно большей глубине, чем при использовании совмещенного преобразователя.

Следующим фактором, влияющим на контактную гибкость  $C_k$ , является сила прижатия преобразователя к объекту контроля  $F_0$ . Из формулы (1) следует, что для уменьшения упругого сопротивления контактной гибкости нужно снижать силу прижатия преобразователя к объекту контроля. Но это возможно в том случае, когда поверхность объекта контроля достаточно гладкая. На стадии углепластика это в какой-то степени возможно. Однако на последующих стадиях – карбонизации и пироуплотнения – пористость материала возрастает, возрастает и шероховатость поверхности, поэтому силу прижатия преобразователя к объекту контроля приходится увеличивать. Но с увеличением силы прижатия растут так называемые фрикционные шумы.

Причиной возникновения фрикционных шумов являются соударения контактного наконечника преобразователя с неровностями поверхности объекта контроля. В результате этих соударений на приемном пьезоэлементе преобразователя возникает переменная составляющая сигнала, которая накладывается на полезный сигнал в виде помехи и затрудняет контроль.

Для того чтобы понять механизм возникновения фрикционных шумов и проанализировать факторы, влияющие на условия контроля, можно рассмотреть идеализированный случай, когда объект контроля имеет синусоидальные неровности, а радиус наконечника преобразователя такой, что он вписывается в неровности поверхности объекта контроля. Для такого случая общее выра-

жение для действующей силы  $F$  с учетом статической силы  $F_0$  прижатия преобразователя к объекту контроля имеет вид:

$$F = F_0 + F_m \times \cos \omega t, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $t$  – время.

Амплитуда  $F_m$  переменной составляющей силы, определяющей уровень электрического напряжения на приемном пьезоэлементе преобразователя, может быть определена по формуле [5, 6]:

$$F_m = \frac{2\pi aV}{L} \cdot \frac{Z_d \cdot Z_n \cdot Z_k}{Z_d + Z_n + Z_k}, \quad (3)$$

где  $a$  – амплитуда неровностей;  $L$  – пространственный период этих неровностей;  $V$  – скорость перемещения преобразователя по объекту контроля;  $Z_d$  – входной механический импеданс преобразователя;  $Z_n$  – импеданс объекта контроля в зоне контакта с преобразователем;  $Z_k$  – импеданс контактной гибкости.

Как следует из формулы (3), при прочих равных условиях для уменьшения уровня фрикционных шумов необходимо снижать скорость контроля, т. е. уменьшать скорость перемещения преобразователя по поверхности объекта контроля. Кроме того,  $F_m$  возрастает (см. формулу (3)) с увеличением импеданса объекта контроля  $Z_n$ , а импеданс материала с углеродной матрицей с каждой последующей технологической стадией повышается.

После графитизации поверхностный слой материала становится еще более шероховатым и жестким, плавно передвигать преобразователь по поверхности объекта контроля становится практически невозможно. Контроль графитизированных деталей обычно возможен только путем перестановки преобразователя с места на место.

Следует отметить, что неровности поверхности реальных деталей имеют более сложный характер и при движении преобразователя по ним на приемном пьезоэлементе возбуждаются несинусоидальные колебания, т. е. фрикционные шумы имеют широкий и сложный спектр. Однако большая составляющая этого спектра лежит в области звуковых частот. В связи с этим импедансный метод, реализуемый с использованием совмещенного преобразователя, в большей степени подвержен влиянию фрикционных шумов.

Отсюда следует, что для неразрушающего контроля деталей из композиционных материалов с углеродной матрицей после графитизации лучше использовать импедансный метод, реализуемый с использованием раздельно-совмещенного преобразователя, так как в этом случае используются более высокие частоты.

Для контроля углепластиковых заготовок и деталей из материала Гравимол на стадии графитизации (перед боросилицированием) первоначально была предложена методика контроля импедансным методом и методом свободных коле-

баний. Недостатками такой методики были большая трудоемкость и, следовательно, низкая производительность контроля (требовалось двумя приборами проконтролировать заготовку или деталь поочередно с двух сторон, т. е. просканировать ее 4 раза). Было признано целесообразным использовать оба предложенных метода, которые реализуются при одностороннем доступе к контролируемому объекту, только для контроля в условиях эксплуатации «Бурана», когда объекты контроля закреплены и доступ к ним только односторонний.

Задачей дальнейшей работы являлось исследование возможности неразрушающего контроля заготовок и готовых деталей носков агрегатов из материала Гравимол акустическим теньевым методом. Этот метод неразрушающего контроля основан на ослаблении (или задержке) дефектом сигнала, проходящего от излучателя к приемнику, которые расположены соосно по разные стороны стенки контролируемого объекта, т. е. метод требует двухстороннего доступа к объекту контроля, что может быть обеспечено только в условиях производства.

Различают амплитудный, временной и фазовый способы контроля теньевым методом. При контроле амплитудным способом дефекты обнаруживаются по ослаблению или исчезновению принимаемого сигнала, при контроле временным способом – по задержке сигнала, при контроле фазовым способом – по изменению фазы принятого сигнала. Автором был выбран амплитудный способ контроля теньевым методом. В процессе контроля теньевым методом проверяется все сечение конструкции, т. е. при этом методе исключается наличие глубинных неконтролируемых зон.

Исследования эксплуатационных возможностей теневого метода проводились на образцах готовых деталей с естественными и искусственными дефектами типа расслоений при использовании ультразвукового дефектоскопа ГСП ЭКОН-6 типа УД-23УМ с преобразователями на частоту 250–200 кГц с локальными (резино-глицериновыми) ваннами.

В ВИАМ разработана и успешно применялась в условиях производства технологическая рекомендация (рабочая методика) по контролю углепластиковых заготовок и готовых деталей носков агрегатов акустическим теньевым методом (ТР1.2.430–85. Неразрушающий контроль углепластиковых заготовок и готовых деталей носков агрегатов «К» и «Ф1» из материала типа Гравимол акустическим теньевым методом). На рис. 1 в качестве примера показана крупногабаритная деталь сложной формы – носок крыла МКК «Буран» – и зоны контроля таких деталей: прямые участки, зоны сложной формы и труднодоступные для контроля места.

Методика контроля заключается в соосном расположении и перемещении или перестановке преобразователей по обеим поверхностям объекта контроля и наблюдении за сигнальной лампочкой.

Шаг перестановки 20 мм (расстояние между соседними центрами контролируемых зон, расположенных на одной линии), шаг сканирования тоже 20 мм (расстояние между соседними линиями перемещения центра преобразователя или зоны контакта преобразователя с объектом контроля). Чувствительность при контроле акустическим теньевым методом составляла 20–30 мм – в зависимости от размера протектора преобразователя, т. е. этим методом выявлялись дефекты, наименьший размер которых в плане равен (или более) 20–30 мм.

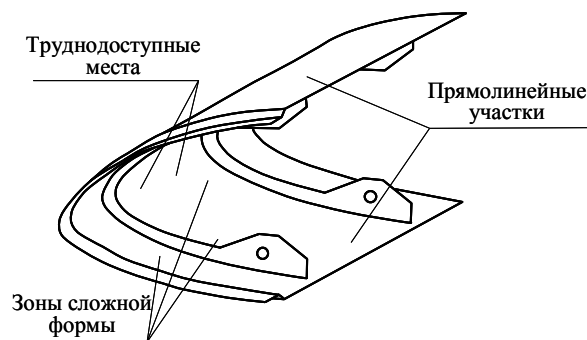


Рис. 1. Крупногабаритная деталь сложной формы – носок крыла многоразового космического корабля «Буран»

Контроль прямых участков заготовок или деталей проводился катящимися преобразователями (рис. 2), а в зоне сложной формы или в труднодоступных местах – преобразователями, расположенными соосно и переставляемыми по поверхности заготовки или детали (рис. 3).

Для настройки дефектоскопа УД-23УМ и периодической (не реже чем через 1 ч) проверки его работоспособности необходим стандартный образец предприятия (СОП). В ВИАМ был предложен и использовался при контроле деталей на Московском электродном заводе СОП размером в плане 100×100 мм, представлявший собой пленочный имитатор дефектов, выполненный в виде многослойного пакета из полиэтиленовой пленки толщиной 0,04–0,06 мм с заложенными в нем двумя искусственными дефектами размером 15×15 и 30×30 мм. Искусственный дефект был образован путем закладывания в полиэтиленовом пакете одного слоя фильтровальной бумаги, двух слоев медицинской марли, обернутой фторопластовой пленкой. Толщина имитатора в зоне искусственного дефекта 0,25–0,75 мм. Искусственный дефект для предотвращения его смещения внутри полиэтиленового пакета запаян по контуру.

При настройке дефектоскопа преобразователи прижимаются к контролируемой заготовке или детали через большой дефект (30×30 мм) стандартного образца (пленочного имитатора дефектов), при этом необходимо добиться максимального ослабления сигнала на приемном преобразователе, т. е. такого положения, чтобы сигнал прак-

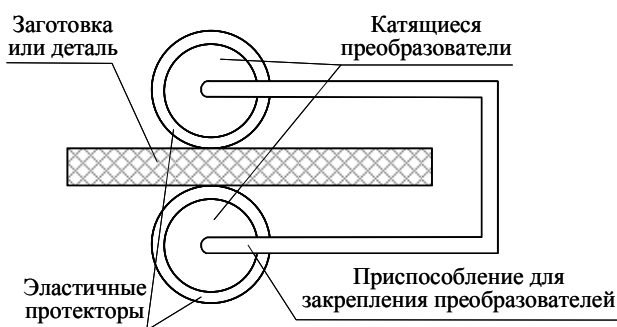


Рис. 2. Контроль прямолинейных участков заготовок и деталей жесткой теплозащиты (схема)

тически не проходил (величина амплитуды импульсов на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа не должна при этом превышать 5 мм). Затем преобразователи прижимаются к объекту контроля в той же зоне через малый дефект (15×15 мм) стандартного образца, при этом добиваются прохождения сигнала. Фактически в этом случае сигнал проходит только по краям преобразователя, а такая настройка дефектоскопа по большому и малому дефектам стандартного образца позволяет установить допустимый интервал усиления прибора, при котором в доброкачественной зоне заготовки или детали сигнал проходит, а в зоне дефекта – не проходит.

Акустическим теневым методом выявляются дефекты типа расслоений, пустот и зон непропитки связующим (без их различия), при этом контроль углепластиковых заготовок позволял отбраковать дефектные заготовки, чтобы не пропустить их на дальнейшие дорогостоящие переделы, а контроль на финишной стадии после технологической обработки позволял выявить расслоения в деталях перед боросилицированием.

Под дефектами типа расслоений понимаются нарушения сплошности, ориентированные в основном параллельно стенке детали. Дефекты типа пустот хотя и не встречались в практике как естественные дефекты, но моделировались искусственным путем (от расслоений пустоты отличаются гораздо большим раскрытием: 1 мм и более) и уверенно выявлялись при контроле теневым методом. Можно отметить, что расслоения в материале Гравимол характеризуются ступенчатостью, т. е. переходом несплошности от одного «слоя» к другому, что объясняется, видимо, тем, что материал в готовой детали в значительной степени перестал быть слоистым.

Уровень принятого сигнала при контроле в бездефектной зоне изменяется в пределах от 12 до 24 дБ, что связано с изменением как условий контакта преобразователей с контролируемой деталью (усилие прижатия преобразователей, шероховатость, кривизна детали в зоне контроля), так и толщины детали, плотности материала и т. п.

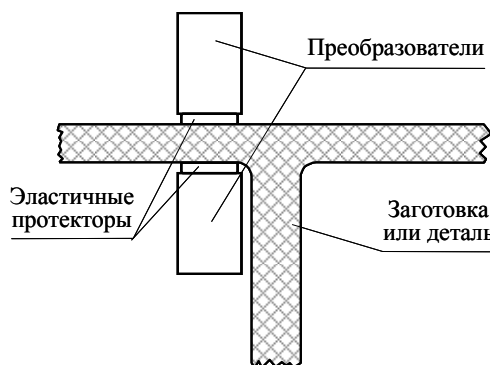


Рис. 3. Контроль в зоне сложной формы и в труднодоступных местах носков крыла и кока (схема)

Уровень принятого сигнала в зоне расслоения чаще всего равен нулю, а в худшем случае составляет 1–2 дБ. Разница в уровнях сигнала в зоне дефекта и в бездефектной зоне детали, когда сигнал сильно ослабляется в результате прохождения через материал пониженной плотности, равна 10–30 дБ, что вполне достаточно для уверенного выявления дефектов.

Контроль крупногабаритной детали сложной формы МКК «Буран» акустическим теневым методом целесообразно проводить контактными преобразователями, оснащенными системой соосной ориентации преобразователей дефектоскопа, так как применять для этих целей катящиеся преобразователи или контактные преобразователи, соосность расположения которых обеспечивает приспособление типа «скоба», невозможно или весьма затруднительно из-за сложности формы контролируемого объекта и больших его размеров.

В ВИАМ предложен принцип построения и разработаны конструкция и электрическая схема системы соосной ориентации преобразователей, которая опробована и использована при неразрушающем контроле носового обтекателя самолета («кок»). Система ориентации состоит из двух основных частей, которыми оснащаются преобразователи дефектоскопа, – источника и приемника магнитного поля. Питание схемы приемника осуществляется от источника переменного или постоянного тока напряжением 8–10 В, не входящего в комплект системы (например, от лабораторного автотрансформатора или от двух батареек типа 3336, соединенных последовательно).

Принцип работы системы ориентации заключается в замыкании цепей электрического тока схемы приемника магнитоуправляемыми герконами при попадании их в магнитное поле, создаваемое источником системы, и включении при этом сигнальных ламп, расположенных в корпусе приемного устройства.

Методика ориентации преобразователей дефектоскопа заключается в прижатии одного из преобразователей дефектоскопа, жестко скрепленного с источником системы ориентации, к од-

ной стороне стенки контролируемого объекта и перемещении другого преобразователя дефектоскопа, жестко скрепленного с приемником системы ориентации, по другой стороне стенки объекта до включения всех сигнальных ламп. При поиске соосного положения преобразователей при включении одной или нескольких ламп (но не всех!) приемник системы ориентации необходимо смещать в сторону включенных сигнальных ламп или перемещать источник системы ориентации в противоположном направлении (в сторону не включенных сигнальных ламп).

Использование постоянного магнита для создания постоянного магнитного поля, пронизывающего объект контроля и являющегося носителем информации о соосности преобразователей дефектоскопа, позволяет проводить контроль теневым методом крупногабаритных деталей сложной формы, выполненных из проводящих материалов с нестабильными электрическими характеристиками (углепластиков, материалов на основе графита и т. п.).

Результаты производственных испытаний системы ориентации при контроле крупногабаритной детали сложной формы («кок»), произведенных на Московском электродном заводе, позволяют сделать вывод о высокой эффективности системы.

Таким образом, наиболее достоверным и надежным методом контроля полуфабрикатов и изделий из углерод-углеродных материалов в

условиях производства следует считать акустический теневой метод.

Рабочая методика применения акустического теневого метода дефектоскопии (ТР1.2.430–85) внедрена на Московском электродном заводе. По результатам работы оформлен акт о внедрении неразрушающего контроля этим методом на стадии получения заготовок из углепластика и готовых деталей.

Успешный орбитальный полет МКК «Буран» подтвердил эффективность неразрушающего контроля деталей из УУКМ. Осмотр носового кока фюзеляжа и передних кромок крыльев после первого полета МКК «Буран» подтвердил, что все детали из УУКМ могут быть использованы и при дальнейших полетах, которых, к сожалению, так и не было.

В заключение следует заметить, что детали столь ответственного назначения должны быть проконтролированы не только методами дефектоскопии для выявления крупных локализованных в объеме материала дефектов типа нарушения сплошности, но и методами, позволяющими оценить состав и физико-механические характеристики УУКМ [7–10] с целью прогнозирования остаточного ресурса и обеспечения безопасной эксплуатации МКК «Буран» в дальнейшем. Однако работы после первого и единственного полета «Бурана» в этом направлении были прекращены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами. /В сб. «75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007»: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–347.
2. Мурашов В.В., Манаева З.И. Акустические методы и средства неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций //Авиационная промышленность. 1982. № 8. С. 61–66.
3. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение. 2008. 864 с.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник /Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 1976. Кн. 2. С. 260.
5. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение. 1991. 272 с.
6. Ланге Ю.В. О фрикционных шумах при дефектоскопии импедансным и велосиметрическим методами //Дефектоскопия. 1972. №3. С. 34–36.
7. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г. Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2008. №1. С. 17–24.
8. Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актюировании материала //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 20–22.
9. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
10. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 465–475.