



Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации

(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Технологическая платформа «Новые полимерные композиционные
материалы и технологии»

Технологическая платформа «Материалы и технологии металлургии»

**X Всероссийская конференция
«ТестМат. Основные тенденции, направления и
перспективы развития методов неразрушающего
контроля в аэрокосмической отрасли»**

материалы конференции

09 февраля 2018 г.

Электронное издание

Москва

2018

УДК 620.1

ББК 30.3 + 34.2 + 34.43

Т36

Редакционная коллегия:

А.В. Славин, д.т.н., начальник Испытательного центра ФГУП «ВИАМ»;
А.Н. Луценко, к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра ФГУП «ВИАМ»;
Е.В. Николаев, к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра ФГУП «ВИАМ»;
А.С. Бойчук, к.т.н., научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ»;
Е.И. Косарина, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ»;
В.В. Мурашов, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ»;
Е.А. Шеин, к.т.н., главный специалист ФГУП «ВИАМ»;
М.С. Закржевская, инженер 2-й категории ФГУП «ВИАМ».

ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: материалы X всероссийской конференции (г. Москва, 09 фев. 2018 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2018. – 385 с. – ISBN 978-5-905217-22-7. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб. – Загл. с экрана.

В сборнике представлены доклады, посвященные теории и практике неразрушающего контроля металлических материалов, полимерных композиционных материалов, клеевых соединений, функциональных материалов и покрытий применительно к деталям авиационных двигателей, агрегатов крыла, элементов, работающих в условиях интенсивного циклического нагружения. Затронуты вопросы автоматизации процессов, применения цифровых технологий радиационного неразрушающего контроля, контроля напряженного состояния, использования математического моделирования.

УДК 620.1

ББК 30.3 + 34.2 + 34.43

ISBN 978-5-905217-22-7

© ФГУП «ВИАМ», 2018

Организационный комитет

Председатель:

А.В. Славин – д.т.н., начальник Испытательного центра ФГУП «ВИАМ»

Заместители председателя:

А.Н. Луценко – к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра ФГУП «ВИАМ».

Члены организационного комитета:

Д.Е. Каблов – к.т.н., заместитель начальника управления ФГУП «ВИАМ»;

Д.Ю. Буколов – начальник управления ФГУП «ВИАМ»;

А.А. Каньгин – начальник управления ФГУП «ВИАМ»;

В.Г. Дворяшин – заместитель начальника управления ФГУП «ВИАМ»;

Д.С. Лаврищев – заместитель начальника отдела ФГУП «ВИАМ»;

Е.В. Николаев – к.т.н., заместитель начальника Испытательного центра ФГУП «ВИАМ»;

А.С. Генералов – к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «ВИАМ»;

А.С. Лаптев – д.т.н., заместитель начальника лаборатории ФГУП «ВИАМ»;

Д.А. Браилко – начальник сектора ФГУП «ВИАМ»;

А.В. Бабин – ведущий инженер ФГУП «ВИАМ»;

Д.С. Трушин – ведущий инженер ФГУП «ВИАМ»;

И.В. Тарасов – ведущий инженер ФГУП «ВИАМ»;

Е.А. Цилин – инженер 2-й категории ФГУП «ВИАМ»;

И.Ю. Ширяева – инженер по маркетингу 1-й категории ФГУП «ВИАМ».

СОДЕРЖАНИЕ

Контроль излома как прием неразрушающего (дострельбового) способа оценки качества гомогенной алюминиевой брони	8
Арцруни А.А.; Зажилов А.А.	
Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток.....	18
Бойчук А.С.; Генералов А.С.; Далин М.А.; Диков И.А.	
Ультразвуковой контроль изделий и конструкций летательных аппаратов (ЛА) из полимерных композиционных материалов (ПКМ)	32
Маслов А.И.; Болотских А.А.; Улесов В.В.; Шалыга С.В.; Бадамшин Г.И.	
Неразрушающий контроль качества упрочнения при электроискровом легировании поверхности титановых деталей, работающих в условиях интенсивного циклического нагружения и фрикционного воздействия.....	49
Гавзе А.Л.	
Сертификация радиографических технических пленок	56
Демидов А.А.; Косарина Е.И.; Михайлова Н.А.; Турбин Е.М.	
Особенности определения пористости в деталях из ПКМ с применением ультразвукового эхо-импульсного метода контроля.....	65
Диков И.А.; Бойчук А.С.; Чертищев В.Ю.; Генералов А.С.	
Дефектность материала основных деталей ГТД и оценка вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле.....	80
Далин М.А.; Ложкова Д.С.; Краснов И.С.	
Тепловой метод и средства контроля текстильных броневых преград в процессе взаимодействия с поражающими элементами.....	90
Козельская С.О.	

Перспективы повышения эффективности контроля динамического нагружения авиационных ГТД при летных испытаниях и эксплуатации..... 106

Коровин Б.Б.; Червонюк В.В.

Применение программных алгоритмов обработки изображений, полученных в ходе контроля изделий из композиционных материалов методом активной термографии 119

Котовщиков И.О.

Применение цифровых технологий рентгеновского неразрушающего контроля в авиационной отрасли. Проблемы, опыт и перспективы 130

Крупнина О.А.; Косарина Е.И.; Михайлова Н.А.; Смирнов А.В.

Обнаружение малоразмерных металлических включений в изделиях из композитных материалов вихретоковым методом..... 144

Кузнецов А.О.

Моделирование процессов преломления и последующего распространения широкополосных импульсов сферически сфокусированных ультразвуковых волн при их падении из жидкости на плоские поверхности твердого тела под различными углами..... 149

Ложкова Д.С.; Далин М.А.

Сопrotивление покрытий образованию трещин 170

Матюнин В.М.; Соловьев М.К.; Агафонов Р.Ю.; Аникин К.А.; Тюлькова А.А.; Марченков АЮ.; Стасенко Н.А.; Абусаиф Нуха

Исследование структуры стеклопластиковых конструкций методом спиральной компьютерной томографии для оценки прочности..... 177

Митряйкин В.И.; Кротова Е.В.

Использование метода вихревых токов для дефектоскопии конструкционных материалов на основе углеродных волокон..... 188

Михеев П.В.; Дидин Г.А.; Шкатов П.Н.

Анализ возможностей ультразвуковой диагностики для контроля качества сварных соединений 195

Мугла Д.Р.; Галиновский А.Л.; Ли Сюеянь

Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов..... 207

Мурашов В.В.; Алексагин В.М.; Мишуров К.С.

Использование ВБР для измерения деформаций анизотропных конструкций из углепластика 226

Анискович В.А.; Будагин О.Н.; Кутюрин Ю.Г.; Муханова Т.А.;
Водопьянов В.А.

Определение толщины серебряного покрытия на оребренных стенках методом рентгенофлуоресцентного анализа 231

Полянский А.М.; Полянский В.М.

Модернизация установки автоматизированного неразрушающего контроля изделий из ПКМ в условиях серийного производства 245

Рыков А.Н.; Корсаков А.Н.

Перспективы развития современных методов неразрушающего контроля и технической диагностики во ФГУП «ВИАМ» 260

Славин А.В.; Косарина Е.И.; Генералов А.С.; Диков И.А.

Использование метода статистического моделирования для оценки выявляемости дефектов при ультразвуковом контроле 288

Андерсон Э.В.; Садкин К.Е.; Сужаева А.С.

Разработка технологии ультразвукового контроля поковок штампованных сложной конфигурации 304

Ташланова О.В.; Зорихина Е.Ю.

Сравнительная оценка работоспособности сопряжений с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования 313

Хопин П.Н.

Неразрушающий контроль акустическими методами многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов мотогондолы авиационного двигателя 329

Чертищев В.Ю.; Бойчук А.С.; Диков И.А.; Генералов А.С.

Разработка методики активного одно-и двухстороннего теплового контроля углепластиковых элементов планера самолета ТВС-2ДТС в условиях производства..... 350

Чулков А.О.; Вавилов В.П.; Серьёзов А.Н.; Брагин А.А.

О необходимости единого подхода к определению механических характеристик материалов изделий, изготовленных по аддитивным технологиям методами индентирования..... 361

Краснов И. О.; Ильинский А.В.; Степанова К.А.; Кашапова И.А.

Физические основы неразрушающих методов контроля и особенности их применения для малогабаритного спутникового приборостроения.....371

Данилин Н.С.; Волков С.А.

Автоматизированный ультразвуковой контроль билетов 378

Казачков И.В.

УДК 623.438.3: 669.715

Контроль излома как прием неразрушающего (дострельбового) способа оценки качества гомогенной алюминиевой брони

Арцруни А.А.¹. к.т.н.; Зажилов А.А.¹

mail@niistali.ru

¹АО «НИИ стали», г. Москва, Россия.

Аннотация:

Алюминиевая броня, в отличие от традиционной стальной брони, обладает характерной особенностью, состоящей в достаточно осязательном следе воздействия средств поражения на поверхности брони при оценке ее противоположных (или противоснарядных) свойств. Указанная особенность является приемлемой при боевой эксплуатации, но, вместе с тем, является достаточно неэстетичной в условиях обычного использования изделия, и может считаться «разрушающим» методом контроля.

Это потребовало разработки и освоения методики применения специальных «карт-свидетелей», используемых для обстрела. Однако, подобная методика является достаточно затратной и, в свою очередь, при развернутом производстве поставила на повестку дня вопрос об освоении выборочного контроля и обращении к анализу структуры металла броневое проката, в частности, к анализу так называемой «шиферности» его излома.

Особенности строения излома как критерия качества алюминиевой брони подробно докладывались на конференции 12-13 февраля 2015 г. в ВИАМ.

Ключевые слова:

противопульная броня, противоснарядная броня, живучесть брони, зоны ГП, шиферность

Используемые обозначения и термины:

ППБ – противопульная броня.

ПСБ – противоснарядная броня.

Живучесть брони – способность противостоять обстрелу без хрупких разрушений с обеспечением кондиционных поражений.

Зоны ГП – зоны Гинье-Престона - когерентно связанные с матрицей трансформации зоны продуктов старения, имеющие, как правило, ряд переходов от сферических зон к упорядоченным зонам, и от зонного старения к фазовому и к коагуляционному старению.

Шиферность – полосчатая характеристика поверхности излома образцов броневое проката, наблюдаемая только на поверхности излома, не нарушающая сплошности проката, отражающаяся на возрастающей хрупкости разрушения при обстреле.

Как известно все промышленно развитые страны мира: США, Англия, Франция и, разумеется, Россия для выпуска боевых машин легкой категории массы (ЛКМ) таких как: машины морского десанта, боевые машины пехоты, боевые машины десанта, боевые разведывательные машины, самоходные артиллерийские установки и др., используют алюминиевую броню, базирующуюся ныне, как правило, на сплавах системы Al-Zn-Mg (до этого применялись сплавы систем Al-Cu, Al-Mg и т.п.).

При единстве системы легирования (Al-Zn-Mg) броневые сплавы названных стран (см. табл. 1) заметно разнятся как по суммарному содержанию Zn и Mg, так и, что особенно важно, по соотношению содержания Zn с содержанием Mg. Так, российские сплавы характерны канодальным соотношением Zn к Mg на уровне 2,1-2,15, а суммарное содержание видоизменяется в зависимости от назначения брони. Для противопульной брони (ППБ) оно составляет 7,91–9,2%, а для противоснарядной (ПСБ) – 6,8–7,9%, при этом в последнем случае

практически исключено содержание Mn (вместо 0,1–0,3% в ППБ 0,05–0,15% в ПСБ) (см. рис. 1а, 1б, 1в).

Таблица 1

Броневые алюминиевые сплавы различных стран

Страна	Марка (обозн.) сплава	Zn	Midi Zn	Mg	Midi Mg	Σ Zn+Mg	Midi Zn+Mg	Zn/Mg	Mn	Midi Mn
США	7039	3,5...5,0	4,25	2,0...3,8	2,9	5,5...8,8	7,15	1,46	0,1...0,7	0,4
Англия	E74S	3,8...4,8	4,3	2,0...3,0	2,5	5,8...7,8	6,8	1,72	0,2...0,4	0,3
Франция	A-Z5-G	4,0...5,0	4,5	1,0...1,4	1,2	5,0...6,4	5,7	3,75	0,05...0,5	0,275
Германия	21/62	5,5...6,5	6,0	1,5...2,0	1,75	7,0...8,5	7,75	3,43	0,1...0,5	0,3
Россия	1901	5,4...6,2	5,8	2,4...3,0	2,7	7,8...9,2	8,5	2,15	0,1...0,3	0,2
Россия	1903	4,7...5,3	5,0	2,1...2,6	2,35	6,8...7,9	7,35	2,13	0,05...0,15	0,45

Как видно по материалам таблицы, практически все зарубежные сплавы лишены четких материаловедческих принципов выбора, и их соотношение Zn к Mg колеблется в большом диапазоне от 1,46 до 3,75, что отражается практически на всей гамме свойств брони, в том числе таких, как свариваемость и коррозионная стойкость.

Основным конструктивным достоинством алюминиевой брони является (в сравнении со стальной) ее многократно (до 9 крат) большая жесткость на изгиб при том же уровне броневых свойств, позволяющая полностью отказаться от каркаса потенциального изделия. Еще одним признаком алюминиевой брони для наземной техники, в данном случае отличающим ее от авиационной брони, является ее свариваемость и, разумеется, коррозионная стойкость (см. рис. 1б).

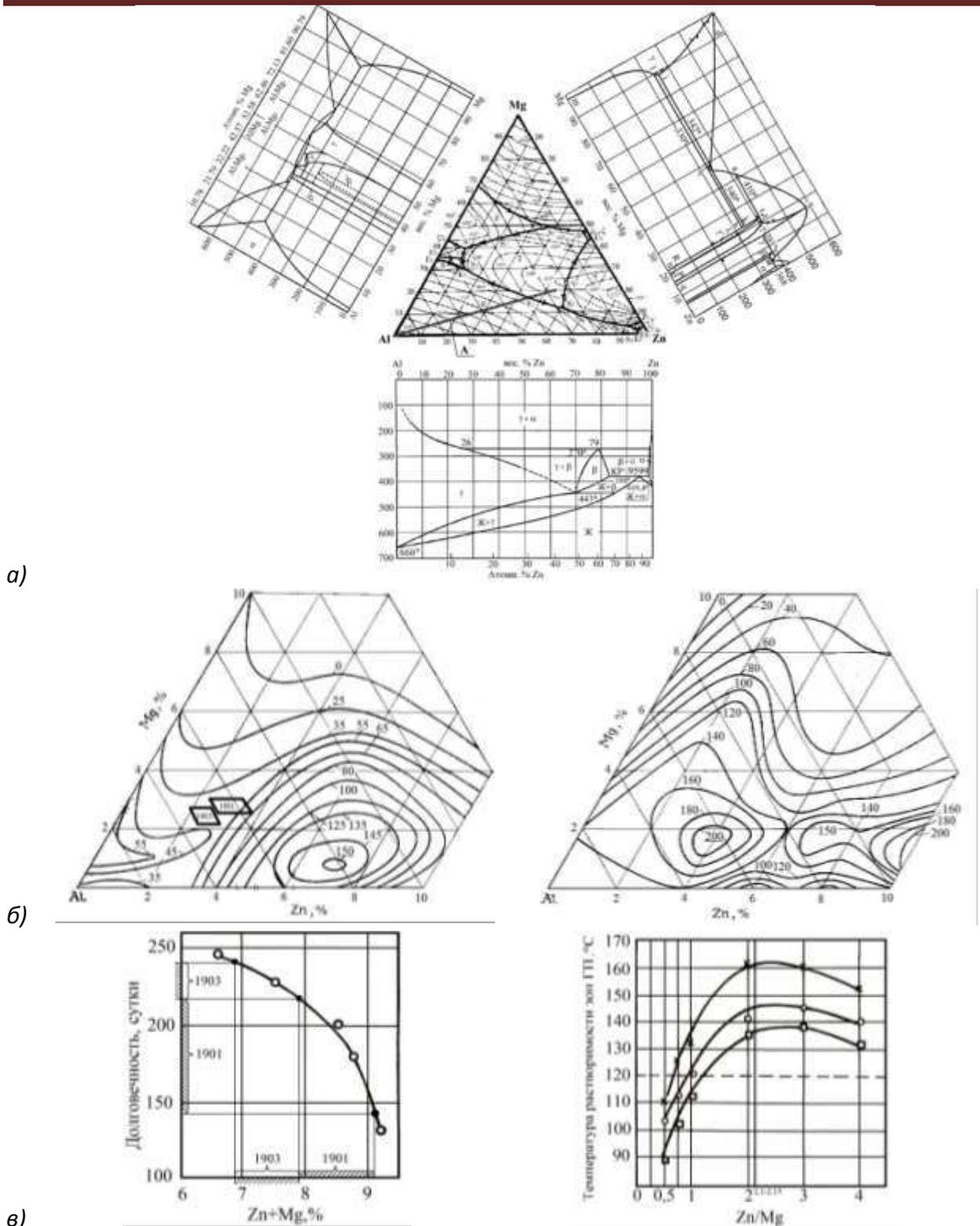


Рисунок 1 – а) Тройная диаграмма Al-Zn-Mg с развертками двойных диаграмм. Линия А представляет псевдобинарный разрез; б) Местоположение сплавов 1901 и 1903 на фоне данных по горячеломкости при сварке сплавов системы Al-Zn-Mg по длине трещин при затрудненной кристаллизации (левый рисунок) в сопоставлении с аналогичными данными Al-Zn-Mg сплава с добавкой Cu (правый рисунок) (по Мондольфо [4]); в) Сопоставление данных по коррозионной стойкости сплавов 1901 и 1903 в наглядной зависимости от суммы Zn+Mg (левый рисунок). Изменение критической температуры растворимости зон ГП в зависимости от соотношения Zn и Mg для сплавов 1901 и 1903. Показано критическое значение соотношения 2,1-2,15 (правый рисунок) (по Валькову [5])

При этом, как следует из данных, представленных на рис. 1в, зоной кардинальной перестройки характера растворимости фазы-упрочнителя является (для суммы 7–9%) соотношение, характерное для наших сплавов Zn/Mg – 2,1-2,15, при температуре нагрева выше 160°C (технологически принято 170°C).

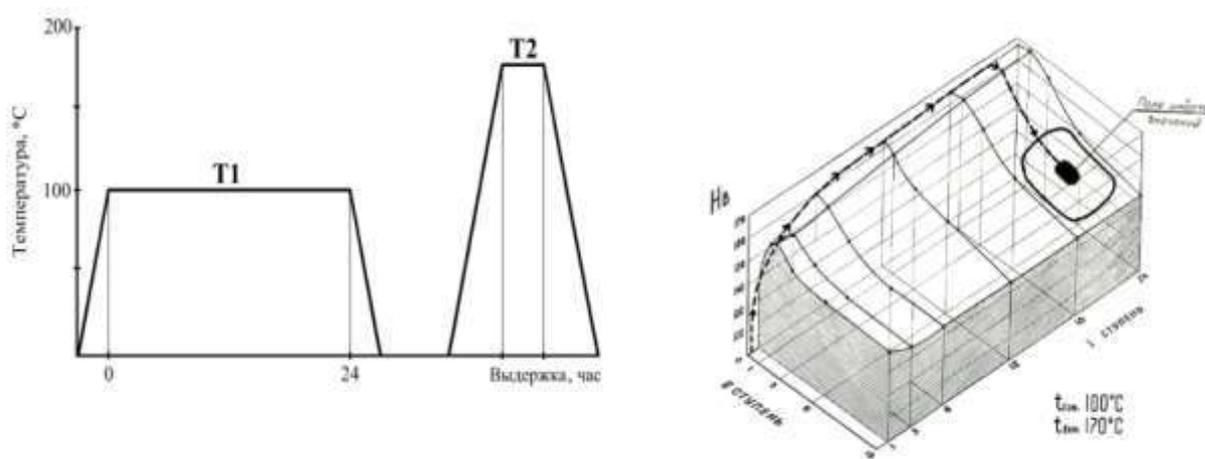


Рисунок 2 – Температурно-временные характеристики (диаграммы) (левый рисунок), и объемная демонстрация значений твердости сплавов 1901 и 1903 (правый рисунок)

Кроме того, достаточно удачным решением является совмещение в операции T2 как трансформации форм выделения фазы-упрочнителя, так и снятие довольно значительных сварочных напряжений. Вид температурно-временных характеристик термообработки в сочетании с пространственной, объемной демонстрацией изменений значений твердости представлен на рис. 2. При этом имеет место кардинальное изменение характеристик механических свойств, состоящее в двух основных проявлениях (см. рис. 3):

- а) снижение прочности-твердости на 10%;
- б) повышение ударной вязкости на 30%.

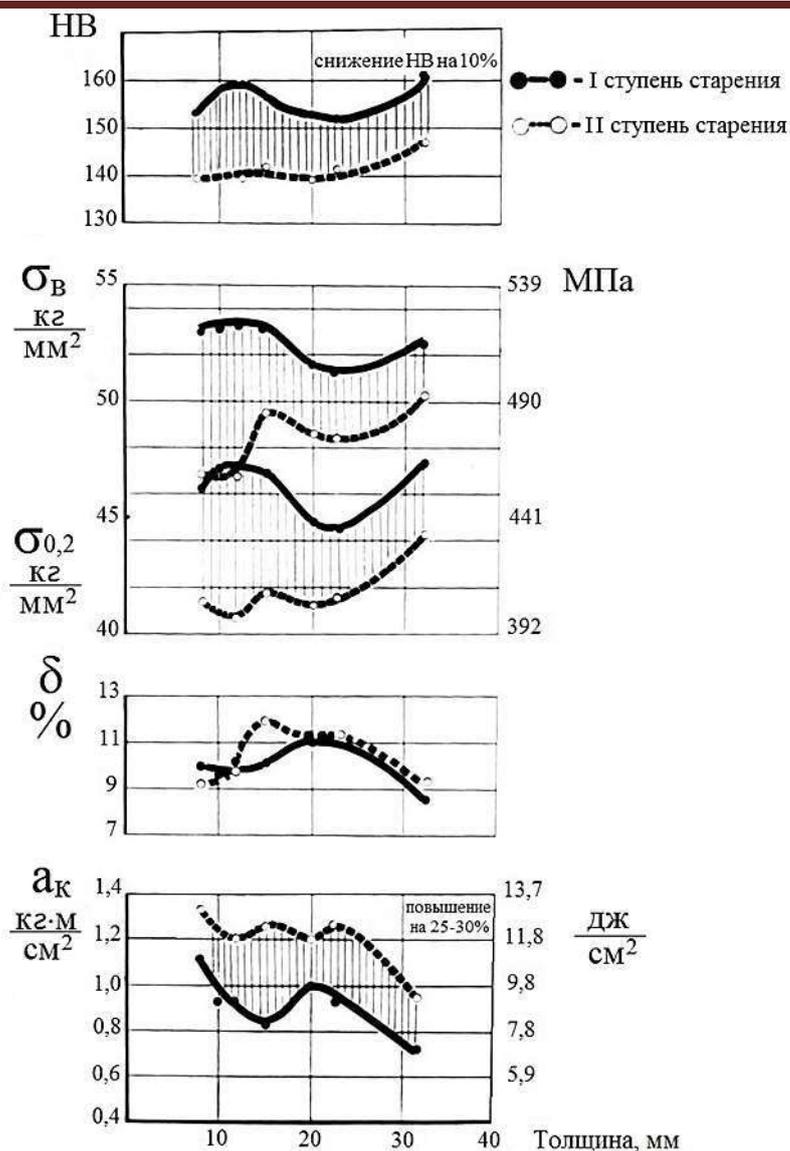


Рисунок 3 – Характеристика механических свойств проката сплава 1901 при операции T2

Режим термообработки сплавов 1901 и 1903 представлен следующим комплексом режимов:

1. Закалка;
2. Упрочняющее старение (обозначаемое совместно с п.1 как T1);
3. Облагораживающее высокотемпературное перестаривание, получившее обозначение – T2, переводящее состояние от «фазового старения» в «коагуляционное старение» и резко видоизменяющее характер выделения фазы-упрочнителя от линейно-плоскостных форм выделения на коагуляционные формы выделения и, тем самым, кардинальным образом

изменяющее как строение излома, так и, соответственно, вид разрушения алюминиевой брони, и этим обеспечивающее ее живучесть (см. рис. 4). Режим операции T2 задается значением температуры растворимости так называемых зон Гинье-Престона (зон ГП), находящейся в зависимости от отношения Zn к Mg и от их суммарного содержания и принятой для вышеуказанных российских сплавов на уровне 170°C.



Рисунок 4 – Изменение характеристик сплавов 1901 и 1903 при переходе от «зонного» к «фазовому» и «коагуляционному» старению

Отдельного внимания заслуживает методика применения так называемых контрольных «карт-свидетелей», используемых для контрольного обстрела изделий. Карты изготавливаются в строгом соответствии с использованным в конструкции металлом (толщина, номер плавки, партии и т. д.) с размещением их затем перед термообработкой как внутри, так и снаружи корпуса, и используются для оценки броневых свойств (см. рис. 5). По мере расширения объемов производства возможен переход на выборочный контроль карт при усилении контроля излома брони.

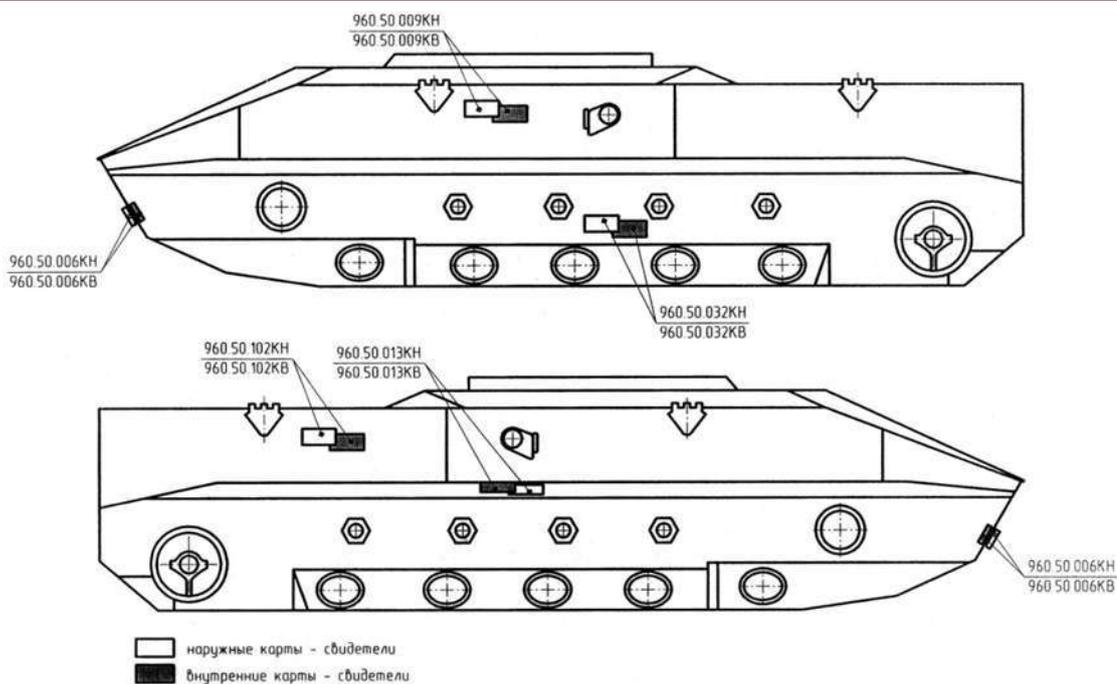


Рисунок 5 – Размещение парных контрольных карт на условном бронекорпусе

Самым наглядным проявлением эффекта старения – операции Т2 – является кардинальная перестройка картины состояния излома и его переход от «шиферного» вида до практически абсолютно нешиферного и, соответственно, перевод балльности строения излома от 5 балла – балла сплошной шиферности – до 1–2 баллов «чистого излома» и излома со «следами шиферности» в соответствии с разработанной нами шкалой (см. рис. 6), что самым прямым образом влияет на вид разрушения брони при ее обстреле.

При оценке авторов А.М. Дрица и В.В. Овчинникова (см.[6]) сплавы 1901, 1903 отнесены к лучшим современным броневым свариваемым алюминиевым сплавам.

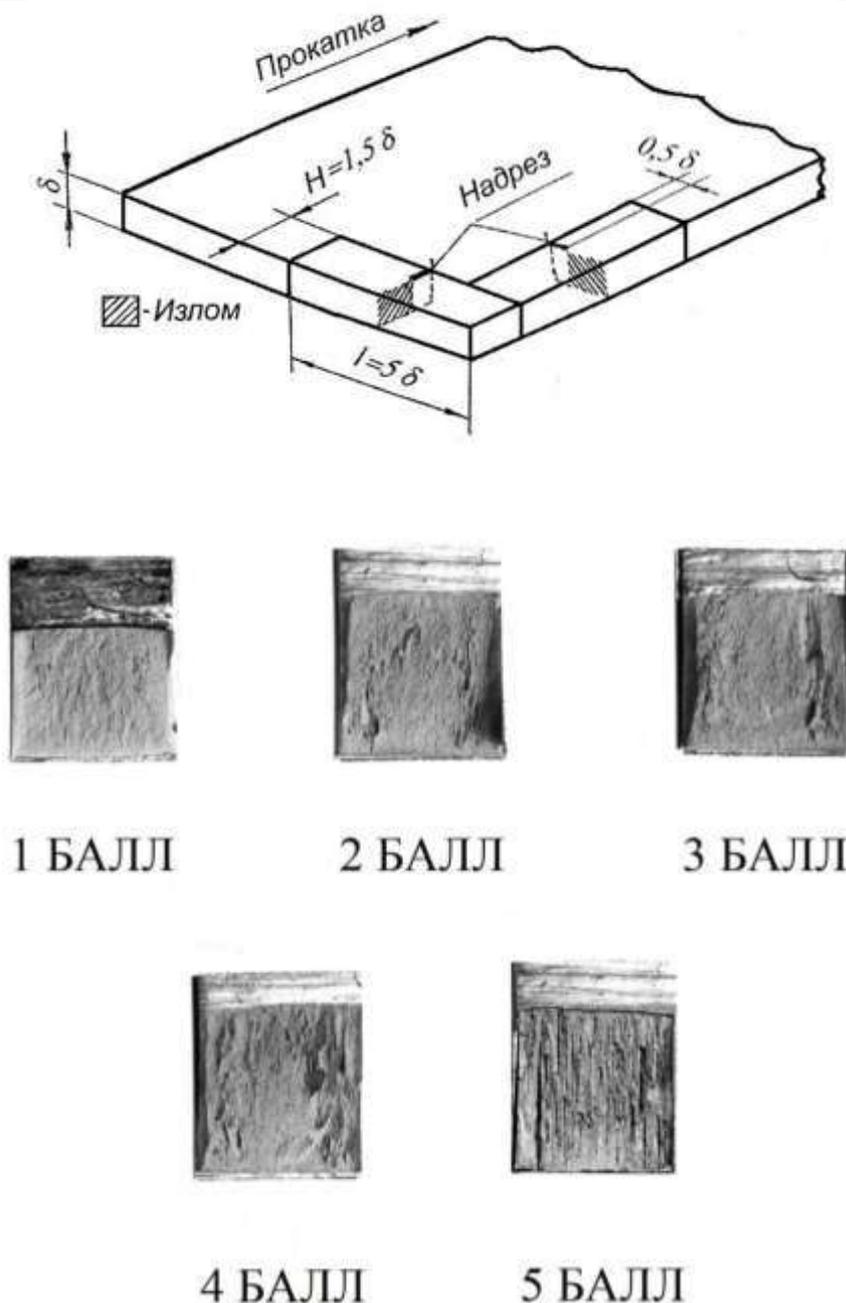


Рисунок 6 – Схема получения образцов на излом и пятибалльная шкала шерфности

Таким образом, контроль излома является действенным механизмом контроля качества алюминиевой брони, механизмом исключения возможности получения некондиционных видов ее поражения в виде «отколов» и «расколов».

Литература

1. Арцруни А.А., Купрюнин Д.Г. Алюминиевая броня для военной техники. Теория, технология, практика. М.: РадиоСофт, 2017.
2. Арцруни А.А., Зажилов А.А., Угринов А.А. Стрoение излома как критерий качества алюминиевой брони // VI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». М., 12-13 февраля 2015 г.
3. Арцруни А.А., Купрюнин Д.Г., Зажилов А.А. Высокотемпературная вторая степень старения - как определяющий фактор в борьбе с коррозией под напряжением алюминиевой танковой брони // Конференция «Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем». Геленджик, 3-4 августа 2017 г.
4. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов (перевод с англ. под ред. Ф.И. Квасова и др.). М.: Металлургия, 1979.
5. Вальков В.Д. Структура, механические и коррозионные свойства сплавов системы Al-Zn-Mg. М.: ВИЛС, 1971.
6. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2017.

УДК 620.179.16

Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток

Бойчук А.С.¹, к.т.н.; Генералов А.С.¹, к.т.н.; Далин М.А.¹; Диков И.А.¹

bas140185@rambler.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В ультразвуковой дефектоскопии в последнее время для повышения производительности и достоверности результатов контроля широко используются ручные дефектоскопы с преобразователями на фазированной решетке. Применение данных приборов в России затруднено из-за отсутствия нормативно-технической базы и опыта работы с данным типом оборудования и специальным программным обеспечением. Целью данной работы было проведение специальных исследований с применением нестандартных подходов к ним и разработка ряда нормативных документов, регламентирующих процедуру проведения ультразвукового контроля монолитных деталей и конструкций из ПКМ с использованием фазированных решеток.

Ключевые слова:

полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, ультразвуковой, фазированная решетка

Введение

В настоящее время в деталях и конструкциях авиационной техники широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ). Доля ПКМ в конструкциях некоторых зарубежных планеров составляет более 50%. В отечественном самолётостроении ПКМ широко используются в конструкциях самолетов «Сухой Суперджет», МС-21, ПАК ФА и др. [1, 2]. Так, в соответствии с имеющимся зарубежным опытом и отечественными разработками применения ПКМ целесообразно при создании средненагруженных конструкций планеров: элеронов и закрылков, предкрылков, воздушных тормозов. Наиболее эффективно используют ПКМ в конструкциях высоконагруженных агрегатов – кессонах киля, стабилизатора и крыла, а также в силовых отсеках фюзеляжа. Ниже на Рисунке 1 показано использование ПКМ в конструкциях новейшего российского самолета МС-21.



Рисунок 1 – Применение ПКМ в конструкциях самолета МС-21

В процессе изготовления и эксплуатации деталей и конструкций из ПКМ имеет место большое число факторов, при которых в материале возникают дефекты. Характерными производственными дефектами ПКМ [3,

4] являются пористость, расслоения, участки неполного отверждения, посторонние включения. Помимо производственных дефектов в процессе эксплуатации готовых изделий могут образоваться эксплуатационные дефекты. Наиболее опасным эксплуатационным дефектом ПКМ является ударное повреждение. Дефект данного типа может возникать в частности из-за попадания посторонних тяжелых предметов (камней, града и т.п.), а также при ударе молнии в воздушное судно при его взлете, во время полета и посадке. Такие дефекты могут быть трудно обнаруживаемы при визуальном осмотре, при этом они существенно снижают способность конструкции сопротивляться сжимающим нагрузкам, и склонны к росту в процессе эксплуатации. Другим типичным эксплуатационным дефектом ПКМ, с которым в настоящее время столкнулись ведущие зарубежные авиастроительные компании, являются отслоения приформованных элементов жесткости к обшивкам и трещины.

Для контроля качества монолитных изделий из ПКМ в России и во всем мире в настоящее время широко используется ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля (НК), основанный на излучении и приеме ультразвуковых импульсов [5]. В России на предприятиях, где проводится производственный контроль, для реализации данного метода контроля ПКМ в основном используются обычные ручные дефектоскопы с одноэлементными пьезоэлектрическими преобразователями. Общий недостаток этих приборов заключается в сравнительно низкой производительности и невысокой достоверности результатов контроля. Сюда также можно отнести сложную интерпретацию результатов контроля.

В ультразвуковой дефектоскопии в последнее время для повышения производительности контроля ПКМ, а также для повышения достоверности результатов контроля стали широко использоваться ручные дефектоскопы с преобразователями на фазированной решетке. Использование ультразвуковых дефектоскопов с фазированными решетками для НК

призвано удовлетворить следующим общим и частным требованиям к неразрушающему контролю качества материалов [6]:

- уменьшение времени настройки и проведения контроля (увеличение производительности);
- увеличение надежности;
- обеспечение доступа в труднодоступные места;
- облегчение интерпретации результатов контроля;
- обнаружение разно-ориентированных дефектов, расположенных на различных глубинах, с использованием только одного преобразователя;
- улучшение энергетических характеристик (отношение «сигнал-шум») и способность калибровки по нестандартным образцам;
- обнаружение мелких дефектов (увеличение чувствительности) и коррозии;
- увеличение точности обнаружения и измерения координат и ориентации дефектов;
- мобильность применяемого оборудования.

Данное оборудование является очень мощным исследовательским инструментом, в какой-то степени некой альтернативой автоматизированному контролю. Его легко применить как в условиях производства деталей и агрегатов из ПКМ, так и в эксплуатации готового изделия.

Технологии контроля ПКМ с применением фазированных решеток широко используются за рубежом. В России применение данных приборов затруднено из-за отсутствия нормативно-технической базы и опыта работы с данным типом оборудования и специального программного обеспечения. Если вторая проблема довольно легко решается путем практических занятий, то отсутствие нормативной документации требует проведения специальных исследований и применения нестандартных подходов к ним.

В ВИАМ с 2010 года проводятся исследования и разработка методик ультразвукового неразрушающего контроля ПКМ с использованием

фазированных решеток [7–9]. Решен ряд задач по увеличению производительности, чувствительности и достоверности контроля монолитных деталей и конструкций, изготавливаемых из углепластика. Все работы выполнены в рамках реализации комплексного научного направления 2.3 «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

Материалы и методы

Для проведения исследований по разработке нормативных документов для контроля деталей и конструкций из ПКМ с использованием фазированных решеток были изготовлены специальные конструктивно-подобные образцы из ПКМ с искусственными дефектами (Рисунок 2). Толщины исследуемых образцов составляли от 2 до 24 мм.



Рисунок 2 – Конструктивно-подобные образцы из ПКМ

Искусственные дефекты, имитирующие типичные производственные и эксплуатационные дефекты изделий из ПКМ, были получены в образцах различными способами (Рисунок 3): а) расслоения, получаемые закладкой металлических клиньев с последующим их удалением; б) полости в зоне жгута, получаемые закладкой вкладки из RTV-силикона, с последующим ее удалением; в) посторонние включения, получаемые путем закладки фрагментов из технологических пленок (фторопластовых, полиимидных, полиэтиленовых); г) круглые плоскодонные отражатели, имитирующие расслоение, а также используемые при настройке оборудования; д) ударные повреждения, получаемые ударом копра; е) отслоения приформованных элементов жесткости.

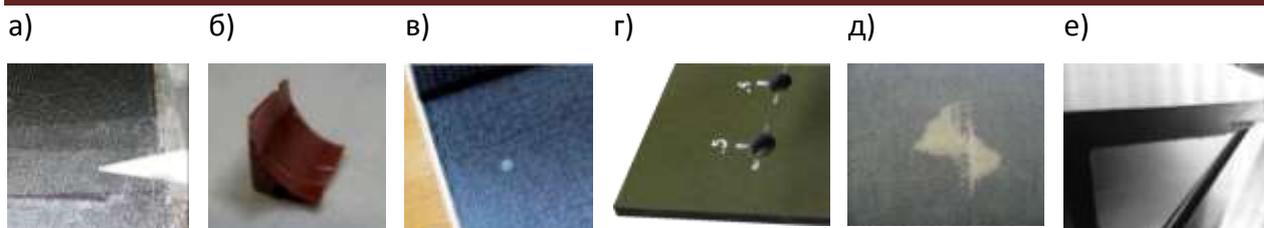


Рисунок 3 – Искусственные дефекты, имитирующие типичные производственные и эксплуатационные дефекты монолитных деталей и конструкций из ПКМ

Исследования проводились с использованием дефектоскопа OmniScan МХ, линейных фазированных решеток с рабочими частотами 3,5 МГц и 5 МГц, секторной фазированной решеткой с частотой 5 МГц, а также специальных кодировщиков и компьютерного программного обеспечения. Для уменьшения неконтролируемых приповерхностных мертвых зон при контроле использовалась специальная линия задержки (призма) из полистирола.

Результаты исследований

Исследование плоских монолитных образцов и образцов с большим радиусом кривизны.

При проведении исследований плоских монолитных образцов из углепластика с целью повышения чувствительности контроля настройка дефектоскопа осуществлялась по плоскодонному отражателю диаметром 5 мм (по методикам контроля с использованием одноэлементных преобразователей чувствительность в настоящее время настраивается на контрольном отражателе диаметром 8–10 мм). С использованием временной регулировки чувствительности проведено выравнивание чувствительности контроля по глубине по трем плоскодонным отражателям, расположенным на разных глубинах («ближний», «средний» и «дальний»), выполненных с донной поверхности на настроечном образце (НО). «Ближний» отражатель располагался на глубине $(0,5 \pm 0,1)$ мм от поверхности ввода НО, «средний» – на глубине $(H/2 \pm 0,2)$ мм (H – толщина НО), «дальний» – на глубине $(0,5 \pm 0,1)$ мм от донной поверхности. Как известно в дефектоскопах с фазированными решетками реализовано электронное сканирование вдоль

линии расположения пьезоэлектрических элементов. Это в свою очередь эквивалентно перемещению одноэлементного преобразователя вдоль одной линии на расстояние, равное ширине фазированной решетки. Электронное сканирование осуществлялось группой из 8 элементов 64-х элементной фазированной решетки с частотой 5 МГц. Фокус ультразвукового пучка устанавливался на приповерхностную зону контролируемых образцов. Для получения результатов контроля в виде С-скана использовались специальные кодировщики положения преобразователя. Наиболее простым и мобильным является однокоординатный кодировщик. Он очень легко подкрепляется к призме с фазированной решеткой и имеет малые габариты. За счет вращения колеса по объекту контроля (ОК) датчиком координат происходит запоминание результатов контроля в виде С-скана в реальном масштабе времени. Двухкоординатный кодировщик позволяет получить то же самое, что и однокоординатный кодировщик, но охватывает большую область контролируемой поверхности за счет кодирования результатов контроля при перемещении фазированной решетки по ОК в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Еще одним преимуществом является то, что кодирование координат в охватываемой кодировщиком зоне контроля и сохранение данных в виде целостного С-скана происходит за один процесс сканирования. В то время как при использовании однокоординатного кодировщика для контроля той же зоны, необходимо ее размечать на поверхности материала и сканировать точно по разметке с последующим сшиванием полученных С-сканов.

Результаты сканирования образцов толщиной 8 мм и 9,5 мм с использованием двухкоординатного и однокоординатного кодировщиков приведены на Рисунке 4.

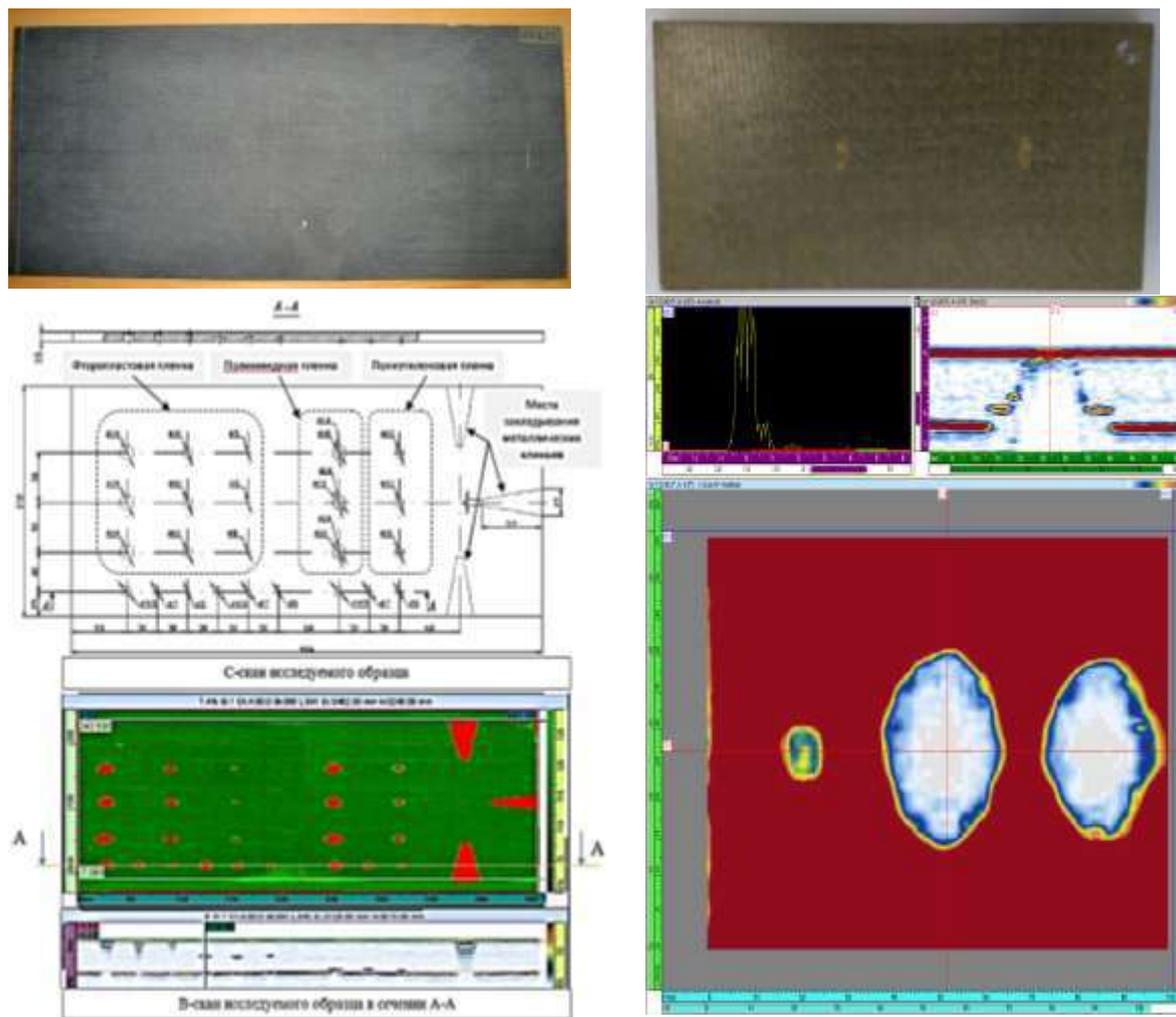


Рисунок 4 – Результаты исследований плоских образцов с искусственными дефектами

В результате исследований плоских образцов с использованием дефектоскопа с линейной фазированной решеткой все полученные в образцах искусственные дефекты были обнаружены с чувствительностью контроля, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм. Размеры и глубины залегания дефектов определены по В- и С-сканам с высокой точностью.

Скорость сканирования при проведении исследований выбиралась такой, чтобы при перемещении фазированной решетки на С-Скане не наблюдалось черных полос, говорящих о том, что прибор при данной скорости сканировании не успевает обрабатывать данные. В конечном итоге удалось добиться такой скорости сканирования, при которой

производительность контроля составила $20 \text{ м}^2/\text{час}$, что в 10 раз выше чем при контроле с использованием одноэлементных преобразователей.

При проведении исследований конструктивно-подобного образца с большим радиусом кривизны монолитной части, имитирующего створку капота мотогондолы двигателя, были отработаны приемы интерпретации результатов контроля, когда конструкция состоит не только из монолитной части одной толщины, но и с переходами толщин и с приформованными элементами жесткости. Настройка дефектоскопа осуществлялась так же, как и при проведении исследований плоских образцов одной толщины. Результаты исследований представлены на Рисунке 5.

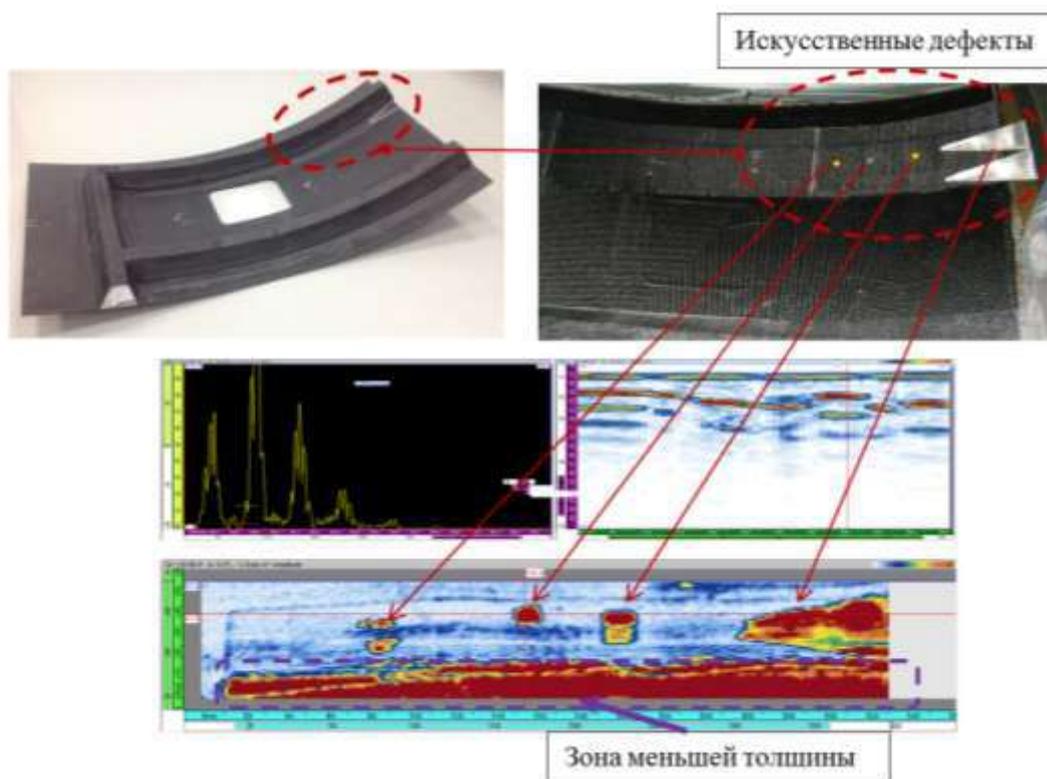


Рисунок 5 – Результаты исследования конструктивно-подобного образца, имитирующего створку капота мотогондолы двигателя

Из Рисунка 5 видно, что благодаря информации о результатах контроля, полученной в виде двухмерных цветных изображений внутренней структуры материала объекта контроля (В- и С-сканов), дефекты в зонах разной толщины легко определяются на фоне образов, полученных от донных поверхностей из-за разности толщин.

Исследование радиусных зон Т-образного соединения стрингера с верхней панелью.

Как известно, для восприятия осевых усилий растяжения и сжатия в конструкциях современных самолетов устанавливаются специальные продольные элементы силового набора (стрингеры), связанные с обшивкой и нервюрами крыла. При изготовлении панелей из ПКМ стрингера как правила формируются вместе с обшивкой. Типовые дефекты, возникающие в зоне приформовки стрингера к обшивке и не выявляющиеся со стороны обшивки традиционными способами, показаны на Рисунке 6.

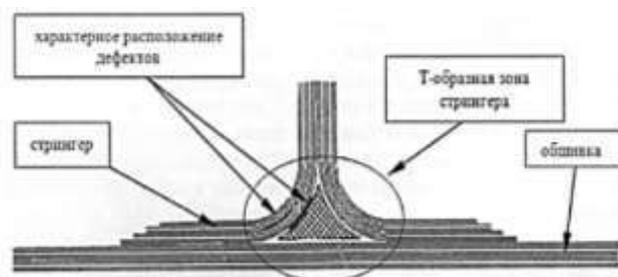


Рисунок 6 – Сложновывявляемые дефектов в Т-образной зоне приформованного стрингера к обшивке

При исследовании радиусной зоны Т-образного соединения стрингера с обшивкой была использована секторная фазированная решетка, а для создания акустического контакта была создана специальная оправка из оргстекла и аквалена, что позволяет контролировать такие зоны без создания локальной иммерсионной ванны или вообще без погружения детали в иммерсионную ванну. Настройка при контроле радиусных зон, как и при контроле плоских панелей, осуществлялась по плоскодонным отражателям $\varnothing 5$ мм в плоском образце. На Рисунке 7 представлены результаты контроля радиусных зон с заложенными в них искусственными дефектами.

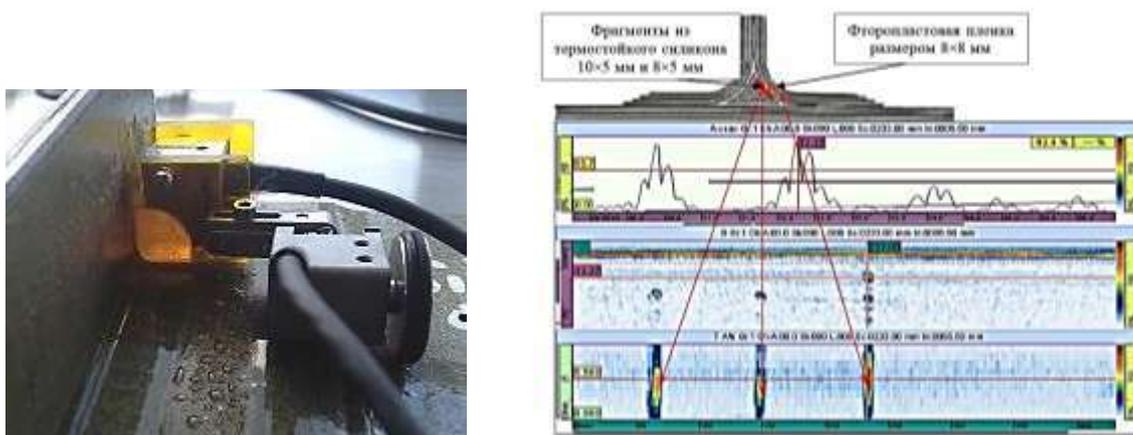


Рисунок 7 – Результаты исследования радиусных зон с заложенными в них искусственными дефектами

По результатам исследования и анализа данных в специальном программном обеспечении было установлено, что все искусственные дефекты, заложенные в радиусные зоны, были выявлены, а размеры и глубина залегания определены с высокой точностью.

На основе проведенных исследований конструктивно-подобных образцов был разработан ряд нормативно-технических документов, регламентирующих процедуру проведения ультразвукового контроля монолитных деталей и конструкций из ПКМ с использованием фазированных решеток.

На завершающем этапе разработки нормативно-технической документации была проведена оценка достоверности результатов неразрушающих исследований монолитных деталей и конструкций из углепластика по разработанным технологиям контроля с использованием фазированных решеток [11]. Экспериментально было показано, что контроль по разработанным технологиям увеличивает вероятность обнаружения более мелких дефектов в 3..5 раз по сравнению с контролем по существующей технологии контроля с применением одноэлементных преобразователей.

Выводы

Проведен ряд исследований конструктивно-подобных образцов из ПКМ, имитирующих типичных детали и конструкции из ПКМ, применяемые

в авиационной технике. Показано, что использование техники фазированных решеток позволяет решить ряд задач, которые в настоящее время ставятся перед неразрушающим контролем монолитных ПКМ, а именно: выявление всех основных производственных и эксплуатационных дефектов с повышенной в 1,5–2 раза чувствительностью (эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм) относительно существующих технологий контроля с применением одноэлементных преобразователей; улучшение интерпретации результатов контроля за счет использования В- и С-сканов в реальном масштабе времени; повышение производительности контроля до 10 раз за счет использования широкозахватных преобразователей; увеличение выявляемости более мелких дефектов в 3..5 раз по сравнению с контролем по существующей технологии контроля с применением одноэлементных преобразователей.

По результатам проведенных исследований был разработан ряд нормативно-технических документов, регламентирующих процедуру проведения ультразвукового контроля монолитных деталей и конструкций из ПКМ с использованием фазированных решеток, в частности контроля деталей и конструкций из ПКМ, применяемым в самолете МС-21.

Литература

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI век. Перспективы и задачи. // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002: юбил. науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
3. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Виды производственных и эксплуатационных дефектов конструкций из полимерных композиционных

материалов // VI научная конференция по гидроавиации «Гидраавиасалон-2006»: Сборник докладов. Москва. 2006. С.147-153.

4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т./ Под общей редакцией В.В. Ключева. Т. 3. И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.: ил.

5. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. «Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля». // Журнал «Авиационные материалы и технологии». ВИАМ. Москва 2013, №1. С. 64–69.

6. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline // - Quebec: R/D Tech inc., 2004. – 368 p.

7. Бойчук А.С., Степанов А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 41–46.

8. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Журнал «Все материалы. Энциклопедический справочник. Москва 2012, № 10. С. 38–44

9. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Создание акустического контакта между фазированной решеткой и выпуклой поверхностью объекта контроля при ультразвуковом контроле ПКМ // Журнал «Авиационные материалы и технологии». 2016. №4. С. 68–73

10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.

11. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика при использовании фазированных решеток // Журнал «Труды ВИАМ» 2016. № 11. С. 86–94.

УДК 620.179.16

Ультразвуковой контроль изделий и конструкций летательных аппаратов (ЛА) из полимерных композиционных материалов (ПКМ)

Маслов А.И.¹; Болотских А.А.²;

Улесов В.В.¹; Шалыга С.В.¹; Бадамшин Г.И.¹

s.v.shalyga@vpk.npomash.ru

¹АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов

²Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация:

Описаны особенности ультразвукового контроля деталей из МСП-К - многослойного клеевого полимерного композиционного (ортотропного) материала.

Ключевые слова:

полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль

Введение

Характерные разрушения изотропных твердых тел были описаны в работах [4, 5, 6]. Многократные теоретические уточнения и экспериментальные подтверждения привели к общепринятому использованию вязкости разрушения в качестве важнейшей константы технических материалов.

Полное описание разрушения анизотропных композитов, в отличие от изотропного случая, не может быть сведено к одномерной задаче. Необходимо установление функциональных зависимостей между

ориентацией трещины (расслоения, непроклея и др. дефектов), направлением материала и векторов нагрузки, не говоря уже об определении когезионной, адгезионной и механической диссипаций. Следовательно, обзор и классификация определенных теоретических решений и детализации методов контроля могут затруднить, а не выявить соответствующие перспективы разрушения и контроля композитов [7].

1. Ультразвуковой метод контроля (УЗК)

Для большинства случаев неразрушающего контроля используются методы, описанные в [2].

Неметаллические материалы обладают более сильной зависимостью затухания ультразвука от частоты, чем металлы. Особенно быстро затухание растет с частотой в крупноструктурных неметаллах. Поэтому для неразрушающего контроля таких материалов приходится использовать снижение частоты УЗ диапазона. Например, УЗ контроль ПКМ возможен на частотах не выше 150...200 кГц.

ПКМ – один из наиболее распространенных конструкционных неметаллов. Для дефектоскопии и оценки прочности конструкций из ПКМ чаще других применяют методы прохождения (теневые) при сквозном или поверхностном прозвучивании конструкций. Основным измеряемым параметром является время распространения ультразвука на некоторой базе прозвучивания. Поэтому базу необходимо знать с возможно большей точностью, особенно при поверхностном прозвучивании. Размеры рабочих поверхностей УЗ преобразователей для этого должны быть как можно меньше.

При контроле ПКМ эхо-методом нужна пространственная селекция отражателей, которую можно обеспечить либо с помощью преобразователя больших волновых размеров, либо с помощью метода синтезированной апертуры, фокусируемой в произвольную точку полупространства (САФТ). Метод САФТ предполагает использование УЗ преобразователей малых волновых размеров, с помощью которых синтезируется апертура.

Для ряда задач, решаемых как методами прохождения, так и эхо-методом, необходимы преобразователи с малой длительностью преобразуемых импульсов и низким уровнем собственного реверберационного шума.

Все эти противоречивые требования были удовлетворены в предложенной конструкции пьезопреобразователя с СТК и малой длительностью импульсной характеристики [3].

Устройство преобразователей показано на (Рис. 1), а на (Рис. 2 а,б) приведены экспериментально снятые диаграммы направленности преобразователей с СТК. Из диаграмм видно, что преобразователь с продольными колебаниями протектора (Рис. 2 а) обеспечивает излучение и прием продольных УЗ волн по нормам к поверхности полупространства. Преобразователь с поперечными колебаниями протектора (Рис. 2 б,в) позволяют излучать и принимать поперечные УЗ волны по нормам к поверхности.

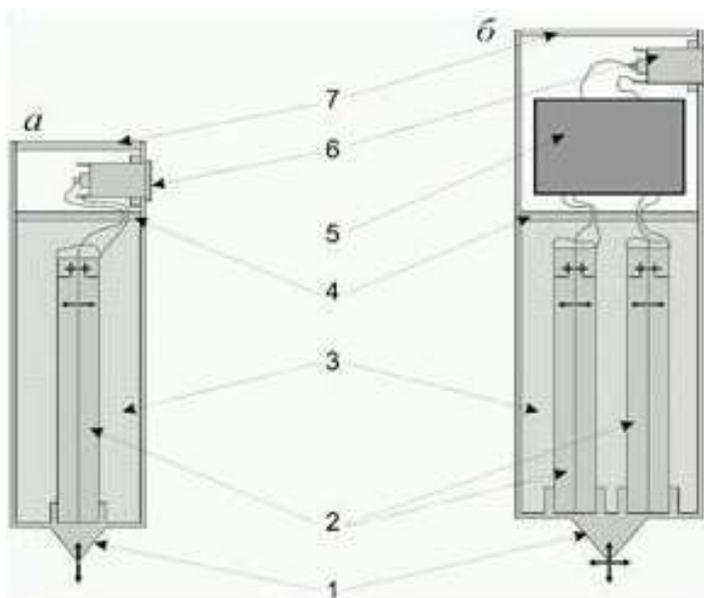


Рисунок 1 – Устройство ультразвуковых преобразователей

Вследствие точечного акустического контакта, кроме основного типа волн, каждый из преобразователей неизбежно излучает и способен

принимать, под некоторыми углами к поверхности полупространства, другой тип объемных волн (Рис. 2).

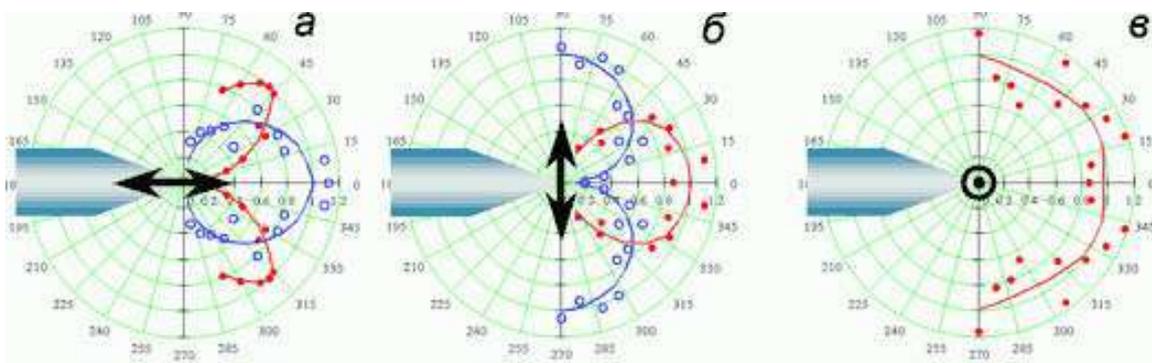


Рисунок 2 – Диаграммы направленности преобразователей с сухим точечным контактом продольных (а) и поперечных (б, в) колебаний протектора

Кроме того, вдоль поверхности полупространства от этих преобразователей в разные стороны от точки контакта распространяются различные поверхностные волны. Преобразователь с продольными колебаниями протектора является ненаправленным излучателем волн Релея. Преобразователь с поперечными колебаниями протектора в направлении вектора смещений излучает продольные подповерхностные (головные) волны и волны Релея. Он же излучает поперечные с горизонтальной поляризацией (SH - волны).

На (Рис. 3) показан типичный вид сигналов и спектров преобразователей, а на (Рис. 4) – внешний вид. Преобразователи можно применять как для ручного контроля, так и в качестве элементов антенных решеток. Благодаря малой длительности сигналов и сухому акустическому контакту их можно применять для решения самых разных задач низкочастотного контроля.

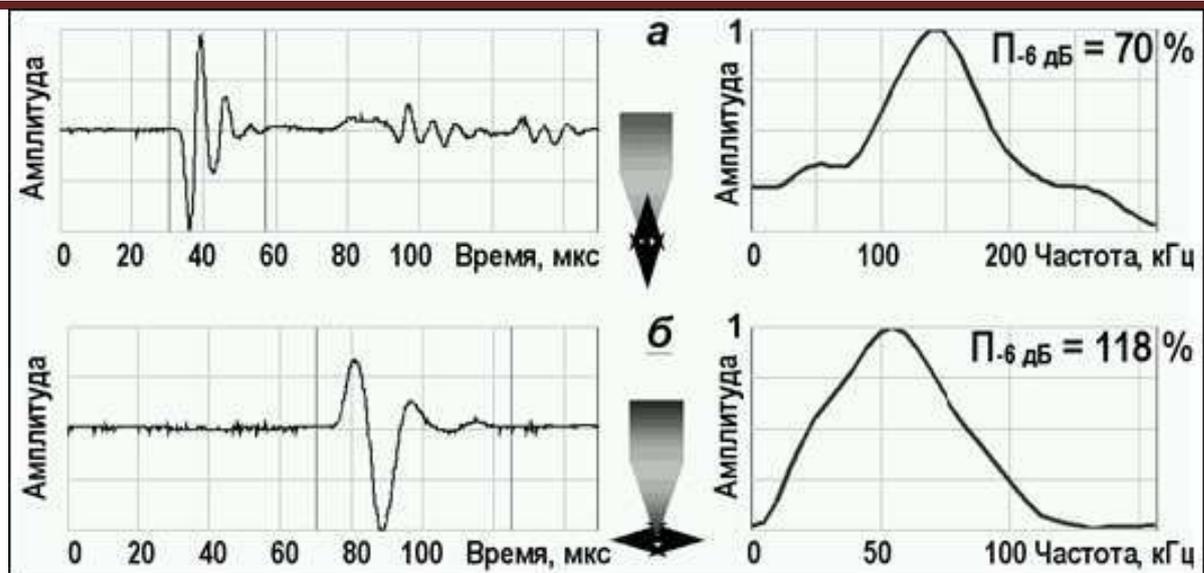


Рисунок 3 – Сигналы (слева) и спектры (справа) УЗ преобразователей с СТК продольных (а) и поперечных (б) колебаний протектора. Двухнаправленные стрелки символизируют ориентацию вектора колебательных смещений протекторов преобразователей



Рисунок 4 – Внешний вид УЗ преобразователей с СТК

1 – преобразователи для ручного контроля; 2 – элементы антенных решеток; 3 – преобразователь прибора УК1401

Для отработки методов контроля из гидроскопического МСП-К были выбраны преобразователи S1803-100 кГц (продольная волна) и S1808-300 кГц (продольная и поперечная волна) и низкочастотный ультразвуковой дефектоскоп А1220 «МОНОЛИТ» производства ООО «Акустические Контрольные системы».

2. Характерные дефекты деталей из МСП-К

Детали из МСП-К являются многослойным клеевым полимерным композиционным (ортотропным) материалом.

Характерными дефектами из них являются:

- зоны отсутствия сцепления между соединенными элементами (непроклей), имеющий нулевую прочность. Обычно эти дефекты имеют заполненный газом зазор. Непроклеи – наиболее часто встречающиеся и самые опасные дефекты клеевых соединений;
- плохая адгезия, то есть слабое сцепление клея с материалом соединяемого элемента. Это снижает прочность клеевого шва;
- неполная полимеризация клея, обусловленная недостаточной температурой и/или укороченной выдержкой при отверждении клея;
- недоброкачественный клей;
- пористость, ослабляющая прочность соединения. Причины пористости – неполное удаление из клея растворителя, недостаточное давление при запрессовке, применение некачественных компонентов.

3. Исследование возможности ультразвукового контроля велосиметрическим методом

Этот метод применяют для многослойных композиционных материалов конструкций. Контроль проводят по сухим поверхностям без применения контактных смазок или погружения объекта контроля (ОК) в ванну с жидкостью. Метод использует влияние дефектов на скорость распространения упругих волн и длину их пути между излучающим и приемным преобразователем дефектоскопа. В ОК возбуждаются ультразвуковые колебания, распространяющиеся в виде ассиметричных волн нулевого порядка (мода d_0) и продольных волн. Дефекты регистрируют по изменению сдвига фазы принятого сигнала или времени распространения импульса на участке между излучателем и приемником.

Исследовался способ с односторонним доступом к изделию. Результаты экспериментов (выборочные) приведены на (Рис. 5–15). Преобразователь S1808-300 кГц.

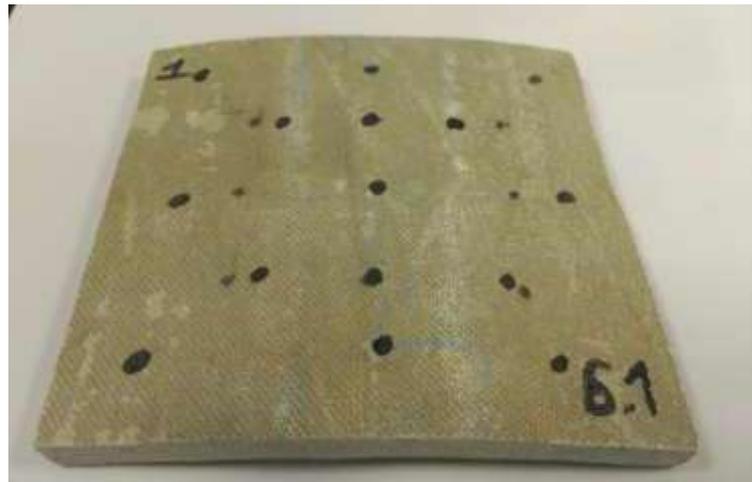


Рисунок 5 – Образец из МСП-К

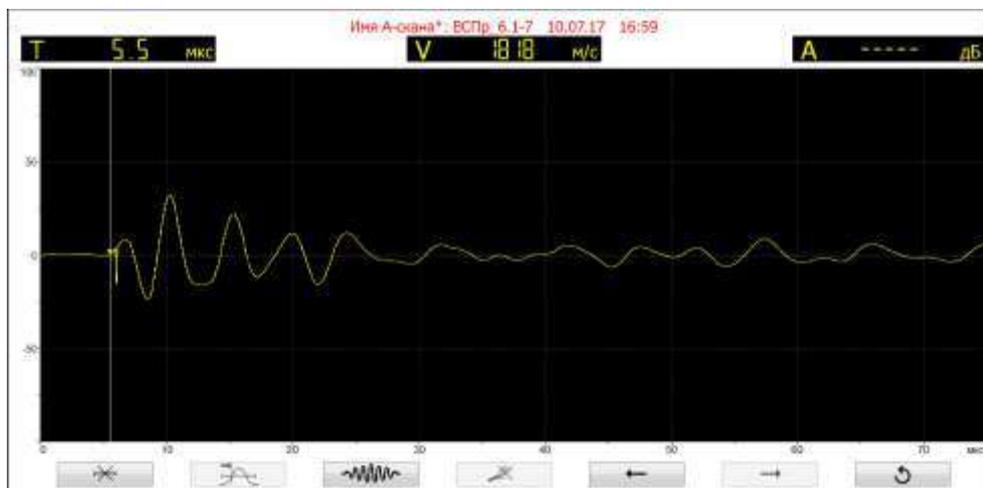


Рисунок 6 – Точка 7 Бездефектный участок продольная волна

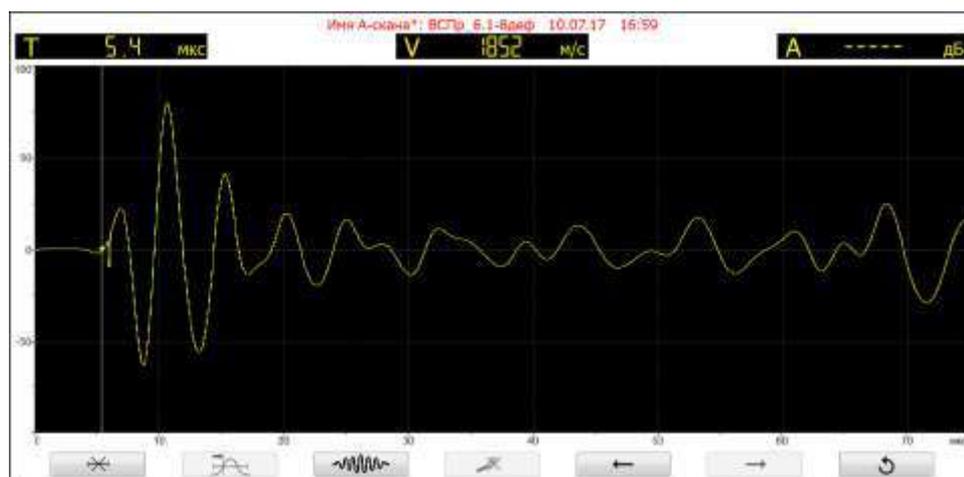


Рисунок 7 – Точка 8. Дефектный участок продольная волна

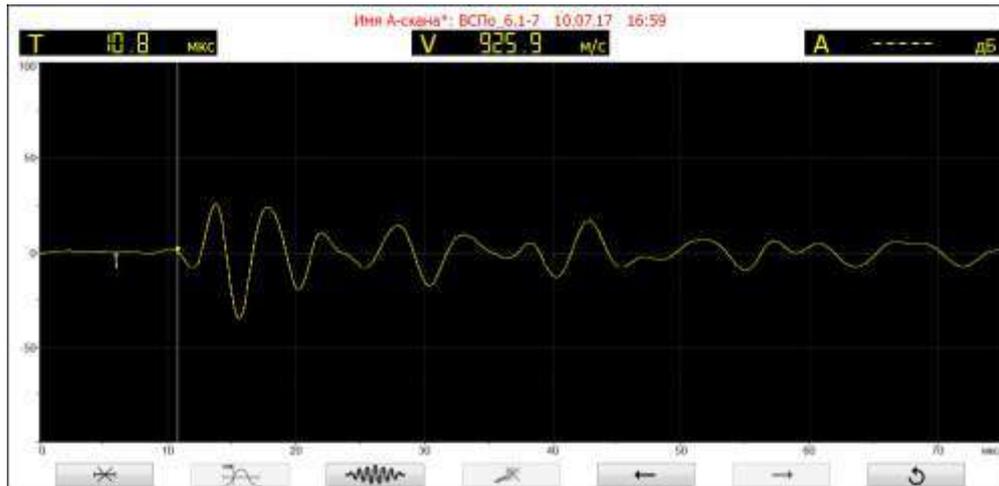


Рисунок 8 – Точка 7. Бездефектный участок поперечная волна

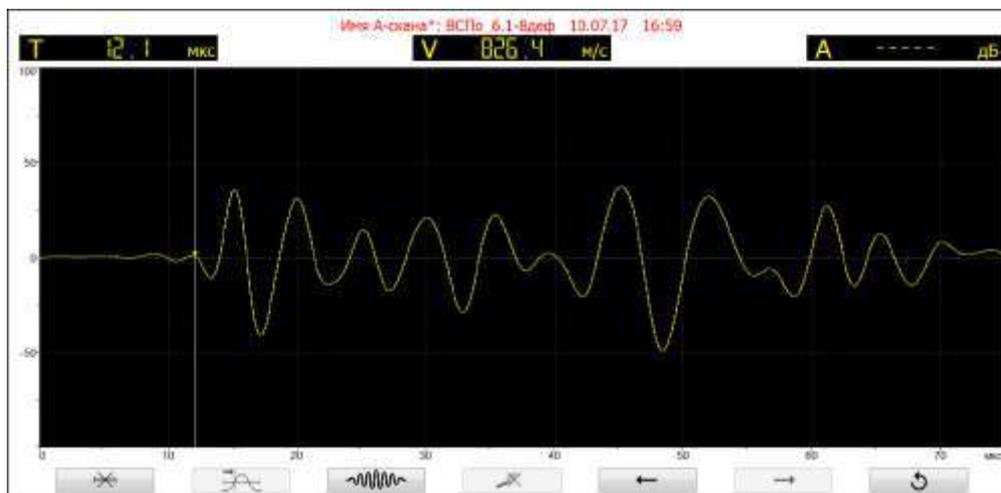


Рисунок 9 – Точка 8. Участок с дефектом поперечная волна



Рисунок 10 – Образец из МСП-К

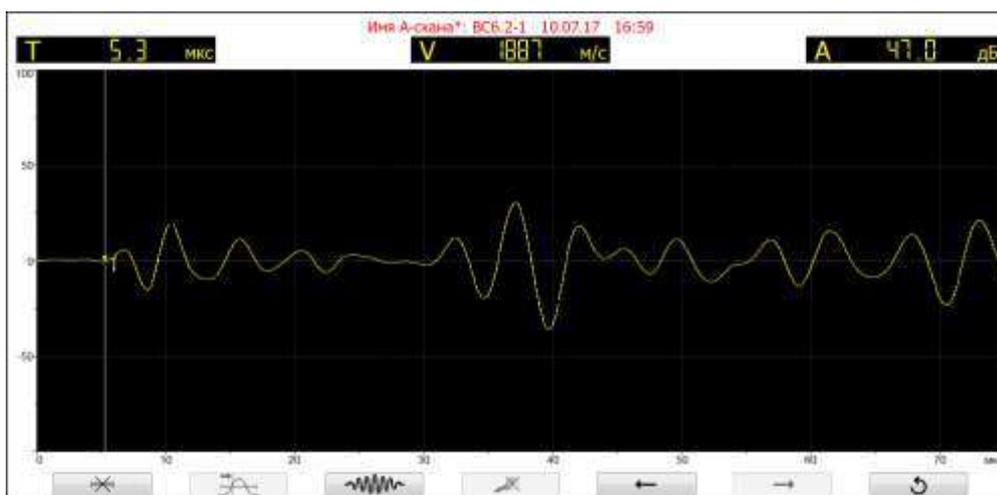


Рисунок 11 – Точка 1. Без дефекта. Продольная волна

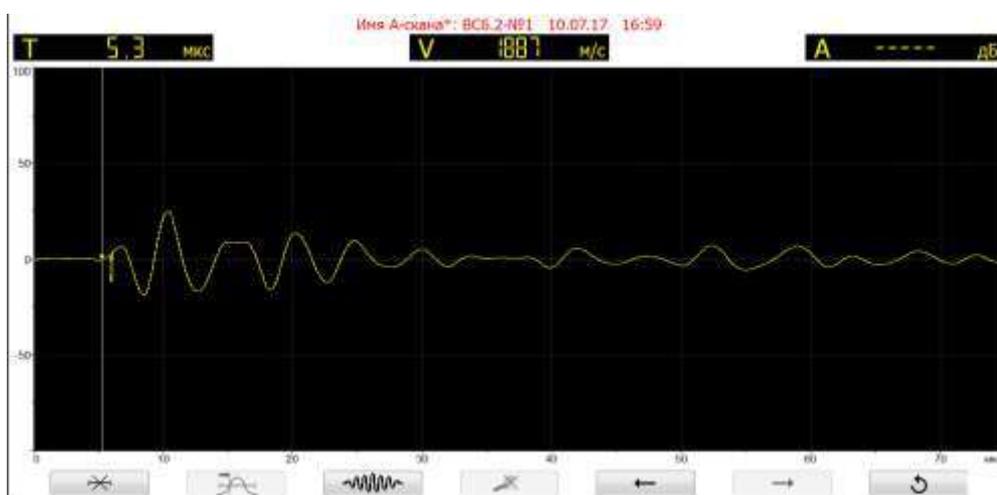


Рисунок 12 – Над отражателем № 1. Продольная волна

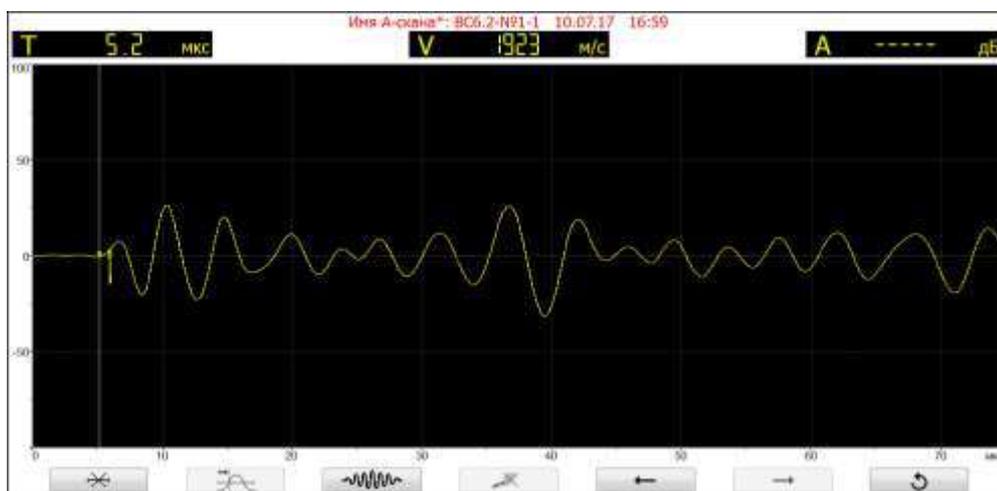


Рисунок 13 – Над отражателем № 2. Продольная волна

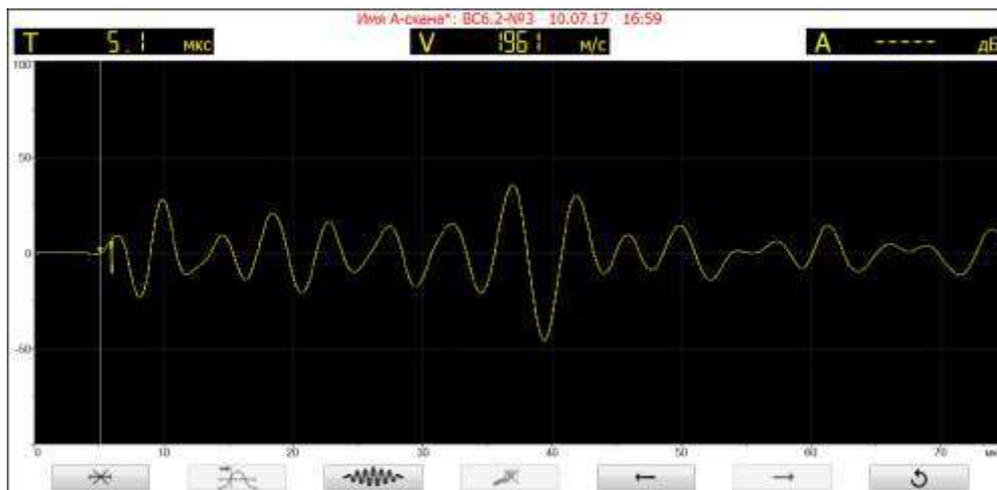


Рисунок 14 – Над отражателем № 3. Продольная волна

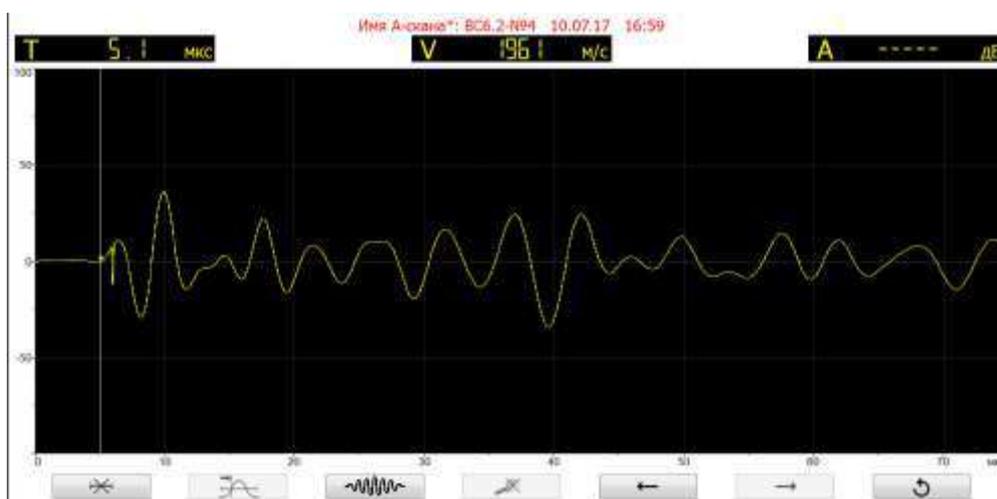


Рисунок 15 – Над отражателем № 4. Продольная волна

По результатам контроля выяснилось:

- для данного материала (ортотропный МСП-К) велосиметрический метод с односторонним доступом малопригоден, так как отсутствует четкий информационный параметр, который однозначно бы изменялся в дефектных участках;
- односторонний вариант имеет интерференциальные помехи, затрудняющий контроль данного материала. По этой причине обычно не удается обнаружить дефекты вблизи краев и зон резкого изменения сечений контролируемых изделий;

– чувствительность метода зависит от параметров контролируемых изделий и глубины залегания дефектов, уменьшаясь с увеличением последней. Минимальная площадь обнаружения дефектов 100...1500 мм², причем большие значения соответствуют большим глубинам залегания.

– односторонний вариант велосиметрического метода имеет также неконтролируемую зону, прилегающую к поверхности, противоположную поверхности ввода. Она составляет 20...40% толщины изделия. Двусторонние варианты такой зоны не имеют и позволяют выявлять дефекты во всех сечениях ОК, кроме очень близких (0,3...0,5 мм) к поверхности, которые могут «захлопываться» под действием статической силы прижатия преобразователей ОК [3].

4. Исследование возможности ультразвукового контроля изделий из МСП-К с двухсторонним доступом

Были исследованы возможности классических методов: временной и амплитудный метод прохождения.

Контроль осуществлялся импульсным дефектоскопом А1220 «МОНОЛИТ», который позволяет фиксировать время прихода сквозного сигнала с абсолютной погрешностью измерений временных интервалов в мкс, $\pm(0,1+0,0001 \cdot T_{\text{изм}})$, где $T_{\text{изм}}$ – измеренное значение временного интервала в мкс.

Преобразователи S1803 и S1808 имеют небольшие размеры, чтобы устранить геометрическую нерезкость, а также, являются широкополосными для излучения и приема коротких импульсов.

Временной метод прохождения основан на измерении времени пробега импульса через ОК. Путь ультразвукового луча, огибающего дефект, больше, чем прямой путь луча. В отличие от велосиметрического метода здесь предлагается, что тип волны не изменяется, то есть, если вводится продольная, то и принимается продольная, а если вводится поперечная, то она и принимается.

Специфические помехи, свойственные этому методу, связаны со случайным изменением толщины ОК, скорости распространения звука в материале и несоосности преобразователей.

Признаком дефекта при контроле амплитудным методом прохождения служит ослабление амплитуды упругих волн, произошедших через ОК. Требуется импульсное возбуждение для того чтобы избавиться от помех, которые связаны с интерференцией.

Первыми для исследования были выбраны преобразователи S1808 с номинальной частотой 300 кГц и вводом поперечной волны на образце 6.2 (Рис. 10, 16, 17, 18, 19, 20).

Видно, что время прихода сигнала на бездефектном участке и над искусственными дефектами одинаково. Амплитуда сигнала уменьшается, но при увеличении размера отражателя должна уменьшаться, а она немного увеличивается.

Так как у поперечных волн есть поляризация, было принято решение повернуть один преобразователь на 30° (Рис. 17–21).

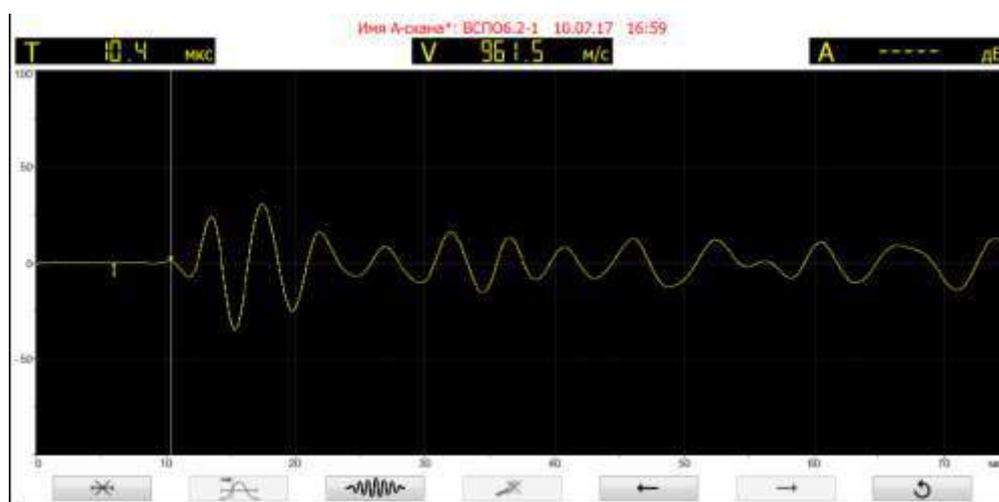


Рисунок 16 – Точка 1. Без дефекта

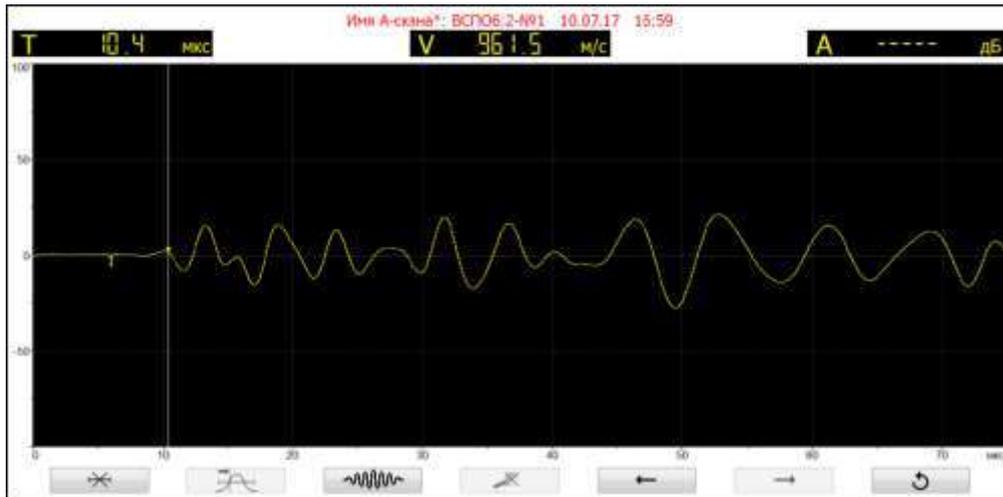


Рисунок 17 – Над отражателем № 1

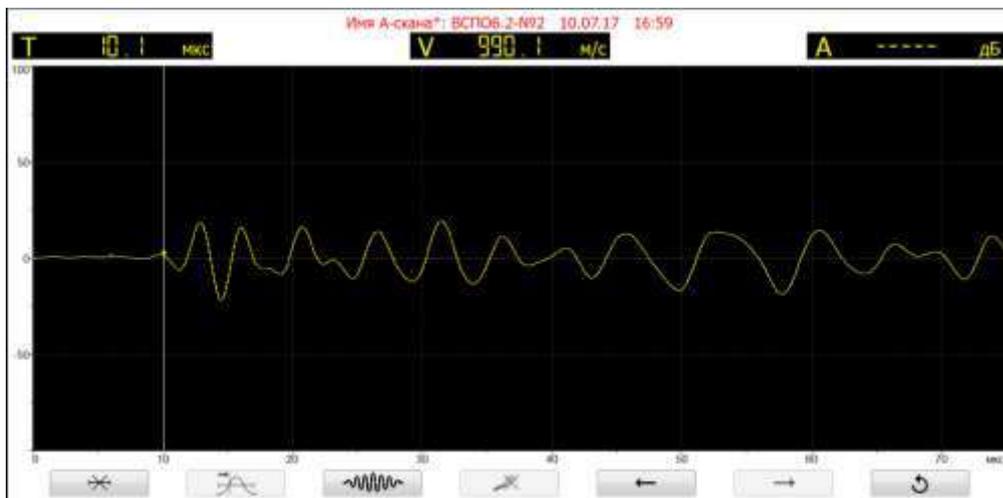


Рисунок 18 – Над отражателем № 2

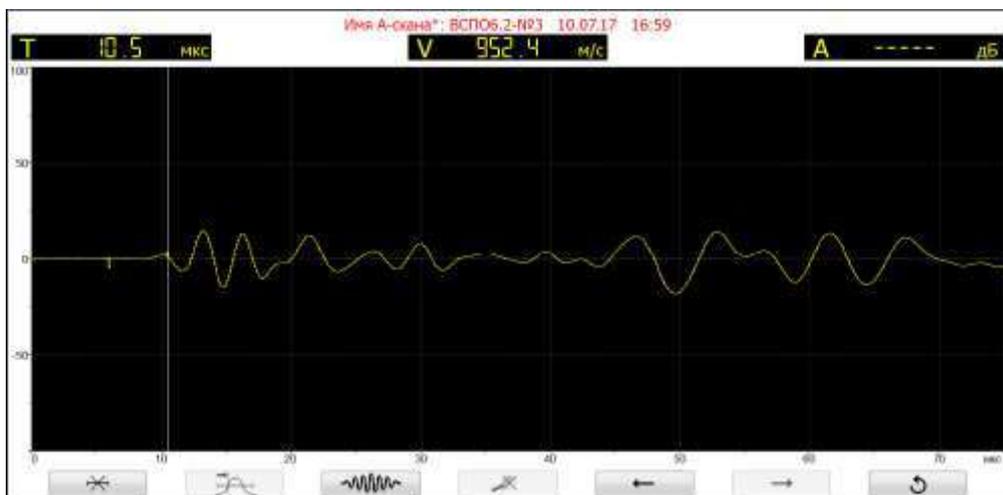


Рисунок 19 – Над отражателем № 3

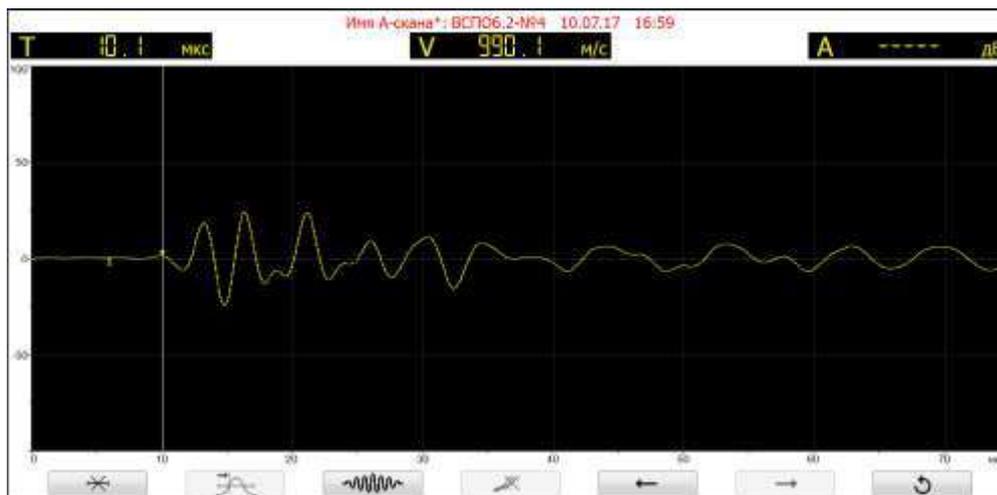
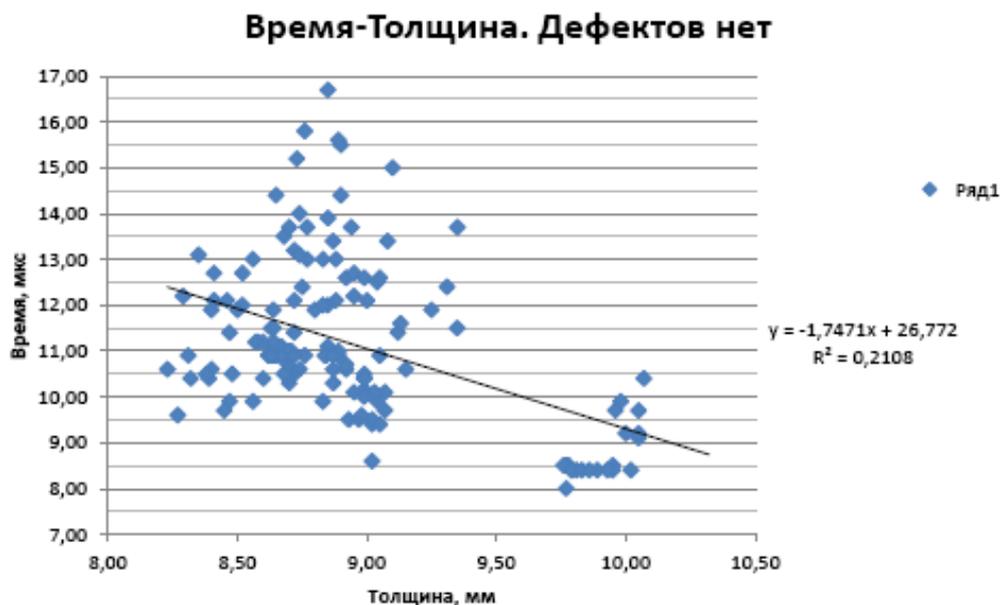


Рисунок 20 – Над отражателем № 4

В итоге сигналы сместились в среднем на 3 мкс. Смещение сигнала по времени над искусственными отражателями отсутствуют. Уменьшение амплитуды не наблюдается.

Далее эксперименты проводились с преобразователями S1803 с номинальной частотой 100 кГц на образцах (Рис. 11, 16). Возбуждение производилось на частоте 250 кГц, для того чтобы сигналы были более короткими и точность измерения возросла. На каждом образце равномерно были выбраны от 13 до 16 точек измерения.

Эксперименты показали, что разница между минимальным и максимальным значением толщины на образцах имеет значения от 0,12 до 0,7 мм. Разница между минимальным и максимальным значением времени прихода сквозного сигнала на образцах имеет значение от 1,2 до 5,7 мкс. Зависимости между изменением толщины и соответственно изменением времени прихода сигнала нет. Коэффициенты достоверности аппроксимации находятся в пределах 0,03...0,34. То есть, помеха временного метода, связанная со случайным изменением толщины и соответственно скорости, отсутствует (существующие изменения толщины сравнительно малы в сравнении с длиной ультразвуковой волны и поэтому незаметны) (Рис. 21).



Диапазон значений времени прихода сигнала лежит в пределах от 8 до 17 мкс. Изменения времени прихода сигнала связаны с изменением скорости распространения ультразвуковых волн в разных точках измерения. В процентном соотношении скорость на одном образце может изменяться до 60%. На образцах были обнаружены точки, где происходит резкое падение амплитуды сигнала, оно происходит, как правило, с увеличением времени прихода сигнала, но есть и исключения. Вероятно всего, это связано с различными типами дефектов. Поэтому однозначно опираться на один информационный канал (время прихода сигнала) не рекомендуется.

Во всех точках были измерены амплитуды сигналов. Связь между амплитудой сигнала и временем прихода показана на (Рис. 22).

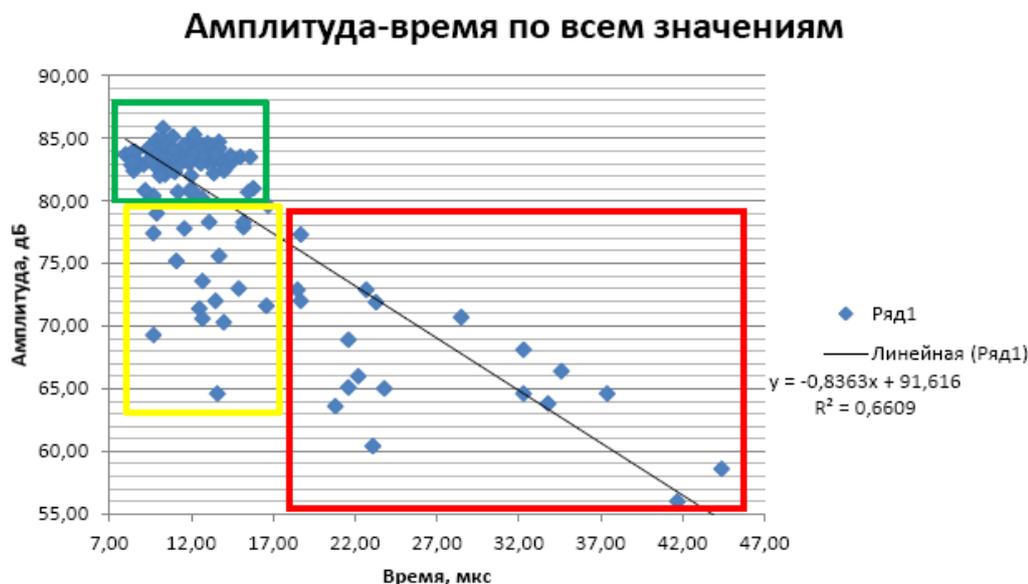


Рисунок 22 – Амплитуда - время

На данной диаграмме присутствуют три характерные области данных:

– первая область (зеленая) – значения времени находятся в интервале от 8 до 17 мкс, значения амплитуд от 80 до 86 дБ. Это область с отсутствием дефектов;

– вторая область (желтая) – значения времени находятся в интервале от 10 до 17 мкс, значения амплитуд от 65 до 78 дБ. Переходящая область.

– третья область (красная) – значения времени находятся в интервале от 18 до 45 мкс, значения амплитуд от 56 до 73 дБ. Область с присутствием дефектов.

Для подтверждения правильности выбранного метода и получения данных о размерах минимального выявляемого дефекта были проведены испытания на искусственных отражателях на образце 6-2 (Рис. 11).

На отражателях № 1, 2 время прохождения и амплитуда не изменились. На отражателях 3, 4 время увеличилось незначительно (на 2 мкс), амплитуда уменьшилась на 13 дБ по сравнению со средним значением на этом образце, то есть размер минимального дефекта, который выявляется данным методом и данным оборудованием составляет 6,0 мм.

Выводы

Наиболее оптимальным методом ультразвукового контроля деталей из МСП-К является комбинация двух способов прохождения – временного и амплитудного. Для реализации данного способа требуется двусторонний доступ к изделию и обеспечение точной соосности преобразователей. Необходимо использовать преобразователи с сухим точечным контактом с возбуждением продольной волны. Оптимальная рабочая частота преобразователей 300 кГц.

Литература

1. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1991, 272 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
3. Ультразвуковой низкочастотный преобразователь: пат. 2082163 Рос. Федерация: МПК G01N29/24/ А.А. Самокрутов [и др.], заявитель и патентообладатель ООО «АКС». - № 94-00-59-01; заявл. 21.02.1994, опубл. 04.07.1997, Бюл. № 17.
4. Irvin G.R., In «Structural Mechanics», Proc. 1st. Symp. Naval Struct. Mech., Pergamon, Oxford, 1960, p. 557-594.
5. Irwin G.R., Proc. Sagamore Ord. Suracuse Mater. Res. Conf. 7th, Research Inst., Suracuse Univ., New York, 1960.
6. Konish H.J., Swedlow J.L., Cruse T.A., J. Compos. Mater., 6, 114-125, 1972.
7. Wu E.M., Reuter R.C., Crack Extension in Fiberglass Reinforced Plastics TAM Rep. No. 275, Univ. of Illinois, Urbana, 1965.

УДК 620.179.11:669.295:621.9.048.4

**Неразрушающий контроль качества упрочнения при
электроискровом легировании поверхности титановых деталей,
работающих в условиях интенсивного циклического нагружения и
фрикционного воздействия**

Гавзе А.Л.¹, к.т.н.

ns_n42@tplants.com

¹АО «НИИ стали», г. Москва,

Аннотация:

На основе стандартного метода определения пластической твердости разработан способ неразрушающего контроля качества упрочнения при осуществлении технологического процесса поверхностного электроискрового легирования нагруженных деталей из титановых сплавов. Предложена схема комплексного контроля упрочняемых деталей.

Ключевые слова:

детали из титановых сплавов, упрочнение поверхности, электроискровое легирование, пластическая твердость, неразрушающий контроль.

Эффективное применение титановых сплавов для снижения массы деталей транспортного машиностроения, испытывающих фрикционное воздействие, невозможно без использования тех или иных методов модифицирования их поверхностей, обеспечивающих повышение их износостойкости, снижение склонности к схватыванию и налипанию и уменьшению коэффициента трения в контакте с сопрягаемыми деталями.

Введение в зону трения известных смазочных материалов не улучшает работоспособности узлов трения, а в ряде случаев увеличивает износ титановой детали. Такое поведение титановых сплавов может быть объяснено их повышенной склонностью к «водородному износу», вызываемому водородным охрупчиванием. Источниками наводороживания являются разлагающиеся под действием повышенных давления и температуры углеводороды смазки или материала сопряженной детали (в случае изготовления указанной детали из полимерных материалов) [1].

Одним из наиболее эффективных и доступных способов поверхностного модифицирования титановых деталей с точки зрения простоты и надежности применяемого оборудования и требований, предъявляемых к технологическому процессу, является метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Метод ЭИЛ обеспечивает упрочнение поверхностей воздействием быстрого нагрева и охлаждения локальных участков деталей под влиянием концентрированного потока энергии низкотемпературной плазмы периодических электроискровых разрядов [2–5]. При этом происходит микролегирование этих участков из-за переноса в канале разряда материала анода (инструмента) на катод (упрочняемую деталь) и взаимодействия расплавленных участков с кислородом и азотом атмосферы.

С применением установок электроискрового легирования (ЭИЛ) различной мощности типа «ЭФИ» и «Элитрон», производства Опытного завода ИПФ АН МССР г. Кишинев, и электродов из твердых сплавов Т15К6, ВК8, стали 30ХГСА, молибдена и титанового сплава ВТЗ-1 при различных технологических режимах получены упрочненные слои на образцах и деталях из титановых сплавов. Проведено исследование их структуры, фазового состава, некоторых физико-механических характеристик и оценка износостойкости при трении скольжения в условиях лабораторных испытаний. Результаты проведенных исследований приведены в работах [6–9].

Показано, что поверхностное легирование с применением ЭИЛ, особенно на режимах повышенной мощности, приводит к ухудшению выносливости образцов и деталей при циклическом нагружении, что связано с увеличением шероховатости поверхности и появлением растягивающих поверхностных остаточных напряжений. С целью устранения указанного недостатка образцы и детали после проведения ЭИЛ подвергали поверхностной пластической деформации (ППД) методами обкатки стальными роликами

Установлено, что обкатка легированного слоя за счет понижения параметра шероховатости Ra (в 10–20 раз), деформационного упрочнения и создания остаточных поверхностных сжимающих напряжений приводит к увеличению износостойкости сопряженных деталей и повышает долговечность образцов и деталей в условиях усталостного нагружения.

На основании проведенных исследований по влиянию ЭИЛ на характеристики упрочняемых поверхностей выбраны технологические режимы комплексного упрочнения поверхностей осей балансиров подвески, кривошипов натяжения и других деталей ходовых систем гусеничных машин из титанового сплава ВТЗ-1, включающего ЭИЛ электродами из твердых сплавов ВК8, Т15К6 по ГОСТ 3882-74 и обкатку стальными роликами, а для ряда деталей электроискровое шлифование (ЭИШ).

В ходе стендовых и натурных испытаний показана возможность повышения работоспособности смазываемых узлов трения, включающих детали из титанового сплава, и обеспечение конструктивной прочности самих титановых деталей, при использовании поверхностного микролегирования электрическими разрядами с последующей поверхностной пластической деформацией (ППД) обкаткой стальными роликами.

В процессе освоения технологии изготовления деталей возникла необходимость разработки методики контроля качества упрочнения поверхностей в условиях серийного производства.

При проведении лабораторных и опытно-промышленных исследований интенсивность упрочнения и глубину упрочненного слоя оценивали на поперечных шлифах, вырезанных из обрабатываемых деталей, по виду микроструктуры и зависимости изменения микротвердости от расстояния от поверхности детали. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузках 50, 100 и 200 г.

Ввиду большой стоимости деталей была поставлена задача разработки неразрушающих методов контроля качества упрочнения.

Попытки оценки интенсивности упрочнения измерением твердости методом вдавливания стальных или твердосплавных шариков по ГОСТ 9012-59, алмазной пирамиды по ГОСТ 2999-75 или алмазного конуса по ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 22975-78, при использовании приборов типа Бринелля, Викерса, Роквелла и Супер-Роквелла не увенчались успехом из-за особенностей строения упрочненной поверхности:

- для обеспечения значений параметров шероховатости, позволяющих с необходимой точностью замерять диаметр или диагональ отпечатков при использовании методов Бринелля и Викерса, приходилось сошлифовывать поверхность на глубину, соизмеримую с глубиной поверхностного упрочнения;

- использование алмазного конуса с радиусом при вершине 0,2 мм приводило к значительному разбросу результатов измерений из-за излишней глубины проникновения индентора при нагрузках 588, 980 и 1470 Н на приборах Роквелла и из-за неоднородности упрочнения по площади при меньших (147 Н, 294 Н, 441 Н) нагрузках на приборах Супер-Роквелла.

Положительные результаты были получены при использовании измерений «функциональной пластической твердости» (НДФ), основанных на «Методе измерения пластической твердости» по ГОСТ 18835-73. Принципиальным отличием применяемого метода измерения «функциональной пластической твердости» от метода, регламентируемого ГОСТ 18835-73, является использование твердомеров Роквелла (типа ТР)

вместо твердомеров Бринелля типа (ТШ). При этом упрощается выбор и установка нагрузки и устраняется необходимость изготовления специального приспособления для измерения глубины отпечатка. Для этих измерений используется индикатор прибора ТР. Цена деления измерителя глубины в этом случае составляет 0,002мм вместо рекомендуемой 0.001мм по ГОСТ 18835-73, однако для решения поставленной задачи цехового контроля цены деления (0.002 мм) оказалось вполне достаточно.

В качестве индентора использован наконечник для алмазного выглаживания по ОСТ 2И77-5-84 типа 1 в исполнении 2 с радиусом сферического участка $r = 1$ мм. Могут быть использованы наконечники по ОСТ 3-4714-80 или другие специально изготовленные алмазные наконечники.

Пластическую твердость измеряют при вдавливании в поверхность испытуемой детали на упрочненном и неупрочненном ее участках сферического индентора (наконечника для алмазного выглаживания с $r = 1$ мм) последовательно прилагаемыми нагрузками $P_1=980$ Н (100кг) и $P_2=1470$ Н (150кг). После снятия каждой нагрузки измеряют отвечающую ей глубину отпечатков. Допускается производить вдавливание наконечника силой P_2 в отпечаток, полученный при нагрузке P_1 . На испытуемых участках поверхности производят не менее пяти измерений.

Глубина отпечатков h_1 и h_2 определяется по формулам:

$$h_1 = 0.2 - \frac{2 HR_1}{1000}; \quad h_2 = 0.2 - \frac{2 HR_2}{1000},$$

где: HR_1 и HR_2 – показание индикатора прибора ТР по шкале «С» после снятия нагрузок P_1 и P_2 соответственно.

Число пластической твердости НДФ определяют по формуле:

$$\text{НДФ} = \frac{P_2 - P_1}{2\pi r h_2 - h_1};$$

после подстановок выражений для h_1 и h_2 , нагрузок $P_1=100$ кг, $P_2=150$ кг: и преобразований:

$$\text{НДФ} = \frac{3990}{HR_1 - HR_2}.$$

Установлено, что если среднее арифметическое значение результатов измерений НДФ на участке поверхности деталей из титанового сплава, упрочненной ЭИЛ и обкатыванием, превышает среднее арифметическое значение измерений на неупрочненном участке не менее, чем на 30 НДФ, то работоспособность деталей в объеме регламентированного пробега обеспечена.

Дополнительным способом контроля качества упрочнения титановых деталей поверхностным электроискровым легированием с последующей обработкой ППД может являться метод определения глубины упрочненного слоя с использованием вихретоковых толщиномеров.

Общая схема контроля качества упрочнения деталей ходовой части из титановых сплавов, разработанная для заводов отрасли включает:

- визуальный осмотр деталей для контроля качества внешнего вида и сплошности покрытий для сравнения с эталонными образцами;
- измерение параметра шероховатости R_a с применением профилометров или профилометров-профилографов. Для некоторых деталей допускается проводить оценку шероховатости по эталонным образцам;
- оценка качества (интенсивности и глубины) упрочнения по определению пластической твердости НДФ;
- оценка толщины покрытия наружных поверхностей вихретоковым измерителем ВТ19И.

Литература

1. Фрейдлин М.Г., Гаркунов Д.Н., Гавзе А.Л., Легкодух А. М. Влияние фазового состава на антифрикционные свойства титановых сплавов при трении со смазкой. //В сб.:Исследование водородного износа. М., «Наука», 1977, С. 67–71.

2. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М.: Машгиз, 1961. 303 с.

3. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка, 1976, 220 с.

4. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиница, 1985. 196 с.

5. Гавзе А.Л., Легкодох А.М., Фрейдлин М.Г., Бродская Р.М. Структурные особенности слоев, полученных при электроискровом легировании титановых сплавов.// Электронная обработка материалов, №2, 1986, С. 26–28.

6. Гавзе А.Л., Чусов С. Ю. Поверхностное упрочнение деталей из титанового сплава с использованием эффекта быстрой кристаллизации / Материалы II Всероссийской научно-технической конференции. *«Роль фундаментальных исследований при реализации стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030года»*, 29 июня 2015года, ФГУП «ВИАМ», Москва.

УДК 620 192 63

Сертификация радиографических технических пленок

Демидов А.А.¹, Косарина Е.И.¹, д.т.н.; Михайлова Н.А.¹, к.т.н.; Турбин Е.М.¹

lagazz@yandex.ru; ekaterina-kosar@mail.ru; natsavv@inbox.ru;
shogun-sun@rambler.ru

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

В соответствии с международным стандартом ISO 11699-1:2008 радиографические пленки делятся на шесть классов С1–С6. Важной задачей является определение соответствия радиографической пленки тому или иному классу по соответствующей методике. Такая методика должна позволять определить основные сенситометрические характеристики радиографических пленок. К основным характеристикам пленок относятся чувствительность к излучению, контрастность, широта и разрешающая способность. Чувствительность, контрастность и широта радиографической пленки определяются по характеристической кривой, представляющей собой графическую интерпретацию зависимости оптической плотности от логарифма относительной дозы излучения.

В докладе приведено сравнение в определении характеристик радиографических пленок по ISO 11699-1:2008 и методике ВИАМ.

Ключевые слова:

радиографическая пленка, сенситометрические характеристики, чувствительность к излучению, средний градиент, предел разрешения, характеристическая кривая

Введение

Согласно отраслевым нормативным документам, частности ПИ 1.2.226-2008 «Неразрушающий контроль металлических изделий рентгеновскими методами» при контроле ответственных изделий с напряжением на рентгеновской трубке не более 220 кВ следует использовать радиографические пленки класса С4 по ISO 11699-1:2008. Это требование не противоречит международным и европейским нормам. Комплект отечественных НТД не предусматривает такой классификации пленок. Исторически это сложилось из-за отсутствия широкой номенклатуры выпускаемых пленок отечественными производителями.

В системе международных стандартов ISO тип выбранной радиографической пленки, используемой в качестве детектора радиационного изображения, строго регламентирован в зависимости от требований, предъявляемых к качеству объекта контроля (ОК), особенно, если речь идет о деталях и узлах двигателя и других элементах летательных аппаратов [1–3].

В международных стандартах определены два класса качества контролируемых изделий: А и В. Класс В распространяется на изделия, эксплуатируемые в экстремальных условиях (авиация, космос, атомная энергетика и пр.) Поэтому, проведение радиографического неразрушающего контроля изделий, относящихся к классу В, следует осуществлять с повышенными требованиями чувствительности контроля и разрешающей способностью к выявлению дефектов (ISO 55697:2013 «Неразрушающий контроль. Общие принципы радиографического контроля металлов с использованием рентгеновского и гамма-излучения») [4]. Для выполнения требований европейских норм необходимо строго регламентированное использование средств радиографического контроля, в частности радиографических пленок, так как качество радиографического изображения зависит от их свойств.

Согласно ISO 11699-1:2008 «Неразрушающий контроль. Промышленная радиографическая пленка. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной дефектоскопии» [5] все радиографические пленки в зависимости от сенситометрических свойств подразделяются на шесть классов [6, 7].

Установить полную принадлежность к определенному классу радиографических пленок имеет право, в частности, ВАМ (Федеральный институт исследования и тестирования материалов) в Германии. Для получения сертификата на соответствие радиографической пленки к тому или иному классу по ISO 11699-1:2008 ВАМ проводит еще целый ряд первоначальных и периодических испытаний. [8, 9].

Анализ методики ВИАМ и ее сравнение с программой испытаний ВАМ

Ввиду отсутствия классификации радиографических пленок, в России нет организации, аналогичной немецкому ВАМ. Оценку качества радиографических пленок ВИАМ проводит по своей методике, действующей в пределах института. Полнота испытаний и ее объективность определяются прежде всего наличием тех технических средств, которыми располагает ВИАМ и требованиями к качеству материалов изделий из них.

Радиографические пленки фирмы Агфа на протяжении многих лет показывают стабильные сенситометрические свойства. Поэтому при испытании новых типов пленок появляющихся на рынке, несмотря на возражения фирм, предлагающих свои пленочные системы, ВИАМ разработал методику испытания радиографических пленок, в которой заложено экспериментальное сравнение испытуемой радиографической пленки с ее аналогом из линейки Агфа.

Поступающие на рынок пленочные системы сопровождаются информацией следующего содержания:

- 1) характеристическая кривая;

- 2) принадлежность к одному из шести классов по ниже приведенным значениям сенситометрических показателей;
- 3) градиент при оптической плотности 2–4 Б;
- 4) гранулярность σ_S при оптической плотности 2 Б;
- 5) отношение градиент/шум G/σ_S при оптической плотности 2 Б;
- 6) скорость;
- 7) доза излучения, под действием которой рентгенограмма приобретает оптическую плотность, равную 2 Б.

1. Для дефектоскописта помимо перечисленного необходима информация о широте пленки (диапазон экспозиций, создающих на рентгенограмме диапазон оптических плотностей, пригодных для расшифровки, обычно: от 1,5 Б до 3,8 Б). Изделия авиационной техники отличаются конструктивным разнообразием и широким спектром применяемых материалов от неметаллических композиционных материалов до жаропрочных сплавов. Для контроля используют излучение в широком диапазоне энергий от 16 кэВ до 300 кэВ. Поэтому необходима информация о спектральных свойствах пленки. Методика ВИАМ предусматривает получение такой информации, проводя экспонирование специально разработанных образцов при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, 180 кВ; 220 кВ. По результатам экспонирования и фотометрирования строят зависимости оптической плотности S , Б, от толщины просвечиваемого материала d , см. В некотором смысле это – аналог характеристической кривой (ХК) пленки, поскольку доза излучения за слоем поглотителя D изменяется по закону ослабления рентгеновского излучения: $D = D_0 \cdot e^{-\mu d}$, D_0 – доза излучения в отсутствии поглотителя; μ – линейный коэффициент ослабления излучения, см^{-1} , который представляет собой функцию атомного номера, плотности объекта экспонирования и энергии излучения. [10, 11].

2. Градиент – тангенс угла наклона спрямленного участка ХК в окрестности точек $S=2$ Б и $S=4$ Б. фактически это участок определяет

производную ХК, то есть $\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta d} = \frac{dS}{dd}$. По методике ВИАМ производную ХК строят по экспериментальным данным. Испытательные образцы представляют собой ступенчатые клинья, причем на каждой ступеньке имеются шесть плоскодонных лунок глубиной 1%; 2%; 3%; 5%; 7%; 10%. Например, на ступеньке толщиной 26 мм (образец № 2 из стали) приращение толщины Δd составляет: $\Delta d = \{0,26; 0,52; 0,78; 1,30; 1,82; 2,60\}$ мм. На рентгенограмме, если оптическая плотность ступеньки толщиной 26 мм $S_{26} = 2$ Б, изображения лунок будут иметь приращения оптической плотности: $\Delta S_{1\%}; \Delta S_{2\%}; \Delta S_{3\%}; \Delta S_{5\%}; \Delta S_{7\%}; \Delta S_{10\%}$. По результатам фотометрирования строят кривую $\frac{dS}{dd}$ – градиент ХК в окрестности точки $S = 2$ Б. Аналогично получают значения градиентов при оптической плотности $S = 4$ Б, причем при разных значениях энергии излучения [10].

3. Гранулярность σ_S – неравномерность оптической плотности равномерно экспонированной и проявленной радиографической пленки, оцениваемая с помощью микрофотометра. С помощью микрофотометра возможно изменение оптической плотности рентгенограмм на площади $0,1 \times 0,1$ мм [10, 11].

4. Ввиду отсутствия микрофотометра методика не позволяет проводить оценку гранулярности, и, следовательно, величины G/σ_S

5 и 6. Согласно ISO 11699-1:2008 скоростью называют величину, обратную дозе излучения K_S , Гр, под действием которой радиографическая пленка получает установленную оптическую плотность, измеренную в проходящем свете, $S - S_0 = 2$ Б, где S_0 – оптическая плотность вуали. Таким образом, скорость: $S_{S-S_0=2} = \frac{1}{K_S}$ [12–16].

В отечественных ТУ на радиографическую пленку это свойство называется чувствительностью пленки к излучению. Физический смысл этого свойства на наш взгляд адекватен определению: способность пленки получать определенную оптическую плотность под действием дозы

излучения. Чем больше доза излучения необходима для оптической плотности $S=2$ Б, тем менее чувствительна пленка. Количественные характеристики, регламентированные в отечественных ТУ, отличаются от ISO 11699-1:2008. Под чувствительностью принимают величину, обратную дозе излучения, которая создает на пленке оптическую плотность, равную $S=0,85$ Б. Единица измерения выглядит следующим образом: $S_{0,85}P^{-1}$. Здесь фигурирует экспозиционная доза излучения, измеряемая в рентгенах, что не соответствует системе СИ.

Известно, что поглощенная доза, выраженная в $\Gamma\rho=Дж/кг$ и экспозиционная доза в Кл/кг, для рентгеновского излучения при энергии фотонов до 1 МэВ связаны между собой численной зависимостью: $D_{\text{экс}}=33,8 \cdot D_{\text{погл}}$. С другой стороны, $D_{\text{экс}}[\text{Кл/кг}]=3,88 \cdot 10^3 D_{\text{экс}}[\text{P}]$. Любой дозиметр измеряет экспозиционную дозу. Экспозиционная доза рентгеновского излучения, выходящая из рентгеновской трубки, пропорциональна величине: $D_0 = \frac{k_{\text{апп}} \cdot U^2 \cdot I \cdot t}{F^2}$, где $k_{\text{апп}}$ – некоторая константа (аппаратный коэффициент, зависящий от схемы питания рентгеновской трубки); U – анодное напряжение, кВ; I – анодный ток, мА; t – продолжительность экспозиции, мин; F – фокусное расстояние: расстояние от анода рентгеновской трубки до радиографической пленки. За слоем поглотителя экспозиционная доза рентгеновского излучения определяется выражением: $D = D_0 \cdot e^{-\mu d}$. Скорость по ISO и чувствительность к излучению, по отечественным ТУ, несмотря на единую смысловую принадлежность, имеют разные и трудно сравнимые количественные характеристики. Поэтому оправдано при проведении испытаний выбор арбитражного аналога [10, 11].

В связи с вышеизложенным, по результатам проведенных испытаний по методике ВИАМ мы можем дать заключение лишь о соответствии (несоответствии) испытуемой пленки тому классу, к которому относится

«арбитражная пленка» Агфа по контрасту и чувствительности к излучению (скорости).

Для проведения испытаний радиографической пленки с определением всех перечисленных параметров и принадлежности ее к определенному классу необходимо наличие микрофотометра и сенситометра – особого устройства, позволяющего проводить специальное экспонирование. В дальнейшем проводят фотометрирование полученной рентгенограммы, по результатам которого строят ХК пленки [17]. Такая задача поставлена и в дальнейшем методика по испытанию пленок будет аналогична той по которой работает ВАМ (Берлинский институт сертификации и тестирования материалов).

В будущем наша методика должна содержать разделы, определяющие спектральные свойства пленок, ее широту и разрешающую способность.

Заключение

1. Методика, разработанная ФГУП «ВИАМ» определяет сенситометрические характеристики испытуемых пленок: градиент, чувствительность (скорость) и разрешающей способности адекватно определению соответствующих сенситометрических характеристик по ISO 11699-1:2008.

2. Для построения ХК, определения гранулярности и отношения градиент шум необходимы микрофотометр с размером щели не более $0,1 \times 0,1$ мм и сенситометр

3. Оценка среднего градиента, выполненная по изложенной методике более объективна, чем оценка, полученная при испытаниях, изложенных в ISO 11699-1:2008, так как учитывает спектральную зависимость радиографических пленок в диапазоне энергий 16–300 кэВ.

Литература

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–51.
6. ISO 5579:2013 Неразрушающий контроль. Общие принципы радиографического контроля металлов с использованием рентгеновского и гамма-излучения.
7. ISO 11699-1:2008 Неразрушающий контроль. Пленка для промышленной радиографии. Часть 1: Классификация пленочных систем для промышленной дефектоскопии.
8. EN 462-1-5:2009 Неразрушающий контроль. Качество изображений при радиографии. Часть 1: индикаторы качества изображения (проволочного типа), определение величины качества изображения. Аутентичный перевод. Европейский институт стандартизации. Стассарт 36, В 1050 Брюссель.
9. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение. 1999. 104 с.

10. Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т 1. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Радиационный контроль. М.: Машиностроение. 2006. 560 с.

11. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Радиографические технические пленки РТ-К и РТ-7Т. Результаты их испытания //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 37–42.

12. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Разработка методики по испытанию радиографических пленок с целью определения целесообразности их применения в дефектоскопии //Контроль. Диагностика. 2011. №12. С. 65–67.

13. Степанов А.В. Методы рентгеновского контроля в производстве авиационных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 28–32.

14. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Рентгеновский контроль крупногабаритных отливок сложной формы из сплавов группы «силумин» //Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 55–58.

15. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Сравнение требований рентгеновского контроля и качества рентгенографических снимков в европейских нормах и российских стандартах //Вестник МЭИ. 2011. №4. С. 85–89.

16. Косарина Е.И., Степанов А.В. Требования рентгенографического неразрушающего контроля в российских стандартах и зарубежных стандартах //Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам. 2013. №9. С. 2–7.

17. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Крупнина О.А. Сенситометр для технических радиографических пленок// Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3. С. 88–94.

УДК 620.179.16

Особенности определения пористости в деталях из ПКМ с применением ультразвукового эхо-импульсного метода контроля

Диков И.А.¹; Бойчук А.С.¹; Чертищев В.Ю.¹; Генералов А.С.¹, к.т.н.

dikov.viam@mail.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В настоящее время в России отсутствуют методы контроля пористости, которые могли бы использоваться параллельно со штатным контролем на поиск дефектов в полимерных композиционных материалах. В данной работе проведены исследования, результатом которых стала разработка технологий контроля пористости деталей и агрегатов крыла самолета МС-21 ультразвуковым эхо-импульсным методом. Разработанные технологии позволяют определять пористость в процессе штатного контроля, т.е. без увеличения трудоемкости. В работе приведены погрешности определения пористости в изделиях, полученных по автоклавной и инфузионной технологиям. Также описаны основные причины неточности определения пористости и возможный путь решения.

Ключевые слова:

углепластик, полимерный композиционный материал, ПКМ, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, ультразвуковые колебания, пористость, поры.

Введение

В настоящее время в самолетостроении для снижения массы конструкции и повышения экономической эффективности все более широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ). Объем использования ПКМ за рубежом в конструкции планера самолетов достигает 50% по весу (рисунок 1), например Boeing 787 (США) – 50%, Airbus A380 (Европа) – 20%, Airbus A350 (Европа) – 50% [1-5]. В отечественном самолетостроении ПКМ нашли свое применение в самолетах МС-21, ПАК ФА, ПАК ДА, в конструкции пассажирского самолета «Сухой Суперджет», в мотогондоле двигателя ПД-14.

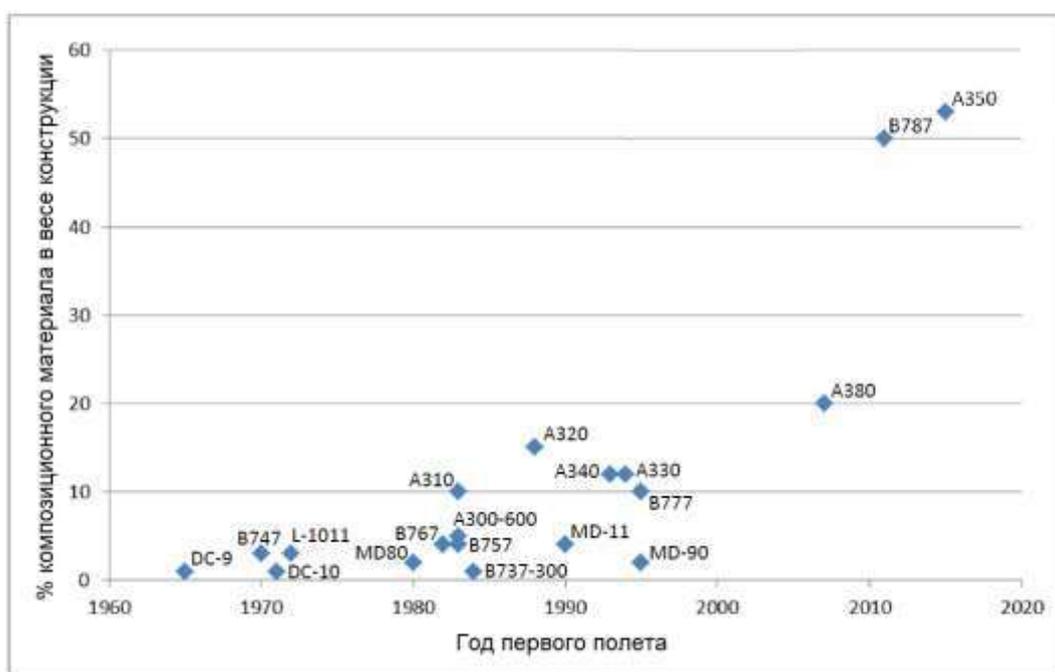


Рисунок 1 – Весовое содержание композиционных материалов (в %) в коммерческих самолетах

В процессе производства, а также при эксплуатации в изделиях из ПКМ могут возникать макро и микродефекты [6], которые отрицательно влияют на прочностные характеристики изделия. Известно, что прочностные свойства ПКМ существенно снижаются при наличии микродефектов в материале, таких как пористость [7–9]. Так при значении объемной доли пор более 3-4% прочность при межслоевом сдвиге снижается в 2 раза. При пористости равной 5% внутрислоевая прочность при сдвиге снижается на

35% (с 0,063 до 0,042 МПа), а при продольном сжатии на 30% (1,12 до 0,773 Мпа) [9]. Поэтому большинство производителей ограничивает допустимую величину объемной доли пор в изготавливаемых деталях и элементах конструкций. Согласно [10] Airbus допускает объемную долю пор в изделиях из ПКМ не более 2,5%. Согласно стандарту ASTM (США) изделие с пористостью более 2% должно быть забраковано [9].

В работе [11] установлено, что для определения пористости в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых неразрушающих методов существует несколько различных подходов. Определение пористости в ПКМ ультразвуковым методом проводится с использованием корреляционных зависимостей, построенных предварительно на образцах с известной пористостью. В качестве информационного параметра корреляционной связи в основном выступают несколько ультразвуковых параметров: затухание ультразвука, скорость ультразвуковых волн, характеристики шумов обратного рассеяния. Фирмы Boeing, Bombardier и Airbus при изготовлении деталей из ПКМ проводят и требуют от поставщиков деталей проводить при ультразвуковом контроле оценку пористости материала по затуханию ультразвука [10–11].

В ходе ранее проведенных работ, а также на основе литературных данных [8] было определено, что кроме пористости в материале изделия на корреляционные зависимости значительно влияют параметры используемого материала, такие как: толщина монослоя и тканая форма наполнителя, а также: схема укладки, наличия покрытия на поверхностях изделия (лакокрасочного, молниезащитного). Также на корреляционные зависимости оказывают влияние параметры применяемого оборудования. Поэтому в данной работе для получения корреляционных зависимостей ультразвуковых параметров от пористости для деталей и агрегатов крыла самолета МС-21 использовались конкретные марки материала, детали и условия производства. Исследования проводились на образцах, соответствующих выпускаемым деталям по ряду основных параметров, с использованием

оборудования, имеющегося у изготовителя деталей – автоматизированных установок для ультразвукового контроля «Теснатом». В качестве информационных критериев были рассмотрены такие параметры как скорость ультразвуковых колебаний в материале образцов, коэффициент затухания в материале, центральная частота донного сигнала, амплитуда донного сигнала.

Материалы и методы исследований

Для исследований были изготовлены 9 конструктивно подобных образцов (КПО) (3 фрагмента лонжерона интерцептора, 3 фрагмента лонжерона воздушного тормоза, 3 фрагмента обшивки элерона) по технологии автоклавного формования, а также 6 конструктивно подобных образцов (стрингерные панели) по технологии инфузии (рисунок 2). Образцы были изготовлены с различной объемной долей пор в диапазоне от 0 до 4%.

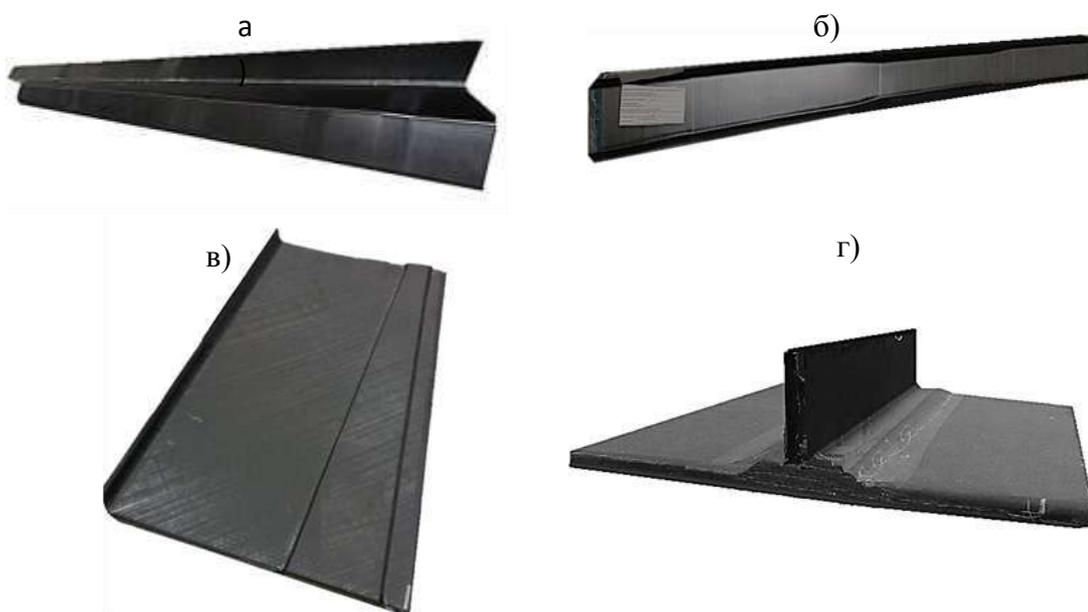


Рисунок 2 – Конструктивно-подобные образцы: а) фрагмент лонжерона интерцептора, б) фрагмент лонжерона воздушного тормоза, в) фрагмент обшивки элерона, г) стрингерная панель

КПО полученные по технологии автоклавного формования были изготовлены из углепластика ВКУ-25 (жгутовый углеродный наполнитель ТОНО TENAX HTS40 (HTS45) и связующее ВСЭ-1212 [12]) , толщины

лонжерона интерцептора и обшивки элерона составили 5,7 мм, толщина лонжерона воздушного тормоза – приблизительно 3,4 мм. КПО полученные по технологии инфузии были изготовлены из однонаправленной углеродной ленты Porcher 4510 и эпоксидного связующего ВСЭ-21, толщины стрингерных образцов составили 4,8 и 17,6 мм.

Для получения объемной доли пористости в КПО деталей и агрегатов крыла самолёта в диапазоне от 0 до 4% был проведен анализ возможных способов получения пористости в углепластике при автоклавном формовании и методом инфузии [13]. В результате анализа для получения пористости были выбраны следующие способы:

- 1) формование без внешнего давления и при сниженном давлении под вакуумным мешком (при автоклавном формовании);
- 2) путем введения в связующее порообразователя (при инфузионном формовании).

Для реализации этих способов были выбраны специальные режимы формования. Для получения нулевой и близкой к нулю пористости формование проводить по штатным режимам.

Исследования КПО лонжерона интерцептора, лонжерона воздушного тормоза и обшивки элерона проводились на автоматизированной установке для ультразвукового контроля Testatom в условиях производства эхо-импульсным методом. При проведении исследования применялся одноэлементный пьезоэлектрический преобразователь с рабочей частотой 5 МГц. Исследование КПО стрингерных панелей, полученных по технологии инфузии проводилось эхо-импульсным методом с использованием фазированных решеток с рабочей частотой 5 МГц. По результатам исследования КПО были записаны полные С-сканы для последующего анализа (рисунки 3 и 4).

По полученным С-сканам с использованием информационных критериев были выбраны зоны и вырезаны на трёхосном фрезерном станке Ceast 100 образцов диаметром 14 мм: 50 – из образцов-свидетелей КПО,

изготовленных из углепластика Porcher 4510/BCЭ-21 по технологии вакуумной инфузии; 50 – из образцов-свидетелей КПО, изготовленных из углепластика ВКУ-25 по технологии автоклавного формования.

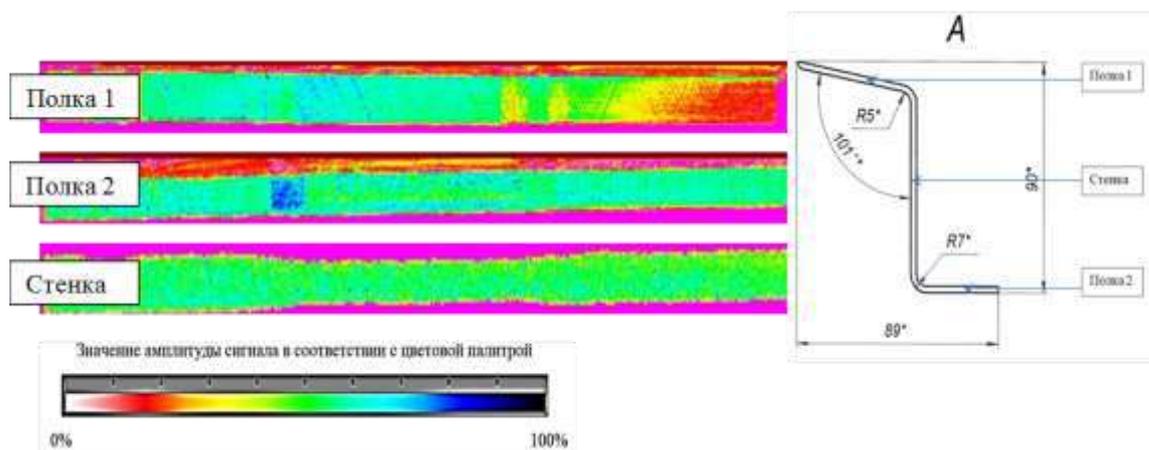


Рисунок 3 – С-сканы КПО фрагмента лонжерона интерцептора

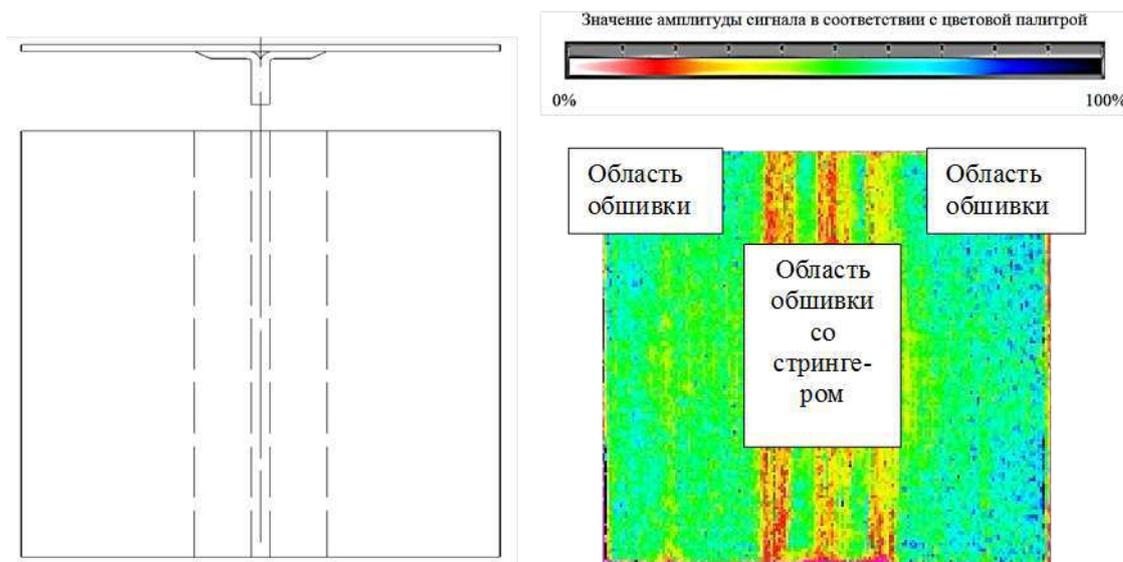


Рисунок 4 – С-сканы КПО стрингерной панели

Определения значения пористости в вырезанных образцах из углепластиков производилось методом рентгеновской микротомографии, обеспечивающим наибольшую точность измерения (выявление несплошностей в углепластике диаметром от 20 мкм), а также построение трёхмерных изображений пор в объёме образцов, что позволяет оценить распределение пор по глубине залегания, а также подтвердить отсутствие в образцах макродефектов существенно влияющих на амплитуду

ультразвукового сигнала и отрицательно влияющих на точность построения корреляционных зависимостей. Определение пористости проводилось с использованием системы промышленной рентгеновской микротомографии Phoenix V|tome|X S 240. В результате для каждого образца была получена томограмма (рисунок 5), распределение пор по объему (рисунок 6) и общие характеристики пористости (таблица 1).

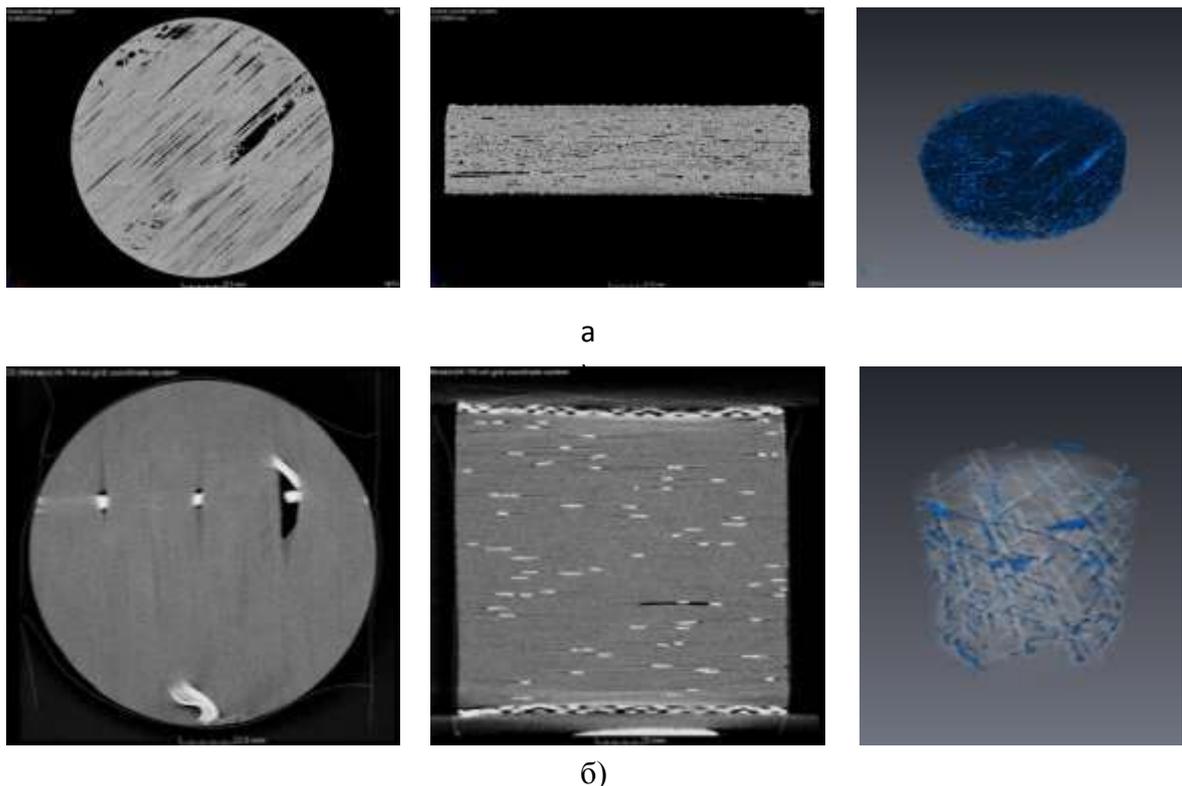


Рисунок 5 – Томография образцов из углепластика: а) томограмма образца из ВКУ-25, б) томограмма образца из Porcher 4510/BCЭ-21

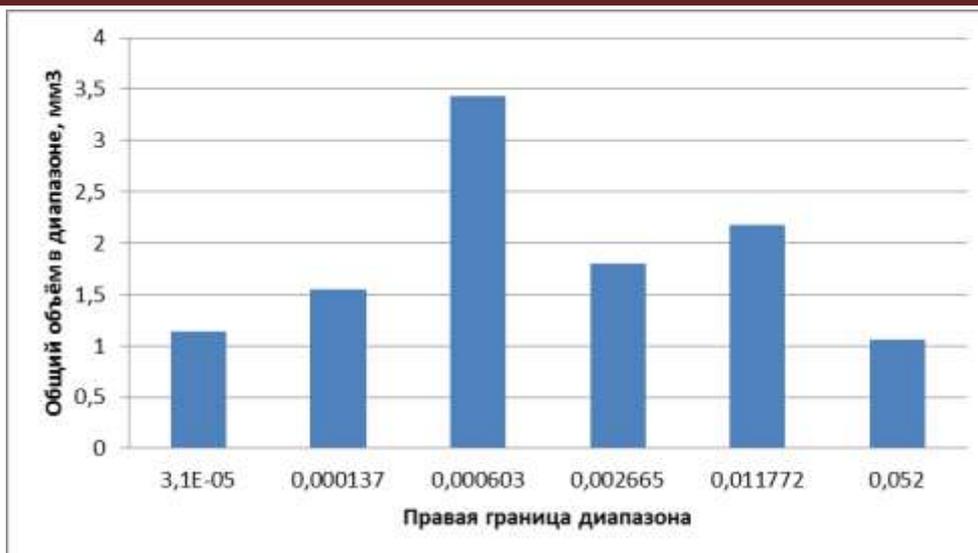


Рисунок 6 – Диаграмма распределения общего объёма пор

Таблица 1

Общие характеристики пористости

62				
	Объём порового пространства	Min	7.53E-06	mm ³
		Max	0.05197859	mm ³
		Mean	9.06E-05	mm ³
		Sum	11.148947	mm ³
	Общий объём образца		810.2924	mm ³
	% соотношение объёма пор.пространства к общ. объёму образца		1.375916521	%
	Количество пор в исследуемом объёме образца		123095	

Результаты исследований

В ходе исследований в качестве информационных критериев были рассмотрены такие параметры как скорость ультразвуковых колебаний в материале образцов, коэффициент затухания в материале, центральная частота донного сигнала, амплитуда донного сигнала. Были построены

корреляционные зависимости между пористостью и указанными величинами (рисунок 7).

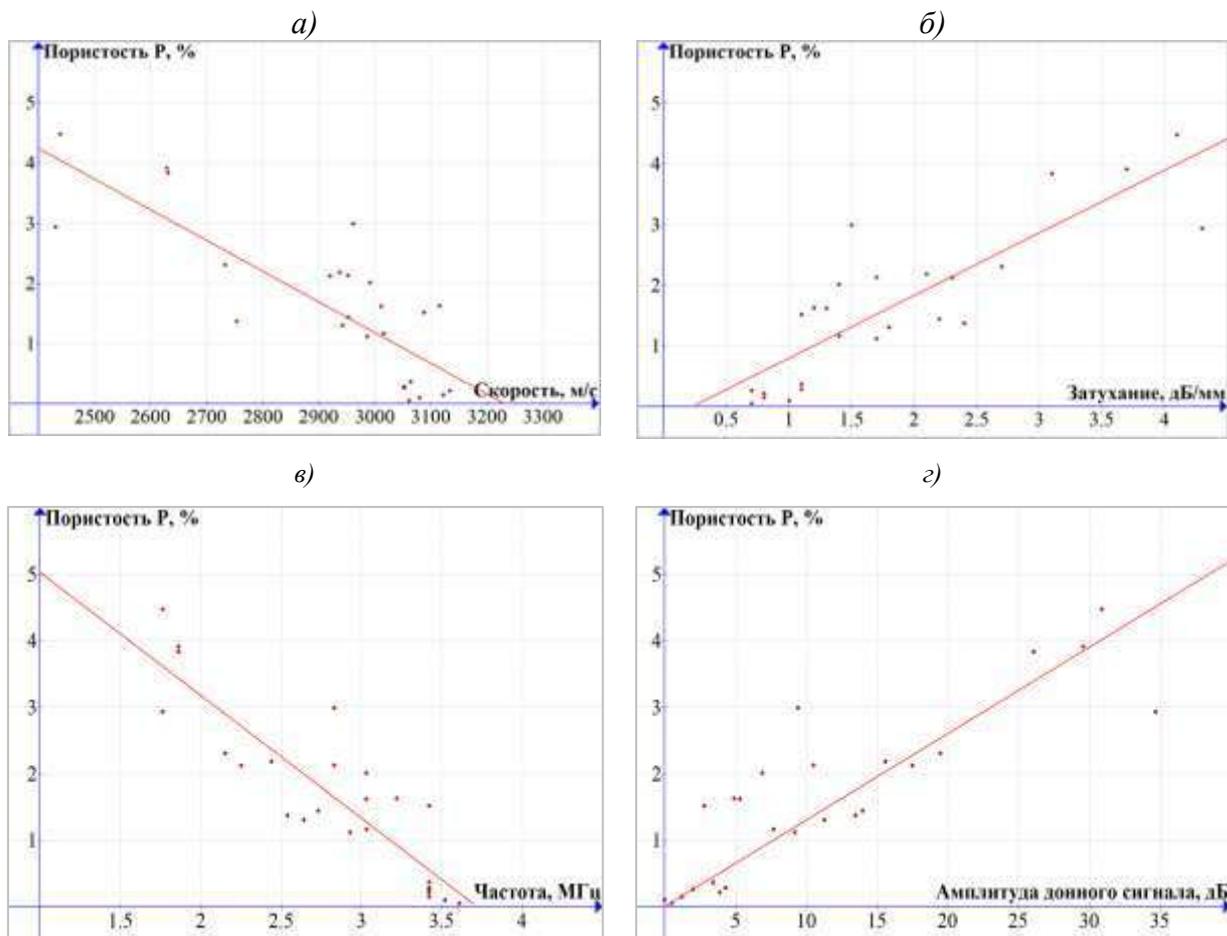


Рисунок 7 – Корреляционные зависимости между пористостью и информационными параметрами для образцов толщиной 5,7 мм из ВКУ-25 а) скоростью ультразвука, б) коэффициентом затухания, в) центральной частотой прошедшего сигнала, г) амплитудой донного сигнала

Все рассмотренные информационные параметры показали высокую степень корреляции с пористостью, но в силу того, что настоящая работа выполнялась для последующего применения разработанного подхода в процессе производства – в качестве информационного параметра была выбрана амплитуда донного сигнала. В ходе работ было установлено, что для регистрации данного информационного параметра требуются наименьшие трудозатраты в процессе штатного контроля, что позволяет вести процесс определения пористости одновременно со штатным контролем. В остальных случаях информационные параметры, такие как скорость ультразвуковых

колебаний, коэффициент затухания и центральная частота донного сигнала требуют больших трудо- и времязатрат, и в процессе штатного контроля не применимы.

В результате исследований построены корреляционные зависимости и рассчитаны уравнения связи между величиной объёмной доли пор и амплитудой сигналов (донных эхо-сигналов, дБ) при ультразвуковом контроле КПО из ПКМ, полученных автоклавным формованием и инфузией (рисунок 8). Построенные корреляционные зависимости и уравнения связи вошли в технологические рекомендации ТР 1.2.2592-2017 «Автоматизированный неразрушающий ультразвуковой контроль пористости деталей и агрегатов механизации самолёта из ПКМ, полученных автоклавным формованием, с применением одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей» и ТР 1.2.2593-2017 «Автоматизированный неразрушающий ультразвуковой контроль пористости деталей крыла самолета из углепластика, полученного инфузией, с применением фазированных решёток».

По 4-м наборам статистических данных и соответствующим корреляционным зависимостям (рисунок 8) были посчитаны значения абсолютных погрешностей определения пористости по ТР 1.2.2593-2017 в углепластике Porcher4510/ВСЭ-21, получаемом методом вакуумной инфузии, и по ТР 1.2.2592-2017 в углепластике ВКУ-25, получаемом методом автоклавного формования. Эти значения составили 0,25 % и 0,78 % соответственно. Достаточно большое значение абсолютной погрешности, полученной по ТР 1.2.2592-2017, обусловлено тем, что на параметры ультразвуковых донных эхо-сигналов оказывает влияние морфология и пространственное распределение пор, образующихся в углепластике при автоклавном формовании. Это было установлено при анализе данных зависимости амплитуд донных эхо-сигналов от значений величины объёмной доли пористости, ее морфологии и пространственного распределения в

углепластике ВКУ-25, полученных по результатам рентгеновской томографии.

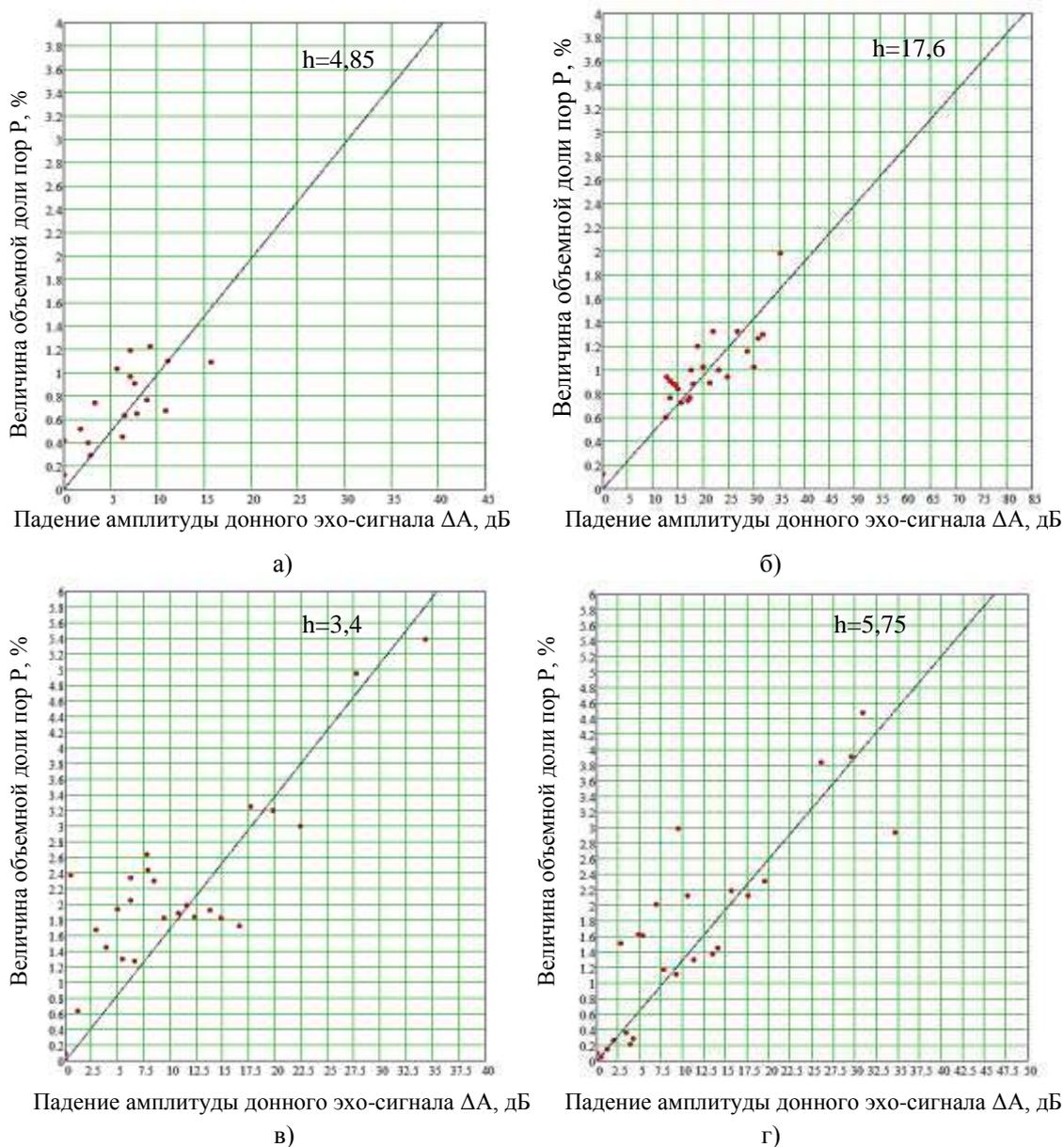


Рисунок 8 – Корреляционные зависимости между величиной объёмной доли пор и падением амплитуды донного эхо-сигнала: а) и б) для углепластика Porcher4510/BCЭ-21; в) и г) для углепластика ВКУ-25

Как видно из рисунка 8, корреляционные зависимости между пористостью и амплитудой донного сигнала значительно отличаются для образцов полученных по технологии автоклавного формования и образцов полученных по инфузионной технологии. Это явление связано с тем, что, как было отмечено ранее, образцы отличаются технологией изготовления,

толщиной монослоя и т.п. Так при анализе томограмм было установлено, что в исследуемом диапазоне пористости в образцах из углепластика ВКУ-25 объем каждой поры лежит в диапазоне от 7×10^{-6} до $0,8 \text{ мм}^3$, а в образцах из углепластика Porcher4510/ВСЭ-21 объем каждой поры лежит в диапазоне от 7×10^{-6} до $15,8 \text{ мм}^3$. Т.е. при одинаковом значении пористости, распределение размеров пор в образцах полученных по различным технологиям может значительно отличаться (максимальное распределение объема единичных пор в инфузионных образцах больше чем в автоклавных образцах на 2 порядка). Наибольшее влияние на эту ситуацию оказывает механизм изготовления образцов: в случае автоклавного формования — изначально используется наполнитель с нанесенной эпоксидной смолой, и поэтому поры имеют более сферическую форму, а в случае инфузионного формования — используется сухая ткань, которая в процессе формования пропитывается связующим, и поэтому поры имеют более продолговатую форму, растягиваясь вдоль волокон, а в случае ткани Porcher 4510, также наблюдаются поры, которые располагаются вдоль утка.

Таким образом, кроме объемной доли пор на амплитуду донного сигнала сильно влияет размер пор и их распределение, т.к. с увеличением размера пор, а также скопление их в соседних слоях, а не по всему объему образца приводят к увеличению затухания ультразвука. Выходом из этой ситуации может выступить следующий подход: т.к. задача определения пористости изначально ставится по причине значительно влияния пористости на прочность композиционно материала, то более «правильным» решением может выступить подход по построению корреляционной связи между параметрами ультразвукового сигнала и прочностью материала.

Выводы

Проведен ряд исследований на конструктивно-подобных образцах, изготовленных по технологии автоклавного формования и по технологии инфузии с объемной долей пор в диапазоне от 0 до 4%. В качестве информационного параметра для построения корреляционной связи с

объемной долей пор в композиционных материалах выбрана амплитуда донного эхо-сигнала, т.к. остальные информационные параметры оказались малоприменимы в условиях производства. Все исследуемые образцы подвергнуты рентгеновской томографии, для точного определения объемной доли пор в них. В результате исследований построены корреляционные зависимости и уравнения связи между объемной долей пор и амплитудой донного эхо-сигнала для двух типов материалов. Полученные зависимости позволяют определять пористость деталей и агрегатов механизации самолёта из ПКМ, полученных автоклавным формованием, и пористость деталей крыла самолета из углепластика, полученного инфузией в диапазоне от 0 до 4 %. Посчитаны значения абсолютных погрешностей определения пористости в образцах, полученных по автоклавной технологии и в образцах, полученных по инфузионной технологии. Эти значения составили 0,25 % и 0,78 % соответственно.

По результатам исследований разработаны две технологические рекомендации для определения пористости в деталях и агрегатах крыла самолета МС-21: ТР 1.2.2592-2017 «Автоматизированный неразрушающий ультразвуковой контроль пористости деталей и агрегатов механизации самолёта из ПКМ, полученных автоклавным формованием, с применением одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей» и ТР 1.2.2593-2017 «Автоматизированный неразрушающий ультразвуковой контроль пористости деталей крыла самолета из углепластика, полученного инфузией, с применением фазированных решёток».

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4(2), С. 686–693.

3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI век. Перспективы и задачи. // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М., 2002. С. 23–47.

4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы - основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.

5. Practical Applications “New” NDT Techniques on Composite Material in the Aerospace Industry // TiaT Europe bv – The Netherlands. 2014. URL: http://ndt.aero/images/Presentation_26_Nov_2014.pdf (дата обращения 20.12.2017).

6. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами // В. В. Мурашов. - Москва : Спектр, 2016. - 242 с.

7. D. E. W. Stone, B. Clarke. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics // Non-Destructive Testing, Volume 8, Issue 3, June 1975, Pages 137-145. DOI: 10.1016/0029-1021(75)90023-7.

8. ZHU Hong-yan, LI Di-hong, ZHANG Dong-xing, WU Bao-chang, CHEN Yu-yong. Influence of voids on interlaminar shear strength of carbon/epoxy fabric laminates // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 19, Supplement 2, September 2009, Pages s470-s475. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60091-X.

9. Душин М.И., Хрульков А.В., Караваев Р.Ю. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из ПКМ, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015 №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.

10. Ulf Schnars, Rudolf Henrich. Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry // Airbus Operations GmbH. Bremen. URL: <http://www.ndt.net/article/cdcm2006/papers/schnars.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).

11. Диков И.А., Бойчук А.С. Способы определения объемной доли пор в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017 №2. С. 80-95. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-10-10.

12. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016 №4. С. 106-114. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.

13. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А. Изготовление тест-образцов из углепластика с различной пористостью для разработки методик оценки пористости неразрушающим методом // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017 №1. С. 92-98. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.12.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-11.

УДК 620.179.1

Дефектность материала основных деталей ГТД и оценка вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле

Далин М.А.¹; Ложкова Д.С.¹; Краснов И.С.¹

Viam-dma@mail.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Современные подходы к расчету безопасного ресурса ГТД позволяют учесть вероятность разрушения ответственных деталей из-за дефектов, пропущенных при неразрушающем контроле. Для реализации этих расчетов необходима либо количественная информация о вероятности наличия в материале детали дефектов того или иного размера, либо, как минимум, информация о вероятности обнаружения или пропуска дефекта при неразрушающем контроле, которому эта деталь подвергалась. В статье рассказывается о работах авторов, направленных для получения этих данных, и о ближайших перспективах работ в этой области. Разработана общая методология и математический аппарат для обработки статистических данных об обнаруженных дефектах, который позволяет рассчитать ожидаемое количество дефектов в материале ГТД. Исследована вероятность обнаружения дефектов при ультразвуковом, капиллярном, магнитопорошковом контроле ряда основных деталей ГТД и их заготовок.

Ключевые слова:

газотурбинный двигатель, неразрушающий контроль, дефект

1. Необходимость получения данных о дефектности материала и вероятности обнаружения дефектов

При расчете и подтверждении ресурса авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), необходимых для сертификации двигателя и его безопасной эксплуатации, особое внимание уделяется основным деталям, ресурс которых устанавливается в циклах. К основным относят детали двигателя, разрушение которых в полете приводит к опасным, связанным с двигателем, последствиям. Перечень основных деталей ГТД для конкретного изделия устанавливается конструктором и может меняться в зависимости от модели. Диски турбин и компрессоров, а также диски вентилятора, барабаны бустера, цапфы и другие роторные детали при разрушении могут повредить конструкции самолета, поэтому их обычно относят к основным деталям. Под воздействием циклических нагрузений имеющийся в детали дефект металлургического происхождения может вызвать рост усталостной трещины и разрушение детали. Это обстоятельство является ключевым фактором, ограничивающим ресурс двигателя. Один из наиболее современных подходов к расчету безопасного ресурса ГТД, основанный на концепции допустимых повреждений, предусматривает применение в качестве входных данных количественной информации о дефектности материала – зависимости ожидаемого количества дефектов в единице массы материала от размера этих дефектов и/или вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле при производстве деталей и эксплуатации ГТД. Подобный подход к расчету ресурса допускается текущей редакцией авиационных правил РЦ АП33.70-1 и привлекает передовые авиационные КБ, так как может дать их разработкам конкурентные преимущества по сравнению с традиционным подходом.

В ФГУП «ЦИАМ» в настоящий момент имеется специализированное программное обеспечение «*DARWIN*», которое позволяет проводить ресурсные расчеты деталей ГТД. Входными данными для расчета в этом ПО являются, конечно же, прочностные характеристики материала и условия

нагрузки детали в полете. Но, кроме этого, для расчета необходимы оценки ожидаемого количества металлургических дефектов различного размера в материале детали (а рисунок 1) и вероятности обнаружения дефектов типа усталостных трещин при неразрушающем контроле в условиях технического обслуживания и ремонта двигателя (б рисунок 1). Итоговым результатом расчета является график, характеризующий вероятность разрушения детали после N полетов (в рисунок 1).

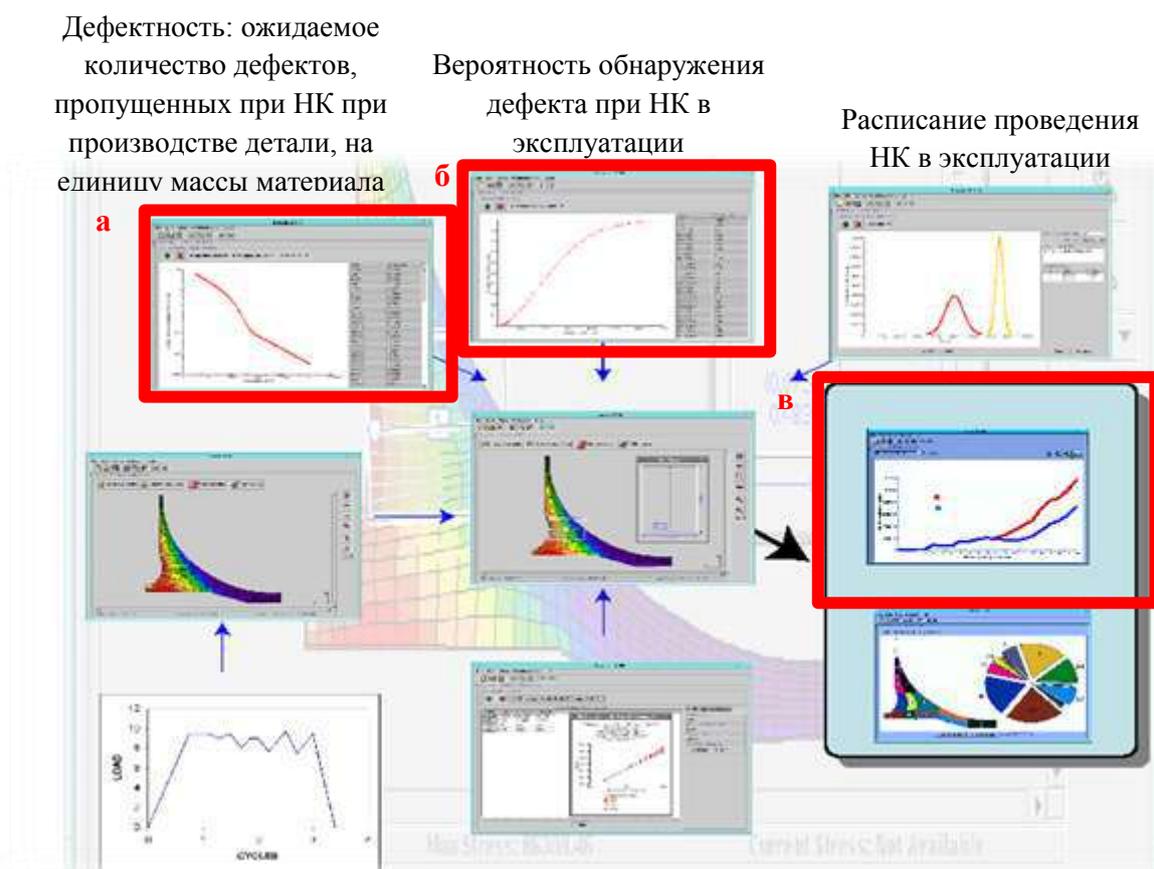


Рисунок 1 – ПО «DARWIN»: расчет вероятности разрушения основной детали в течение одного полетного цикла с учетом вероятности обнаружения дефектов при НК (с веб-сайта SWRI)

На рисунке 1 (в) красный график показывает вероятность разрушения детали без НК, синий – если проведение НК в эксплуатации запланировано. Задавшись допустимой величиной риска (обычно около одной миллионной), по этому графику можно определить безопасный ресурс детали. Первая составляющая исходных данных (рисунок 1, а) – график дефектности, характеризующий количество дефектов, пропущенных при неразрушающем

контроле, данного или большего размера в единице массы материала как функцию размера, с заданной доверительной вероятностью.

2. Оценка дефектности материала основных деталей ГТД

В настоящий момент общая методология оценки дефектности полуфабрикатов основных деталей ГТД из жаропрочных никелевых гранулируемых и деформируемых жаропрочных никелевых сплавов, титановых сплавов, а также их сварных соединений находится в стадии становления. В РЦ АП 33.70-1 отмечено, что работа по количественной оценке содержания внутренних дефектов фактически завершена только для одного класса материалов – титановых сплавов зарубежного производства [5].

Количественная оценка дефектности может быть выполнена различными методами, но по зарубежному опыту [4], наиболее эффективный способ заключается в математической обработке данных:

- о вероятности обнаружения дефекта используемым методом неразрушающего контроля;
- о количестве материала, прошедшего неразрушающий контроль;
- о количестве обнаруженных в процессе контроля дефектов;
- о размере обнаруженных дефектов, установленном по результатам их металлографического исследования.

Очевидно, что чем больше статистика обнаруженных дефектов, тем точнее будет результат оценки дефектности материала.

Начав в 2013 году с изучения зарубежного опыта оценки дефектности титановых сплавов, специалисты ФГУП «ВИАМ» попытались разработать методологию такой оценки, общую для всех материалов основных деталей ГТД. Были восстановлены формулы, по которым проводился расчет дефектности титановых сплавов пр-ва США. Были опробованы и описаны в разработанной методике передовые способы металлографического исследования (рисунок 2), исключая ошибку в оценке реальных размеров образцов, которая была допущена исследователями из США.

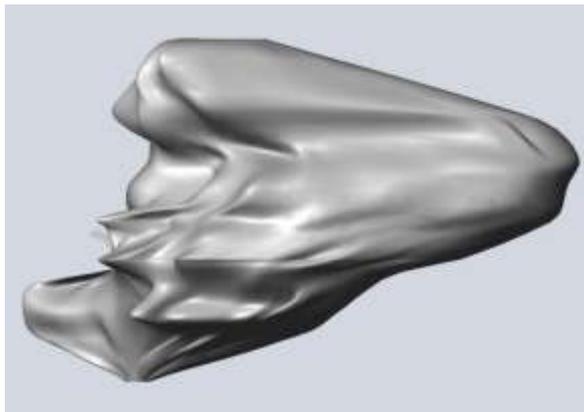


Рисунок 2 – Пример реставрации трехмерного изображения дефекта по результатам съемки 16 сечений в образце

Однако достаточно быстро выяснилось, что отечественная статистика выявления дефектов, пригодная для обработки по указанным формулам, для большинства материалов отсутствует. В некоторых случаях, за весь период выпуска того или иного материала, по которому есть документально подтвержденная статистика НК, в нем не было обнаружено ни одного металлургического дефекта. Поэтому был разработан математический аппарат, позволяющий построить непрерывную кривую распределения размеров дефектов при наличии небольшого (менее 10) количества обнаруженных и исследованных дефектов, и даже при полном отсутствии обнаруженных дефектов [1]. Работы по оценке дефектности в настоящее время продолжаются. Разработанный математический аппарат статистической обработки данных был в 2017 году дополнен возможностью учета того, что различные зоны детали могут быть проконтролированы разными методами с отличающимися параметрами достоверности контроля. В перспективе мы планируем исключить необходимость разбиения диапазонов размеров дефектов на поддиапазоны, и распространить полученные результаты на более широкий класс материалов и методов контроля.

Авторами доклада также был предложен подход, применение которого направлено на повышение скорости накопления информации о дефектах сварных соединений титановых сплавов, полученных по технологии

электронно-лучевой сварки. В дальнейшем на основе этих данных, а также известной зависимости вероятности обнаружения дефектов планировалось проводить оценку дефектности материала. В качестве методов неразрушающего контроля в зависимости от оснащенности предприятия рекомендовалось использовать рентгеновскую томографию, иммерсионный ультразвуковой контроль на повышенной чувствительности с последующим проведением металлографических исследований с целью определения размеров и типа внутренних несплошностей. Аналогичный подход, в основу которого закладывались томографические исследования, был использован в работах [3] для определения обратной кумулятивной функции распределения размеров дефектов, характеризующей количество дефектов, размер которых варьируется в некотором диапазоне, в единице объема материала для гранулируемого жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП. Исследовались образцы из различных партий и плавов, изготовленных в условиях АО «СМК», а также образцы диска ТНД.

3. Вероятность обнаружения дефектов при неразрушающем контроле деталей ГТД и их заготовок

Как было показано выше, для того, чтобы построить зависимость дефектности материала на единицу объема материала, необходима информация о достоверности проводимого неразрушающего контроля. Но это не единственное назначение этой информации.

На рисунке 1 (в) можно видеть график вероятности обнаружения дефекта при НК в эксплуатации и ремонте ГТД. Он может быть использован для того, чтобы объективно учесть влияние этого НК на ресурс.

В РЦ АП 33.70-1 предусматривается и упрощенная модель расчета ресурса с учетом риска разрушения детали из-за дефекта, пропущенного при неразрушающем контроле. При отсутствии данных о дефектности материала детали, в качестве исходных данных для расчета берутся размеры дефектов, внутренних и поверхностных, выявляемых различными методами неразрушающего контроля с вероятностью 90%. Необходимость определения

этих размеров дефектов установлена выпущенным ФГУП «ЦИАМ» ОСТ 1.01207 «Неразрушающий контроль основных деталей двигателя». Данный документ обязывает моторостроительные предприятия проводить численную оценку вероятности обнаружения дефектов при НК, при которой могут быть найдены основные показатели выявляемости дефектов. Расчет показателей выявляемости проводится при специальных испытаниях системы НК основных деталей ГТД и заключается в определении вероятности обнаружения дефекта заданного размера или размера дефекта, обнаруживаемого с вероятностью 50, 90 и 95 % при доверительной вероятности 50 %, а также размера дефекта, обнаруживаемого с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95 %. То есть, и для реализации упрощенного подхода, вероятностная оценка достоверности результатов неразрушающего контроля также необходима.

Таким образом, возрастающую важность работ по оценке вероятности обнаружения дефектов при НК сложно переоценить. Это направление исследований выделено в отдельную задачу в разработанных ФГУП «ВИАМ» «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.». Знание вероятности обнаружения дефектов позволяет сравнивать и обоснованно выбирать методику и оборудование для неразрушающего контроля, позволяет предприятию-заказчику объективно оценивать эффективность системы НК предприятия-поставщика полуфабрикатов и т.д. В настоящий момент уже началась складываться общепринятая система взглядов, регламентирующая необходимость подтверждения уровня разрабатываемых новых методик контроля путем проведения вероятностной оценки достоверности контроля, проводимого по ним. Однако основным назначением вероятностной оценки надежности НК при контроле деталей авиационной техники является, по нашему мнению, ее применение при расчете и подтверждении ресурса основных деталей ГТД.

Коллективом лаборатории неразрушающего контроля ФГУП «ВИАМ», совместно со специалистами ФГУП «ЦИАМ» был выполнен ряд научно-исследовательских работ в области оценки достоверности неразрушающего контроля, в основном посвященных титановым сплавам [6, 7]. В 2016–2017 г. полученный научный задел был использован при выполнении оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле основных деталей двигателя ПД-14, изготовленных из никелевых жаропрочных сплавов, титановых сплавов и сталей. Усовершенствованы алгоритмы, использованные при математическом моделировании ультразвукового контроля титановых сплавов. Для ультразвукового контроля впервые был разработан и обоснован подход к созданию имитаторов внутренних дефектов в образцах, учитывающий особенности морфологии деформируемых жаропрочных сплавов и сталей. Разработано, изготовлено и паспортизовано 88 образцов, содержащих более 700 искусственных дефектов известного размера и формы. Проведены экспериментальные исследования в условиях трех заводов, входящих в кооперацию по изготовлению двигателя ПД-14, с участием дефектоскопистов этих заводов. Численно оценена выявляемость дефектов для 4 методов НК в 22 основных деталях двигателя ПД-14, в их заготовках и сварных соединениях. Результаты работы использованы заказчиком для подтверждения сертификационного базиса двигателя и принятия решения о необходимости совершенствования НК ряда основных деталей.

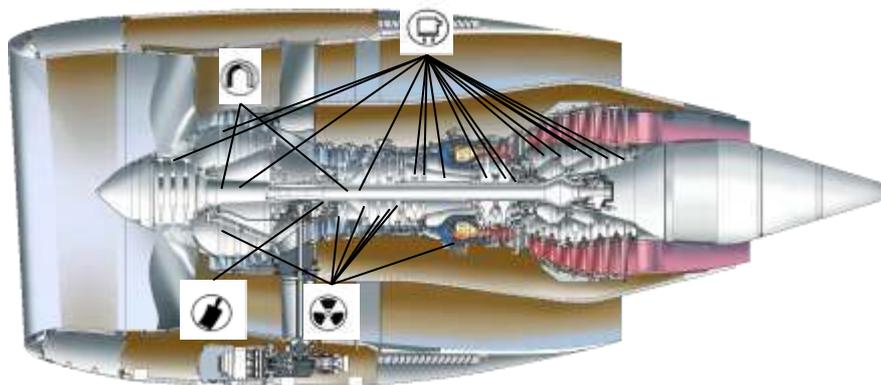


Рисунок 2 – Основные детали двигателя и методы НК, эффективность которых была исследована

В 2018г. планируется продолжение работ в направлении разработки методического обеспечения оценки вероятности обнаружения дефектов в основных деталях перспективного ГТД, при этом область исследований будет дополнена вихретоковым методом контроля, ультразвуковым и капиллярно-люминесцентным контролем деталей в условиях ремонта. В объекты контроля будут добавлены диски из гранулируемых никелевых жаропрочных сплавов.

Литература

1. Ложкова Д.С., Краснов И.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок дисков ГТД из титановых сплавов // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 61–67.
2. Ложкова Д.С., Краснов И.С. Экспериментальные исследования по оценке дефектности сварных соединений основных деталей ГТД // «Дефектоскопия» 15, 2015. №2. С. 10–16.
3. Артамонов М. А. и др. Исследование методами рентгеновской томографии и электронной микроскопии дефектов и их распределения в гранулируемом никелевом сплаве ЭП741НП // Сборник статей научно-технической конференции «Климовские чтения-2017. Перспективные направления развития двигателестроения», 2017. С. 111–117.

4. The development of anomaly distributions for aircraft engine titanium disk alloys, American Institute of Aeronautic and Astronautic, 1997.

5. FAA Advisory Circular: AC 33.14-1, titled “Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors”. Washington, U.S. Dpt of Transportation, Federal Aviation Administration. 2001.

6. Ложкова Д.С. Оценка влияния различных факторов на вероятность обнаружения дефектов при неразрушающем контроле деталей газотурбинных двигателей. // Физико-химия и технология неорганических материалов. VIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов. Сборник материалов. 2011. С. 184.

7. Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля титановых сплавов с использованием математического моделирования // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4 (66). С. 15–19.

8. Ложкова Д.С. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля полуфабрикатов основных деталей ГТД из титанового сплава с использованием математической модели // "Контроль. Диагностика" 2017. №12. С. 54–63.

УДК539.3

Тепловой метод и средства контроля текстильных броневых преград в процессе взаимодействия с поражающими элементами

Козельская С.О.¹

Kozelskaya.sofik1977@yandex.ru; tsniism@tsniism.ru

¹АО «Центральный научно-исследовательский институт специального
машиностроения», г. Хотьково, Московской обл.

Аннотация:

Разработан тепловой метод контроля качества композитных броневых преград на основе анализа динамических температурных полей, образующихся в процессе взаимодействия бронезащиты с поражающими элементами для повышения ее эффективности.

Ключевые слова:

диагностика качества, броневая преграда, температурное поле, поражающий элемент, математическая модель, коэффициент теплового эффекта.

В средствах индивидуальной броневой защиты личного состава широкое применение находят полимерные конструкционные материалы в виде тканей из высокопрочных волокон различной природы (арамидных, сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых). Перед разработчиками броневых преград стоят задачи повышения их защитных свойств, что требует использования объективных методов как разрушающего, так и неразрушающего контроля качества применяемых материалов и готовых изделий, позволяющих результативно использовать данные испытаний при проектировании бронезащиты.

Проблемы контроля качества бронезащиты и физические процессы, протекающие при взаимодействии ПЭ с броневыми преградами, рассматривались в работах Е.Ф. Харченко, А.Ф. Ермоленко, В.М. Маринина, В.А. Хромушкина, Ю.И. Дмитриенко, О.Н. Будагина и многих других ученых. Благодаря проведенным исследованиям установлены механизмы поглощения кинетической энергии при ударе ПЭ в бронезащиту, разработаны и апробированы методы контроля её качества.

В настоящее время оценка защитных свойств осуществляется главным образом с помощью стендовых испытаний, которые состоят в экспериментальном определении максимальной скорости поражающего элемента (ПЭ) и структуры броневое материала, при которых не происходит проникновения ПЭ сквозь него. В качестве критериев качества броневой преграды используются: глубина проникания при остановке ПЭ; продолжительность проникания ПЭ; давление, оказываемое на ПЭ при проникании; переходная скорость (скорость, выше которой происходит проникание и ниже которой ПЭ отклоняется); критическая скорость ПЭ, при которой броня пробивается с вероятностью 50%.

Однако такие обобщённые критерии не позволяют оценить вклад различных физических процессов, протекающих при взаимодействии ПЭ и бронезащиты, в общее поглощение кинетической энергии. Тем самым затруднён анализ пространственного распределения интенсивности энергопоглощения по слоям многослойной композитной брони и по каждому слою в плане, а это не позволяет оптимизировать конструкцию броневой преграды для повышения качества защиты.

Выделение энергии при действии ПЭ на броневую преграду сопровождается образованием динамического (изменяющегося во времени и пространстве) температурного поля на поверхности броневой преграды, характеристики которого зависят от кинетической энергии пули, от характера взаимодействия ПЭ и материала, а также, структуры броневой преграды. Поэтому представляется перспективным исследование и разработка

теплового метода неразрушающего контроля и технической диагностики качества броневой преграды в процессе ее взаимодействия с ПЭ.

Цель работы – разработка теплового метода контроля качества композитных броневых преград на основе анализа динамических температурных полей, образующихся в процессе взаимодействия бронезащиты с поражающими элементами для повышения ее эффективности.

Разработана математическая модель, описывающая процесс энерговыделения при взаимодействии быстроперемещающегося ПЭ с различными слоями многослойной текстильной броневой преграды, что обеспечивает необходимую оперативность обработки результатов измерений.

Рассматривается слоистый тканый образец прямоугольной формы (рис. 1). Объект содержит следующие структурные элементы: податливое основание, поражающий элемент (ПЭ) и пакет слоёв ткани, в котором необходимо выделить отдельную зону контакта с ПЭ.

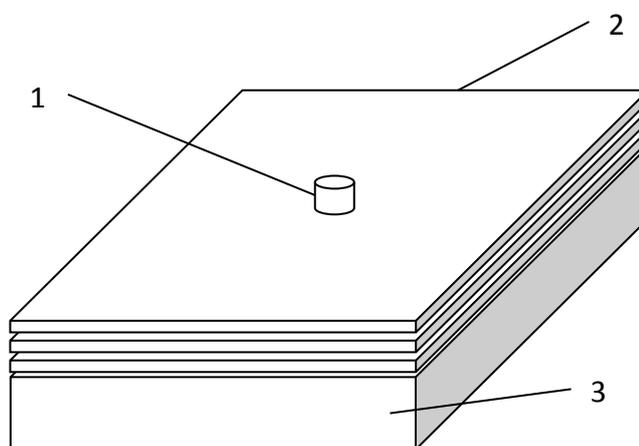


Рисунок 1 – Слоистый тканый образец с поражающим элементом: 1 – поражающий элемент, 2 – слои ткани, 3 – основание

Каждый слой образован двумя взаимно перпендикулярными семействами нитей – утком и основой, причём углы между направлением

основы и кромкой образца в разных слоях могут различаться. Образец находится на податливом основании. В момент удара центральная часть образца контактирует с ПЭ, масса M и начальная скорость V_0 которого известны и являются переменными (параметрами), характеризующими воздействия. В процессе взаимодействия с ПЭ происходит его замедление.

На Рисунке 2 приведена схема расположения системы координат на моделируемом объекте.

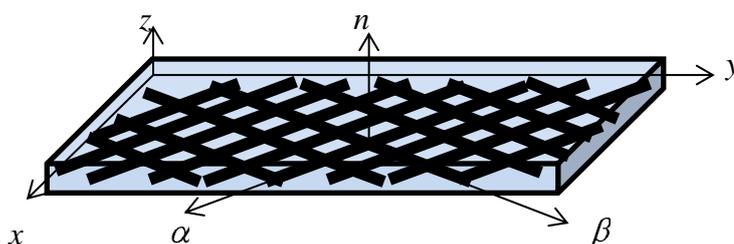


Рисунок 2 – Эйлера система координат (x, y, z) и лагранжева система координат слоя (α, β, n)

Кинетическая энергия ПЭ переходит в работу сил трения нитей, работу структурных изменений и разрушения материала нитей, необратимую работу напряжений в основании и нагрев образца, ПЭ и нитей. При этом изменяются во времени переменные состояния – выходные параметры модели: перемещения U , скорости \dot{U} , внутренние напряжения Σ и температура T .

Разработана математическая модель, отображающая переменные воздействия $\Xi = \{M, V_0\}$ на переменные состояния $H = \{U, \dot{U}, \Sigma, T\}$:

$$H = \Psi(\Xi). \quad (1)$$

Выполним декомпозицию модели по процессам (рис. 3). Для краткости не показаны производные по времени: если параметр состояния является выходной переменной математической модели процесса, то тем самым и скорость его изменения также получается из той же модели.



Рисунок 3 – Схема взаимодействия процессов

Движение малого элемента массы средней плотностью ρ будет описываться уравнением движения, связывающим ускорение с плотностью и действующими напряжениями:

$$\ddot{U} = \ddot{U}(\Sigma) \quad (2)$$

(точкой здесь и далее обозначена производная по времени).

Входными переменными для процесса движения являются напряжения, выходными – кинематические параметры (скорости и перемещения) в конце достаточно малого временного шага. Изменение скоростей и перемещений приводит к изменению локальных кинематических параметров – деформаций ε и скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}$, включая величины, характеризующие взаимное проскальзывание нитей внутри слоя. Изменение кинематических параметров приводит к изменению напряжённого состояния пакета, которое обусловлено деформациями слоёв ткани и взаимным смещением нитей в них:

$$\Sigma = \Sigma(\Sigma_0, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \varepsilon_H), \quad (3)$$

где Σ_0 – напряжения в отсчётный момент времени, ε_H – необратимые деформации.

Изменение деформаций и напряжений приводит к накоплению необратимых деформаций ε_H :

$$\varepsilon_H = \varepsilon_H(\Sigma, \varepsilon), \quad \dot{\varepsilon}_H = \dot{\varepsilon}_H(\Sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}), \quad (4)$$

При этом мощность напряжений на скоростях необратимых деформаций даёт прирост необратимо рассеянной энергии W_H :

$$W_H = W_H(\Sigma, \dot{\epsilon}_H). \quad (5)$$

Эта энергия частично переходит в тепло, что вызывает изменение адиабатической температуры материала и приводит к теплопереносу за счёт теплопроводности и теплоотдачи в окружающую среду.

С использованием разработанной математической модели проведены теоретические исследования возможности теплового контроля качества броневой преграды в процессе взаимодействия с поражающим элементом на предмет оценки ее энергопоглощающей способности.

На Рисунке 4 а, б, приведены диаграммы смещения нитей при различных углах армирования.

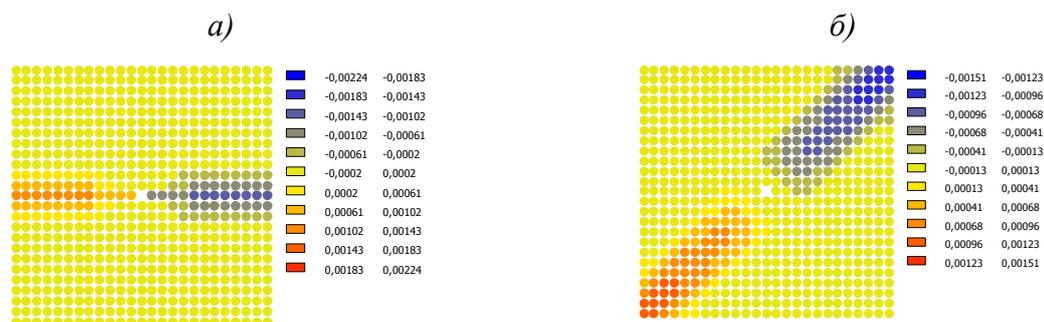


Рисунок 4 – Смещения нитей основы относительно утка, при углах армирования:
 $a - 0^\circ$, $б - 45^\circ$

Из рисунка 4 видно, что диаграммы достоверно отражают поведение нитей при взаимодействии с поражающим элементом.

На рисунке 5 (а, б, в) приведены, в качестве примера, результаты расчета адиабатической температуры поверхности при различной скорости ПЭ:

Из рисунка 5 видно, что в последнем случае ПЭ пробил броневую преграду и температура локализована в центральной области.

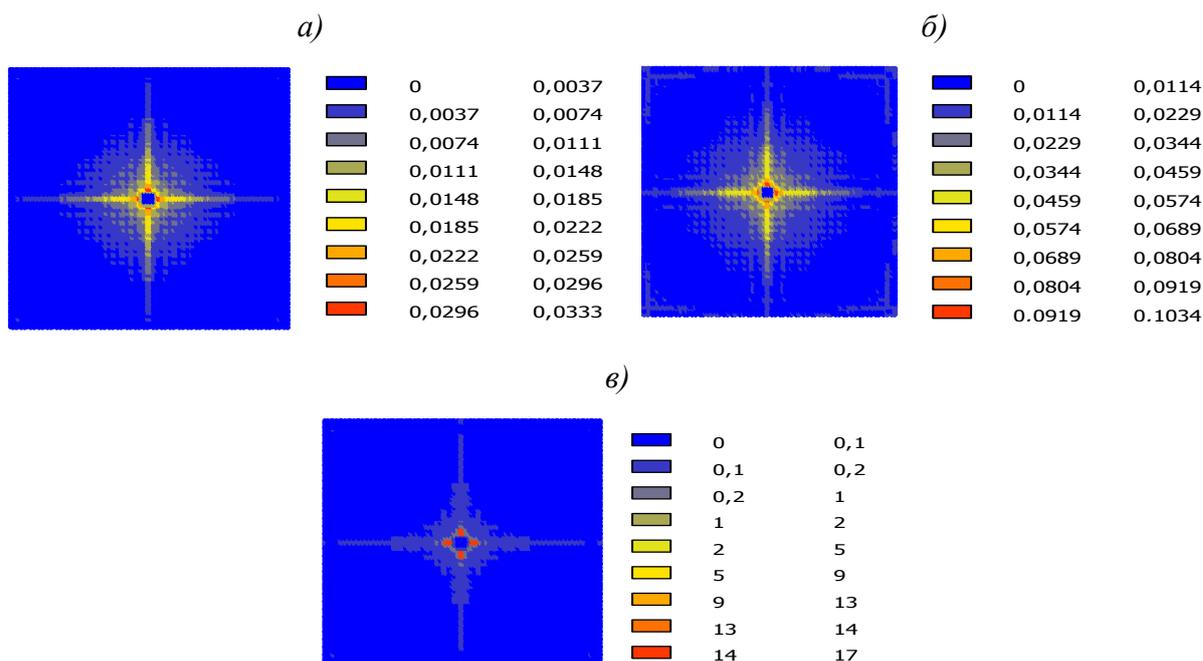


Рисунок 5 – Адиабатическая температура поверхности при начальной скорости: *a* – 100 м/с, *б* – 200 м/с, *в* – 500 м/с.

Более показательное распределение плотности рассеянной энергии. На рисунке 6 показано распределение работы растягивающих напряжений на необратимых деформациях.

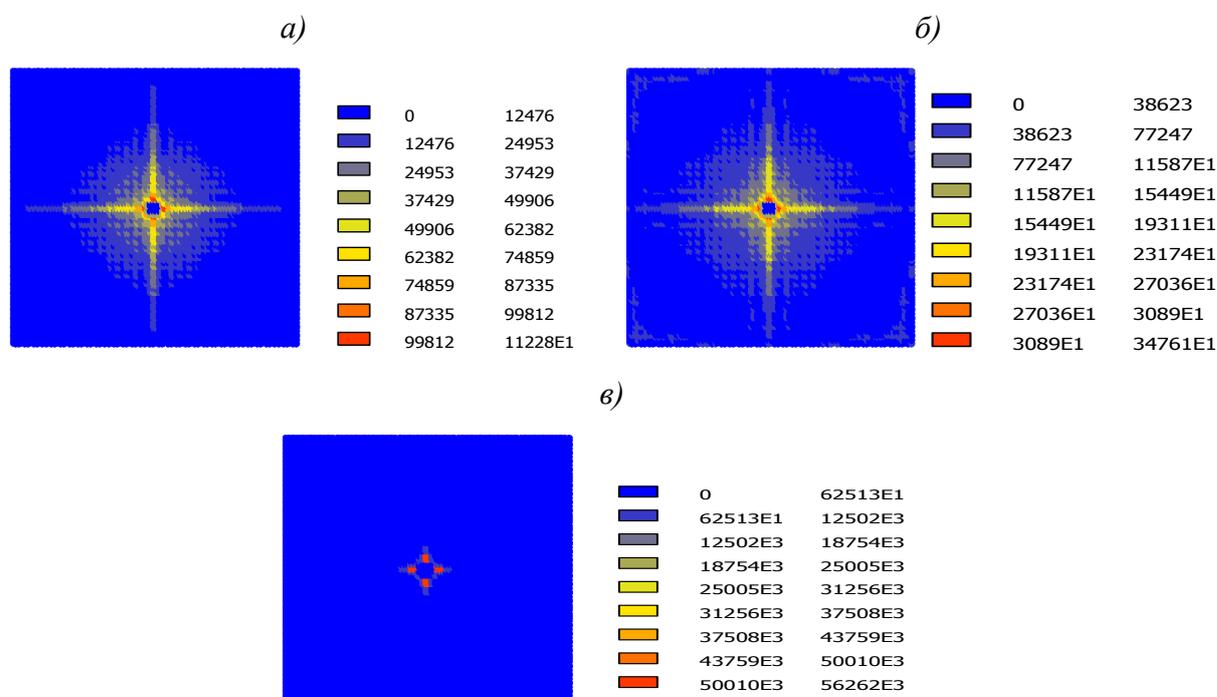


Рисунок 6 – Работа растягивающих напряжений, Дж/м³, на необратимых деформациях при начальной скорости: *a* – 100 м/с, *б* – 200 м/с, *в* – 500 м/с.

Из рисунка 6 видно, что в последнем случае ПЭ пробил броневую преграду, и энергия растягивающих напряжений локализована в центральной области (в области взаимодействия ПЭ с броневой преградой, т.к. ПЭ не успел растянуть нити).

Обработка результатов теоретических исследований позволила определить ряд зависимостей, описывающих процесс взаимодействия броневой преграды и ПЭ, что позволяет прогнозировать характеристики исследуемой конструкции.

Экспериментальные исследования проводились в три этапа

Этап 1 – экспериментальные исследования характеристик нитей (Руслан-ВМ-600) броневой преграды на разрывных машинах с целью идентификации определяющих уравнений математической модели для обеспечения количественного согласования с экспериментальными данными.

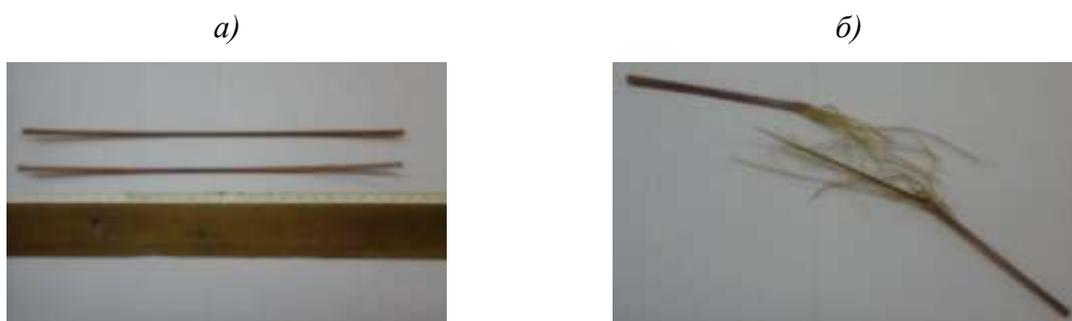


Рисунок 7 (а, б) – Образцы до (а) и после (б) проведения эксперимента (разрыва)

Образцы представляли собой полоску ткани из десяти нитей, соединенных связующим. Размеры образца составляли: толщина 0,5 мм, ширина 3,5 мм.

Исследовалось две партии образцов (20 шт. и 6 шт.). В первой партии экспериментов образцы подвергались растягивающей нагрузке до достижения предельного значения, при котором происходил разрыв волокон (рис. 8). Во второй партии экспериментов образцы нагружались до уровня ~2000Н, после чего разгружались и нагружались повторно (рис. 9). В процессе нагружения регистрировалась величина действующей

нагрузки и перемещения захватов как на участке активного нагружения, так и при разгрузке.

Этап 2. В задаче идентификации модели тепловыделения определяемым параметром является коэффициент теплового эффекта, который позволяет по известной диаграмме деформирования вычислить температуру образца при заданной деформации. Исходными данными являются диаграмма деформирования $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, скорость нагружения $\frac{d\varepsilon}{dt}$, измеренные с помощью тепловизионной аппаратуры значения температуры в конкретных точках образца в заданные моменты времени $T_k(t_i)$.

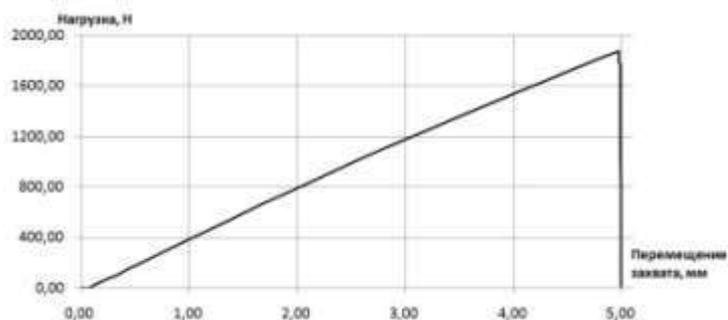


Рисунок 8 – Диаграмма растягивающей нагрузки

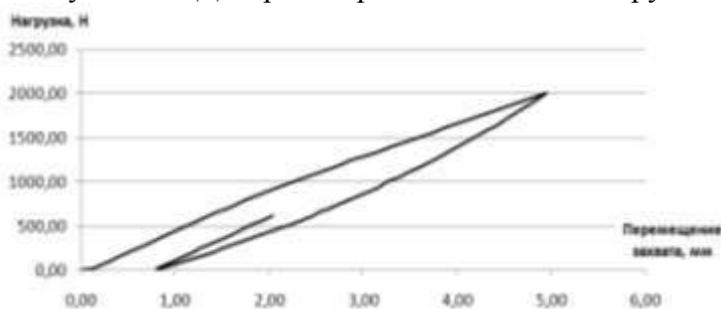


Рисунок 9 – Диаграмма двойной нагрузки

На рисунке 10 приведена фотография экспериментальной установки, включающая: разрывную машину, термограф ИРТИС-2000, компьютер для визуализации и измерения температурных полей.

По результатам экспериментальных исследований проведена идентификация определяющих уравнений, что позволило обеспечить приемлемое для практического использования совпадение результатов контроля реальных изделий с результатами математического моделирования.

В качестве критерия идентификации выбрана сумма квадратов отклонений вычисленных и измеренных значений температуры во всех выбранных точках и для всех моментов времени (метод «невязки»), зафиксированных на термограммах. При идентификации варьировались два фактора: температура среды и коэффициент теплового эффекта:

$$X(b, T_{\infty}) = \sum_i \sum_k T_{расч}(t_k, b, T_{\infty}) - T_{k,i}^2, \quad (6)$$

где i – номер точки,

k – номер момента времени,

$T_{k,i}$ – значение измеренной температуры,

$T_{расч}$ – значение температуры, рассчитанное по формуле

b – коэффициент теплового эффекта,

H – толщина пакета,

h – текущая координата по толщине пакета.

T_{∞} – температура окружающей среды.

$$\frac{dT}{dt} + 2 \frac{h}{c\rho H} T = \frac{b}{c\rho} \cdot \sigma(\varepsilon) - \frac{\sigma(\varepsilon)}{E_0} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + 2 \frac{h}{c\rho H} T_{\infty} \quad (7)$$

На основе статистической обработки экспериментальных данных по исследованным образцам получено: среднее значение коэффициента теплового эффекта равняется **0,0192**, среднеквадратичное отклонение равно **0,011**.

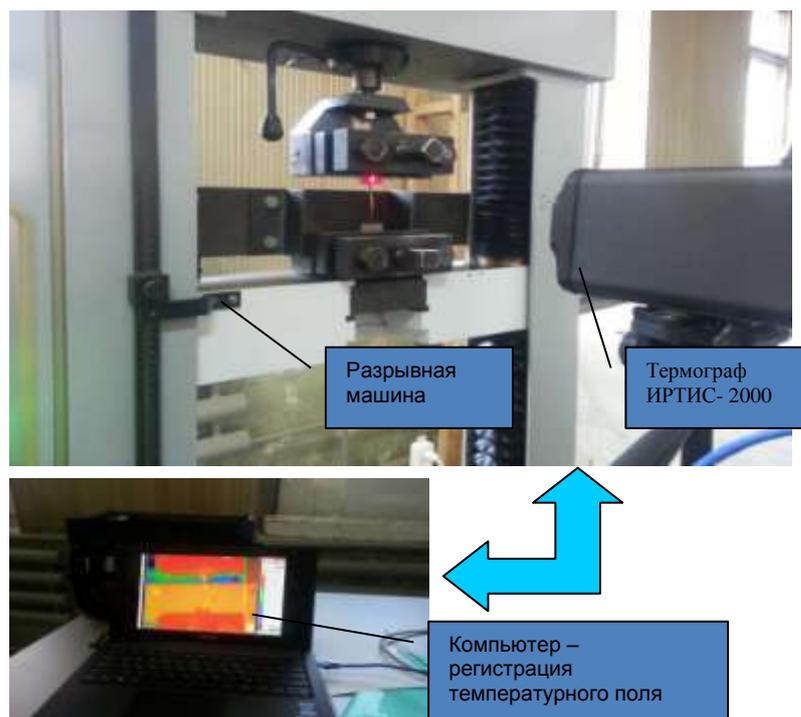


Рисунок 10 – Экспериментальная установка

На рисунке 11 приведены типовые термограммы образцов, полученные в процессе нагружения:

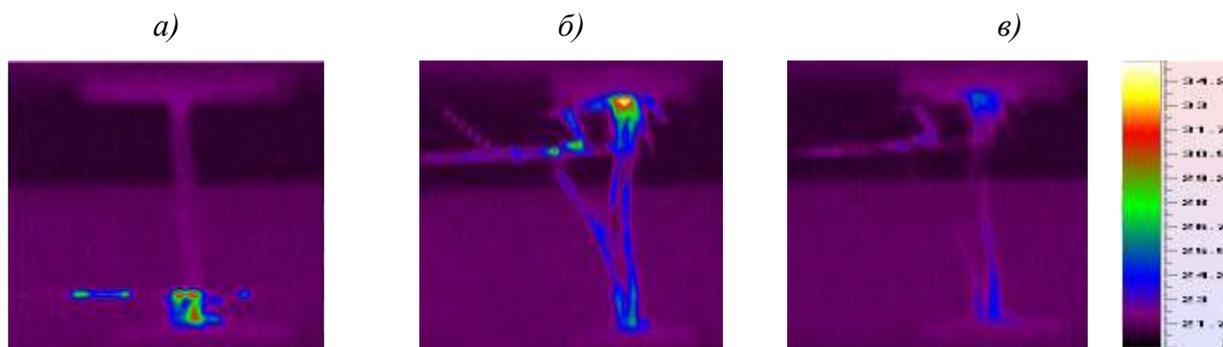


Рисунок 11 – Термограммы образца при скорости нагружения 40 мм/мин: а – через 7 сек. после начала нагружения, б – непосредственно после разрушения, в – через 2 сек. после разрушения (температуры изменяются от 21°C до 34°C)

Этап 3 – экспериментальные исследования взаимодействия ПЭ и броневой преграды.

Эксперименты производились путем взаимодействия многослойной броневой преграды и ПЭ (отстрела броневой преграды) с различными скоростями ПЭ. В процессе взаимодействия регистрировалось температурное поле поверхности с частотой 100 Гц и погрешностью ± 1 °С.

Рисунки 12-14 иллюстрируют экспериментальную установку и результаты контроля на примере испытаний образцов броневой преграды.

Экспериментальные исследования проводились на образцах броневой преграды (рис. 15).

Полученные результаты позволили разработать аппаратные, программные и методические средства контроля.

Проведены работы по разработке и внедрению методики и программно-аппаратных средств.



Рисунок 12 – Фотография экспериментальной установки

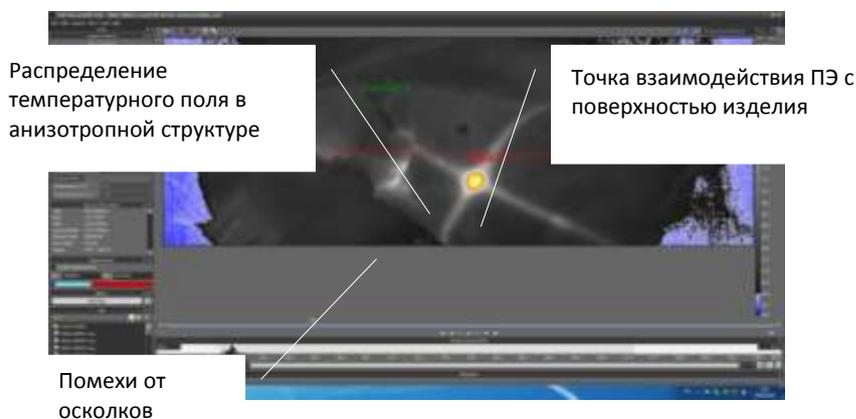


Рисунок 13 – Типовая термограмма поверхности исследуемого материала при взаимодействии с ПЭ

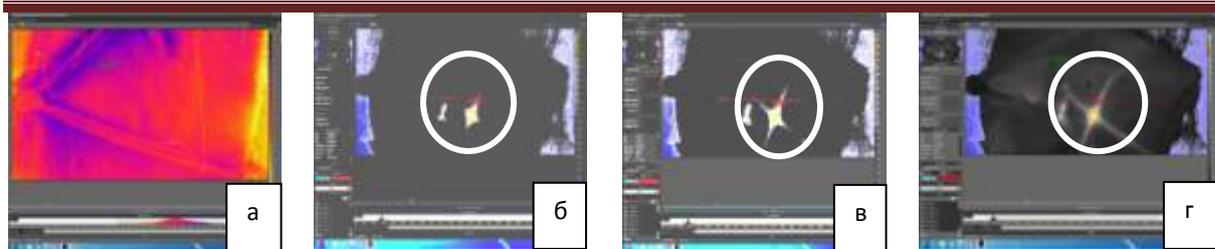


Рисунок 14 - Температурное поле поверхности броневой преграды: а – в начальный момент времени, до взаимодействия с ПЭ, б – через 0,01с после взаимодействия, в – через 0,03с, г – через 0,06 с (максимальное значение температуры). Температура на термограммах изменяется от 22°С до 133,8°С. Регистрация температурного поля производилась тепловизором FLIR X6530sc с частотой кадров 146Гц. Точность измерения температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$

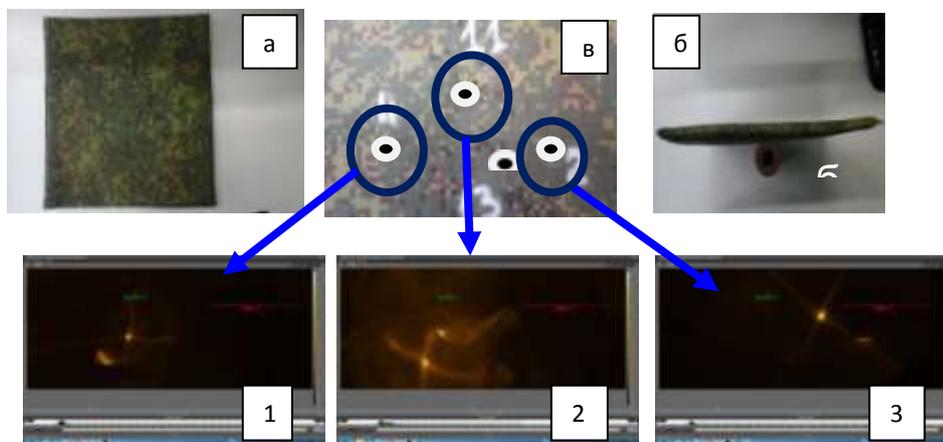


Рисунок 15 – Фотография образца броневой преграды до (а, б) и после (в) и соответствующие термограммы результатов взаимодействия с поражающим элементом (диапазон температур: 20–140°С)

Таблица 1

Экспериментальные зависимости температуры поверхности броневой преграды от скорости ПЭ в зоне контакта (к рис. 15)

№ выс-тре-ла	Ткань 29 текст	Количество слоев	Поверхностная плотность	Скорость ПЭ (м/с)	Переплетение	Температура эксперимента (град.°С)	Температура расчетная (град.° С)	Погрешность (%)
1	56319 аво	31	4кг/кв.м	310	Саржа 2/2	68,0	75,3	10,7
2				399		120,9	131,7	8,9
3				495		120,9	139,4	4,2

Разработана методика проведения теплового контроля тканой броневой преграды и включает три основных этапа:

Этап 1 - настройка модели путем проведения идентификационных экспериментов: получение диаграммы деформирования; определение коэффициента теплового эффекта, характеризующего долю необратимо рассеянной энергии.

Этап 2 - регистрация температурного поля в процессе взаимодействия броневой преграды и поражающего элемента.

Этап 3 – обработка результатов регистрации динамического температурного поля с использованием программного обеспечения и математических моделей: определение величины поглощаемой энергии (качество броневой преграды) и влияния характеристик слоев броневой преграды на поглощение энергии ПЭ, предельную допустимую скорость ПЭ для данного типа броневой преграды и т.п.

Программные средства зарегистрированы в Фонде алгоритмов и программ РФ (№ 2017615345).

Проведены экспериментальные исследования разработанной методики и программных средств на натуральных изделиях - тканых бронематериалах. При проведении экспериментальных исследований броневая преграда обстреливалась со скоростями от 260 до 760 м/с стандартными имитаторами осколка - стальными шариками диаметром 6,3 мм, имеющими массу 1,05 г. Измерение тепловых полей производилось тепловизором марки «ИРТИС-2000». В качестве объекта исследования использовался четырехслойный пакет из баллистической ткани на основе арамидных волокон РУСАР. Суммарная поверхностная плотность пакета составляла 0,5 кг/м².

Опыт эксплуатации разработанного метода на натуральных изделиях показал его эффективность и возможность определять энергию поглощения ПЭ с учетом свойств исследуемых материалов и конструкции тканых бронематериалов.

Заключение

1 Разработан тепловой метод контроля качества композитных броневых преград из арамидных материалов на основе изучения процессов их взаимодействия в реальном времени с поражающим элементом (процессы кинематические, деформационные, тепловые).

2 Разработана и внедрена методика компьютерного теплового контроля и диагностики технического состояния композитных броневых преград из арамидных тканей.

3 Впервые разработана математическая модель и соответствующее программное обеспечение, пригодные для использования на практике, описывающие процесс тепловыделения при взаимодействии быстроперемещающегося ПЭ с различными слоями многослойной броневой преграды из композитных материалов.

4 Впервые показана зависимость величины поглощения энергии на различных слоях композитной броневой преграды от характеристик слоев, их последовательности расположения, скорости поражающего элемента (это позволяет оптимизировать броневую преграду по отношению к конкретным поражающим элементам).

Литература

1. Козельская С.О. К вопросу о постановке задачи математического моделирования тепловыделения на тканом образце под воздействием ударного импульса поражающего элемента / С.О. Козельская, В.О. Каледин // Контроль. Диагностика, №2, 2017, С. 58–62.

2. Козельская С.О. Приближенная модель термомеханических процессов в броневой защите из ткани при взаимодействии с поражающим элементом/ С.О. Козельская, О.Н. Будадин, В.О. Каледин, Е.А. Вячкина, А.Е. Гилева // Контроль. Диагностика. №5, 2017. С. 28–33.

3. Козельская С.О. Численная схема для приближенного расчета ударных процессов в броневой защите из ткани с поражающим элементом/

О.Н. Будадин, В.О. Каледин, С.О. Козельская, Е.А. Вячкина, А.Е. Гилева // Контроль. Диагностика. № 7, 2017, С. 34–39.

4. Козельская С.О. Исследование возможности контроля качества броневых композиционных материалов на основе ткани по анализу динамических температурных полей при взаимодействии с поражающим элементом/ В.О. Каледин, О.Н. Будадин, С.О. Козельская, А.Е. Гилева // Конструкции из композиционных материалов. № 3, 2017, С. 70–82.

5. Козельская С.О. Использование нейронных сетей с глубинным обучением для прогнозирования и оценки уровня критичности дефектов конструкций/ В.В. Котельников, А.Н. Рыков, С.О. Козельская // Промышленные АСУ и контроллеры. № 12, 2016, С. 39–45.

6. Патент РФ 2608491. Устройство теплового контроля качества композитных броневых преград / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская, Опубл. 18.01.2017г. Бюл. № 2.

7. Патент РФ 2616438. Способ теплового контроля композитных материалов / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская, заявка № 2016119922 от 23.05.2016г. Опубл. 14.04.2017г. Бюл. № 11.

8. Патент 2623700. Способ контроля качества композитных броневых преград и устройство для его осуществления / О.Н. Будадин, А.А. Кульков, С.О. Козельская, заявка № 2016122151 от 03.06.2016г. Опубликовано 28.06.2017г. Бюл. №19.

9. Регистрация программы № 2017615345 от 12.05.2017 г. В.О. Каледин, О.Н. Будадин, А.Е. Гилева, С.О. Козельская / Программа расчета динамических температурных полей в многослойном композиционном материале при ударе.

УДК 621.431.75.001.4.

Перспективы повышения эффективности контроля динамического нагружения авиационных ГТД при летных испытаниях и эксплуатации

Коровин Б.Б.¹, д.т.н.; Червонюк В.В.¹, д.т.н.

nio3&lil.ru

¹АО «ЛИИ им. М.М. Громова», г. Жуковский, Московской области

Аннотация:

Рассмотрены перспективы развития методов контроля динамического нагружения авиационных ГТД и управления нагружением при летных испытаниях и эксплуатации. Повышение эффективности указанных методов базируется на использовании цифровых технологий измерения и анализа вибропроцессов в реальном времени, учитывающих индивидуальные характеристики каждого экземпляра обследуемого двигателя и реальные условия его нагружения. Применение такого подхода направлено как на раннее выявление неисправностей (при контроле вибраций двигателя), так и на минимизацию динамического нагружения (при контроле состояния лопаток, винтов).

Ключевые слова:

эксплуатация, динамическое нагружение, индивидуальный контроль, резонанс, турбулентность течения, неоднородность течения в воздухозаборнике, управление нагружением.

Введение

Освоение такого сложного и высокотехнологичного продукта, как авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) предполагает использование разнообразных методов неразрушающего контроля на всех без исключения стадиях создания двигателя. Контролю подвержены образцы материалов, полуфабрикаты, детали, элементы конструкции и технологии сборки. Тем не менее, как показывает опыт, несмотря на существующие методы проектирования, технологии производства и всесторонний контроль в эксплуатации, пока не удастся достигнуть желаемого уровня безотказной эксплуатации авиадвигателей.

В эксплуатации нередки и катастрофы ЛА. Поэтому особую страхующую роль в существующей иерархии методов контроля при освоении ГТД играет динамическое тензометрирование и вибрографирование элементов двигателя. Это связано с высокой виброактивностью современного ГТД ввиду противоречивых требований к элементам его конструкции и неблагоприятной комбинации одновременно действующих механизмов возбуждения (аэродинамический, акустический, механический, тепловой).

Элементы современных ГТД при малом весе должны надежно работать в условиях высоких температур и давлений, обусловленных высокими параметрами термодинамического цикла, при высоких уровнях неоднородности течения в газоздушном тракте и циклических нагрузок в широком диапазоне частот, связанных с наличием быстро вращающихся роторов двигателя и его агрегатов.

В практике используются как эксплуатация по назначенному времени, так и по фактической наработке в сочетании с контролем предотказного состояния двигателя по вибропараметрам. Однако до сих пор не разработано надежных методов контроля истощения ресурса и не реализовано управление нагружением наиболее ответственных элементов двигателей в

эксплуатации. В результате уровень надежности ГТД в эксплуатации пока далек от предельно достижимого состояния.

В данной статье рассмотрены возможности реализации принципа эксплуатации до разрушения и эксплуатации при использовании методов управляемого снижения уровня вибрационного нагружения наиболее критических элементов двигателя – рабочих лопаток.

Методы контроля динамического нагружения ГТД и пути их совершенствования

В соответствии с действующими нормативными документами основные методы контроля динамического нагружения ГТД базируются на динамическом тензометрировании и вибрографировании. При этом динамическое тензометрирование осуществляется только для опытных двигателей в процессе проведения их стендовой и летно-прочностной доводки.

Многолетний опыт летно-прочностной доводки отечественных ТРДФ (ТРДДФ) показывает, что одним из ключевых видов испытаний этих двигателей, предваряющих их надежное использование на летательных аппаратах военной авиации, является динамическое тензометрирование рабочих колес компрессоров низкого давления (КНД). Это связано с тем, что лопатки КНД (вентиляторов) подвержены интенсивному воздействию неоднородности потока воздуха на входе, возникающей при совместной работе ГТД и сверхзвуковых входных устройств.

На рисунке 1 показана модифицированная диаграмма Кемпбелла, иллюстрирующая многообразие источников динамического нагружения лопаток вентилятора при работе ТРДДФ в компоновке сверхзвукового самолета.

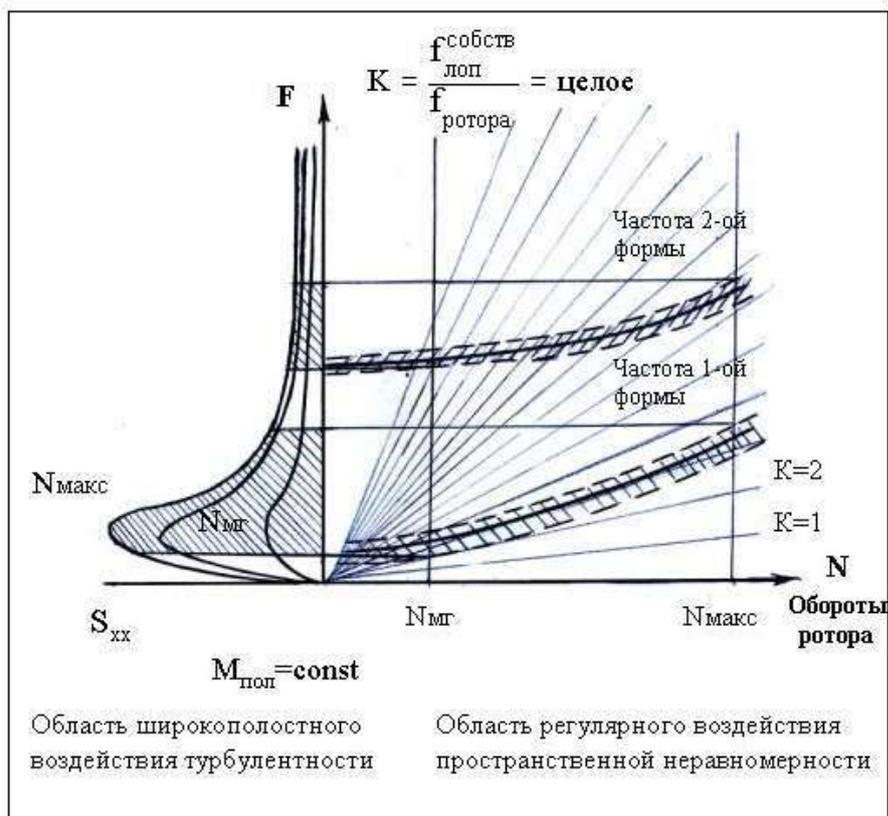


Рисунок 1 – Модернизированная диаграмма Кемпбелла, иллюстрирующая источники возбуждения вибрационного нагружения рабочих лопаток вентилятора ТРДДФ от неоднородности потока в компоновке сверхзвукового самолета.

На рисунке 2 – характерное изменение уровня виброн нагруженности рабочих лопаток первой ступени вентилятора такого двигателя, параметров полета и его работы при разгоне самолета. Обращает на себя внимание двойное проявление резонанса лопаток, вызываемое окружной неравномерностью потока с частотой 3-ей кратности к частоте вращения ротора на начальном этапе разгона и монотонное повышение интенсивности вибрационного отклика лопаток с высоким темпом после вступления в работу клина воздухозаборника. При этом наиболее неблагоприятная ситуация может возникнуть когда резонанс реализуется на предельных скоростях полета [1], [2], [3].

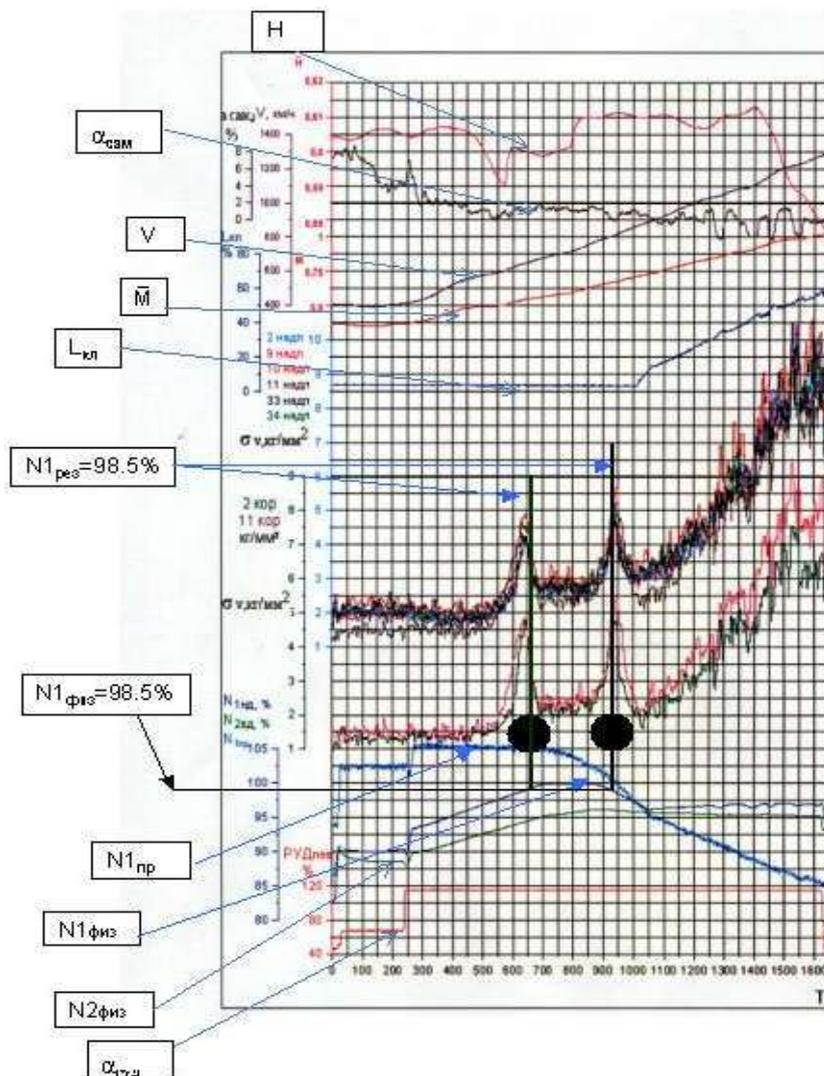


Рисунок 2 – Изменение уровня вибронпряжений рабочих лопаток первой ступени вентилятора ТРДДФ, а также параметров полета и работы двигателя при разгоне самолета

Технология экспериментального тензометрирования роторных деталей двигателя базируется на использовании ртутных, и бесконтактных токосъемников, имеющих малый ресурс, как и тензометры сопротивления, что не позволяет вести непрерывный контроль динамического нагружения лопаток для обеспечения его полноты для всего парка двигателей во всех условиях эксплуатации.

Для радикального решения проблемы контроля вибронгруженности рабочих лопаток и нормирования вибрационной прочности при резонансе по изгибным формам авторами настоящего сообщения еще в прошлом веке была предложена технология автоматического регулирования уровня

колебаний рабочих лопаток. Она позволяет в проблемных случаях минимизировать вибронагруженность лопаток методом фазировки дополнительно внесенной в поток компенсирующей гармоник с гармоникой возбуждения, порождаемой конструктивными особенностями воздухозаборника [4]. При этом для обеспечения обратной связи необходимо иметь надежные средства непрерывного измерения переменных напряжений в лопатках в эксплуатационных условиях.

Сущность технологии иллюстрируется рисунком 3, на котором показано, как взаимным расположением векторов исходной $A_{исх}$ и внесенной $A_{вн}$ неравномерности можно добиться минимизации суммарной неравномерности $A_{сум}$ вплоть до ее обнуления. Там же продемонстрированы критерий устойчивости такой системы управления и зона в координатах А-φ устойчивости такого управления.

Для внедрения рассматриваемого подхода требуется создание устанавливаемого на двигателе управляемого по фазе и интенсивности генератора гармонического возмущения (регулируемые направляющие аппараты, специальные интерцепторы и устройства вдува воздуха и пр.). Указанный способ не может быть реализован без надежных штатных средств непрерывного измерения переменных напряжений в лопатках или полей неоднородности в эксплуатации и соответствующих систем управления. Учитывая прогресс в современной инструментровке испытаний и цифровых технологий, такие требования в настоящее время не представляются непреодолимыми.

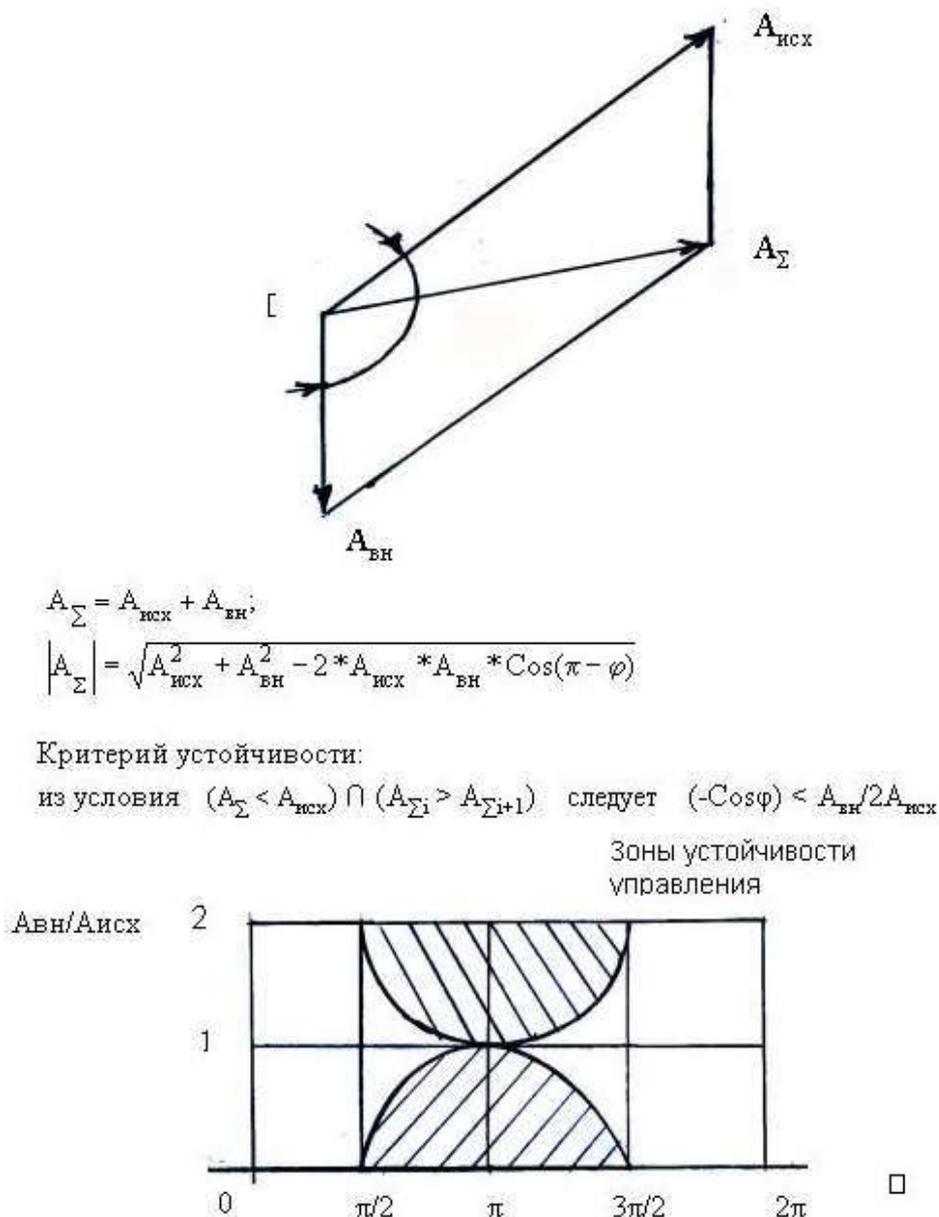


Рисунок 3 – Схема регулирования динамического нагружения лопаток компрессора (вентилятора) ГТД при резонансе

Серьезные успехи могут быть достигнуты и в совершенствовании методов бортового виброконтроля авиационных ГТД в части повышения их эффективности, снижения вероятности «пропуска цели» и ложного срабатывания при одновременном повышении быстродействия выявления опасных дефектов. Такой результат может быть получен путем внедрения технологии автоматизированного контроля вибраций с помощью автоматически получаемых на начальной стадии эксплуатации

индивидуально (для каждого экземпляра двигателя) исходных зависимостей от частоты вращения ротора интенсивности и фазы роторных вибраций с автоматическим переходом к контролю их изменения при достижении требуемого уровня достоверности.

Такой подход впервые успешно апробирован В.В. Червонюком для двигателей Д30КП на самолете Ил-76 [6]. Он получил дальнейшее развитие в современных работах ЛИИ (авторы Коровин Б.Б., Былинкина О.Н., Стасевич А.А.) на двигателях поколения 4+ с использованием новейших технических средств, позволяющих работать в реальном времени при летных испытаниях и эксплуатации.

Сущность метода заключается в том, что вместо предельно допустимого уровня вибраций, назначенного для всего парка двигателей принимается относительно более низкий допуск для каждого экземпляра в виде максимального отклонения от текущего значения его индивидуальной вибромодели. Эта вибромодель (виброхарактеристика) автоматически формируется в рабочем диапазоне режимов по оборотам для нормально работающего двигателя на начальном этапе его подконтрольной эксплуатации, когда вероятность отказа двигателя практически равна нулю. Представление об автоматическом формировании индивидуальных границ изменения уровня роторных вибраций двигателя для их использования в процедуре последующего автоматизированного виброконтроля можно получить из рассмотрения рисунка 4. Границы изменения вибраций на рисунке 4, для которых, достигнут необходимый уровень достоверности, используются в режиме контроля.

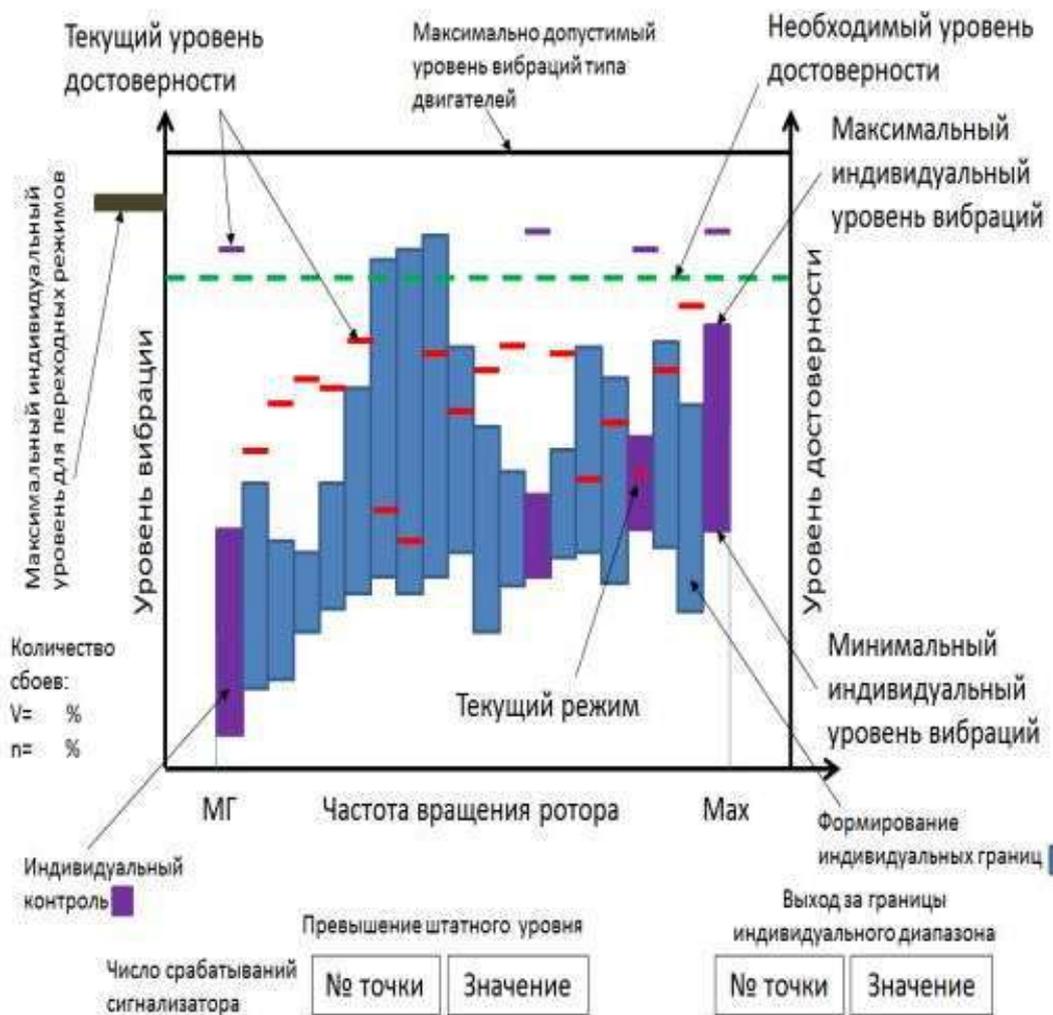


Рисунок 4 – Иллюстрация формирования индивидуальных границ изменения уровня роторных вибраций ГТД по частоте вращения ротора

Виброхарактеристики, подобные той, что показана на рисунке 4, автоматически определяются в ЛИИ при летных испытаниях всех новых опытных двигателей. Технологию получения указанных характеристик не трудно адаптировать и для этапа эксплуатации.

Эффективность бортового виброконтроля состояния ГТД может быть существенно повышена при использовании для этой процедуры характеристики изменения фазового угла роторных вибраций от частоты вращения ротора. Это значительно повышает чувствительность бортового виброконтроля к изменению, как уровня возбуждающих сил, так и колебательных свойств двигателя, например, из-за внутренних разрушений в

опорных элементах конструкции. Схема формирования индивидуальных границ изменения фазового угла вибраций с частотой вращения ротора авиационного двигателя (см рисунок 5) подобна схеме формирования индивидуальных границ для уровня вибраций.

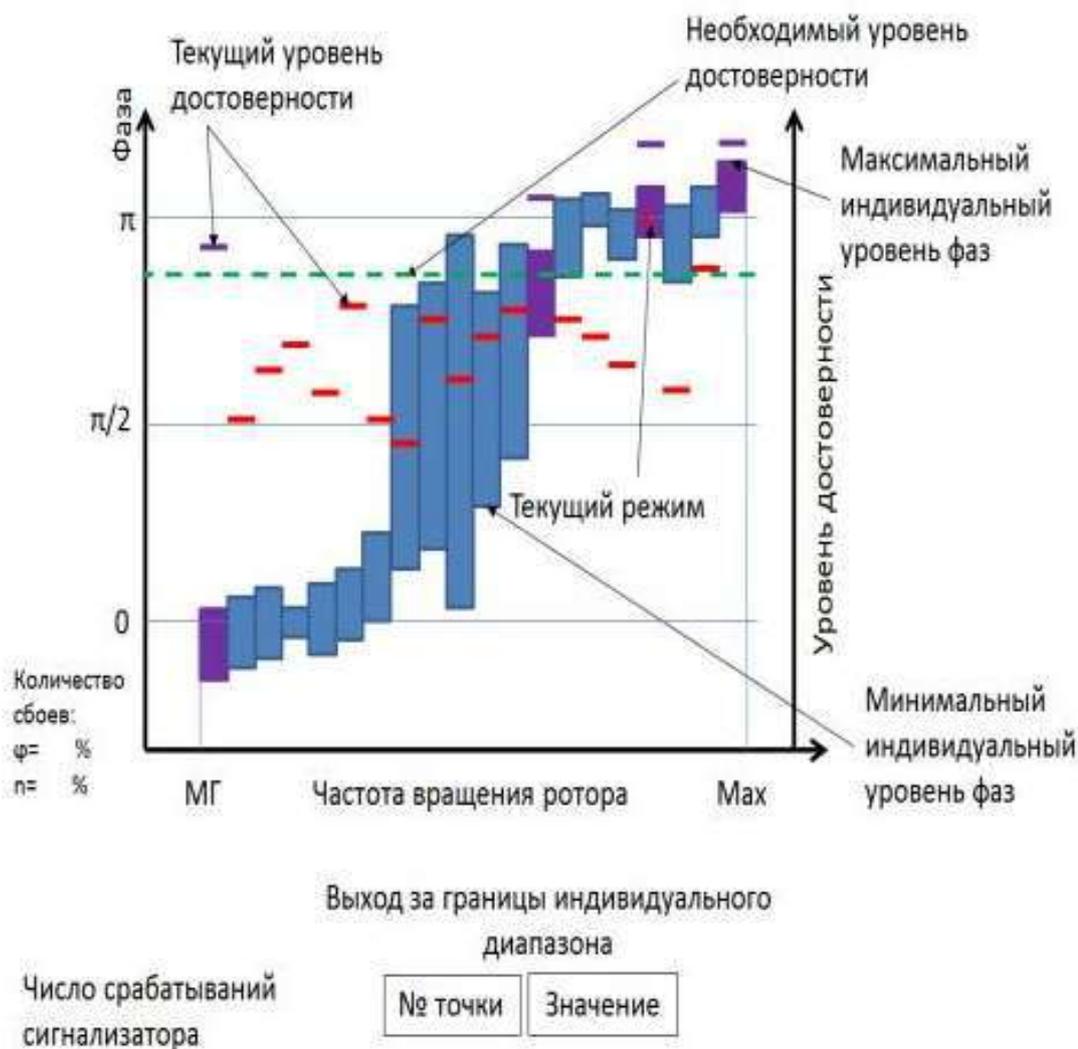


Рисунок 5 – Иллюстрация формирования индивидуальных границ изменения фазового угла роторных вибраций ГТД по частоте вращения ротора

Один из значимых видов контроля динамического нагружения авиационного ГТД – оценка пульсационного воздействия на элементы его конструкции процессов виброгорения газовой смеси в основной и форсажной камерах сгорания. Ввиду нелинейности, осевой направленности и строгой периодичности этих процессов их силовое динамическое воздействие на элементы газовой смеси происходит в узких полосах частот, кратных основной частоте виброгорения. Контроль вибрационного

отклика конструкции на такое воздействие плоской волны виброгорения осуществляется по замерам вибраций статорных деталей ГТД либо по замерам тензосигналов с датчиков сопротивления на элементах статора или ротора. Заметим, что широкое использование контроля возникновения виброгорения и результатов его воздействия на конструкцию в эксплуатации пока ограничивается ресурсными возможностями датчиков и специальных согласующих устройств.

И в заключение обратим внимание на проблему контроля нагружения воздушных винтов и винтовентиляторов в силу аналогичных с компрессорами проблем вибрационного нагружения их лопастей. Для повышения безопасности полетов и минимизации сроков летных испытаний требуется мониторинг нагружения винта в реальном времени от косо́го обдува, что также невозможно без применения надежных токосъемных устройств большого ресурса, передающих сигналы с тензодатчиков на вращающихся элементах винта и вала винта. Такие устройства, в частности, могут быть созданы на основе использования индукционного принципа для бесконтактного питания тензодатчиков на роторе при одновременной бесконтактной передаче в цифровом виде информации с датчиков на роторе на регистратор и компьютер на статоре.

Как показано сотрудниками института (Червонюк В.В. и Пипекин В.И.), наиболее актуальными задачами при летно-прочностных испытаниях ТВД и ТВВД на летающих лабораториях являются полнота оценки и достоверность в прогнозировании по этим данным динамического нагружения винтов и вала винта при косо́м обдуве в эксплуатационном диапазоне углов атаки основного самолета. Главным здесь является учет отличия угла заклинения двигателя на летающей лаборатории и основном летательном аппарате.

Выводы

1. Повышение эффективности существующих методов контроля динамического нагружения авиационных ГТД на основе тензометрирования и вибрографирования может быть достигнуто за счет разработки высокоресурсных вибропреобразователей, тензодатчиков, специальных согласующих устройств, и средств передачи информации с вращающихся деталей двигателя. Использование такой инструментовки повысит полноту контроля и за счет внедрения процедуры непрерывного индивидуального контроля позволит уменьшить вероятности «пропуска цели» и «ложных срабатываний».

2. Регулирование уровня колебаний рабочих лопаток ГТД методом фазировки – радикальный способ увеличения ресурса этих деталей. Для реализации метода требуется разработка управляемого по фазе и уровню бортового генератора гармоник окружной неравномерности потока в газоздушном тракте двигателя и использование методов автоматического управления

3. Эффективность бортового виброконтроля ГТД может быть существенно повышена за счет перехода к индивидуальным нормативам путем использования виброхарактеристик, автоматически получаемых для каждого экземпляра двигателя на начальном этапе эксплуатации.

Литература

1. Коровин Б.Б. К совершенствованию методологии вибрационной доводки лопаток компрессоров авиационных ГТД Труды ЛИИ № 409-1981, 56 с.

2. Еленевский Д.С., Малыгин И.И. Вибрационное состояние вентиляторов ГТД в связи с условиями на входе в двигатель. В сб. Аэроупругость лопаток турбомашин. Вып.2. Труды ЦИАМ № 1064, 1983, С. 151–163.

3. Коровин Б.Б. Роль летных исследований в обеспечении вибрационной надежности лопаток КНД авиационных ГТД. В сб Надежность и

долговечность машин и сооружений №30, Киев, 2008.-
С 76–84.

4. Коровин Б.Б. Методы прогнозирования и контроля лопаток КНД авиационных ГТД при испытаниях и эксплуатации. «Авиационно-космическая техника и технология №8/34».- Харьков: ГАУ «ХАИ».- 2006. - С. 74–79.

5. Коровин Б.Б., Червонюк В.В. О возможности регулирования уровня вынужденных колебаний лопаток турбомашин с помощью управляемого воздействия на поток. В сб. Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов.-Куйбышев.-1983.-С.79-84.

6. Червонюк В.В., Акопян Э.Г. Индивидуальный контроль двигателей Д-30КП как составная часть ресурсосберегающей эксплуатации самолетов Ил-76 авиакомпании «Илавия». - Труды 5-го международного научно-технического симпозиума ЦАГИ «Авиационные технологии 21 века».

УДК 620.192.63

Применение программных алгоритмов обработки изображений, полученных в ходе контроля изделий из композиционных материалов методом активной термографии

Котовщиков И.О.¹

ilya@locus.spb.ru

¹ООО «Локус», г. Санкт-Петербург

Аннотация:

В данной работе приведён анализ результатов экспериментальных исследований образцов из композиционных материалов методом активной термографии с использованием программных алгоритмов обработки инфракрасных изображений. Результатом исследования являются практические рекомендации по использованию методов обработки и анализа тепловых изображений.

Ключевые слова:

активная термография, композиционные материалы, обработка ИК изображений

1. Введение

Композиционные материалы (КМ), благодаря своим уникальным свойствам (высокая теплостойкость, высокие прочностные характеристики при повышенной и сверхвысокой температурах, низкая плотность, низкий коэффициент линейного термического расширения и т.д.), находят широкое применение в ракетно-космической, авиационной и других областях техники [1, 2, 3].

Как в процессе изготовления, так и во время эксплуатации, на поверхности и в объёме изделий из КМ возникают дефекты. Наличие таких дефектов, как: расслоение, непроклеи, трещины, повреждения поверхностных слоёв, и т. д., сильно сказывается на эксплуатационных и физико-механических свойствах изделий из КМ [4]. Таким образом, возникает задача неразрушающего контроля (НК) изделий из КМ. Сложная неоднородная структура композитов накладывает ограничения на применение традиционных методов НК в решении задачи контроля качества изделий из КМ. Выбор метода НК определяется видом композиционного материала, видом характерных дефектов в нём, условиями эксплуатации изделия и условиями контроля.

Одним из перспективных методов НК изделий из КМ является метод активного теплового контроля (активной термографии). На сегодняшний день, целесообразность использования термографических методов НК общепризнана, а области применения оборудования для термографического контроля постоянно расширяются [5, 6].

Активная термография – это передовой метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменения температуры объекта контроля (ОК) в условиях внешнего теплового возбуждения. Внешним источником тепла, приложенного к материалу, могут быть галогенные лампы, импульсные лампы, ультразвуковые волны или другие источники тепловой энергии. Возбуждение вызывает тепловой отклик на поверхности ОК, который регистрируется инфракрасной (ИК) камерой. Результатом процедуры контроля является информация о поверхностных и подповерхностных дефектах или внутренних неоднородностях. Схема контроля методом активной термографии приведена на рисунке 1.



Рис. 1 – Схема контроля методом активной термографии

Рассмотрим нагрев с помощью галогенных ламп. Внешняя энергия возбуждения, в таком случае, действует на поверхность исследуемого материала с использованием энергии электромагнитной волны (УФ, видимая или ИК). Эта энергия преобразуется в тепло в процессе поглощения, создавая тепловые волны, которые распространяются в материале по закону теплопроводности. Наличие внутренних дефектов влияет на процесс распространения тепловых волн. Внутренние дефекты воздействуют на тепловые волны как барьеры, создавая локальные изменения амплитуды и фазы, которые наблюдаются в картине распределения температуры по поверхности. Теплопроводность через твердое тело представляет собой сложную трехмерную задачу, которая может быть описана упрощенной версией закона теплопроводности Фурье (также называемого тепловым уравнением) внутри ОК:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \nabla^2 T - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

где $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$ (выраженный в $[м^2/с]$) – коэффициент температуропроводности ОК, k (измеряется в $[Вт/м \cdot К]$) – его теплопроводность, ρ (выраженная в $[кг/м^3]$) – его плотность, C_p (в $[Дж/кг \cdot К]$)

– удельная теплоёмкость. Температура T является функцией от x , y , z и t , а $\frac{\partial Q}{\partial t}$ – полная тепловая энергия возбуждения.

В момент, когда процесс нагрева поверхности завершается, градиент энергии переносится с поверхности в объем, где перенос энергии и его скорость зависят от температурного градиента и теплопроводности материала. Для расчета переноса тепла за счет теплопроводности используются алгебраические методы анализа, использующие градиент температуры. Этот градиент является направленной производной, которая указывает направление максимальной скорости изменения температуры. Направление теплового потока всегда будет противоположно направлению температурного градиента, так как самопроизвольная передача энергии возможна только от более нагретой точки к менее нагретой (второй закон термодинамики). Это направление максимальной теплопередачи будет перпендикулярно поверхностям равной температуры (изотермам), окружающим источник тепла.

Современные системы НК методом активной термографии используют сложные программные алгоритмы в процессе обработки и анализа ИК изображений, с целью повышения качества контроля. В данном исследовании проанализирован опыт применения некоторых методов обработки и анализа тепловых изображений, и сформулированы рекомендации по их практическому использованию.

2. Проведение контроля изделий из КМ методом активной термографии

Для реализации метода активной термографии, авторы использовали систему NDTherm[®] (рисунок 2). Для теплового возбуждения в данной системе используются четыре галогенных лампы. Сразу после излучения теплового импульса, система регистрирует динамику температуры поверхности ОК с помощью ИК камеры, в виде последовательности её ИК изображений (термограмм). Далее, с помощью специального программного

обеспечения установленного в блоке обработки и анализа изображений, информация о динамике температуры обрабатывается программными алгоритмами.

а)

б)

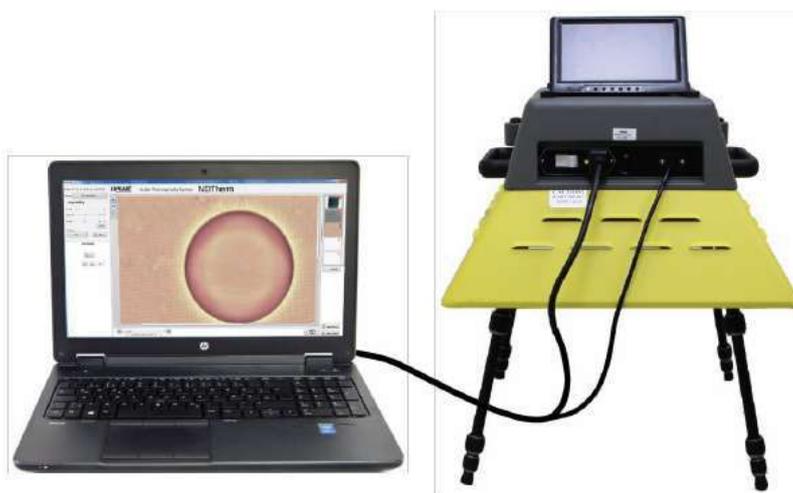


Рис. 2 – Система активной термографии NDTherm[®]: а) блок обработки и анализа изображений; б) блок нагрева и регистрации динамики температуры

2.1 Алгоритмы обработки изображений.

Базовая поставка системы NDTherm[®] включает в себя набор программных алгоритмов для анализа ИК изображений, описанный ниже.

Метод реконструкции (восстановления)

Это базовый метод обработки первичной информации о динамике температуры поверхности ОК. Метод использует аппроксимацию с помощью полинома, разработанную фирмой Orgal, для уменьшения временного и пространственного шума и восстановления более четких изображений изменения теплового сигнала с течением времени. Общий вид интерполяционной функции выражается следующей формулой:

$$\varphi(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_nx^n$$

Для применения этого метода должны быть примерно известны теплофизические свойства материала. Продолжительность нагрева должна быть, по крайней мере, достаточной для установления равномерного нагрева поверхности объекта контроля. После получения базовых термограмм, система позволяет выбрать степень полиномиального соответствия n . Для однородных материалов следует выбрать самую низкую степень ($n \sim 5$), чтобы снизить искажения изображения при полиномиальной подгонке. Для более сложных структур лучше использовать более высокую степень полиномиальной аппроксимации (от 7 до 9), которая определяется материалом объекта контроля. В восстановленных изображениях дефектные зоны проявятся в виде областей с более высокой или более низкой температурой по отношению к бездефектным зонам (зависит от тепловых свойств, как материала, так и дефекта). Например, в армированном углеродным волокном пластике (АУВП) расслоения будут отображаться как более яркое пятно, чем окружающая среда, так как коэффициент диффузии несплошности выше, чем у основного материала, а отраженное тепло приводит к увеличению температурного сигнала. В то же время, металлические включения, оставшиеся от производственного процесса, будут отображаться в виде более темной области.

Метод первой производной

Первая производная функции $T(t)$ по времени демонстрирует скорость охлаждения поверхности исследуемого материала. На скорость охлаждения влияет наличие дефектов на пути тепловой волны, следовательно, контраст температур усиливается. Преимущество метода первой производной заключается в усилении градиента яркости на изображении, вызванного наличием дефектов. Как следствие, метод первой производной улучшает выявляемость дефектов, что позволяет находить очень слабые дефекты на восстановленных изображениях.

Метод второй производной

Вторая производная во времени $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ определяется скоростью изменения скорости охлаждения («ускорение охлаждения»). Метод второй производной по времени позволяет определить глубину залегания дефекта. Неглубокий дефект проявится раньше, чем установится максимальный контраст в восстановленном изображении. Максимумы или минимумы в изображениях, полученных этим методом, коррелируют непосредственно с глубиной залегания и толщиной дефекта (длиной вдоль направления распространения тепловой волны), поскольку эти значения представляют собой время, необходимое тепловой волне для прохождения через дефектную область. Благодаря своему физическому определению, вторая производная базовых тепловых изображений по времени очень чувствительна к нарушениям процесса диффузии тепловых волн и может быть использована для оценки физических свойств, таких как глубина и размер.

Таким образом, производные по времени более чувствительны к изменениям температуры, чем восстановленные тепловые изображения. Производные более высоких порядков не имеют никакой физической интерпретации, поэтому дальнейшее улучшение контраста дефекта не наблюдается.

Метод обнаружения фазы (Pulsed Phase)

В этом методе временная область преобразуется в частотную область методом Фурье-преобразования; поэтому самые глубокие и мелкие дефекты в ОК показаны на первом изображении. При сканировании фазовых изображений дефекты отображаются последовательно. Обнаружение фазы менее подвержено влиянию отражателей окружающей среды, вариаций излучательной способности, неоднородного нагрева, геометрии поверхности и ориентации объектов, чем исходные тепловые данные.

Корреляция

Метод корреляции устанавливает соотношение между наличием дефекта, параметрами времени, и пространственными координатами,

генерируя 4 изображения. Первое изображение описывает максимальное значение корреляционной функции времени, второе – максимальное значение корреляционной функции местоположения значений сигнала. Остальные два описывают минимумы значений тех же корреляционных функций, что и первые два изображения. Наиболее эффективен этот метод анализа в задаче контроля композиционных материалов. Этот метод можно применить для анализа термограмм полученных методами производных, с целью исследования вызывающих сомнения участков ОК с возможными дефектами.

2.2 Применение программных алгоритмов обработки изображений

Компания ООО «Локус» имеет богатый опыт сотрудничества с предприятиями-изготовителями КМ, такими как: АО УНИИКМ, ПАО «Компания «Сухой», ФГУП ЦАГИ им. Жуковского, СибНИА им. Чаплыгина и др. Система термографического контроля NDTherm[®] опробована в задаче контроля качества широкого спектра изделий из КМ.

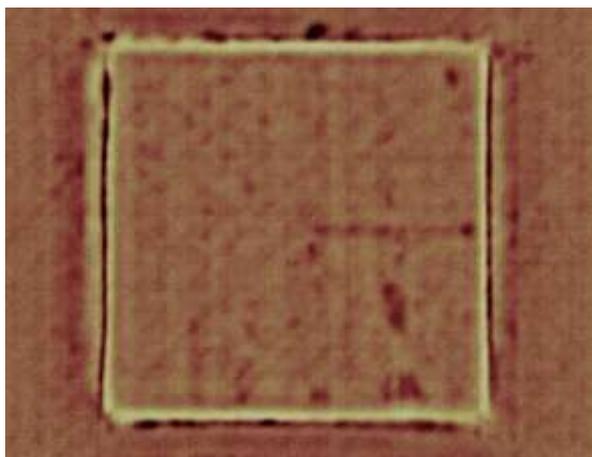
Максимальный контраст между областями ОК с различными теплофизическими характеристиками наблюдается в термограммах, полученных методами производных (рисунок 3 а). Как было сказано ранее, КМ имеют сложную внутреннюю структуру, вследствие чего, чувствительные методы производных проявляют структурные элементы КМ и границы между ними.

В большинстве проведённых экспериментов наилучший результат по критерию наглядности представления результатов контроля продемонстрировал метод обнаружения фазы (рисунок 3 б). Алгоритм, лежащий в основе метода обнаружения фазы, позволяет использовать данный метод только для анализа процесса охлаждения ОК. На термограммах, полученных данным методом, глубина и площадь несплошностей пропорциональны яркости и площади контрастных участков.

Методы корреляций, также используемые для анализа процесса охлаждения ОК, позволяют получать термограммы сверхвысокой

контрастности с отображением всех обнаруженных неоднородностей на одном изображении. Данные методы используются в случаях, когда чувствительности методов первой и второй производных недостаточно. Использование методов корреляций осложнено неоднородностью внутренней структуры КМ.

а)



б)

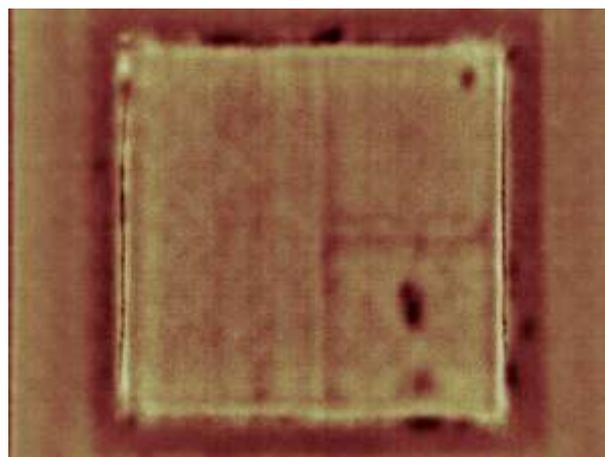


Рис. 3 – Результат обработки ИК изображений образца из углепластика: а – методом первой производной; б – методом обнаружения фазы

3. Выводы и рекомендации

Благодаря уникальным теплофизическим свойствам наиболее используемых КМ (углепластик, углерод-углеродные композиционные материалы и т.д.), метод активной термографии имеет большие перспективы в задаче НК изделий из КМ. Многочисленные эксперименты по обнаружению заложенных искусственных дефектов в образцах из КМ методом активной термографии демонстрируют принципиальную возможность промышленного применения данного метода НК.

Сложность структуры КМ приводит к необходимости использования дополнительных алгоритмов обработки изображений, полученных в ходе контроля изделий из композиционных материалов методом активной термографии. Существует множество методов обработки и анализа тепловых изображений ОК, каждый из которых имеет своё назначение.

В системе активной термографии NDTherm[®] фирмы Orgal для обработки тепловых изображений ОК используются наиболее универсальные

методы: восстановления, первой производной, второй производной, обнаружения фазы и методы корреляций. Метод восстановления является базовым уровнем обработки ИК изображений ОК, который может быть использован для общей оценки динамики температурного поля, и необходим для реализации более сложных алгоритмов. Исследование изделий из КМ с помощью системы NDTherm[®] показало, что наиболее наглядным и удобным для оператора является метод обнаружения фазы. Методы производных являются высокочувствительными методами, полезными при поиске мелких дефектов и определении геометрических параметров дефектов (в том числе высоты). Корреляционные методы позволяют добиться максимально контрастного изображения, на котором проявляются даже самые мелкие дефекты. Использование корреляционных методов осложняется сложной структурой КМ.

Стоит отметить, что фирма Orgal предоставляет возможность снабжения системы термографического контроля NDTherm[®] дополнительными алгоритмами обработки и анализа тепловых изображений, разработанными под конкретную задачу.

Литература

1. Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
2. Kapadia A. Non Destructive Testing of Composite Materials. Best Practice Guide TWI Ltd National Composites Network.
3. Троицкий В. А., Глуховский В. Ю. Термографический контроль как метод, предшествующий стандартным видам технической диагностики // Междунар. конф. и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Матер. конф. – Гурзуф, 2011. – С. 61–66.

4. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
5. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
6. Новостная страница сайта компании «FACC AG» [Электронный ресурс]: <http://www.facc.com/en/News/News-Press/Testing-competence-in-lightweight-components-FACC-receives-Boeing-qualification-for-active-thermography>

УДК 620 192 63

Применение цифровых технологий рентгеновского неразрушающего контроля в авиационной отрасли. Проблемы, опыт и перспективы

Крупнина О.А.¹; Косарина Е.И.¹, д.т.н.; Михайлова Н.А.¹, к.т.н.;
Смирнов А.В.¹

Fess.m.d@gmail.com; ekaterina-kosar@mail.ru; natsavv@inbox.ru;
mr.smirnovalexey@gmail.com

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

В настоящей статье представлена информация об использовании средств цифровой радиографии для неразрушающего контроля изделий, выполненных из авиационных материалов. Обобщены основные проблемы применения цифровой радиографии, такие как выбор оборудования, квалификация персонала и стандартизация технологии контроля. Приведено описание выбора параметров, режимов контроля и источников рентгеновского излучения в сравнении с тем, как это осуществляется при традиционном рентгенографическом контроле. Представлен опыт специалистов лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» по разработке технологии цифрового рентгенографического контроля различных объектов, а также проводимые в этой области практические и теоретические исследования.

Ключевые слова:

Неразрушающий рентгенографический контроль, цифровая рентгенография, отношение сигнал/шум, нерезкость изображения, контраст изображения

1. Введение

Качество материалов в значительной степени определяет успешную эксплуатацию летательных аппаратов. Технология получения деталей и изделий авиационной техники из металлических, неметаллических и композиционных материалов не всегда обеспечивает стабильность их свойств. Причина этого – возможные отклонения техпроцессов, наличия разного рода дефектов, в частности нарушения сплошности материала, металлических и неметаллических включений. Стопроцентный контроль изделий возможен лишь неразрушающими методами, однако, объективность оценки качества изделия возможна при максимальной адаптации того или иного метода неразрушающего контроля (НК) к конкретному изделию. Рентгенографический неразрушающий контроль, широко распространен в производстве летательных аппаратов в сравнении с другими отраслями промышленности, что обусловлено высокими требованиями к надёжности продукции и безопасности полетов. Однако, несмотря на свои очевидные преимущества, рентгенография имеет низкую производительность, ввиду сложности механизации и автоматизации процесса, высокую себестоимость, обусловленную дорогостоящими расходными материалами. На протяжении многих лет рентгенографический контроль не находит альтернативы из-за того, что радиографическая пленка до сих пор является непревзойденным по качеству воспроизводимого изображения детектором рентгеновского излучения, а все предшествующие радиоскопические системы имели низкую чувствительность контроля, ограниченный диапазон допустимого анодного напряжения, малый размер контролируемого участка.

В настоящее время активно создают и развивают средства цифровой радиографии, способные конкурировать с радиографическими пленками. Цифровая радиография – метод радиационного контроля, где в качестве преобразователя радиационного изображения применяют матрицы цифровых детекторов (цифровые детекторы). Такие электронные устройства преобразуют радиационное изображение в дискретную матрицу аналоговых

сигналов, которые затем оцифровываются и передаются на дисплей компьютера в виде цифрового изображения, соответствующего распределению мощности дозы рентгеновского излучения, прошедшего через область ввода устройства. Внедрение цифрового радиографического контроля взамен традиционной радиографии на предприятиях авиакосмической отрасли увеличит технико-экономические показатели, поскольку позволит исключить расходные материалы (радиографическая пленка, фотохимические реактивы); сократить рабочие площади (помещения с неактиничным освещением для зарядки и проявки радиографической пленки, архивы, где снимки должны храниться в течение срока эксплуатации изделия); увеличить производительность контроля за счет сокращения продолжительности экспозиции, снижения продолжительности подготовительных операций и мгновенной оценке результатов с возможностью корректировки режимов и параметров контроля при необходимости. Сложности при внедрении цифрового рентгеновского метода контроля носят комплексный характер и связаны в первую очередь с технологией проведения контроля, квалификацией персонала, выбором и эксплуатацией оборудования.

2. Состояние вопроса

В соответствии с международной практикой решение о переходе на цифровую радиографию (ЦР) принимается руководством предприятия, на котором осуществляется контроль. Перед этим необходимо выбрать номенклатуру деталей, контроль которых планируется осуществлять с применением ЦР. Однако уже на этапе выбора оборудования для контроля специалисты сталкиваются с проблемами отсутствия в РФ нормативной документации, регламентирующей требования к техническим характеристикам и комплектности систем ЦР, которые напрямую зависят от объекта контроля (ОК) или номенклатуры ОК, а также от задач, которые необходимо решить с применением цифровой радиографии. При отсутствии серийных решений по контролю выбранных объектов (под серийными

понимаются установки с проверенной эффективностью и надежностью, а также проверенной на практике применимостью для решения задач, поставленных заказчиком) возникает необходимость разработки технического решения для будущей системы. У заказчика, зачастую, нет полного понимания специфики технологии и того как и какие технические характеристики влияют на результат контроля, поэтому эта разработка выполняется поставщиком. В этом случае, уже на этапе формулирования ТЗ, остается надеяться на опытность и добросовестность поставщика.

В общем случае, установка для ЦР состоит из следующих компонентов: связная система источник-детектор (И-Д), устройство для перемещения и/или позиционирования ОК, рабочая станция оператора и связанное с ней программное обеспечение (ПО). Возможности и применимость установки для решения конкретных задач по контролю в первую очередь определяются характеристиками выбранной системы И-Д и программным обеспечением. За рубежом в соответствии с ASTM 2597M система И-Д, классифицируется по результатам определения пяти параметров: базового пространственного разрешения детектора (SR_b), контрастной чувствительности при контроле ОК из различных материалов (CS), специфического диапазона радиационных толщин ($SMTR$), эффективности при экспозиционной дозе 1 мГр, задержки изображения или послесвечения. Исходя из полученных значений, можно установить, что, например, система с высоким расчетным значением SR_b и относительно малым динамическим диапазоном просвечиваемых радиационных толщин может применяться при контроле однотипных сварных соединений, в то время как система с меньшим SR_b и высоким специфическим диапазоном радиационных толщин может успешно использоваться при контроле отливок из различных материалов. Входящее в состав установки перемещающее устройство определяет возможность стопроцентного контроля изделий сложной формы или крупных габаритов в том числе в разных пространственных положениях, что влияет в частности на производительность контроля. Очевидно, что

выбор подходящего для поставленных задач оборудования, является необходимым условием успешного внедрения ЦР на производстве, но не достаточным. Можно иметь самую совершенную аппаратуру, но, чтобы проводить полноценный грамотный контроль, этого недостаточно и следующим по порядку, но не по важности, фактором является квалификация и компетенция персонала.

Результатом рентгенографического неразрушающего контроля является оптическое изображение, которое оценивает специалист, что, в конечном счете, приносит субъективность. Таким образом, достоверность результатов и производительность этой операции зависит от квалификации дефектоскописта и даже его физического состояния. При переходе к цифровой рентгенографии, помимо внедрения новой технологии проведения контроля, возникают проблемы при расшифровке полученных изображений ОК, что требует навыка работы с цифровым изображением и некоторого понимания цифровой обработки сигналов. Также необходимо учитывать, что специалисту, работающему с оборудованием для ЦР, необходимо пройти обучение и получить знания, позволяющие поддерживать стабильные характеристики системы и своевременно выявлять сбои в работе оборудования.

В отраслевых нормативных документах имеются ссылки на ISO 9712 (ГОСТ Р 54795), по которым должна проходить квалификация и сертификация персонала НК (третьей стороной), также в авиации применяется альтернативный вариант системы квалификации и сертификации персонала: система сертификации работодателем по EN 4179/NAS 410 (ГОСТ Р 55252). Однако в национальных стандартах разделение на пленочную и цифровую радиографию отсутствуют, хотя абсолютно очевидно, что эти методы имеют существенные различия. Рекомендации по программам обучения для всех уровней квалификации по ЦР есть в стандарте США ASNT CP-105-2011. Без адекватной и полноценной

подготовки специалистов развитие метода цифровой рентгенографии в нашей стране невозможно.

И все же, самым главным требованием, которому должен соответствовать каждый внедряемый метод НК, является достоверность контроля и гарантированное обнаружение недопустимых дефектов. Для ЦР это означает, что результаты контроля должны удовлетворять требованиям по чувствительности и разрешающей способности, регламентированным нормативно-технической документацией, а выявляемость дефектов должна быть не хуже, чем при традиционной рентгенографии. По итогам проведенной специалистами ФГУП «ВИАМ» научно-исследовательской работы было установлено, что при соблюдении технологии, результаты цифрового рентгенографического контроля не хуже, чем при контроле на пленку. Что же включает в себя технология контроля с применением цифровых детекторов и в чем же ее отличие от пленки?

В первую очередь опасения вызывает малая разрешающая способность метода, поскольку размер пикселя промышленно выпускаемых детекторов $SR_6^{дет}$ (мм) составляет от 50 до 200 мкм, что несравнимо больше размера микрокристаллов бромида серебра радиографической пленки, составляющего в среднем около 1 мкм. Нерезкость изображения $u_{изоб}$ (мм) определяется в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 17636-2:

$$u_{изоб} = \frac{\sqrt{(u_r)^2 + (2SR_6^{дет})^2}}{M} = \frac{\sqrt{((M-1) \cdot \Phi)^2 + (2SR_6^{дет})^2}}{M} \quad (1),$$

где u_r – геометрическая нерезкость, мм;

M – коэффициент геометрического увеличения (соотношение расстояния от выходного окна рентгеновской трубки до детектора к расстоянию от выходного окна трубки до ОК);

Φ – размер фокусного пятна источника излучения, мм.

Это означает, что при ЦР для соблюдения требований к нерезкости изображения необходимо применять схему просвечивания с геометрическим увеличением, когда ОК размещается ближе к источнику излучения. В

большинстве случаев это означает применения микро- и острофокусных источников излучения, с размерами фокусного пятна до 0,1 и 0,8 мм соответственно.

Минимальный размер фокусного пятна излучателя Φ напрямую зависит от конструктивного исполнения трубки и возрастает с ростом мощности, выделяемой на аноде рентгеновской трубки. Величина допустимой мощности зависит лишь от допустимой тепловой нагрузки на материале анода (мишени). При применении микрофокусных источников излучения, ограничения, связанные с малой величиной допустимой мощности, неизбежно влияют на режимы контроля. Возникает необходимость достигать требуемую для формирования сигнала на детекторе дозу посредством увеличения напряжения на рентгеновской трубке. Увеличение анодного напряжения вызывает снижение контраста радиационного изображения, что приводит к некоторому снижению чувствительности контроля. Исходя из этого, ГОСТ 20426 содержит указания по максимально возможному напряжению, при котором гарантировано достижение чувствительности контроля не хуже двух процентов от просвечиваемой радиационной толщины в случае применения радиографической пленки. Однако, соблюдение рекомендаций ГОСТ 20426 при цифровом рентгенографическом контроле с применением микрофокусных источников излучения приводит к получению недостаточного уровня отношения сигнал/шум (ОСШ) цифрового изображения, что является не допустимым в соответствии с требованиями ISO 17636-2, ASTM 2698. Специалистами лаборатории НМК ВИАМ была проведена серия экспериментов, в процессе которых определялось качество цифровых изображений при контроле объектов из стальных, алюминиевых и титановых сплавов при различных напряжениях. Было установлено, что увеличение величины анодного напряжения приводит к росту ОСШ до требуемого уровня. Однако, в каждом конкретном случае существует величина напряжения, после которой прирост ОСШ становится

незначительным, потери радиационного контраста возрастают и чувствительность контроля снижается ниже требуемой. Самые общие рекомендации по выбору анодного напряжения при цифровом рентгенографическом контроле представлены в таблице 1. Полученные значения максимально допустимых напряжений при контроле выше аналогичных по ГОСТ 20426 почти в два раза, и лишь немного выше допустимых регламентом ISO 17636-2.

Таблица 1

Рекомендации по выбору анодного напряжения при цифровом рентгеновском контроле

Толщина ОК, мм, из сплава на основе			Напряжение на рентгеновской трубке (не более), кВ
железа	титана	алюминия	
0,02	0,05	0,25	40
0,3	0,75	3,75	80
0,4	1	5	100
0,7	2	12	120
1,5	5	29	150
3	8	45	170
6	14	56	180

Однако на результаты ЦР влияют не только схема просвечивания, напряжение и ток на аноде рентгеновской трубки. Следует учитывать и возможность варьирования таких параметров детектора как время накопления кадра (время интегрирования), количество кадров накопления, величина усиления сигнала (чувствительность детектора к излучению). При разработке режимов можно руководствоваться рекомендациями, представленными в таблице 2.

Таблица 2

Рекомендации по корректировке режимов сканирования (при анализе изображения в негативе)

Полученное изображение	➔		
	Слишком светлое	Слишком темное	
Действия по корректировке	уменьшить	увеличить	величину анодного тока трубки, мкА
	увеличить	уменьшить	время накопления кадра, мс
	уменьшить	увеличить	чувствительность детектора
	установить	убрать	фильтры
	уменьшить	увеличить	величину анодного напряжения, кВ

Несмотря на возможность корректировки параметров в режиме реального времени, разработка технологии цифрового рентгенографического контроля, учитывающая номенклатуру контролируемых изделий, используемое оборудование, специфику производственной культуры, позволит получать наилучшее качество результатов контроля (цифровые рентгенограммы), в то время как следование общим рекомендациям не может гарантировать достижения требуемого качества.

3. Опыт специалистов ФГУП «ВИАМ»

ФГУП «ВИАМ» в 2015 г выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2493 «Проведение рентгеновского неразрушающего контроля изделий авиационной техники с использованием цифровых детекторов рентгеновского излучения», содержащая основные сведения об оборудовании, вспомогательных материалах, параметрах и режимах контроля, технологии проведения контроля и требованиях к получаемым цифровым изображениям. На утверждении находится первая редакция проекта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий радиационный. метод цифровой радиоскопии». Однако практика показывает, что разработка методики или технологии при работе на конкретной единице оборудования с целью обнаружения дефектов и несплошностей, характерных для технологии изготовления и материала объекта контроля – является необходимым условием получения достоверных результатов. Использование общих рекомендаций по выбору параметров контроля не гарантирует достижения требуемой конструкторской документацией чувствительности, достоверности и воспроизводимости результатов контроля. Более того, правильная технология позволит увеличить производительность контроля, или же наоборот, увеличить технологическую гибкость единицы оборудования.

3.1 Технология контроля сварных соединений

На основании теоретических и практических исследований, разработана технология проведения неразрушающего контроля тонкостенных сварных конструкций, в том числе паянных, сварных трубопроводов с применением цифровых преобразователей рентгеновского излучения. Данная технология позволяет проводить на установке для ЦР механизированный контроль сварных и паяных соединений с чувствительностью контроля от 1%, и требуемой величиной пространственного разрешения (рисунок 1).

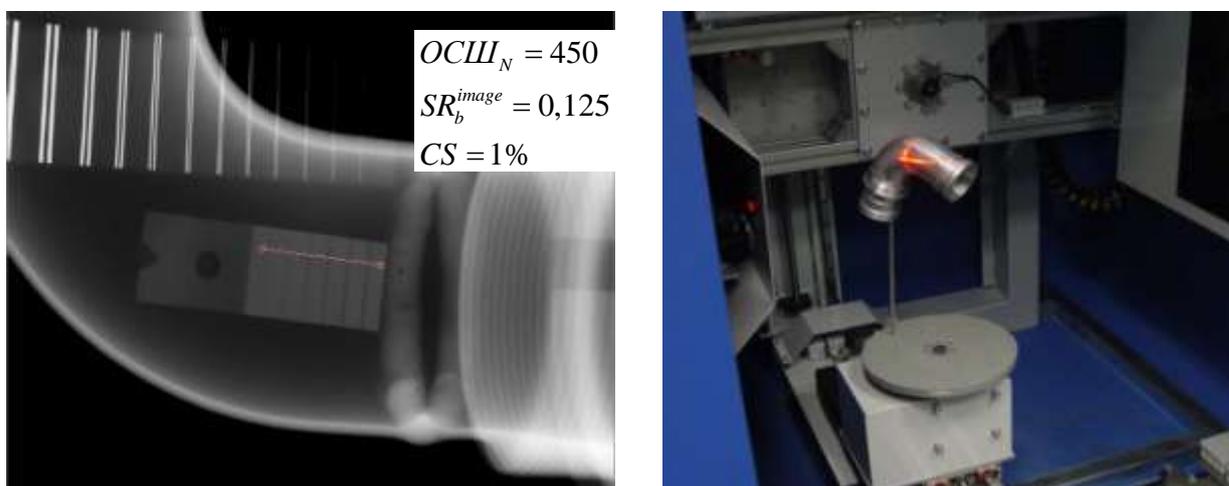


Рисунок 1 – Контроль сварных соединений методом ЦР. Слева: цифровое изображения кольцевого сварного соединения патрубка, справа: схема контроля

3.2 Контроль отливок из легких сплавов

Применение ЦР при контроле отливок из легких сплавов крайне перспективно, поскольку широкий динамический диапазон детектора позволяет за одну экспозицию получить изображение ОК переменной радиационной толщины с возможностью их расшифровки. Однако в соответствии с требованиями отраслевых стандартов (ОСТ 1 90248 для магниевых сплавов, ОСТ 1 90029 и ОСТ 1 90021 для алюминиевых сплавов) степень микрорыхлоты или балл пористости отливки определяют рентгеновским методом НК, сравнивая полученную рентгенограмму отливки с изображениями альбома эталонных рентгенограмм (рисунок 2). Внедрение эталонных альбомов цифровых изображений является необходимым

условием легализации результатов контроля с последующей приемкой изделия или детали.

В соответствии с отечественным и зарубежным опытом, оцифровка пленочных эталонных рентгенограмм с целью расшифровки изображения, полученного при помощи цифрового детектора, не допускается. В перспективе, нашей целью является разработка математического аппарата, позволяющего по результатам анализа цифрового изображения присваивать балл пористости алюминиевой отливке.

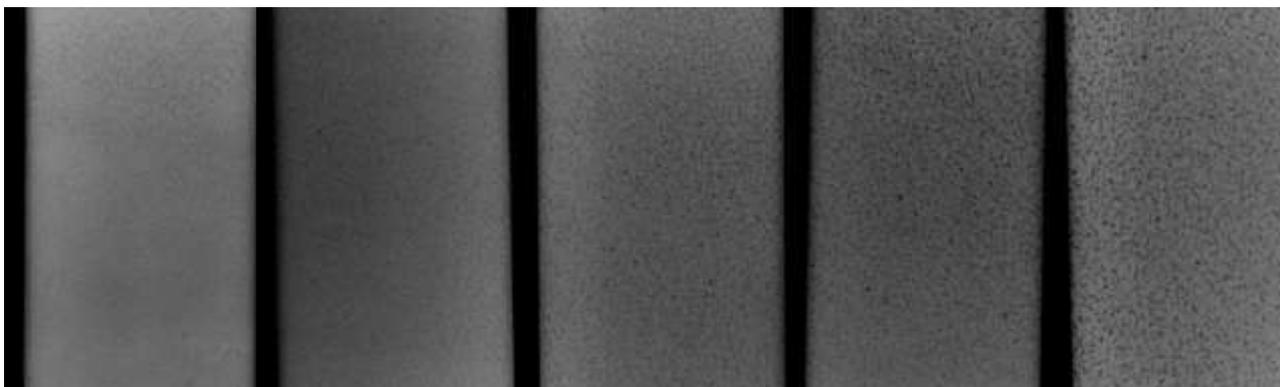


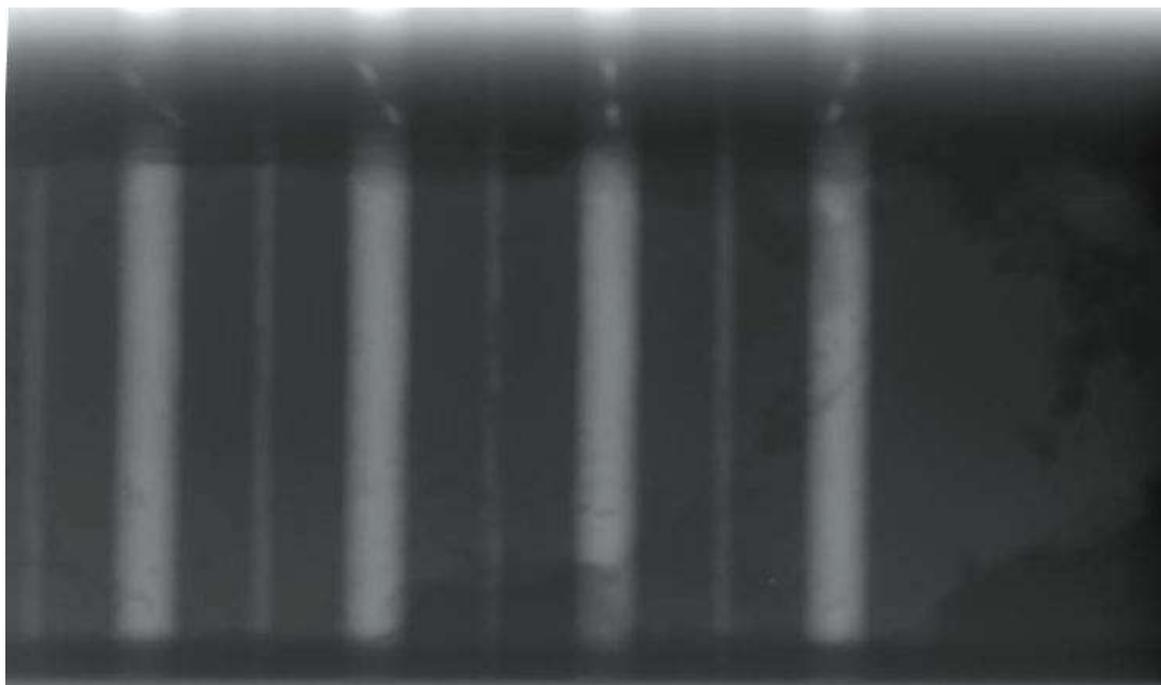
Рисунок 2 – Эталонные цифровые изображения шкалы газовой пористости алюминиевых сплавов

Однако это крайне сложно реализовать для магниевых отливок, поскольку микрорыхлота не обладает такой периодичностью и фактором как пористость. На настоящий момент адекватным решением данной проблемы является разработка цифровых альбомов для конкретной детали или номенклатуры изделий по результатам анализа технологических карт контроля, регламентирующих схему и режимы.

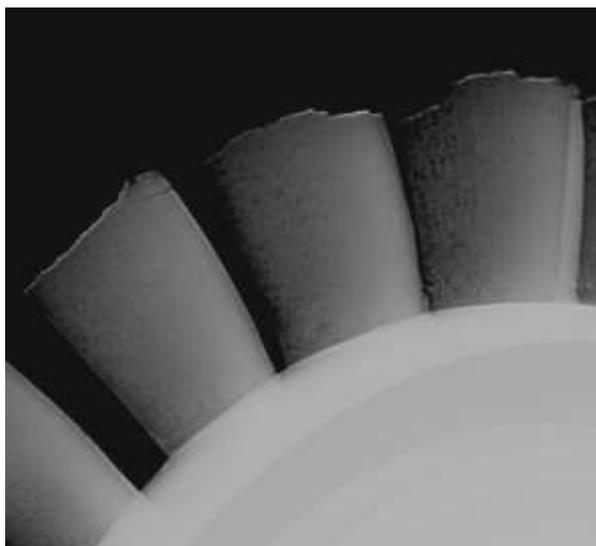
3.3 Контроль деталей, полученных по аддитивным технологиям

Методом, позволяющим проводить НК изделий и компонентов любой группы сложности, полученных по аддитивным технологиям, является рентгеновская компьютерная томография. Применение проекционной рентгенографии также позволяет оценивать качество таких деталей: полноту удаления порошка из каналов (рисунок 3а), наличие включений, макронесплошностей (рисунок 3б), нарушений геометрии (рисунок 3в) и т. д. Поскольку большинство деталей аддитивного производства имеют сложную

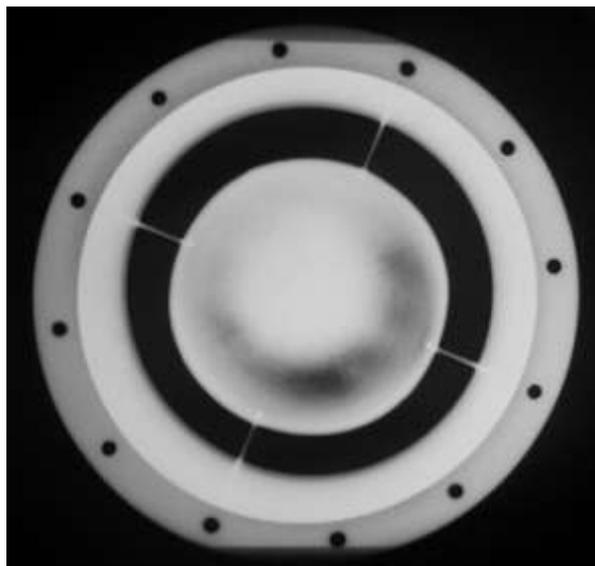
пространственную конфигурацию, традиционный рентгенографический контроль имеет крайне низкую производительность. Цифровая радиография, имея более широкий динамический диапазон и большую контрастную чувствительность, позволяет исследовать такие детали с большей технологичностью.



а



б



в

Рисунок 3 – Цифровые рентгенографические изображения деталей, полученных методом селективного лазерного сплавления

3.4 Контроль при диагностике и техническом обслуживании летательных аппаратов

Помимо использования ЦР как операции производственного цикла изготовления изделия, большие перспективы имеет применение этого метода в процессе эксплуатации ЛА, о чем так же свидетельствует и зарубежный опыт. При помощи цифровой радиографии можно определять взаимное положение внутренних конструктивных элементов обследуемых конструкций и агрегатов без их демонтажа, деформации и изменения местоположения элементов конструкций, выявлять воду (лед) и дефекты объемного характера (смятие сот, нестыковка сот, нарушение геометрии сот и пр.) в сотовых конструкциях, разрушения и отклонения в клепаных и болтовых соединениях силовых наборов конструкций планера ЛА и т.д. Специалистами ФГУП «ВИАМ» проводятся работы по внедрению мобильных средств цифровой радиографии при контроле деталей в производстве, а также при проведении летных и наземных испытаний.

4. Выводы

1. Внедрению ЦР на предприятиях, производящих авиационную технику, должно предшествовать изучение информации о существующем рынке оборудования и технических решениях для цифровой радиографии, нужны соответствующие компетенции в области цифровых технологий и понимание основ технологии контроля, позволяющие оценить применимость оборудования для решения поставленных задач.

2. Эффективность применения метода ЦР в РФ возможна при обеспечении возможности квалификации и сертификации персонала в соответствующей области. С этой целью специалистам ВИАМ необходимо разработать программу тестирования и аттестации по цифровым технологиям и регламентировать ее соответствующими НТД

3. Применение цифровых детекторов, при соблюдении технологии контроля, возможно на всех стадиях производства, на которых в настоящее время проводится контроль с использованием радиографической пленки.

Установлено, что технология проведения контроля с применением цифровых детекторов существенно отличается от традиционной радиографии, что требует отражения в нормативной документации. В дальнейшем, имея в распоряжении конкретную систему для ЦР, предприятию совместно с ВИАМ необходимо разработать технологию контроля и поэтапно осуществлять замену традиционной радиографии на цифровую.

УДК 681.2.08

Обнаружение малоразмерных металлических включений в изделиях из композитных материалов вихретоковым методом

Кузнецов А.О.¹

¹АО ЦНИИСМ

Аннотация:

Настоящая работа выполнялась в рамках диссертационной работы «Вихретоковый метод и средства контроля малоразмерных металлических включений в многослойных композитных конструкциях».

Проведены исследования проблем обнаружения малоразмерных металлических включений в неэлектропроводных материалах, в т.ч. из многослойных полимерных композитных материалов (ПКМ).

Из возможных потенциально приемлемых методов неразрушающего контроля (НК) выбран наилучший для решения поставленной задачи - вихретоковый.

Показано, что основными проблемами решения данной задачи являются:

- отсутствие достоверной математической модели, описывающий процесс обнаружения;*
- случайное месторасположение включений в материале (на глубине до 40 мм) изделия, что предполагает сканирование изделия с малым шагом;*
- произвольная геометрическая форма включений;*
- малый размер включений (до 0,2 мм), что обуславливает необходимость высокой чувствительности аппаратуры и специальных методов обнаружения дефектов на фоне структурных помех и неоднородностей;*

- отсутствуют аппаратно-технические средства, обеспечивающие выявление включений малых размеров;*
- отсутствуют промышленные методики обнаружения малоразмерных металлических включений и др.*

Показано, что часть задач была решена ранее. В частности, проблема определения глубины залегания металлического включения в ПКМ по своей форме напоминающего вытянутый сфероид.

На основании проведенных исследований сформулирована цель научной диссертации и разработан перечень решаемых задач для достоверного высокопроизводительного обнаружения малоразмерных металлических включений в неэлектронных материалах.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, композитные материалы, магнитные поля, качество

Одним из видов дефектов, возникающих при производстве сложных многослойных конструкций из ПКМ являются металлические включения, имеющие малые размеры (до 0,2 мм) и случайное расположение по объему материала. Как правило, такие дефекты являются недопустимыми для конструкции.

Основными проблемами при обнаружении малоразмерных металлических включений являются их случайное месторасположение и форма, а также физические свойства как самих металлических включений, так и материала изделия.

Исследования показали, что данная задача может быть решена несколькими методами неразрушающего контроля (НК), например, рентгеновским, тепловым, ультразвуковым или вихретоковым. При определении метода контроля на один из первых планов выступают проблемы достоверности обнаружения, экономические, безопасности труда, производительности и т.п.

Например, современные системы радиационного контроля [1] позволяют осуществлять обнаружение металлических элементов в реальном времени в материале изделия. Чувствительность контроля зависит от плотности материала и толщины просвечиваемого объекта, его формы и ориентации, режима и условий просвечивания, метода регистрации результатов контроля.

Недостатки данного метода контроля очевидны: необходимость радиационной защиты человека, низкая мобильность, большая стоимость технических средств и т.п.

Перспективным методом НК и диагностики является быстро развивающийся тепловой НК [2, 3], где информацию о параметрах объекта несет температура его поверхности, значения которой в основном определяются параметрами возбуждения теплового поля, изменением теплофизических, геометрических характеристик объекта контроля и дефекта и т.п.

Недостатками данного метода контроля являются необходимость воздействия электромагнитного (теплового) излучения на изделие, что не всегда допустимо. Кроме того, тепловой контроль при всех его преимуществах имеет ограничения по обнаружению дефектов на большой глубине залегания.

Достаточно известным методом НК является ультразвуковой НК [3, 4, 5]. Однако он не всегда способен регистрировать малоразмерные дефекты в конструкциях из ПКМ.

Как показали исследования, наиболее подходящим методом НК для решения поставленной задачи является вихретоковый, где с помощью преобразователя генерируется магнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в материале объекта. По изменению магнитного поля, созданного вихревыми токами, судят о наличии дефектов. [6]

Проведены патенто-информационные исследования возможности обнаружения металлических включений с помощью вихретокового НК.

Схожие задачи рассматривались в работах Будадина О.Н., [3, 7] и других исследователей.

В работе [7] описано решение аналогичной задачи - способ контроля толщины резиноподобного покрытия в изделии из ПКМ вихретоковым методом над подложками в виде металлических колец.

В работе [8] решалась похожая задача по обнаружению малоразмерных металлических включений в полимерных композитных материалах (ПКМ). Существенным отличием данной задачи является то, что месторасположение металлических включений известно.

Исследования так же показали, что известные способы и технические средства не позволяют определить местонахождение малоразмерных металлических включений с произвольными месторасположением, формой и размером в объеме материала с необходимой точностью.

На основании проведенных исследований сформулирована цель и разработан перечень решаемых задач, направленных на усовершенствование существующих технологий контроля металлических включений в изделиях из ПКМ имеющих произвольное месторасположение и геометрическую форму.

Литература

[1] Артемьев Б.В., Буклей А.А., под общ. ред. В. В. Ключева; Радиационный контроль: учебное пособие. - 2-е изд. – М.: Спектр, 2013. – 191 с.: ил.

[2] Будадин О.Н. и др., Тепловой неразрушающий контроль изделий, М., Наука, 2002, С. 338–393.

[3] Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: ИД «Спектр», 2013. – 243 с.

[4] Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

[5] Алешин Н.П., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г., под общ. ред. В. В. Ключева; Ультразвуковой контроль: учебное пособие. — М.: Спектр, 2011. — 224 с.: ил.

[6] Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.3. Электромагнитный контроль: Практи. пособие; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1992. – 312с.: ил.

[7] Будадин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О., Щипцов В.С. Вихретоковый толщиномер для многослойных конструкций из диэлектрических материалов с кривизной поверхности на основе интеллектуального преобразователя. // Контроль. Диагностика – 2015 - №8 – С. 44–49.

[8] Кузнецов А.О., Козельская С.О., Щипцов В.С., Абрамова Е.В. Разработка технологии вихретокового метода и аппаратуры обнаружения и определения глубины залегания малоразмерных металлических включений в полимерном композитном материале. // Контроль. Диагностика – 2017 - №12 – С. 42–47.

УДК 620.179.16

**Моделирование процессов преломления и последующего
распространения широкополосных импульсов сферически
сфокусированных ультразвуковых волн при их падении из жидкости
на плоские поверхности твердого тела под различными углами**

Ложкова Д.С.¹; Далин М.А.¹

lozhkovads@gmail.com

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Задачи расчёта процесса распространения упругих колебаний в твёрдой и жидкой среде, имеет значительный потенциал в решении многих прикладных задач. Одной из таких задач является определение поправочных коэффициентов, уравнивающих чувствительность ультразвукового неразрушающего контроля для:

- объектов с криволинейной поверхностью при настройке дефектоскопического оборудования на образцах с плоской поверхностью;*
- случая ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля под углом, отличным от угла ввода при настройке дефектоскопического оборудования.*
- решения вопросов оценки достоверности автоматизированного ультразвукового контроля.*

Определение поправочных коэффициентов и нахождение амплитуд от дефектов различной ориентации для решения вопросов оценки достоверности контроля возможно с использованием математического

моделирования процессов, происходящих при излучении, приёме, распространении ультразвуковых волн, и их взаимодействии с находящимся в материале отражателем. Разработанная модель учитывает возможность применения фокусированных широкополосных иммерсионных ультразвуковых преобразователей, в том числе с кольцевым пьезоэлементом, корректно описывает явления на границе раздела жидкость/твёрдое тело, в том числе для случаев наклонного падения ультразвуковых пучков, предусматривает возможность задания частотно-зависимого коэффициента затухания ультразвука.

Работа предусматривала экспериментальную проверку корректности разработанной математической модели на натуральных образцах с различными внутренними отражателями.

Ключевые слова:

автоматизированный ультразвуковой контроль, вероятность обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле, математическое моделирование процессов распространения волн от фокусированного преобразователя

Современной тенденцией развития неразрушающего контроля в особо ответственных отраслях промышленности является ужесточение требований к нему. В данном направлении ведется значительное количество разноплановых работ, в том числе связанных с повышением чувствительности проводимого контроля на основных и особо ответственных деталях газотурбинного двигателя, а также по ужесточению требований к объему чистового контура детали в заготовке, проконтролированного центральным лучом преобразователя.

В большинстве случаев форма заготовок не обладает благоприятной геометрией с точки зрения контролепригодности, поэтому для возможности реализации вышеуказанных требований необходимо наклонять акустическую ось преобразователя относительно поверхности ввода на различные углы,

тем самым охватывать труднодоступные для контроля зоны. При контроле во всем объеме объекта исследования необходимо обеспечивать идентичную чувствительность контроля с возможностью ее подтверждения. Для подтверждения чувствительности используются настроечные образцы с искусственными дефектами. Однако изготовление настроечных образцов для каждого направления прозвучивания является трудоемкой и дорогостоящей процедурой. В связи с этим актуальной является задача разработки альтернативного подхода, позволяющего расчетным путем определить поправочные коэффициенты для кривой, выравнивающей чувствительность контроля по глубине, построенной на настроечных образцах с отражателями, ориентированными для характерного направления прозвучивания, при варьировании положения преобразователя относительно поверхности ввода уз-колебаний. Также следует отметить, что характерная геометрия поверхностей ввода ультразвуковых колебаний в объекты исследования, поступающих на участок ультразвукового контроля, является криволинейной. Несмотря на это в большинстве случаев настройка дефектоскопической аппаратуры производится по образцам с плоской поверхностью без последующей корректировки общего усиления системы, что приводит к неравномерности чувствительности контроля по объему материала, а в некоторых случаях – к несоответствию уровня контроля требованиям конструкторской документации.

Для корректного и быстрого определения поправочных коэффициентов необходимо использовать вычислительный подход, позволяющий быстро находить решения прямой задачи расчёта процесса распространения упругих колебаний в твёрдой и жидкой средах. Использование вычислительного подхода имеет значительный потенциал не только в области расчета различных поправочных коэффициентов компенсации, но также в решении многих прикладных задач, в том числе при проведении специальных испытаний по оценке достоверности применяемых технологий ультразвукового контроля. Для решения данной задачи преимущества

вычислительного подхода очевидны: это и большой объем проанализированной информации, уменьшение временных ресурсов, затрачиваемых на проведение эксперимента, но самое главное – возможность имитировать совершенно разную ориентацию дефектов, зависящую от конечной формы заготовки диска, т.е. его использование приводит к уменьшению допущений, связанных с усреднением и распространением результатов, получившихся на одном полуфабрикате, на подобный тип, но отличающийся по геометрическим параметрам.

Независимо от описанных вариантов применения математической модели, имитирующей процессы, происходящие при ультразвуковом контроле, необходимо обеспечивать корректный расчет отраженного эхосигнала не только для внутренних отражателей/несплошностей, имеющих всевозможную форму, и ориентацию, но и с учетом характеристик и параметров, используемого при контроле оборудования.

В настоящий момент существует ряд готовых зарубежных программных продуктов, например CIV4 или Picasso, специализирующихся на моделировании процессов распространения/приема ультразвуковых колебаний возбуждаемых преобразователями различного типа (иммерсионный, контактный и т.д.) в средах с отличающимися акустическими свойствами. Решения, предложенные в данных программных продуктах, основываются на реализации численного подхода во временной области.

В России также разрабатываются модели, реализуемые во временной области, описывающие волновые процессы, происходящие при излучении ультразвуковых волн в контролируемое изделие, но в большинстве случаев модели ориентированы на решение задач контактного ультразвукового контроля.

В данной работе было предложено проводить моделирование иммерсионных ультразвуковых преобразователей различной конфигурации в частотной области. Моделирование в этой области позволяет учесть частотно

зависимую составляющую коэффициента затухания, связанную с рассеиванием ультразвуковых колебаний на границе зерен и тем самым минимизировать ошибки при вычислении компенсирующих коэффициентов.

В общем виде задачу расчета поля иммерсионного фокусирующего преобразователя (ПЭП) можно схематически подразделить на следующие подмодели:

– ультразвуковые колебания, распространяющиеся от первичного излучателя – ПЭП, формируют на поверхности объекта исследования излучающую поверхность фокусирующей системы – поле вторичного излучателя;

– ультразвуковые колебания, создаваемые уже вторичным излучателем, распространяются в материале объекта исследования;

– ультразвуковые колебания, распространяющиеся от внутренней несплошности, залегающей в объекте исследования из титанового сплава, возвращаются на линзу преобразователя.

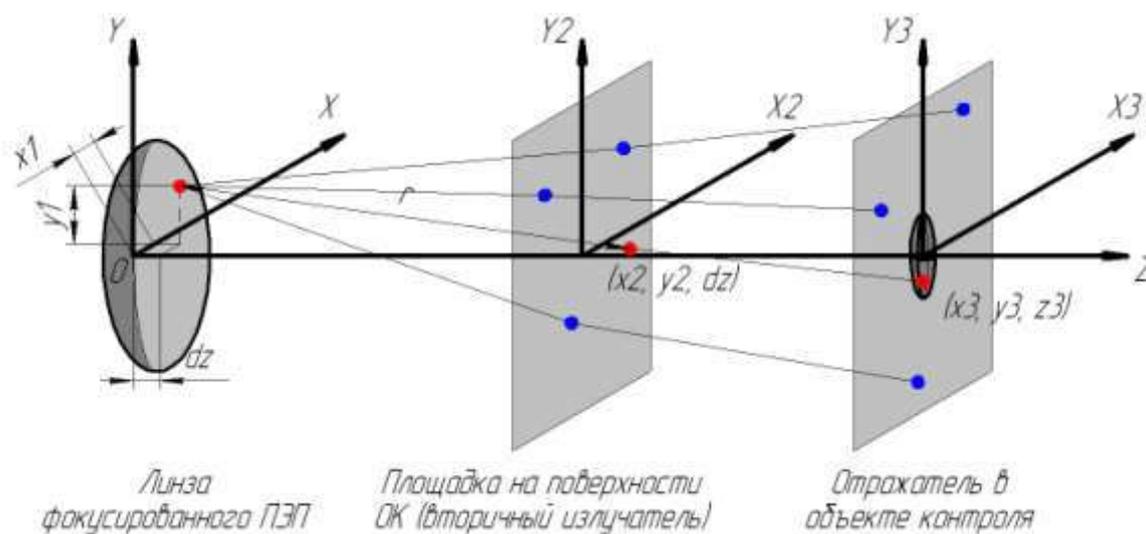


Рисунок 1– Схематическое представление алгоритма расчета поля иммерсионного фокусирующего преобразователя

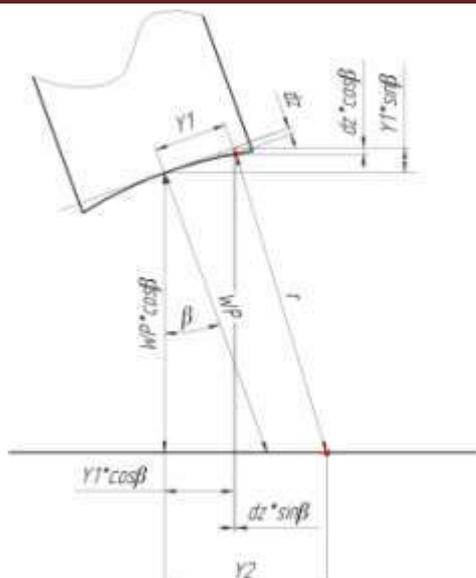


Рисунок 2 – Схематическое изображение расчета поля на поверхности

Амплитуду давления P_1 , которую создает первичный излучатель в любой точке площадки $(x_2 \times y_2)$ на поверхности объекта контроля, можно найти, используя следующее выражение:

$$P_1(x_2, y_2) = -\frac{i \cdot k \cdot WP}{2\pi} P_0 \int_{S_{\text{ПЭП}}} \frac{e^{i \cdot k \cdot r(x_2, y_2, dz, x_1, y_1)}}{r^2(x_2, y_2, dz, x_1, y_1)} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

где x_1 и y_1 координаты точки на поверхности преобразователя, P_0 – амплитуда давления, создаваемая на выходной поверхности линзы ПЭП при излучении, $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ – волновое число излучаемой продольной волны, $\lambda = \frac{c}{f}$ – длина волны; f – частота колебаний излучаемой волны, c – скорость распространения в среде ультразвуковых колебаний; WP – расстояние от торца ПЭП до поверхности ввода ультразвуковых колебаний; r – расстояние от излучающего элемента до поверхности ввода ультразвуковых колебаний, определяющееся с использованием выражения 2:

$$r = (WP \cdot \cos\beta - dz \cdot \cos\beta + y_1 \cdot \sin\beta)^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1 \cdot \cos\beta - dz \cdot \sin\beta)^2 \quad (2)$$

Аналогично амплитуду давления P_2 , которую создает вторичный излучатель в произвольной точке (x_3, y_3) на поверхности контрольного отражателя или дефекта, можно представить с использованием выражения 3:

$$P_2(x_3, y_3) = -\frac{ikz_2}{2\pi} \int_{S_{ok}} \frac{e^{i \cdot k \cdot r(x_3, y_3, z_2, x_2, y_2)}}{r^2(x_3, y_3, z_2, x_2, y_2)} \cdot P_1(x_2, y_2) dx_2 dy_2, \quad (3)$$

где S_{ok} площадка на поверхности объекта контроля, через которую осуществляется ввод ультразвуковых колебаний. Исходя из соображений симметрии системы, амплитуда давления, создаваемая ультразвуковой волной, отраженной от внутренней несплошности, на пьезопластине преобразователя, может быть вычислена на основе формулы 4.

$$A(x_3, y_3) = A_0 \cdot \int_{S_{ko}} P_2(x_3, y_3)^2 dx_3 dy_3, \quad (4)$$

где S_{ko} площадь внутренней несплошности в объекте исследования, от которой принимается сигнал, A_0 коэффициент, зависящий от параметров преобразователя и электрического тракта дефектоскопической аппаратуры.

Ранее было упомянуто, что моделирование процессов преломления и последующего распространения широкополосных импульсов сферически сфокусированных ультразвуковых волн при их падении из жидкости на плоские поверхности твердого тела под различными углами имеет значительный потенциал для реализации прикладных задач, поэтому она должна учитывать особенность электрического тракта конкретного оборудования. Приведенные формулы (1, 3-4) справедливы для монохроматической волны, но ультразвуковые ПЭП излучают короткий сигнал с широким спектром частот, которые оказывают влияние на итоговую форму принятого эхосигнала. Для учета и частотных характеристик ПЭП, и электрического тракта используемой дефектоскопической аппаратуры был предложен способ фиксации и последующего формирования импульсного отклика, учитывающего их.

Предварительно для типичных ПЭП, применяемых при контроле заготовок из титановых сплавов на предприятиях авиационной отрасли, в иммерсионной среде были получены импульсные отклики – в геометрической фокальной плоскости используемого преобразователя зафиксирован эхосигнал в форме А-скана от точечного отражателя. В качестве точечного отражателя использовалось плоскодонное сверло из титанового сплава диаметром 0,4 мм, фиксировалась амплитуда от его торцевой поверхности. Параметры оборудования (амплитуда и ширина зондирующего импульса, демпфер; ЧСИ, фильтры и т.д.), используемого при проведении эксперимента, использовались аналогичные, что и при контроле. В результате разложения в ряд Фурье снятого А-скана, были получены коэффициенты A_0 для каждой излучаемой частоты f_i , используемые в выражении 4. Сравнение реального сигнала и сигнала, восстановленного из ряда Фурье (рисунок 3) показывает, что выбранная дискретность квантования спектра и диапазон частот не приводят к заметной ошибке, которая могла бы сказаться на точности дальнейшего математического моделирования.

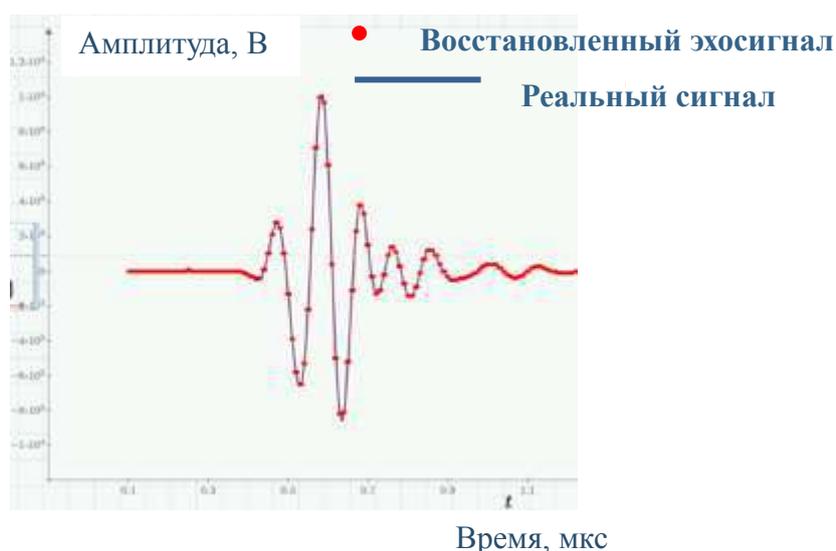


Рисунок 3 – Сравнение реального сигнала и восстановленного

Для дальнейшего моделирования процессов при ультразвуковом иммерсионном контроле использовался вычисленный импульсный отклик системы, учитывающий, частотные характеристики ПЭП и электрического тракта дефектоскопической аппаратуры.

В разработанной математической модели были также учтены зависящие от углов падения ультразвуковых волн коэффициенты прозрачности границы вода-металл (по приближенным формулам Френеля) и частотная зависимость затухания ультразвука в титане.

При реализации модели была использована равномерная, квадратная сетка конечных элементов. Шаг сетки для поверхностей преобразователя и объекта контроля выбирался наибольшим, при котором обеспечивается минимизация погрешностей, вызванных пространственной дискретизацией, что обеспечивалось анализом пространственного спектра распределения поля по поверхности на самой высокой частоте, попадающей в полосу частот преобразователя.

Из теории известно, что в случае, если дефект меньше четверти длины волны, то отражение от него практически не происходит, а доминирует дифракционный эффект. Поэтому изначально при выборе шага конечных элементов равномерной, квадратной сетки, на которые разбивались поверхности преобразователя, объекта контроля и дефекта, планировалось использовать в качестве шага сетки величину, равную четверти длины волны ($\lambda/4$), рассчитанную для максимально излучаемой частоты, попадающей в полосу пропускания используемого ПЭП.

$$\lambda = \frac{C_{water}}{f_{max}} \quad (5)$$

где C_{water} - скорость распространения ультразвуковых колебаний в иммерсионной жидкости, 1.49×10^3 м/с,

f_{max} – максимальная частота, попадающая в полосу пропускания, для 5 МГц – 8,5 МГц.

Для фокусированного преобразователя с центральной частотой 5 МГц данное значение составило 0,04 мм.

С использованием данного показателя шага разностной сетки h , мм, на поверхности объекта контроля было построено сечение поля излучения для наибольшей из излучаемых частот, т.е. 8,5 МГц. Далее было определено значение пространственной частоты $f_{\text{простр}}^{\text{max}}$.

С использованием расчетного значения пространственной частоты можно определить минимально необходимый шаг дискретизации с учетом теоремы Котельникова. Для того чтобы восстановить исходный непрерывный сигнал с малыми искажениями необходимо, чтобы шаг дискретизации d_x отвечал следующему условию:

$$dx < \frac{1}{2 \cdot f_{\text{простр}}^{\text{max}}} \quad (6)$$

Используемые значение при математическом моделировании составили от 0,05 до 0,15 мм для ПЭП с центральной частотой 10 МГц и 5 МГц соответственно.

Для того чтобы избежать различных артефактов, возникновение которых возможно при восстановлении эхосигналов в ряд Фурье, необходимо было рассчитать время прихода сигналов от двух наиболее удаленных точек на поверхности объекта контроля (рисунок 4).

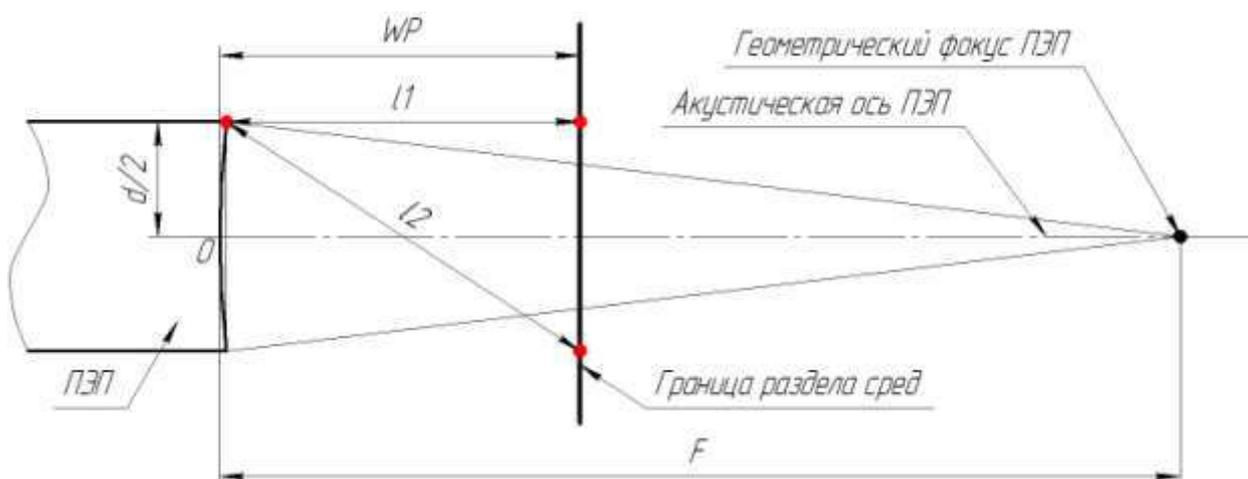


Рисунок 4 – Схематическое изображение расположения наиболее удаленной и наиболее приближенной точки на границе раздела двух сред относительно единичного точечного излучателя на поверхности ПЭП

$$\Delta t = \frac{l_2 - l_1}{c_{water}} = \frac{(WP - (F - \sqrt{F^2 - \frac{d^2}{4}}))^2 + d^2 - (WP - (F - \sqrt{F^2 - \frac{d^2}{4}}))}{c_{water}} \quad (7)$$

где WP - расстояние от торца преобразователя до поверхности ввода ультразвуковых колебаний, мм;

F – геометрический фокус используемого преобразователя, мм;

d – диаметр пьезопластины, мм;

c_w – скорость распространения ультразвуковых колебаний в иммерсионной жидкости, $1,49 \times 10^3$ м/с.

Таким образом, для преобразователя со сферической фокусировкой 6 дюймов по воде с диаметром пьезопластины d 19,5 мм и центральной частотой 5 МГц, при расстоянии по воде WP равным 75 мм было получено, что разница времени прихода сигнала Δt от точки на поверхности ОК при наикратчайшем расстоянии между точкой на поверхности линзы и поверхностью ввода и самой удаленной точкой на поверхности ввода от этой же точки на линзе составило 1,7 мкс. Перед расчетом Δt было найдено положение геометрического фокуса F , мм, для преобразователя с вышеуказанными параметрами. Для этого находилось положение ближней зоны

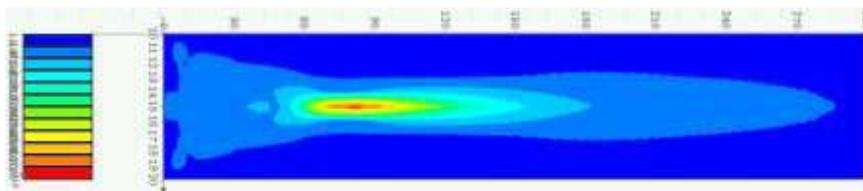
$$N = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{a^2 \times f}{c_{water}}, \quad (8)$$

где a радиус пьезопластины, мм;

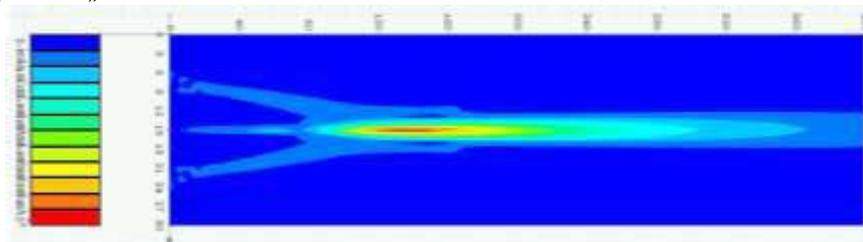
На основе значения ближней зоны вычислялось значение геометрического фокуса F для данного преобразователя, которое 190 мм.

На основе приведенных уравнений в программной среде *Mathcad* была построена структура распределения акустического поля в иммерсионной жидкости для фокусированных ПЭП. Их визуализация приведена на рисунке 5 для трех типов моделируемых преобразователей *ID 5/10* и *V308*.

а) ID 5/10 (10 МГц)



б) ID 5/10 (5 МГц)



в) V308

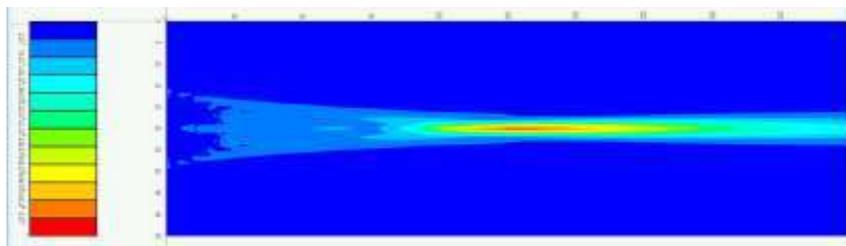


Рисунок 5 – Структура поля фокусированного ПЭП в иммерсионной жидкости

- а) для двухэлементного ПЭП ID 5/10 – излучает внутренняя площадка с центральной частотой 10 МГц;
- б) для двухэлементного ПЭП ID 5/10 – излучает внешнее кольцо с центральной частотой 5 МГц;
- в) для фокусированного ПЭП V308

Из данных изображений видно, что положение акустического фокуса совпадает со значениями, указанными в паспорте, т.е. 6” дюймов для ПЭП с центральными частотами 5 МГц, 3” дюйма для ПЭП с центральной частотой 10 МГц.

Далее в математическую модель вводилась поверхность, имитирующая границу раздела двух сред иммерсионная жидкость/титановый сплав. Для каждого преобразователя расстояние от его торца до поверхности ввода ультразвуковых колебаний выбиралось равным используемым величинам при серийном контроле полуфабрикатов из титановых сплавов. На основе описанных ранее уравнений в программной среде *Mathcad* была создана и решена система уравнений, позволяющая построить поле вторичного излучателя на поверхности объекта контроля при положении акустической

оси преобразователя перпендикулярно поверхности ввода ультразвуковых колебаний. На рисунке 8 приведены диаметральные сечения пучков фокусирующего ПЭП *ID 5/10 ScanMaster* при работе внешнего кольца линзы при излучении частот от 1 МГц до 8,5 МГц с шагом 0,5 МГц на площадке размером 20×20 мм на поверхности ОК, погруженного в иммерсионную жидкость, при расстоянии от торца преобразователя до границы раздела сред 75 мм.

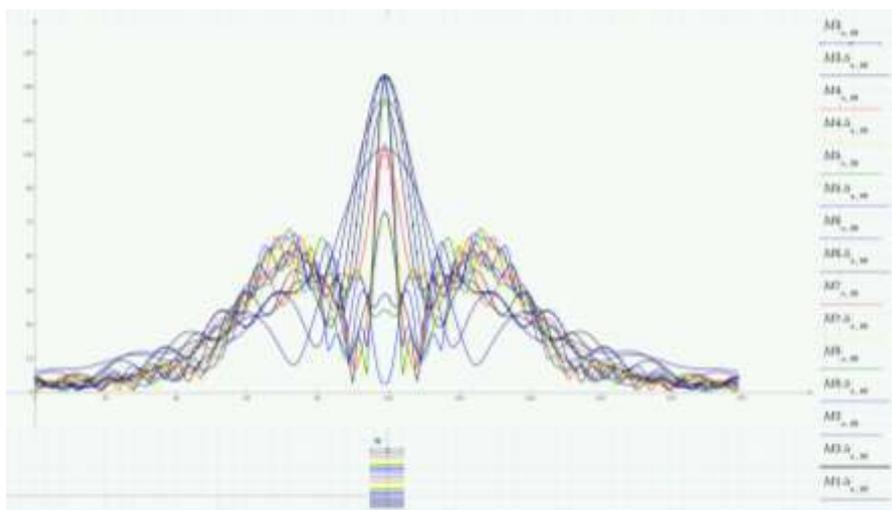


Рисунок 6 – Поле вторичного излучателя на поверхности объекта исследования

Дополнительно при создании математической модели учитывалось, что серийный контроль полуфабрикатов из титановых сплавов в авиационной отрасли проводится не только с использованием продольных колебаний, но и с использованием сдвиговых, причем отраслевой нормативный документ регламентирует проведение данного контроля в четырех направлениях: в тангенциальном направлении по и против часовой стрелки, в радиальном к центру и от центра заготовки. Для реализации данной особенности была сформирована и решена система уравнений, позволяющая описывать поле на поверхности объекта контроля при наклонном вводе ультразвуковых колебаний в объект исследования. Моделирование проходило для аналогичных ПЭП, что и при контроле с использованием продольных волн, только акустическая ось преобразователя наклонена относительно нормали к

поверхности ввода на угол 20 градусов. Визуализация структуры поля в воде от ПЭП с наклоненной акустической осью приведена на рисунке 7.

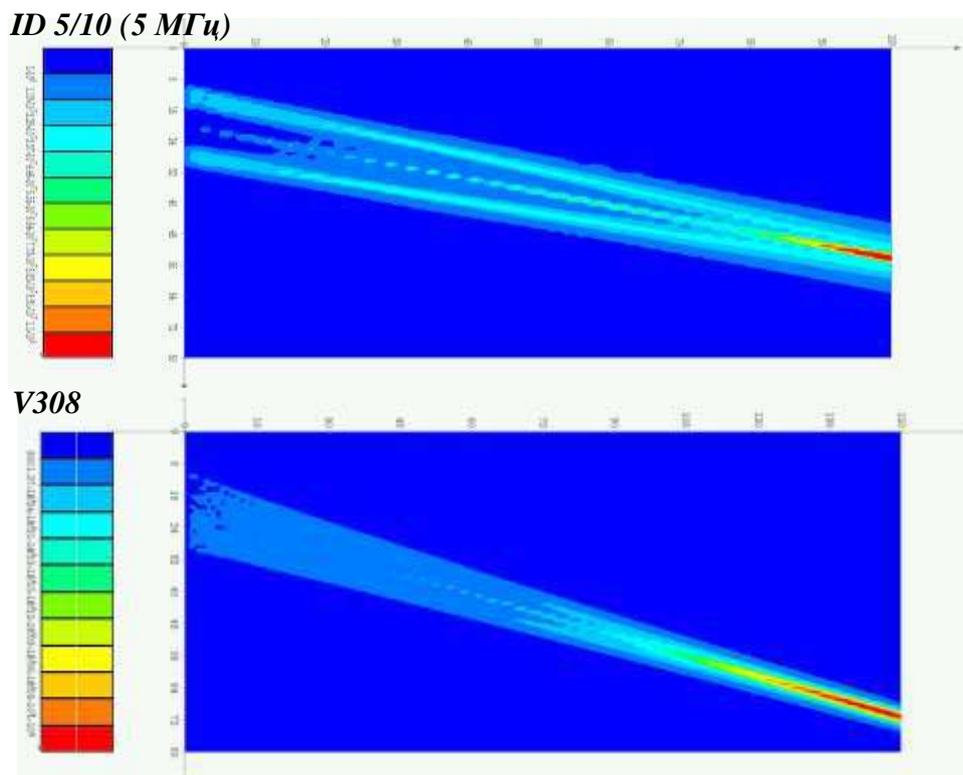


Рисунок 7 – Структура поля при распространении сдвиговых колебаний в иммерсионной жидкости для ПЭП V308 и ID5/10

Следующий этап создания математической модели заключался в добавлении поля излучения от созданного на поверхности объекта контроля вторичного излучателя. При распространении ультразвуковых колебаний в различных средах вследствие необратимых потерь происходит ослабление волны, вызванное затуханием. Затуханием ультразвуковых колебаний называют явление уменьшения амплитуды колебаний частиц в звуковой волне, вызванное процессами рассеяния и поглощения.

Для учета затухания использовалась следующая формула:

$$\delta_p = C_1 f + C_2 \cdot D^3 \cdot f^4 \quad (9)$$

где C_1 – коэффициент, характеризующий учет поглощения;

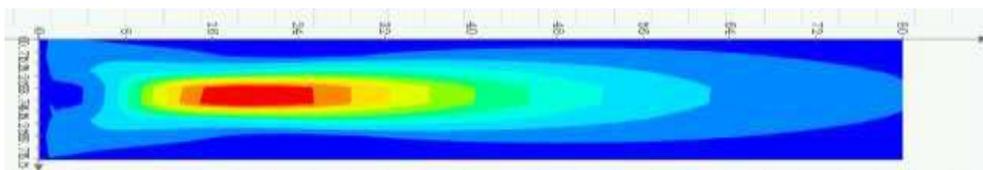
C_2 – коэффициент, характеризующий учет рассеяния;

D – средний размер кристаллов;

f – частота контроля.

В формулу 4 был введен коэффициент затухания и рассчитаны распределения акустических полей в титановом сплаве для ПЭП используемых на начальной стадии моделирования. На рисунке 8 приведена визуализация для ПЭП *V308 Panametrics* при вводе продольных и сдвиговых колебаний.

а) *V308 Panametrics* - ввод продольных ультразвуковых колебаний в титановый сплав



б) *V308 Panametrics* - ввод сдвиговых ультразвуковых колебаний

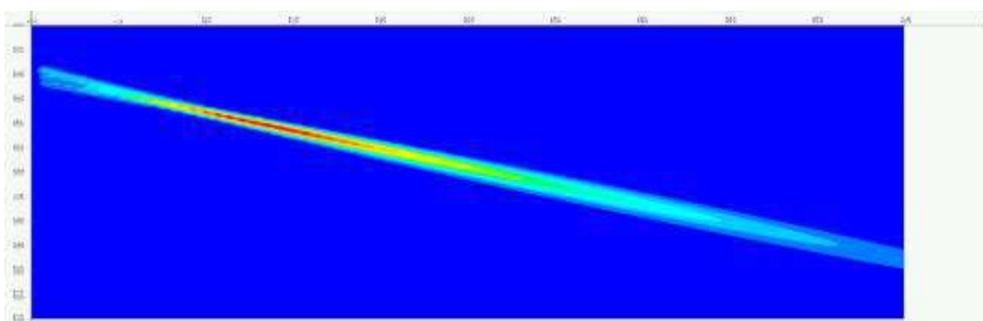


Рисунок 8 - Визуализация для ПЭП *V308 Panametrics* при вводе продольных и сдвиговых колебаний

В качестве косвенной проверки правильности построения было рассчитано положение фокальной области, которое указывается в паспорте на ПЭП. Данный показатель расположения фокальной точки ПЭП по глубине объекта исследования, мм; H_{Focus} можно рассчитать следующим образом:

$$H_{Focus} = \frac{(PTF - WP)C_{Water}}{C_{Ti}} \quad (10)$$

где PTF – фокусное расстояние по воде для конкретного ПЭП, мм. Данная величина берется из паспорта на ПЭП;

WP – расстояние от торца преобразователя до поверхности ввода ультразвуковых колебаний;

C_{Ti} – скорость распространения ультразвуковых колебаний в титановом сплаве. Для всех титановых сплавов, кроме интерметаллидных, можно принять 6,1 мм/мкс для продольных уз-колебаний, 3,5 мм/мкс для сдвиговых;

C_{Water} – скорость распространения ультразвуковых колебаний в воде, при температуре $(26 \pm 1) ^\circ\text{C}$ можно принять 1,49 мм/мкс.

Таким образом, для ПЭП V308 расчетное расположение фокуса в объекте исследования H_{Focus} при WP равным 75 мм и PTF равным 6 дюймов, находится на глубине 19 мм при вводе продольных уз-колебаний и 33 мм при вводе сдвиговых. Из рисунка 8 видно, что данные величины практически совпали.

Следующим этапом усовершенствования математической модели является добавление дефектов произвольной формы. Наиболее распространенный способ описания металлургического дефекта - это представление его в виде эллипсоида, который может быть описан размерами осей (полуосей) и углами их поворота относительно поверхностей ввода ультразвуковых колебаний в объект исследования. Шаг сетки конечных элементов на поверхности контрольного отражателя (дефекта) выбирался наибольшим, при котором случайная погрешность, обусловленная небольшим количеством точек на поверхности, не превышала 5 % для самого маленького контрольного отражателя.

Для оценки корректности и работоспособности разработанной математической модели и правильности выбранных коэффициентов, учитывающих затухание, постоянно проводились сравнительные эксперименты с результатами натуральных замеров.

На образцах из титанового сплава ВТ8-1, используемых для настройки дефектоскопического оборудования при серийном ультразвуковом контроле заготовок дисков ГТД из титановых сплавов, были получены эхосигналы:

1) от плоскодонных контрольных отражателей диаметром 0,8 мм, располагающихся от поверхности ввода ультразвуковых колебаний в объекте исследования на глубинах:

– 2 мм, 5 мм, 10 мм, 15 мм, 20 мм – для ПЭП с центральной частотой 10 МГц;

– 15 мм, 20 мм, 25 мм, 35 мм, 40 мм, 55 мм, 70 мм – для ПЭП с центральной частотой 5 МГц (продольный ввод).

2) от контрольного отражателя в виде отверстия глубиной 1 мм диаметром 0,50 мм с коническим дном на глубинах 4 мм, 7 мм, 10 мм, 20 мм, 30 мм для ПЭП с центральной частотой 5 МГц (наклонный ввод).

Оборудование, используемое при замерах эхосигналов от КО, аналогично используемому при штатном серийном контроле полуфабрикатов из титанового сплава на двух предприятиях авиационной отрасли ФГУП «ВИАМ» и АО «НПО «Сатурн», а именно:

1) ультразвуковая иммерсионная установка *LS500-LP ScanMaster*, применяемая в комплекте со следующими преобразователями:

– ПЭП с центральной рабочей частотой 10 МГц с фокусным расстоянием по воде по паспорту 3 дюйма, диаметром 12,7 мм, сферическая фокусировка, *V327 Panametrics*. Использовалось расстояние от торца преобразователя до поверхности ввода ультразвуковых колебаний при продольном вводе уз-колебаний *WP* 70 мм;

– ПЭП с центральной рабочей частотой 5 МГц с фокусным расстоянием по воде по паспорту 6 дюймов, диаметром 19,5 мм, сферическая фокусировка, *V308 Panametrics*. *WP* при продольном вводе уз-колебаний 70 мм, при наклонном – 50 мм;

2) ультразвуковая иммерсионная установка *LS200 ScanMaster*, применяемая в комплекте с двухэлементным ПЭП с центральными рабочими частотами 5/10 МГц, с фокусным расстоянием по воде по паспорту 6 дюймов для 5 МГц, диаметром 19,5 мм, сферическая фокусировка, *ID 5/10 ScanMaster*. *WP* при продольном вводе уз-колебаний 50 мм, при наклонном – 50 мм.

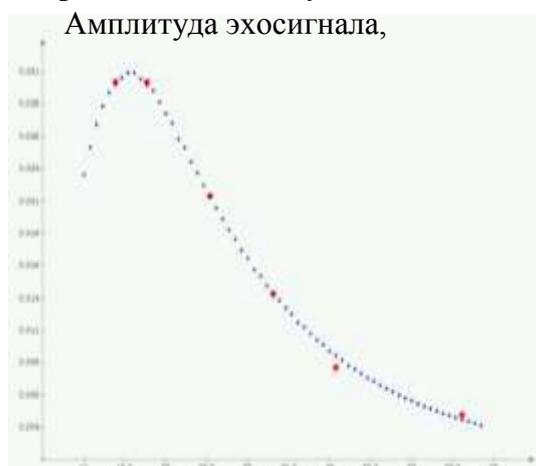
В качестве информативного параметра фиксировалось общее усиление системы при достижении эхосигнала от контрольного отражателя уровня в

80 % по экрану дефектоскопа. Параметры генератора дефектоскопического модуля *USC100* установок, настраивались аналогично используемым при проведении серийного контроля, а также при создании импульсного отклика от точечного отражателя.

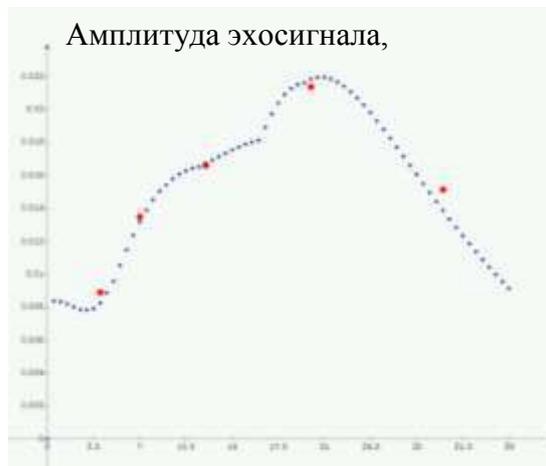
При вычислительном эксперименте моделировались указанные преобразователи и контрольные отражатели идентичной формы и месторасположением. Результаты натурального и вычислительного эксперимента приведены на графиках (рисунок 9).

Результаты сравнения для ПЭП с центральной частотой 5 МГц

Продольный ввод уз-колебаний



Сдвиговый ввод уз-колебаний



Глубина залегания КО $\varnothing 0,8$ мм, мм

Глубина залегания КО, эквивалентному по отражающей способности КО $\varnothing 0.8$ мм. мм

Рисунок 9 – Сравнение результатов математического моделирования и натуральных экспериментов для продольных и сдвиговых колебаний

На рисунке 10 приведены результаты вычислительного и натурального экспериментов для случая, когда фиксировалось общее усиление системы при достижении амплитуды эхосигнала уровня 80 % по экрану дефектоскопа, от отражателей, изменяющихся по площади, но располагающихся на одной глубине. В результате данного эксперимента удалось качественно оценить влияние изменения размеров контрольного отражателя на регистрируемый эхосигнал, а также сравнить наклон теоретической, экспериментальной и вычислительной кривой при прочих равных условиях, а именно:

– идентичная геометрия отражателей – круглый, плоскодонный отражатель;

– благоприятная ориентация – отражатель ориентирован перпендикулярно направлению прозвучивания и расположен в зоне расхождения сферической волны, распространяющейся от преобразователя;

– показатель затухания ультразвуковых колебаний в объекте исследования зафиксирован и одинаков для всех отражателей на данной глубине.

Предварительно с использованием *LS500-LP* в комплекте с преобразователем *V308* при вводе продольных ультразвуковых колебаний на образцах из комплекта мер (государственных стандартных образцов) КСО-2 с контрольным отражателем в виде плоскодонных отверстий диаметром 1,2 мм, 1,6 мм, 2,0 мм, залегающих на глубине 30 мм, фиксировалась амплитуда при достижении эхосигнала уровня 80 % по экрану дефектоскопа. Таким образом были получены эхосигналы, которые впоследствии сравнивались с результатами математического моделирования во временной и частотной областях, а также с результатами, полученными с использованием специализированного программного обеспечения CIVA, предназначенного для моделирования процессов при НК. На рисунке 10 приведены результаты сравнения, из которых видно, что использование математической модели, работающей в частотной области, позволяет получить высокую степень совпадения с данными натурных исследований – максимальное отклонение моделированных данных относительно натуральных составило не более 6,5 %.

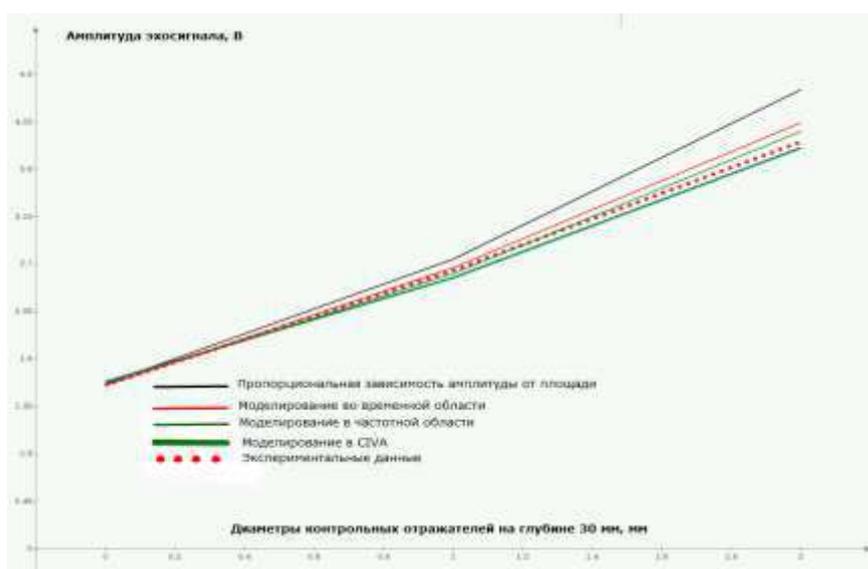


Рисунок 10 – Результаты сравнительного эксперимента

Анализируя результаты, приведенные на рисунке 10, можно заметить, что все кривые лежат ниже кривой, характеризующей пропорциональную зависимость амплитуды от площади, что может быть объяснено следующими причинами:

– на поверхность отражателя падает сферический фронт волны, поэтому будет наблюдаться разность во времени прихода откликов от точки, лежащей в центре отражателя и, например, от точки на его краю, в связи с этим аккумулярование сигнала может происходить с фазовым смещением, что в свою очередь приведет к уменьшению итоговой максимальной амплитуды. Данный эффект будет наблюдаться более выражено при увеличении диаметра отражателя;

– несмотря на то, что эксперимент происходил в области, находящейся после фокальной зоны перетяжки, в ней все равно присутствует неравномерность интенсивности сигнала, которая на оси будет больше, поэтому при увеличении диаметра отражателя будет увеличиваться объем периферийной области, которая будет давать меньшую прибавку в итоговый суммируемый сигнал.

Таким образом, максимальное отклонение моделированных данных относительно натуральных составило не более 6,5 %.

С использованием разработанной математической модели был сформирован массив ультразвуковых откликов от произвольно ориентированных дефектов в заготовках основных деталей ГТД из титанового сплава. Предварительно форма дефектов и их ориентация определялась с учетом деформационной картины оцениваемого полуфабриката. На основе полученной информации строилась кривая вероятности обнаружения дефектов при автоматизированном ультразвуковом контроле полуфабрикатов из титановых сплавов из которой находились основные показатели выявляемости дефектов по 1.

ОСТ 1 01207-2012 «Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей».

В дальнейшем разработанная математическая модель будет использована при определении поправочных коэффициентов, уравнивающих чувствительность ультразвукового неразрушающего контроля для:

- объектов с криволинейной поверхностью при настройке дефектоскопического оборудования на образцах с плоской поверхностью;
- случая ввода ультразвуковых колебаний в объект контроля под углом, отличным от угла ввода при настройке дефектоскопического оборудования.

УДК 620.17

Сопrotивление покрытий образованию трещин

Матюнин В.М.¹, д.т.н.; Соловьев М.К.², к.т.н.;

Агафонов Р.Ю.², к.т.н.; Аникин К.А.³;

Тюлькова А.А.²; Марченков АЮ.¹, к.т.н.;

Стасенко Н.А.¹; Абусаиф Нуха¹

Agafonov1989@gmail.com; Art-Marchenkov@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

²АО «Российские космические системы»

³ФГБОУ ВО «НИУ «МАИ»

Аннотация:

Предложена и обоснована методика определения удельной работы кинетического индентирования, необходимой для образования первых трещин в покрытиях.

Ключевые слова:

покрытия, радиальные и кольцевые трещины, трещиностойкость, кинетической индентирование, акустическая эмиссия

Одним из основных механических свойств покрытий является их трещиностойкость. Для упрочняющих покрытий, эксплуатирующихся в условиях повышенных контактных нагрузок и износа, трещиностойкость имеет особое значение. Обычно для таких покрытий стремятся обеспечить высокую твёрдость за счёт химического состава, строения и технологии обработки. Однако трещиностойкость связана с твёрдостью неоднозначно. Упрочняющие покрытия должны обладать оптимальным соотношением

твёрдости и вязкости разрушения, при которых достаточно их сопротивление зарождению и распространению трещин. Толщины упрочняющих покрытий невелики и чаще всего составляют несколько единиц или десятков микрометров. Учитывая малую толщину покрытий, для оценки их механических свойств, включая трещиностойкость, используется индентирование.

Известны способы определения трещиностойкости материалов индентированием пирамидой с измерением твёрдости и длин образовавшихся радиальных трещин, исходящих из углов отпечатка. Так, например, согласно способу D.K. Shetty [1], для расчёта критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} в случае образования радиальных трещин используется следующая формула:

$$K_{1c} = 0,0889 \left(\frac{HF}{4l} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где H – твёрдость; F – сила индентирования; $l = c - a$ ($2c$ – длина радиальной трещины, $2a$ – диагональ отпечатка).

В работе [2] выполнены исследования по развитию способа определения трещиностойкости материалов индентированием. Для этого вначале также в поверхность испытуемого материала вдавливают пирамиду с усилием F_1 до образования отпечатка с развивающейся из него трещины, измеряют после разгрузки размер отпечатка и длину радиальной трещины, после чего повторно прикладывают нагрузку вдавливания $F_2 > F_1$, обеспечивая страгивание трещины. Затем снова разгружают индентор и измеряют размер отпечатка и длину трещины, с учётом которых рассчитывают параметр трещиностойкости K_{1c} . Изложенный способ является более обоснованным для оценки сопротивления развитию образовавшейся трещины, однако вызывает затруднения процесс определения нагрузки F_2 , необходимой для страгивания трещины.

Изложенные выше способы оценки трещиностойкости материала реализуются при ступенчатом вдавливании индентора с измерением нагрузки

вдавливания, длины трещины, диагонали отпечатка и применимы только к радиальным трещинам. Вместе с тем часто встречаются случаи образования кольцевых трещин вокруг отпечатка, что не позволяет применить формулу (1), и аналогичные ей, для расчёта K_{1c} .

В работе [3] авторы настоящего доклада предложили методику определения значений нагрузки вдавливания $F_{кр}$ и глубины внедрения индентора $t_{кр}$, необходимых для образования первой видимой кольцевой трещины в покрытии. Такие кольцевые трещины образуются, например, при индентировании упрочняющих покрытий из TiN. Эта методика реализуется путём кинетического индентирования с регистрацией диаграммы вдавливания в координатах «нагрузка F – глубина внедрения индентора t ». Было установлено, что первый перелом на линии нагружения диаграммы вдавливания соответствует нагрузке $F_{кр}$ и глубине $t_{кр}$. Для подтверждения этого вывода были использованы метод акустической эмиссии и микроскоп для наблюдения за появлением первой трещины. Эксперименты показали, что в момент образования первой трещины при $F = F_{кр}$ возникали импульсы акустической эмиссии с высокими амплитудой и энергией, совпадающие по времени с появлением первого перелома на линии нагружения диаграммы вдавливания. При $F < F_{кр}$ кольцевая трещина вокруг отпечатка не появлялась, что подтверждалось наблюдением за отпечатком с помощью микроскопа.

Располагая диаграммой вдавливания и значениями $F_{кр}$ и $t_{кр}$, было предложено рассчитывать удельную работу $\omega_{кр}$, затраченную на образование первой кольцевой трещины по следующей формуле:

$$\omega_{кр} = \frac{W_{кр}}{V_{кр}} = 0,0612 \left(\frac{F_{кр}}{t_{кр}^2} \right), \quad (2)$$

где $W_{кр}$ – абсолютная работа индентирования; $V_{кр}$ – упругопластический объём отпечатка.

Абсолютная работа индентирования $W_{кр}$ определяется с использованием выражения

$$W_{кр} = \int_0^{t_{кр}} F dt, \quad (3)$$

а упругопластический объём отпечатка можно выразить через глубину отпечатка:

$$V_{кр} = 8,167t_{кр}^3. \quad (4)$$

В целях выяснения возможности использования кинетической диаграммы вдавливания для регистрации первого перелома для случая образования радиальной трещины были испытаны керамико-подобные покрытия. Эти покрытия, полученные в НИУ «МАИ» микродуговым оксидированием на установке МДО-100 с участием сотрудников АО «РКС», предназначены для обеспечения оптимального комплекса физико-механических свойств конструкционных материалов, используемых в космическом приборостроении. Покрытия были нанесены на традиционно используемый в космическом приборостроении алюминиевый сплав АМгб и имели толщины 15...70 мкм.

На рисунке 1а представлена кинетическая диаграмма вдавливания « $F - t$ » алмазной четырёхгранной пирамиды и фото отпечатка с образовавшимися радиальными трещинами для одного из керамико-подобных покрытий. На линии нагружения этой диаграммы чётко виден первый перелом, а на фотографии отчётливо различимы радиальные трещины, исходящие из углов отпечатка. Для сравнения на рисунке 1б представлены кинетическая диаграмма вдавливания и кольцевая трещина для покрытия из TiN, нанесённого ионно-плазменным напылением в НЦ «Износостойкость» НИУ «МЭИ». Такого типа покрытия предназначены для обработки рабочих лопаток паровых турбин в целях повышения сопротивления воздействию эрозии, коррозии, высоких температур и контактных напряжений. На линиях

нагружения диаграмм вдавливания для обоих типов покрытий чётко виден первый перелом, соответствующий образованию трещины.

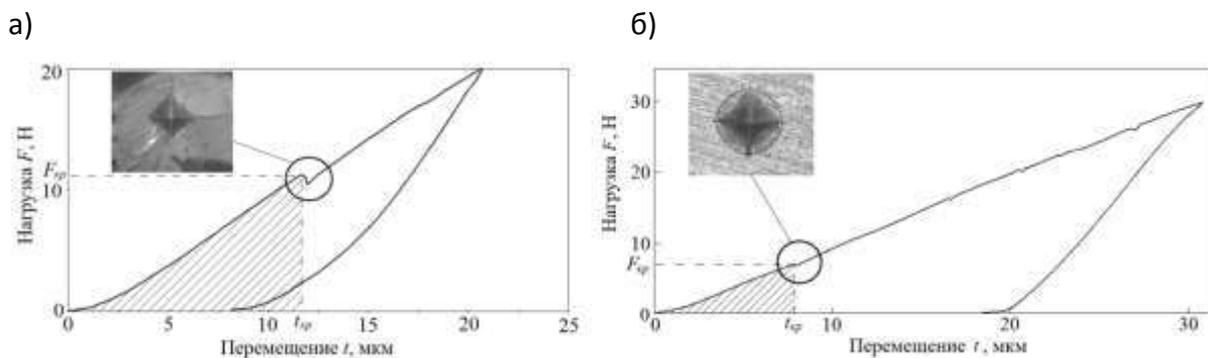


Рис. 1 – Кинетические диаграммы вдавливания алмазной четырехгранной пирамиды а в керамико-подобное покрытие (а) и покрытия из TiN (б) и фотографии отпечатков с трещинами

Представленные на рисунке 1 диаграммы вдавливания были получены на универсальной машине «Instron 5982». Для этого был изготовлен специальный штوك с индентором, встроенным в подвижную траверсу машины. Скорость деформирования составляла 0,025 мм/мин. При обработке диаграмм вдавливания учитывалась жёсткость испытательной машины, а расчёт невосстановленной глубины отпечатка выполнялся по методике Оливера-Фарра.

Для более полного экспериментального опробования предложенной методики определения $\omega_{кр}$ были подготовлены образцы из названных типов покрытий. Покрытия из TiN были нанесены на подложки из разных марок стали, а керамико-подобные покрытия имели разную толщину (от 12 до 25 мкм). Для каждого образца покрытий значение $\omega_{кр}$ определялось как среднее из результатов 3-4 испытаний индентированием. Результаты испытаний покрытий представлены в таблице 1.

Результаты определения сопротивления образованию радиальных и кольцевых трещин при индентировании покрытий

Номер образца	$F_{кр}$, Н	$t_{кр}$, мкм	$W_{кр}$, Дж	$\omega_{кр}$, Дж/мм ³
Покрытия из TiN				
1	1,27	4,0	$2,54 \cdot 10^{-6}$	4,86
2	1,86	3,2	$2,98 \cdot 10^{-6}$	11,12
3	1,67	2,7	$2,25 \cdot 10^{-6}$	14,0
Покрытия керамико-подобные				
4	10,79	7,0	$3,78 \cdot 10^{-5}$	4,60
5	14,71	14,0	$1,03 \cdot 10^{-4}$	8,06
6	9,52	8,5	$4,05 \cdot 10^{-5}$	13,48

Из таблицы 1 следует, что значения $\omega_{кр}$ могут значительно различаться в пределах одного типа покрытий. Чем больше $\omega_{кр}$, тем выше способность покрытия сопротивляться образованию трещины. Если сравнивать оба типа покрытий по $\omega_{кр}$, то диапазоны изменения этой характеристики различаются не слишком сильно, что свидетельствует о примерно одинаковой способности сопротивляться образованию трещин.

Таким образом, предложенный параметр $\omega_{кр}$, характеризующий удельную энергию индентирования, необходимую для образования первых трещин в покрытиях различного типа, является одной из характеристик трещиностойкости. Этот параметр легко определяется по кинетической диаграмме вдавливания индентора и может быть использован для оперативного сравнения качества различных покрытий и выбора оптимальных режимов технологий их нанесения.

Литература

1. Shetty, D.K. Indentation fracture of WC-Co cermets [Текст] / D.K. Shetty, I.G. Wright, P.N. Mincer, A.H. Clauer // Journal of materials science. – 1985. – Vol. 20. Issue 5. – pp. 1873-1882.

2. А.с. 1188578 СССР, МКИ G01 N3/40 Способ определения трещиностойкости материалов [Текст] / Н.В. Новиков, С.Н. Дуб, В.И. Мальнев; заявл. 20.07.1984. Бюл. №40.

3. Качанов, В.К. Оценка трещиностойкости упрочняющих покрытий по параметрам кинетического индентирования и акустической эмиссии [Текст] / В.К. Качанов, И.В. Соколов, В.М. Матюнин, В.А. Барат, В.В. Бардаков, А.Ю. Марченков // Измерительная техника. – 2017. – № 7. – С. 41–44.

4. Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology [Текст] / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Materials research soc. – 2004. – Vol. 19. № 1. – pp. 3–20.

УДК620.192.63

Исследование структуры стеклопластиковых конструкций методом спиральной компьютерной томографии для оценки прочности

Митряйкин В.И.¹, д.т.н.; Кротова Е.В.¹

kati_mit@mail.ru

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)*

Аннотация:

Проведен комплекс исследований структуры образцов из композиционных материалов на рентгеновском спиральном компьютерном томографе. Получены корреляционные зависимости, позволяющие определить плотность и пористость стеклопластика по значениям единиц НУ. Эти зависимости используются для оценки механических характеристик при неразрушающем контроле композиционных конструкций.

Ключевые слова:

композиционный материал, рентгеновская компьютерная томография, неразрушающий контроль, плотность, пористость

Композиционные конструкции широко используются в современной авиационно-космической технике. Оценка их прочностных характеристик, определение исходного и остаточного ресурса невозможна без глубокого изучения структуры материала при производстве и динамики ее изменений в процессе эксплуатации.

Между структурой и механическими свойствами материалов имеется определенная взаимосвязь, которая позволяет судить о прочностных характеристиках материала по результатам исследования ее структуры.

Одной из основных физических характеристик материала является его плотность ρ (г/см³). Она используется при расчетах большинства физических и механических параметров материала. В свою очередь, плотность зависит от пористости материала V_{II} – безразмерной величины, оценивающей процентное содержание пор в твердом теле. Пористость стеклопластиков может составлять от 1% до 26%. Установлено, что увеличение пористости снижает механические свойства материала.

В работе [1] исследовалась прочность стеклопластиковых панелей в зависимости от процентного содержания пор $V_{II}\%$. При увеличении пористости от 0,5% до 16%, прочность при сжатии σ_{-1} (кг/м²) и прочность при горизонтальном сдвиге τ (кг/м²) линейно убывают. Эту зависимость авторы аппроксимировали следующими формулами:

$$\sigma_{-1} = 112 - 73V_{II}, \quad (1)$$

$$\tau = 6,7 - 0,55V_{II}. \quad (2)$$

Значения пористости при производстве определяют на образцах свидетелях, вырезанных из припусков изготавливаемых конструкций, но в ходе эксплуатации эти показатели под действием климатических факторов (влаги, температура, радиация, кислотность и т.д.) меняются в худшую сторону. Кроме того, конструкции получают усталостные и ударные повреждения, которые приводят к отслоению волокон наполнителя от эпоксидной основы (матрицы), это увеличивает объемную пористость и, как следствие, снижают прочностные характеристики. Следовательно, контролируя значение пористости, можно прогнозировать остаточный ресурс детали.

Для ответственных высоконагруженных деталей и конструкций диагностика таких важных физических характеристик материала, как

плотность, пористость имеет важное значение и является актуальной задачей. Возникла потребность в средствах неразрушающего контроля, позволяющих определить эти параметры в конструкции как при производстве, так и в ходе эксплуатации.

Использование современных методов неразрушающего контроля для таких задач чаще всего связано с оценкой косвенной статистической взаимосвязи физических параметров и параметров, которые могут быть определены в процессе диагностики. После установки корреляционных связей между этими параметрами на эталонных образцах, можно определить физические параметры на конкретном участке композиционной конструкции и судить о ее прочности.

В данной работе такой подход использован для идентификации механических характеристик композиционных конструкций с применением рентгеновской компьютерной томографии. Параметром диагностики в данном методе является линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения исследуемым материалом μ (см^{-1}). Он зависит как от химического состава и плотности, так и от энергии излучения. При фиксированной энергии рентгеновского излучения, величина линейного коэффициента ослабления определяется по формуле:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho, \quad (3)$$

где μ_m – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения при той же энергии ($\text{см}^2/\text{г}$), ρ – плотность вещества ($\text{г}/\text{см}^3$).

Для исследования дефектов и структуры композиционных конструкций в настоящее время применяются различные типы промышленных рентгеновских компьютерных томографов: ВТ-600ХА(600 мм), X-5000 (900×1200 мм), VItomeIхL 240 (350×250 мм), MetrisX-TekХТН 225+320 (300×600 мм), в скобках указаны габаритные размеры контролируемых объектов, которые могут разместиться на поворотном столе. В этих

томографах с неподвижным блоком источника рентгеновского излучения используется веерно-лучевое и конусно-лучевое сканирование.

Авторы проводили исследование на медицинском рентгеновском томографе фирмы «Siemens». Выбор томографа был обусловлен габаритными размерами исследуемых конструкций (элементы несущих систем вертолета «Ансат»). Пробные исследования показали, что конструкции из композиционных материалов могут достаточно эффективно диагностироваться на таких томографах.

По своим возможностям медицинские томографы значительно превышают промышленные. При одинаковом числе детекторов, у медицинских томографов больше объемы памяти и улучшено математическое сопровождение. Эти томографы за несколько секунд обеспечивают послойную визуализацию значительной области исследуемой конструкции. Длина поля сканирования составляет 150 см, а время сканирования 60–100 с. В зависимости от размеров дефекта можно задавать различные интервалы между сечениями от 0,5 до 10 мм. При спиральном сканировании происходит практически полное исключение пропусков срезов. В промышленных томографах объект размещается на поворотном столике, у медицинских томографах для укладки и перемещения исследуемой конструкции используется стол с подвижной декой и приводным механизмом, можно исследовать длинные конструкции.

В спиральных компьютерных томографах (СКТ) принято измерять коэффициент ослабления рентгеновского излучения не в абсолютных, а в относительных к коэффициенту ослабления воды единицах, называемых числами Хаунсфилда(HU)

$$HU = 1000 \frac{\mu - \mu_{\text{воды}}}{\mu_{\text{воды}}} \quad (4)$$

где μ – коэффициент ослабления исследуемого материала, $\mu_{\text{воды}}$ – коэффициент ослабления воды.

В литературе этот параметр часто называют «плотностью». Следует отметить, что соотношение между коэффициентом ослабления излучения и плотностью материала достаточно неопределенное и требует дополнительных исследований.

Для установления корреляционной зависимости между числами НУ и плотностью был выбран стеклопластик СК-5211Б, применяемый на ПАО «Казанский вертолетный завод» для изготовления конструкций вертолета. Материал состоит из стеклоткани Т-25 (ВМ)-78 и связующего 5-211Б. плотность наполнителя составила $\rho_H=2,58$ г/см³, а связующего $\rho_{CB}=1,2$ г/см³. При заданном проценте содержания связующего 28%–33%, эталонная плотность стеклопластика должна составлять $\rho=1,95\pm 0,3$ г/см³.

Как уже отмечалось, эти характеристики в ходе эксплуатации могут ухудшиться. Например, экспериментально установлено, что у образцов, подвергнувшихся солнечной радиации по ГОСТу 16962-71, модуль упругости на растяжение снижется на 12–17%. Усталостные и ударные повреждения нарушают структуру материала, он становится более рыхлым. Результаты испытаний образцов из материала СК-5-211Б показали, что для оценки влияния пористости на прочность при сжатии и горизонтальном сдвиге с достаточной точностью можно использовать зависимости (1, 2).

Было исследовано 100 образцов вырезанных из заготовок, специально изготовленных с различными сочетаниями связующего и наполнителя, а также деталей, имеющих стендовую и эксплуатационную наработку. Плотности образцов определялась по ГОСТу 15139-73 как отношение массы к объему. Плотность образцов изменялась в диапазоне от 1,6 г/см³ до 1,97 г/см³. Значение пористости вычислялось по формуле, учитывающей плотность связующего, наполнителя и процентное содержание связующего. Дополнительно, для оценки пористости, проведены исследования на микроскопе Axiovert 200 MAT с последующей обработкой изображения на

компьютере с помощью программы AxioVision. Установлено, что пористость 100 исследуемых образцов изменялась в диапазоне от 1 до 16%.

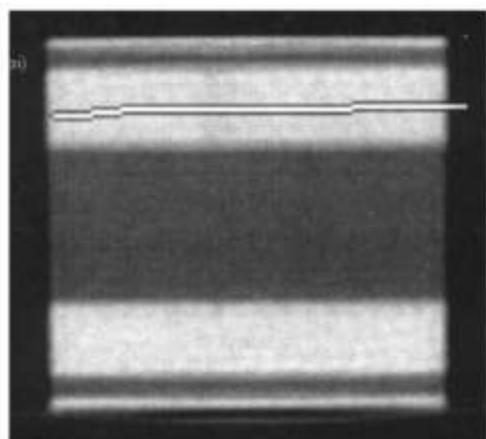
Далее проведено исследование образцов на СКТ при фиксированной энергии излучения $E=140$ кВ. Данный метод позволил исследовать несколько образцов одновременно. Для точной установки начала отсчета применялся оптический визир. Шаг сканирования варьировался от 0,5 до 2 мм, в зависимости от размеров образцов. При обработке томограмм, определялось среднее значение единиц НУ, для выбранного сечения. На рис.1.а. показана томограмма сечения образца и линия замеров единиц НУ. Распределение значений НУ по длине образца приведена на рис.1.б, они меняются в диапазоне 1110-1200 единиц НУ.

На базе проведенных исследований, построены корреляционные зависимости, позволяющие определить плотность и пористость стеклопластика СВ-5-211Б по значениям НУ после обследования на СКТ.

$$\rho=0,49+0,0014\text{НУ}; \quad (5)$$

$$V_{\Pi} = 41,2-0,038 \text{ НУ}; \quad (6)$$

а)



б)

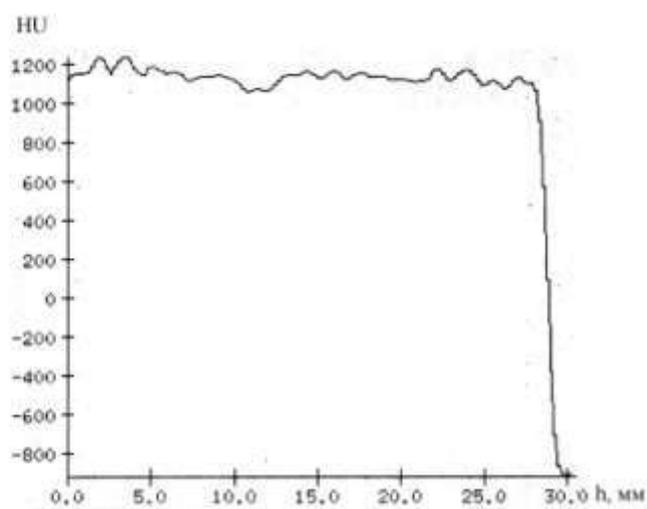


Рисунок 1. - Томограмма сечения образца и линия замеров единиц НУ

Эти зависимости в дальнейшем используются для оценки механических характеристик при неразрушающем контроле

композиционных конструкций, в частности втулки несущего винта вертолета «Ансат».

Втулка спроектирована по бесшарнирному типу с двумя упругими торсионами, выполняющими роль вертикального, горизонтального и осевого шарниров (рис. 2). Торсион имеет три участка: комлевый, упругий (торсионный) и концевой. Комлевый участок имеет отверстия для крепления к валу редуктора, к концевому участку крепятся переходники лопасти. Упруго-деформируемый участок состоит из чередующихся слоев пластика и резины, опрессованных совместно. Для уменьшения жесткости на кручение имеются профильные прорези.



Рисунок 2 – Общий вид втулки НВ вертолета «Ансат»

Стабильность качества втулки НВ существенно повышает безопасность и эксплуатационные характеристики вертолета. На всех этапах технологического процесса предусмотрены операции контроля качества. Контролируются характеристики исходных материалов. В процессе окончательной опрессовки происходит непрерывная запись величин давления и температуры. В конструкции предусмотрен технологический припуск, из которого вырезаются «образцы-свидетели» для испытания на процентное содержание связующего, на предел прочности при межслойном сдвиге, при сдвиге по резине, по изгибу. Косвенным контролем внутренних дефектов являются контрольные замеры изгибной (в двух плоскостях) и крутильной жесткостей каждого рукава упругой балки путем измерения изгибов от сил и углов закручивания от моментов, прикладываемых на концах рукавов. Замеренные прогибы и углы закручивания сравниваются с

расчетными.

Результаты замеров, полученные при исследовании девяти втулок на этапе отработки технологии, показали, что у отдельных образцов они значительно отличались от расчетных. Это могло быть связано как с внутренними дефектами, так и с отклонениями механических свойств элементов, входящих в конструкцию, это потребовало применение средств неразрушающего контроля. Был опробирован метод рентгеновской спиральной компьютерной томографии.

Разработанная методика применялась для диагностики торсиона НВ (рис. 3). Эксперименты проводились на 20 торсионах. Наряду с визуальным контролем внутренней структуры проводился замер НУ в некоторых сечениях. Результаты этих исследований для одной из втулок приведены на рис. 4. Погрешность измерений коэффициента ослабления (плотности) составляла $\pm 12\text{НУ}(\pm 1\%)$.



Рисунок 3 – Диагностика втулки НВ на СКТ

В случае соблюдения всех технологических условий график значений коэффициента ослабления по толщине втулки должен иметь прямолинейный характер, так как плотность и содержание связующего должны быть одинаковыми во всем сечении. Для большинства втулок это условие

выполняется и зависимость коэффициента ослабления близка к прямолинейной, с некоторыми отклонениями.

Средние значения коэффициентов ослаблений в среднем составляют ≈ 1000 HU., это соответствует заданной плотности $\rho=1,9$ г/см³. Это значение можно принять за эталонное.

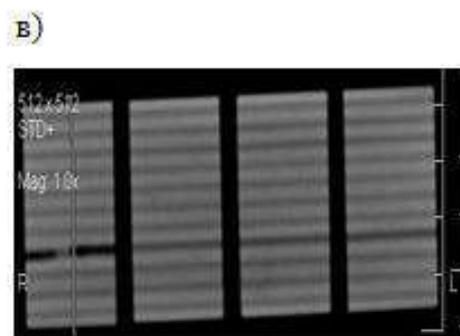
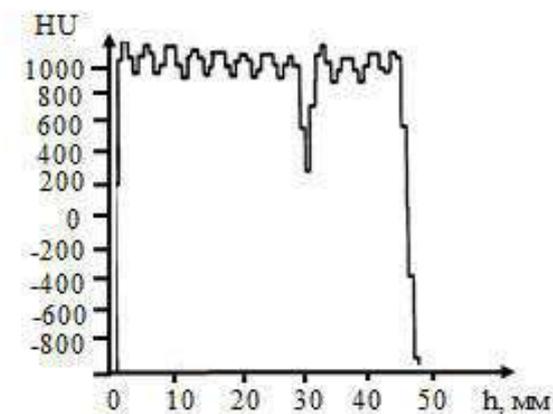
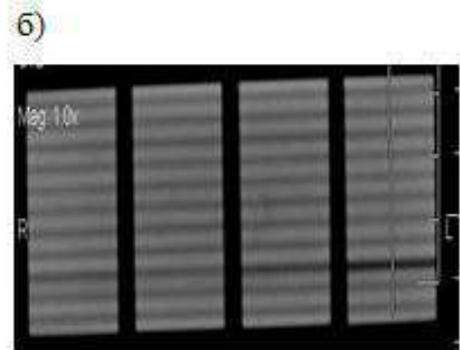
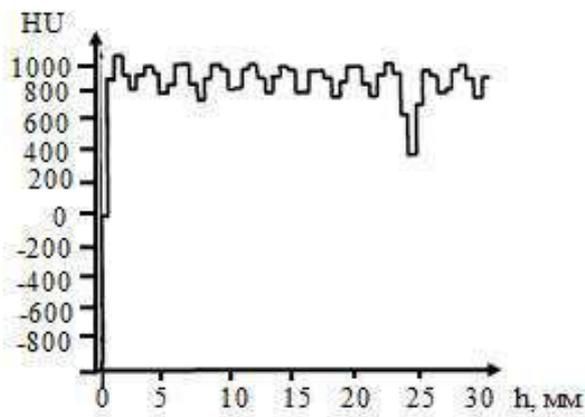
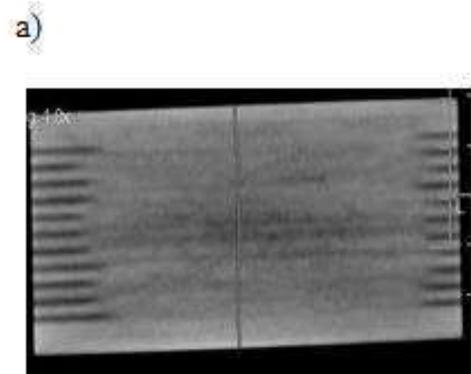
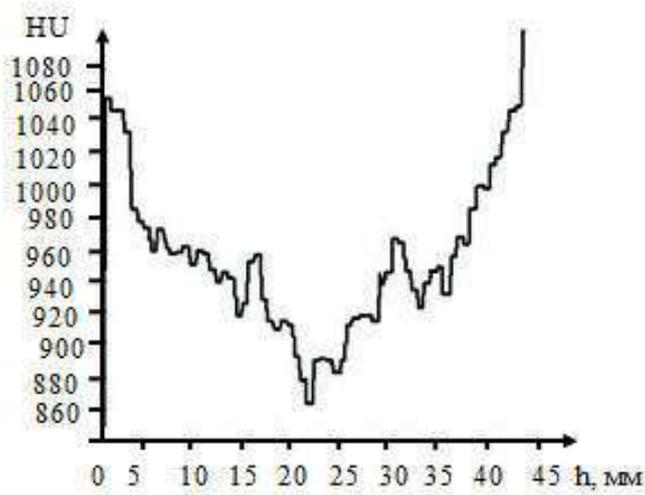


Рисунок 4 – Распределение плотностей в различных сечениях дефектного торсиона

У некоторых образцов коэффициенты ослабления меньше эталонных. Это свидетельствует о том, что плотность материала ниже и соответственно выше пористость V_{II} . На рис. 5 приведены гистограммы значений коэффициентов ослабления для эталонного и дефектного торсиона. Значения равные 1000 НУ. у бездефектного торсиона составляют 35% (D1), у дефектного 14% (D2).

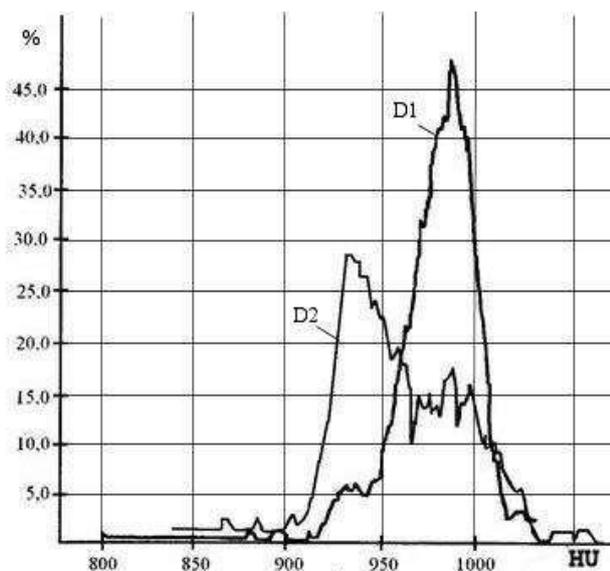


Рисунок 5 – Гистограмма коэффициентов ослабления торсионов НВ

Изменение плотности приводит как к увеличению, так и снижению механических характеристик материала, поэтому при диагностике по одному информативному параметру $x = \text{НУ}$. область непринятия гипотезы выбираем в зависимости от допустимой величины механических характеристик и соответственно пористости V_{II} .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда
Фундаментальных исследований (грант № 16-08-00416)*

Литература

1. Fried N. Pros. 20th Conf. SPI Reinforced Plastics Div., 1965, Sec. 1-C.
2. Митряйкин В.И., Сидоров Е.А., Зайцева Т.А., Кротова Е.В. Расчетно-экспериментальные исследования прочности лопасти винта вертолета с ударными повреждениями. Научно-технический вестник Поволжья 2017г. №5. С. 64–68.

3. Митряйкина Е.В., Зайцева Т.А. Внедрение спиральной компьютерной томографии для определения механических характеристик путем исследования его внутренней структуры. Научно-технический вестник 2012. №6. С. 311–314.

УДК 539.4: 678.067

Использование метода вихревых токов для дефектоскопии конструкционных материалов на основе углеродных волокон

Шкатов П.Н.¹, д.т.н.; Дидин Г.А.², к.т.н.; Михеев П.В.², к.ф.-м.н.

¹ *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Московский технологический университет (МИРЭА)"
г. Москва*

² *ООО «Главдиагностика», г. Москва*

Аннотация:

Описан экспериментальный опыт применение вихретокового контроля для поиска расслоений в углепластике, применяемых в аэрокосмической отрасли. Предположения проверены на модельных образцах материалов с искусственными дефектами.

Ключевые слова:

вихретоковый контроль, композитные материалы, углепластик, дефекты, расслоения

Для современных композиционных материалов важным фактором является их сплошность. Дефекты типа расслоений могут резко снизить долговечность и прочность при сжатии. Кроме расслоения способствуют поглощению воды. При этом габариты изделий применяемых в авиации и энергетике постоянно растут. Существующие методы, например, ультразвуковой и рентгеновский, имеют свои особенности и ограничения. Мы исследовали возможность поиска расслоений в КМ с помощью широко известного для металлов метода вихревых токов. Опасные расслоения могут возникать как при производстве, так и при эксплуатации изделий из ПКМ

Задача исследования состояла в экспериментальной оценке возможностей вихретокового метода неразрушающего контроля для выявления дефектов сплошности в углепластиковых материалах. Общие принципы контроля рассмотрены в книге [1]

В работах [2-10] описаны результаты исследования применения вихретоковых преобразователей с ортогональными обмотками - возбуждающей и измерительной - для выявления механических повреждений углепластиковых пластин. Нами была предпринята попытка проверить возможность применения для этой цели вихретокового преобразователя (ВТП) собственной конструкции - дифференциального и абсолютного. В работах [11-13] ВТП успешно используются для контроля укладки слоев препрега или сухой ткани перед пропиткой. Но остаются не обработанными вопросы выбора частот и конструкции датчиков. В работах [14,15] были исследованы тонкие образцы.

Большим преимуществом метода является возможность получения двух составляющих вихретокового сигнала – амплитуды и фазы или активной (Re) и реактивной (Im) составляющих на одной частоте.

Для оптимизации геометрических размеров сердечника и параметров обмоток ВТП была разработана математическая модель, описывающая распределение электромагнитного поля для объекта с расслоением (рис. 1).

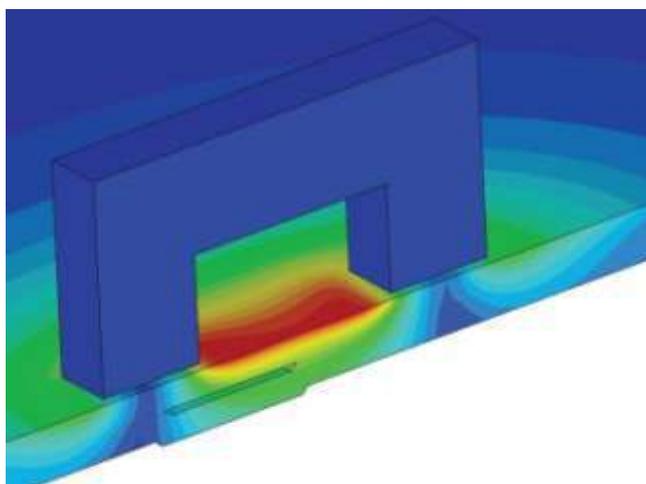


Рисунок 1 - Электромагнитное поле в слоистом композите с расслоением

Контроль осуществлялся путём сканирования поверхности объекта ВТП. Один из сканов на частоте 250 КГц представлен на рис 2. Как видно из рисунка края искусственного расслоения надежно регистрируются.

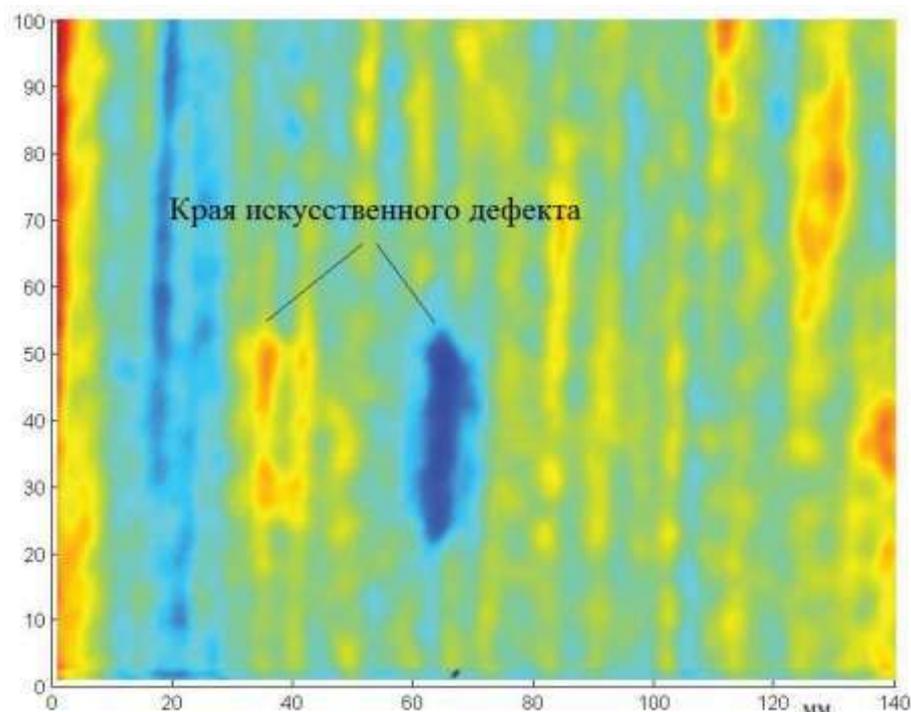


Рисунок 2 - Визуализация вложенного дефекта при сканировании

Проведенные исследования показали возможность выявления дефектов типа расслоений с помощью специализированных вихретоковых преобразователей.

Для демонстрации возможностей метода исследовалась ступенчатая плита большой толщины. Плита была изготовлена по инфузионной технологии и армирована мультиаксиальной углеродной тканью. На рис .3 представлен ее внешний вид, на рис. 4 и 5 - результаты сканирования дифференциальным и абсолютным точечным ВТП. Диапазон частот изменялся от 0.2 до 2 МГц, скорость перемещения датчиков была 0,5 м/с.

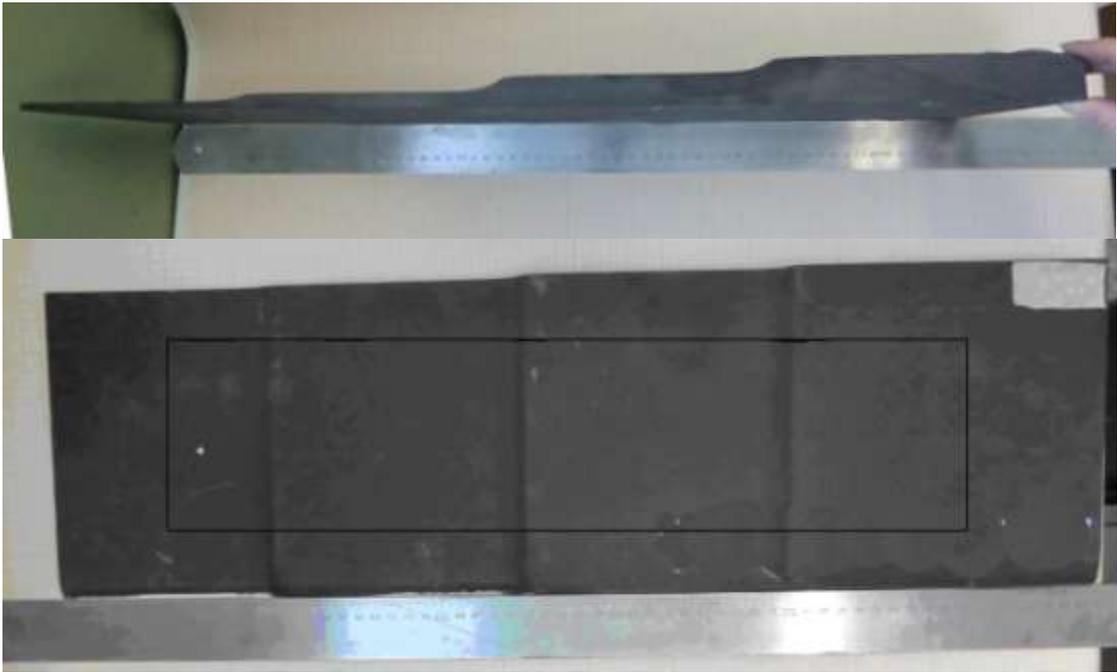


Рисунок 3 - Общий вид ступенчатой панели

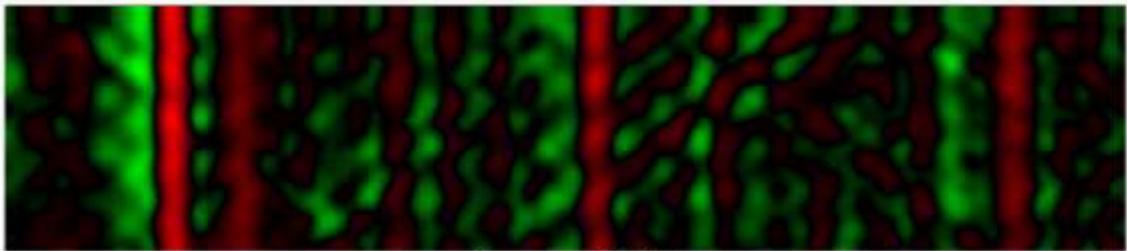


Рисунок 3 Re1

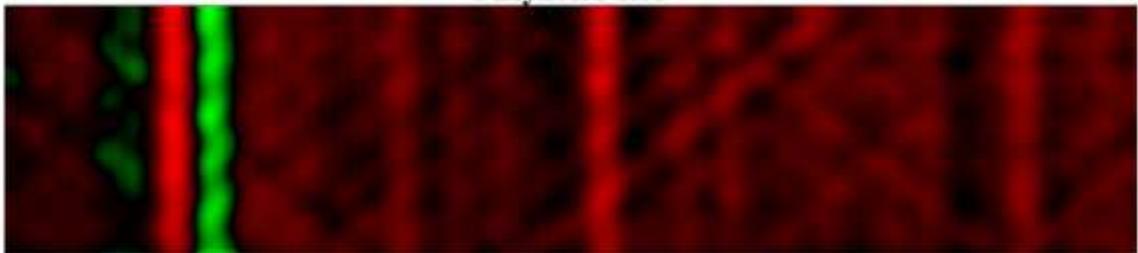


Рисунок 4 Im1

Рисунок 4 - Скан панели, полученный с помощью дифференциального ВТП

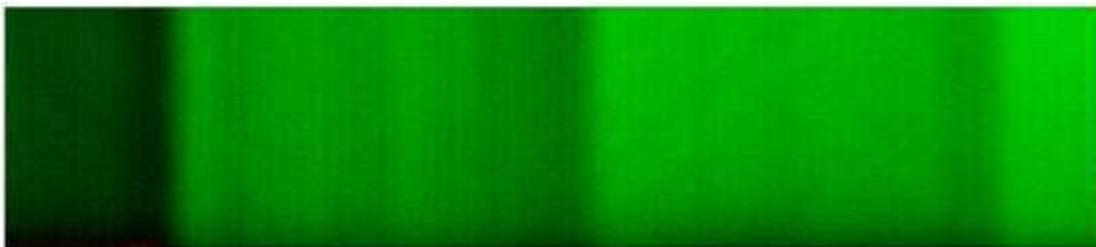


Рисунок 5 Re2



Рисунок 6 Im2

Рисунок 5 - Скан панели, полученный с помощью абсолютного ВТП

Из полученных данных видно, что надежно регистрируются ступеньки на обратной стороне пластины, несмотря на ее значительную толщину.

Кроме того, на сканах видны не только дефекты, но и направление армирующих волокон в данной пластине.

Выводы:

Проведенные исследования показали, что вихретоковый метод широко применяется для контроля качества углепластиков.

С помощью известных средств вихретоковым методом выявляются дефекты типа разрывов.

Чувствительность к дефектам типа расслоений удалось обеспечить с помощью специально созданного для этой цели вихретокового преобразователя.

В настоящее время удается выявлять расслоения с зазором между слоями 200 мкм и диаметром 10 мм на глубине 2 мм.

Повышение чувствительности возможно за счет дальнейшего совершенствования вихретокового преобразователя, электронного блока и алгоритмов обработки сигнала.

Важным преимуществом метода является односторонний подход к детали и отсутствие контактной жидкости.

Литература:

1. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль, / Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике; под общей редакцией В.В. Ключева. Москва, 2014. Сер. Диагностика безопасности (2-е издание), 224 с.
2. Koyama K, Hoshikawa H., Hirano T. Investigation of impact damage carbon fiberrainforced plastic (CEPR) by eddy current non destructive testing. International Conference NDT in Canada 2011- 2-4 November 2011, Montreal, Quebec, Canada.
3. A.R Valleau, "Eddy current nondestructive testing of graphite composite material", Materials Evaluation 48-2, p.230- 1990.
4. M.Gvishi, A.H.Kahn, and M.L.Master, "Eddy current testing of carbon-carbon composite", Review of Progress in QNDE, Plenum Press 11, p.289- 1992.
5. M.P. de Goeje and K.E.D. Wapenaar, "Non-destructive inspection of carbon fiber- reinforced plastics using eddy current methods", Composites 23:3, pp.147-157 1992.
6. R.Lange and G.Mook, "Structural analysis of CFRP using eddy current methods", NDT&E international 27-5. p.241- 1994.
7. X.E.Gros and W.Lowden, "Electromagnetic testing of composite materials", Insight 37-4, pp.290-293 1995.
8. K.Koyama, K.Miki, and H.Hoshikawa, "Eddy Current Non-Destructive Testing for CFRP",
9. US-Japan Conference on Composite Materials 2008, SHM-1 1, pp. 1-6 2008.

10. K.Koyama, H.Hoshikawa ana G.Koiima, “Eddy current non-destructive testing for carbon fiber-reinforced composites (CFRP)”, Proceeding of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference 2010.

11. Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей. В мире неразрушающего контроля - 2012 - №2(56).- С. 9-21.

12. Dietrich Berger and Gisela Lanza .Development and Application of Eddy Current Sensor Arrays for Process Integrated Inspection of Carbon Fibre Preforms. Sensors 2018, 18(1), 4; doi:10.3390/s18010004

13. G Bardl, A Nocke, C Cherif, M Pooch, M Schulze, H Heuer, M Schiller, Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data, Composites Part B: Engineering 96, 312-324.

14. S Gäbler, H Heuer, G Heinrich, Measuring and Imaging Permittivity of Insulators Using High-Frequency Eddy-Current Devices, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 64 (8), 2227-2238.

15. Шкатов П.Н., Мякушев К.В., Обобщенная оценка глубины проникновения вихревых токов при вихретоковом контроле, Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 3 (305). С. 142-147.

УДК 620.1

Анализ возможностей ультразвуковой диагностики для контроля качества сварных соединений

Мугла Д.Р.¹; Галиновский А.Л.¹, д.т.н.; Ли Сюеянь¹

mdr@bmstu.ru; galcomputer@bmstu.ru; gezai2012@163.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация:

Контроль качества выполнения сварных соединений на объектах повышенной опасности имеет важное практическое значение. Однако, существуют проблема достоверности используемых методов контроля, способных оценить снижение механических характеристик материала, как в пространстве сварного шва, так и во времени эксплуатации без его разрушения. Таким образом, поиск новых информативных методов и средств диагностики является актуальной научно-технической задачей. В данном исследовании предлагается новый метод оценки параметров качества сварных соединений, в частности, ударной вязкости разрушения, основанный на воздействии высокоскоростной струей воды на поверхность контролируемого объекта; информативными признаками служат геометрические характеристики образовавшейся гидрокаверны. В статье приведены результаты экспериментов, демонстрирующие возможность оценки однородности материала сварного шва, а также, показана высокая ранговая корреляция между ударной вязкостью материала шва и глубиной, образовавшейся в результате струйного воздействия гидрокаверны. Результаты, полученные в ходе исследования, позволяют предположить, что предложенная технология может занять достойное место среди

информационно-диагностических средств используемых при обслуживании объектов повышенной опасности, например, в топливно-энергетическом комплексе.

Ключевые слова:

диагностика, топливно-энергетический комплекс, ультразвука, сварной шов, однородность, ударная вязкость, абразив

Технология получения неразъемных соединений методом сварки достаточно продолжительное время используется в различных областях машиностроения. До сих пор остаются вопросы, связанные с контролем качества сварных соединений изделий и обеспечением их надежности. Среди наиболее актуальных направлений совершенствования технологий сварки следует отметить следующие [1, 2]:

1. разработка и уточнение научно-обоснованных норм по допустимости размеров дефектов с позиций механики разрушения;
2. разработка новых более эффективных методов неразрушающего контроля (НК) изделий, направленных на выявление поверхностных и подповерхностных дефектов, а также качества термической обработки сварных соединений применяемых для снятия остаточных напряжений;
3. создание методик оперативного выбора оптимальных технологических режимов сварки.

Одним из важнейших является поиск и определение наиболее опасных зон сварного шва, к которым могут быть отнесены структурно-механические неоднородности, различные дефекты, конструктивные и технологические концентраторы напряжений и области сниженных механических характеристик металла, в частности, ударной вязкости разрушения [3–5]. Учитывая широкое применение и объем сварных соединений в изделиях, используемых в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК), решение данных задач является здесь крайне актуальным и значимым.

Существующие методы дефектоскопии, ориентированные преимущественно на поиск несплошностей в сварных соединениях, не позволяют говорить о высоком уровне достоверности результатов по оценке их качества [6–11]. Данные, полученные в результате применения таких методов дефектоскопии, не позволяют технологу-сварщику оперативно выявлять причины дефектности шва и совершенствовать технологический процесс сварки.

Необходим метод контроля, который бы интегрально оценивал состояние металла сварного соединения, несмотря на множество внешних факторов. Поддержка многочисленных объектов ТЭК на должном уровне надежности и безопасности является приоритетной задачей государства и частных компаний. На сегодняшний день только в систему трубопроводов (протяженность 19300 км) ОАО АК «Транснефтепродукт» входят 96 насосных станций и 66 пунктов налива. При этом в системе трубопроводного транспорта в целом эксплуатируется около 39% трубопроводов со сроком службы более тридцати лет [12]. Очевидно, что в этой связи в целях снижения и ликвидации аварийности особое внимание должно уделяться вопросам совершенствования и поиска новых видов диагностики, контроля качества и оценки остаточного ресурса.

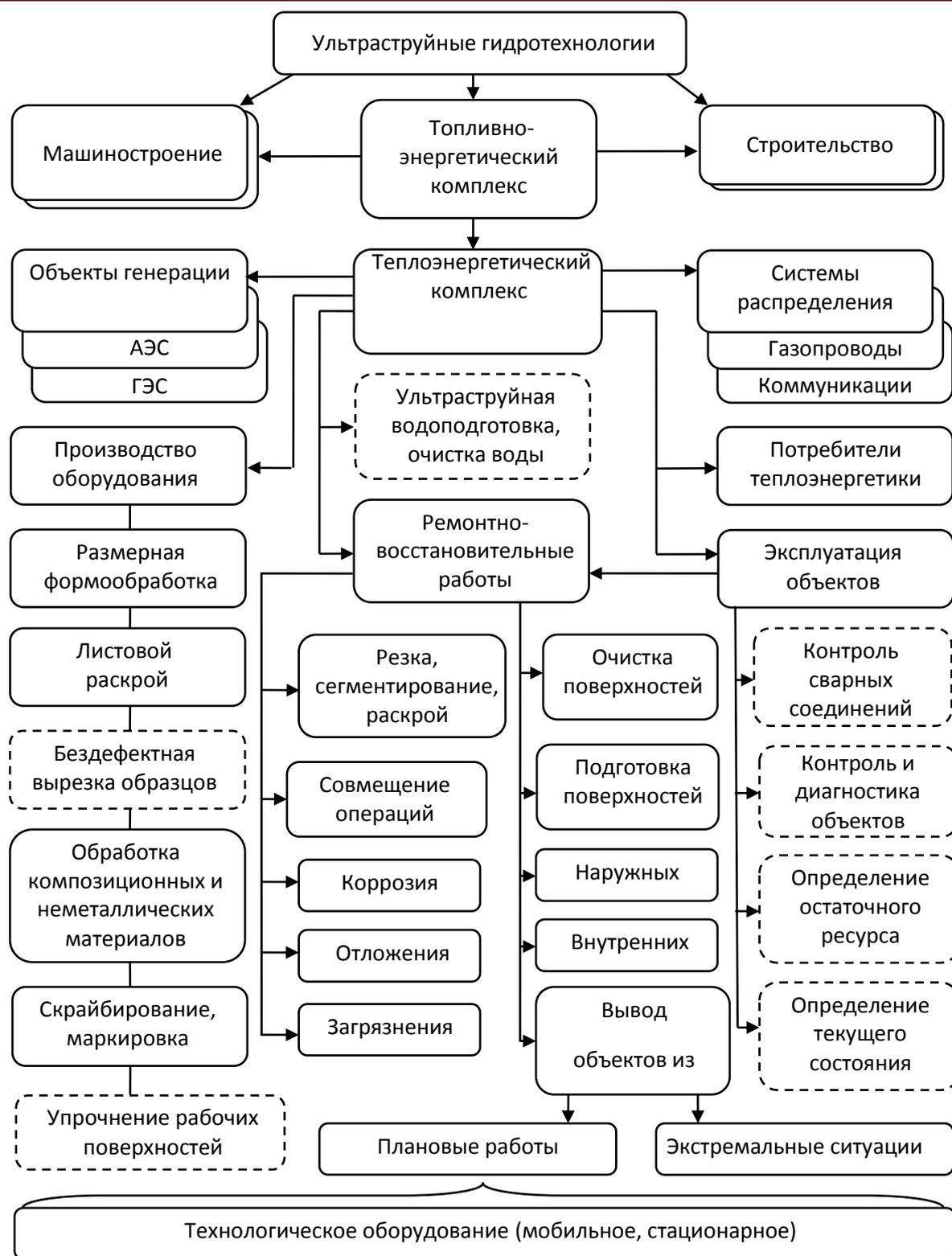
В связи с этим, предлагается новый метод определения параметров качества сварных соединений, основанный на процессе гидроразрушения поверхностного слоя материала высокоскоростной струей жидкости – ультразвуковая диагностика (УСД) [13, 14]. Основное достоинство данного метода диагностики состоит в возможности создания имитационных, знакопеременных и нестационарных нагрузок на исследуемое изделие. Данный метод универсален, поскольку оборудование, применяемое для его реализации, может быть использовано для решения смежных технологических задач, в частности осуществления вырезки дефектных участков изделий. Кроме того, метод отличает пожаро- и взрывобезопасность [15, 16], что особо актуально при выполнении работ на объектах ТЭК.

Проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана исследования по оценке возможностей УСД [14] показали, что ее важным прикладным аспектом является возможность осуществления технологического контроля качества образцов-свидетелей, достоверной экспресс-оценки эксплуатационных параметров поверхностных и подповерхностных слоев (участков) деталей, повышения производительности процедуры контроля, возможности ее совмещения с другими технологическими операциями.

На рисунке 1 приведена схема, построенная на примере объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и иллюстрирующая возможные области реализации ультраструйных технологий и УСД в частности [17].

Следует подчеркнуть значимость применения УСД в различных областях ТЭК, где у нее практически нет альтернативных технологических решений, в частности по пожаро-взрывобезопасности, выполнении планово-восстановительных и ремонтных работ, при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Повышение надежности сварных соединений на этапе производства, проведение планово-восстановительных работ, диагностика узлов и агрегатов, оценка остаточного ресурса, являются ключевыми составляющими обеспечения безопасности промышленных объектов [18]. Особое значение имеют элементы ТЭК, как в наибольшей степени требующие гарантий работоспособности и безотказности, надежности и качества функционирования, экологичности и безопасности работы. Примером является обеспечение высокого уровня надежности и безопасности для строящегося трубопровода Северный поток (Nord Stream), согласно которому трубы подлежат трехуровневой системе контроля качества.



— реализованные возможности;

- - - предполагаемые области применения

Рисунок 1 - Области применения ультразвуковых технологий

Каждый сварной шов на морском участке газопровода проходит стопроцентное тестирование в соответствии со стандартом для морских трубопроводов Det Norske Veritas (DNV) (DNV-OS-F101)^[19].

С целью проведения исследований по оценке возможностей УСД для диагностики сварных швов был проведен ряд исследований. Так для эксперимента был взят образец алюминиевого сварного шва (очертания видны без травления); сварка ручная дуговая. Параллельность опорной и рабочей поверхностей соблюдена, шероховатость поверхности 1,75 мкм и соответствует ГОСТ 9012. На гидроструйном оборудовании было выполнено гидроскрайбирование боковой поверхности сварного шва (режимы: давление струи воды 380 МПа, диаметр струи 0,2 мм, скорость подачи 0,5 мм/с и 2 мм/с). После чего на профилографе-профилометре БВ-7669М производства НИИ «Измерения» были сняты профили по трассам, показанным на рис. 2 а). Трассы с №1 по №6 проходили вдоль гидрокаверны, трассы с № 7.0 по № 7.3 проходили перпендикулярно гидрокаверне. Замер твердости производился по методике, указанной в ГОСТ 69960 (схема замера твердости указана на рисунок 3), при помощи портативного твердомера МЕТ-ДУ с применением динамического датчика (данные, полученные при замерах, приведены в таблица 3). В каждой точке делалось по четыре замера, после чего, среднее значение, вычисляемое прибором автоматически, заносилось в таблицу 3.

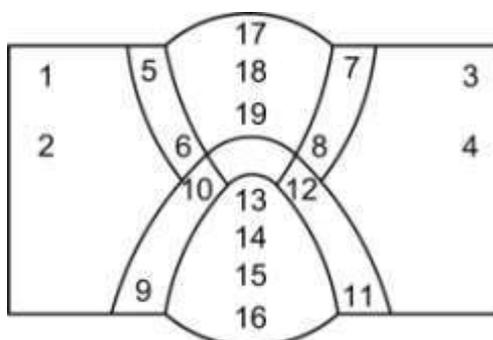
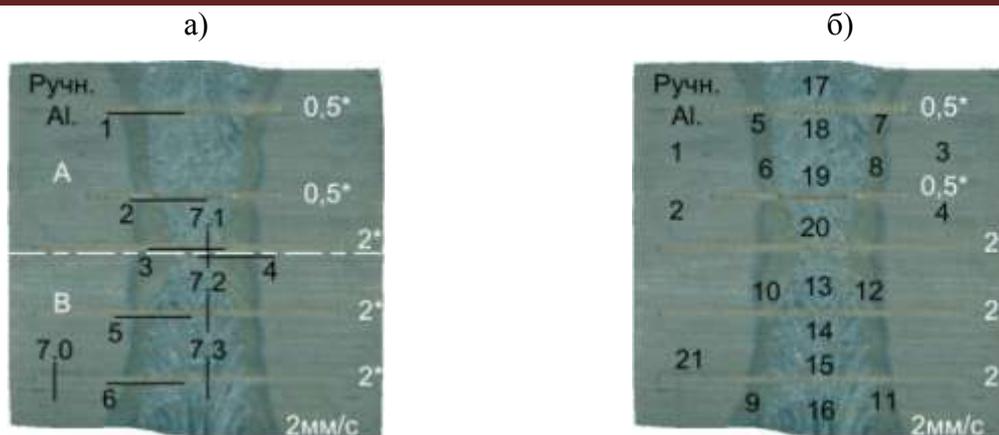


Рисунок 2 - Схема расположения точек замера твердости по ГОСТ 69960



б) схема трассирования профилографом; в) схема точек замера твердости
Рисунок 3 - Сварной шов

Белым цветом со значком * показаны значения подачи режущей головки в мм/с

Таблица 1

Результаты механических испытаний материала сварного шва

		Верх	Середина	Низ
Предел прочности, МПа		862,0	839,0	855,0
Предел текучести, МПа		828,0	793,0	814,0
КСУ, кДж/см ²	Зона А	525,0	656,0	833,0
	Зона В	630,0	909,0	778,0

Таблица 2

Результаты испытаний материала сварного соединения

Зона	Основной металл	Зона термического влияния	Зона шва
Твердость, HRC	27,0-30,0	30,0-32,0	32,0-34,0

Таблица 3

Значения твердости в точках (рисунок 4)

Номер точки замера твердости	Твердость, НВ	Номер точки замера твердости	Твердость, НВ
1	222	11	259
2	313	12	350
3	233	13	282
4	297	14	283
5	265	15	257
6	334	16	228
7	333	17	228
8	295	18	281
9	247	19	282
10	297	20	331

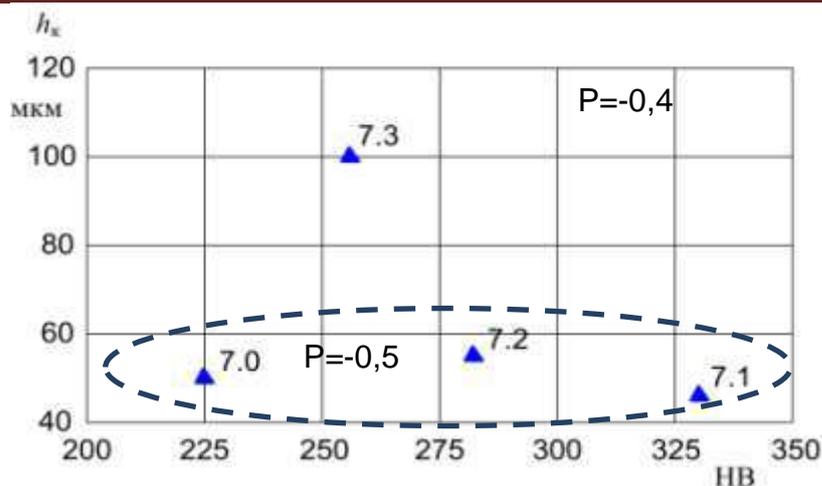


Рисунок 4 - Зависимость глубины гидрокаверны от твердости материала

По глубине сварного шва (трассы 7.1...7.3) нетрудно заметить монотонную зависимость глубины гидрокаверны от твердости материала.

В точке №21 замера твердости, что соответствует трассе №7.0, присутствует достаточно явное отступление от тенденции, описанной выше. Это явление можно связать с тем, что точка 21 лежит вне зоны наплавленного металла и зоны термического влияния, что, в свою очередь, позволяет сделать вывод об отсутствии разупрочнения металла в зоне 21 (таблица 4).

Имеет место высокая корреляция между глубиной образовавшейся гидрокаверны и твердостью материала (рисунок 4).

Данные по измерению ударной вязкости по точкам также показали высокую корреляцию последней с параметрами гидроэрозии (рисунок 4). Данные лабораторных исследований представлены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 4

Зависимость глубины гидрокаверны от твердости материала

Глубина гидрокаверны, мкм	Твердость материала, НВ	Номер трассы	Материал
49,7	225	7.0	изделие
45,4	331	7.1	шов
55,5	283	7.2	
100,6	257	7.3	

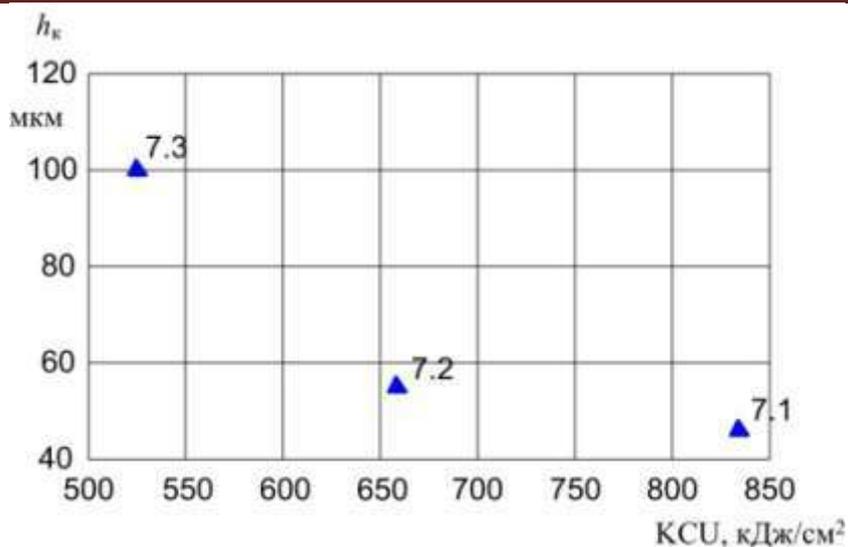


Рисунок 5 - Зависимость глубины гидрокаверны от коэффициента ударной вязкости

На рисунках 6–8 представлены профили трасс 7.1...7.3, снятых при помощи профилографа-профилометра БВ-7669М.

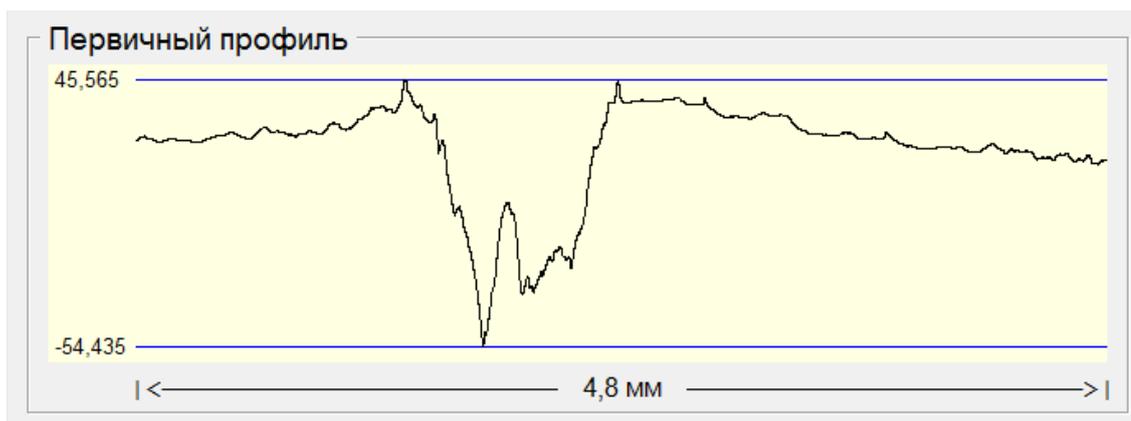


Рисунок 6 - Профиль трассы 7.1

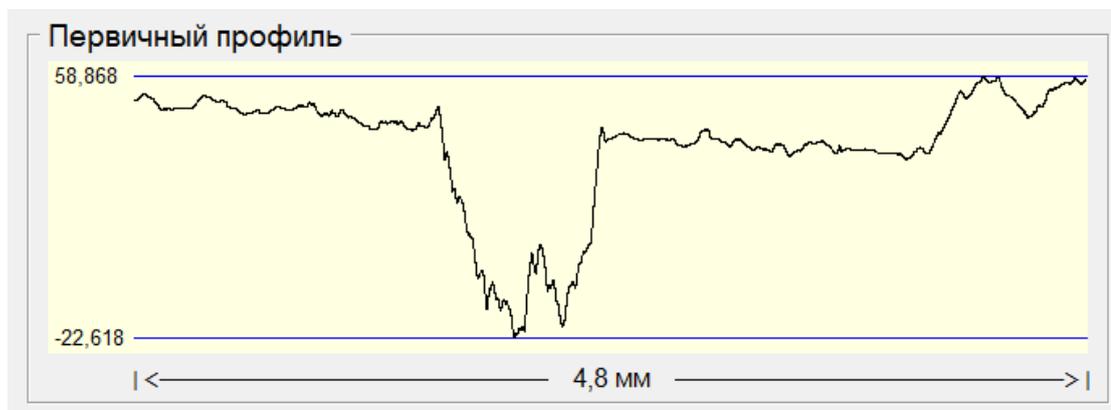


Рисунок 7 - Профиль трассы 7.2

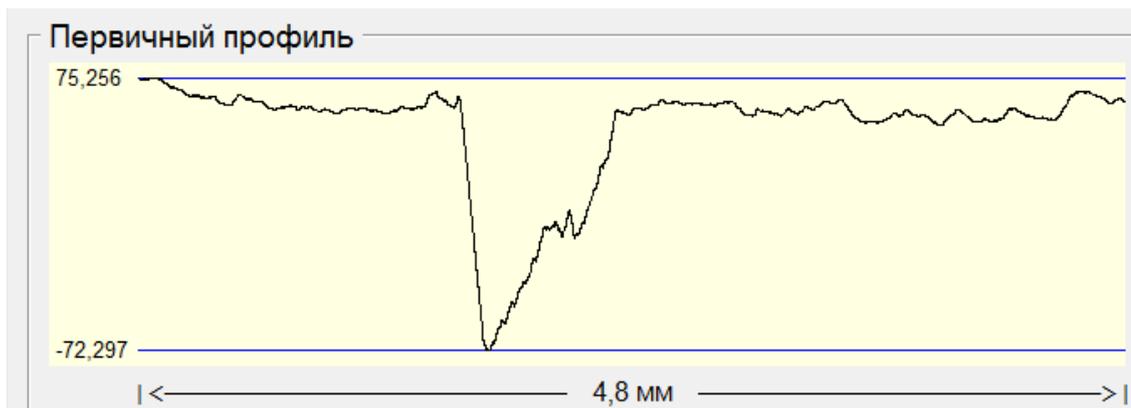


Рисунок 8 - Профиль трассы 7.3

Выводы

Рассматриваемая в данной работе УСД сварных швов является примером технологии, обладающей широкими функциональными возможностями и перспективами внедрения в ТЭК. Эта технология в будущем может стать частью аппарата по обслуживанию элементов оборудования ТЭК, включающего в себя выбор рациональных режимов сварки на этапе технологической подготовки, диагностику действующих и ремонт вышедших из строя изделий.

Весьма вероятно, что в перспективе реализация данной идеи позволит создать высокоэффективный аппарат ультразвуковой диагностики, позволяющий оперативно решать ряд практически важных вопросов, в первую очередь, связанных с оценкой остаточного ресурса материала конструкций потенциально опасных объектов, в частности в ТЭК.

Литература

1. Стеклов О.И. Сварка начала XXI века //Территория Нефтегаз. 2007. № 12. С. 44–53.
2. A. Cullison, M. R. Johnsen Fifty Years of Welding's Latest and Best //WELDING JOURNAL. Mar. 2003. P. 46–54.

3. Варовин А.Я., Карзов Г.П., Марголин Б.З. Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным неразрушающего контроля //Вопросы материаловедения. 2007. № 3. С. 169–186.

4. Antipov V.S., Vasil'ev V.D., Udralov Yu.I. Radiographic inspection of the weld seams: test parameters //Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. Т. 42. № 2. С. 106–110.

5. G. A. Matzkanin, H. T. Yolken Selecting a Nondestructive Testing Method: Ultrasonic Testing //WELDING JOURNAL. May. 2008. P. 26-32

6. Ташкинов А.В. Учет концентрации напряжений в оценках усталости сварных стыковых соединений труб на стадии эксплуатации //Вопросы материаловедения. 2007. № 3. С. 265–271.

7. Гумеров А.Г., Медведев А.П., Худякова Л.П., Фаритов А.Т., Рождественский Ю.Г. Концепция развития системы технического диагностирования промысловых трубопроводов //Нефтяное хозяйство. 2005. № 1. С. 78–83.

8. Берман А.В., Ватулин Я.С., Коровин С.К., Первов К.М., Первов В.К. Оценка остаточного ресурса металлоконструкций горных машин на основе характеристик несущей способности материала //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2005. № 5. С. 220–228.

9. Гордиенко В.Е. Мониторинг технического состояния сварных несущих металлических конструкций дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин //Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 206–209.

10. Носов В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкции с помощью метода акустической эмиссии //Дефектоскопия. 2009. № 3. С. 58–67.

11. Бигус Г.А., Галкин Д.И. Методы неразрушающего контроля при проведении периодического контроля и мониторинга опасных производственных объектов // Сварка и диагностика. 2007. №1. С. 13–16.

12. Режим доступа: <http://www.transnefteproduct.ru>

13. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С. 141–147.

14. Барзов А.А., Галиновский А.Л. Технологии ультразвуковой обработки и диагностики материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 246 с.

15. Губин С.А., Корсунский Б.Л., Пепекин В.И. Проблемы утилизации боеприпасов в России. Препринт РАН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова, Институт химической физики в Черноголовке, Москва, 1994. 24 с.

16. Антошин Е.Т. Техника и технологические возможности гидрорезного оборудования // Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов «Утилизация-98»/Тез. докл. 3-й междунар. науч.-техн. конф. - М.: Вооружение. Политика. Конверсия, 1999. С. 190–199.

17. Барзов А.А., Елагина О.Ю., Сарычев Г.А., Степанов В.В., Тутнов И.А. Верификация основных мероприятий для увеличения проектного срока безопасной эксплуатации силовых установок энергетических систем и комплексов// Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2011. Т. 3. С. 35–41.

18. Барзов А.А., Елагина О.Ю., Пузаков В.С. Ультраструйные гидротехнологии в обеспечении промышленной безопасности энергообъектов. Москва, 2009.

19. Режим доступа: <http://www.nord-stream.com/ru/>

УДК 620.179.1:678.012

Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов

Мурашов В.В.¹, д.т.н.; Алексашин В.М.¹, к.т.н.,
Мишуров К.С.¹

admin@viam.ru, vicmur07@yandex.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Рассмотрены методы диагностики полимерных композиционных материалов (ПКМ) лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля, позволяющие определять состав и физико-механические свойства ПКМ в деталях и конструкциях без их разрушения.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, физико-механические свойства, лазерно-акустический способ, ультразвуковой контроль

Введение

Актуальной проблемой повышения надежности изделий авиационной техники является проблема повышения их качества как главного показателя оценки надежности изделий ответственного назначения [1, 2].

В машиностроении для выявления дефектов в деталях из ПКМ и в многослойных клееных конструкциях широко применяются [3–10] различные акустические методы контроля: методы отражения (эхометод,

реверберационный), методы прохождения (теневого, велосиметрический, реверберационно-сквозной), импедансные методы и методы собственных колебаний (свободных и вынужденных колебаний) [11–20].

В настоящее время важное значение имеет использование методов технической диагностики ПКМ с целью определения их технического состояния путем оценки физических свойств и состава материала, так как такие характеристики ПКМ как плотность, пористость, содержание армирующих волокон играют определяющую роль для получения стабильного уровня упруго-прочностных свойств при кратковременном статическом и, особенно, при длительном статическом и динамическом нагружениях [21–26].

Отклонение в составе в значительном объеме материала приводит к существенным изменениям характеристик прочности, упругости и эксплуатационной надёжности монолитных ПКМ [27, 28]. Превышение допустимой величины степени отверждения подформованной заготовки приводит к снижению прочности интегральной конструкции (ИК) в зоне соединения элементов, поэтому контроль прочности соединения элементов ИК после ее изготовления является актуальной задачей, решение которой направлено на повышение надежности изделий ответственного назначения [29].

Основное направление исследований в настоящей работе – уточнение информативных параметров диагностики, а именно таких параметров, которые наилучшим образом коррелировали бы с плотностью, пористостью и составом углепластика, со степенью полимеризации матрицы, с прочностными характеристиками углепластика в монолитных и интегральных конструкциях. Другим важным направлением была разработка технологии изготовления объектов исследования, которые обеспечивали бы необходимый диапазон исследуемых характеристик.

Методы и материалы

Для решения задач основного направления исследований был выбран ультразвуковой метод отражения и современное эффективное средство неразрушающего контроля – лазерно-ультразвуковой прибор УДЛ-2М [30–32]. На этом приборе была отработана методика неразрушающих испытаний, успешно решены вопросы ввода и приема ультразвуковых колебаний (УЗК) и изучены различные факторы, влияющие на точность измерения параметров диагностики углепластика ВКУ-17КЭ0,1.

При отработке технологии изготовления объектов исследования были использованы специальные технологические приемы для получения экспериментальных плит-образцов из углепластика с разбросом по пористости (0-8)%, с объемным содержанием углеродного волокна (59–64)% и плотностью материала (1,50–1,54) г/см³, путем изменения наноса связующего при изготовлении препрегов и времени выдержки под давлением на первых этапах формования образцов.

Для обеспечения образцами экспериментальной части работы по проблеме оценки прочности при сдвиге монолитных конструкций из углепластика признано целесообразным изготовить три партии образцов. Первая – по штатной технологии по схеме укладки $[0, 90]_{20}$ при удельном давлении прессования 10 ати. Вторая – с закладкой слоев сухого наполнителя (не пропитанного клеем) и между ними препрега по схеме укладки $[0,90]_9$, $[0_c/90/0_c]_2 [0,90]_9$ при удельном давлении прессования 1 и 3 ати. Третья – с закладкой только 4-х слоев сухого наполнителя по схеме укладки $[0,90]_9$, $[0_c,90_c]_2 [0,90]_9$ при давлении прессования 3 и 5 ати. Такие вариации состава и давления формования позволили получить образцы с номинальной прочностью при сдвиге и с различными значениями пониженной прочности.

Для обеспечения образцами экспериментальной части работы по проблеме оценки прочности при сжатии монолитных конструкций из углепластика признано целесообразным изготовить также несколько партий образцов по различным схемам укладки наполнителей (препрега и сухого

волокон). Образцы с пониженной прочностью при сжатии изготовлены при удельном давлении прессования 1 – 10 ати. Такие вариации состава и давления формования также позволили получить образцы с номинальной прочностью при сжатии и с различными значениями пониженной прочности.

При отработке технологии изготовления объектов исследования были использованы специальные технологические приемы для получения экспериментальных образцов из углепластика марки КМУ со степенью отверждения матрицы в диапазоне от 1 до 50% путем варьирования температурно-временного режима формования углепластиков.

С целью прогнозирования режимов отверждения образцов с заданными значениями степени превращения методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) была исследована кинетика реакции. Экспериментальные результаты для расчета кинетических параметров реакции были получены на калориметре DSC 822 швейцарской компании Меттлер-Толедо. Образцы препрега, из которого затем формовали заготовки, анализировали методом ДСК при нагревании в интервале температур от 25 до 300°С с различными скоростями. Кинетическую обработку результатов анализа проводили по программам “Peak separation” и “Thermokinetics 3.1”, разработанным в германской компании NETZSCH.

По экспериментальным данным, полученным методом ДСК при трёх различных скоростях нагрева (метод Озавы-Флинна-Уолла) были рассчитаны кинетические параметры реакции отверждения связующего в препреге и построены изотермы степени превращения, позволяющие получить образцы с заданным ее значением. Степень превращения в изготовленных предотверждённых образцах рассчитывали по результатам ДСК [33] как процентное отношение снижения теплового эффекта реакции к исходному значению и дополнительно контролировали по содержанию гель-фракции, используя метод экстрагирования.

Для разработки неразрушающего метода оценки прочности соединения элементов ИК изготовлены образцы ИК с различной прочностью соединения,

полученной в результате варьирования степени отверждения матрицы подформованных заготовок. Параметры формования заготовок выбраны по кривым кинетики отверждения ненаполненной матрицы (связующего) и препрега на основе ленты ЭЛУР-П по тепловому эффекту реакции доотверждения, пропорциональному степени превращения. Различная степень превращения связующего достигается за счет изменения температуры в пределах от 50 до 120°C и времени выдержки препрега в пределах от 2 до 40 мин под давлением в процессе формования образцов ИК.

Спектр акустического сигнала, рассеянного на неоднородностях структуры, состоит из регулярной (гладкой) и нерегулярной (шумовой) компонент. Гладкая часть определяется спектральной чувствительностью пьезоприемника в акустическом преобразователе и может быть определена сглаживанием реального спектра сигнала. Нерегулярная часть (так же, как и во временной форме акустического сигнала) определяется рассеянием на неоднородностях структуры композита (в первую очередь порах) и ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

В качестве параметра диагностики пористости материала использована полная нормированная энергия шумовой компоненты:

$$W_n = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [S(f) - S_o(f)]^2 df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_o^2(f) df},$$

где: $S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; $S_o(f)$ – спектр зондирующего импульса; f – частота ультразвуковых колебаний; f_{\min} и f_{\max} – граничные частоты спектрального диапазона.

Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор V_n с нормированной величиной энергии W_n структурного шума $V_n = \varphi(W_n)$ [34].

На рисунке 1 показана зависимость энергии W_n шумовой компоненты акустического сигнала в относительных единицах, рассеянного в обратном направлении, от объемной пористости материала V_n в %. Между пористостью материала и энергией шумовой компоненты существует довольно тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции $R=0,95$), что и позволяет использовать энергию шумовой компоненты в качестве параметра диагностики, определяемого при неразрушающих испытаниях деталей и конструкций из углепластиков [35, 36]. Связь объемной пористости материала с энергией структурного шума определяется выражением: $V_n = 290,66 W_n^2 + 0,2934 W_n$.

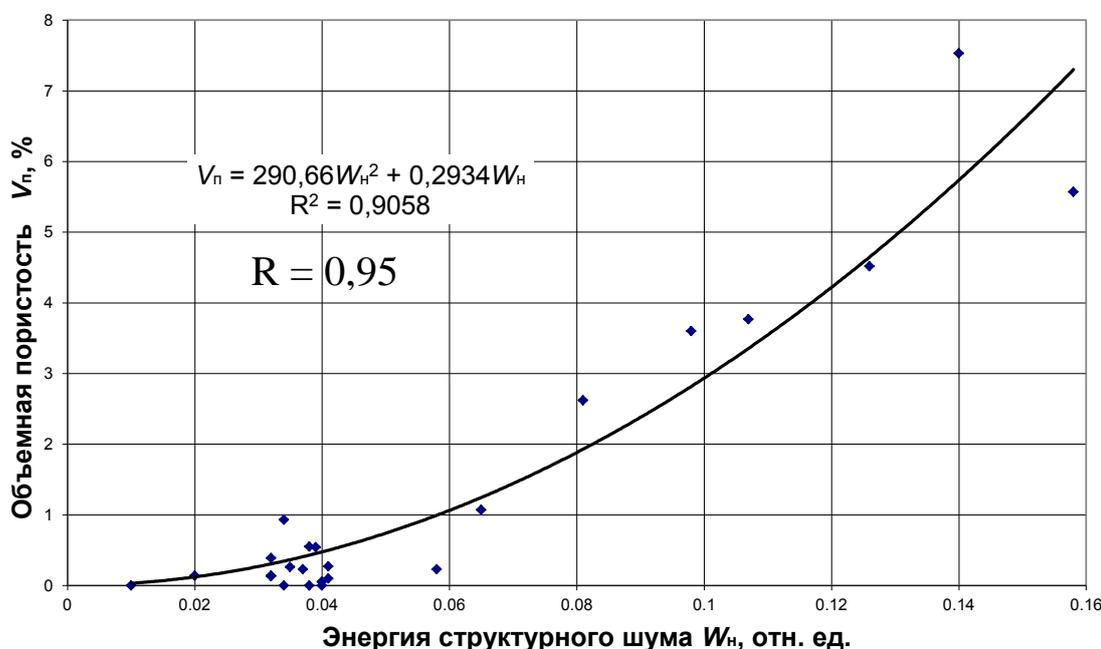


Рис. 1 – Связь объемного содержания V_n пор в углепластике ВКУ-17КЭ0,1 с энергией W_n структурного шума

Энергия структурного шума в дефектной области углепластика может на порядок превосходить энергию в бездефектной области. Поэтому, производить корректную диагностику пористости в дефектных участках УП не представляется возможным. Следовательно, диагностику УП можно проводить только на тех деталях и конструкциях, которые успешно прошли дефектоскопический контроль, т.е. не имеют дефектов типа расслоений, инородных включений и т.п.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Определение пористости, содержания волокна, плотности и прочностных характеристик углепластика

Энергия структурного шума W_n определяется для предварительной оценки пористости материала. Определение содержания армирующего волокна в УП и плотности УП в соответствии с установленными корреляционными связями возможно при пористости от 0 до 1%. При пористости материала свыше 1% возрастает погрешность определения объемного содержания армирующего волокна в УП и плотности УП, т.к. возрастающее количество пор в материале влияет на результаты определения параметра диагностики.

Содержание волокна в углепластике определяется по установленной корреляционной связи массового содержания волокна с основным параметром диагностики – скоростью c прохождения ультразвуковых колебаний (УЗК) в углепластике: $M_B = \varphi_1(c)$, а плотность ρ углепластика определяется (при пористости материала не более 1%) по установленной корреляционной связи плотности материала с тем же параметром диагностики: $\rho = \varphi_2(c)$.

Получены следующие уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для образцов с низкой пористостью $V_n = (0 - 1) \%$ [37]:

– для корреляционной связи скорости УЗК с массовым содержанием волокна: $M_B = 0,0507 c - 88,4$, коэффициент корреляции $R = 0,88$;

– для корреляционной связи скорости УЗК с плотностью материала: $\rho = 0,0003 c + 0,6293$, коэффициент корреляции $R = 0,88$.

Прочностные свойства углепластика в конструкции предложено определять по установленной корреляционной связи объединенного параметра b диагностики с прочностью $\tau_{сдв.}$ материала при межслойном сдвиге $\tau_{сдв.} = \varphi_1(b)$ и прочностью $\sigma_{сж.}$ материала при сжатии $\sigma_{сж.} = \varphi_2(b)$, где b – объединенный параметр диагностики, равный отношению коэффициента k

ко времени Δt его прохождения в направлении толщины стенки конструкции [38].

Коэффициент k определяется программным способом по амплитудным характеристикам сигналов и является величиной, обратной затуханию сигнала в материале при его прохождении по толщине ОК. Программа определяет коэффициент k как: $k = A_I / A$, где A_I – амплитуда донного сигнала, то есть амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности стенки ОК; A – амплитуда сигнала, вошедшего в ОК.

Объединенный параметр b диагностики рассчитывается программным способом по первичным параметрам диагностики: $b = k / \Delta t = A_I / (A \cdot \Delta t)$, где Δt – время прохождения сигнала по толщине стенки конструкции.

Получены следующие уравнения регрессии и коэффициенты корреляции для образцов из углепластика ВКУ-17КЭ0,1 с низкой пористостью (V_p от 0 % до 1 %):

– для корреляционной связи параметра диагностики с прочностью при сдвиге: $\tau_{сдв} = 306,6 b + 58,825$, коэффициент корреляции $R = 0,90$;

– для корреляционной связи параметра диагностики с прочностью при сжатии: $\sigma_{сж} = 18300 b + 490,48$, коэффициент корреляции $R = 0,88$.

Относительная погрешность определения неразрушающим методом пористости углепластика – не более $\pm 10\%$, плотности углепластика – не более ± 1 , содержания волокна в углепластике по массе – не более $\pm 4\%$.

Оценка степени полимеризации матрицы углепластика

Для оценки степени полимеризации матрицы углепластика [39] определяется основной параметр диагностики – объединенный параметр b_1 , равный произведению ослабления сигнала A_0/A_I и времени Δt его прохождения через контролируемый материал в направлении его толщины: $b_1 = (A_0/A_I) \cdot \Delta t$, где A_0 – амплитуда импульса, отраженного от верхней поверхности ОК (мВ); A_I – амплитуда первого донного импульса, т.е. амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности стенки

ОК (мВ); Δt – время прохождения сигнала по толщине ОК (мкс):
 $t = (t_1 - t_0)/2$, где t_1 – время индикации первого донного импульса (мкс); t_0 –
время индикации импульса, отраженного от верхней поверхности ОК (мкс).

Параметр диагностики b_1 вычисляется программным способом по
результатам определения первичных параметров диагностики (A_0/A_1 , Δt) в
процессе неразрушающих испытаний.

Эксперименты подтверждают правильность выбора такого параметра.
Так, при увеличении степени отверждения материала оба сомножителя
уменьшаются, а при уменьшении – увеличиваются, т.е. изменяются в одну
сторону, а их произведение усиливает эти изменения.

Степень полимеризации β матрицы в ОК из углепластика
ВКУ-17КЭ0,1 определяется по графику, построенному по установленной
корреляционной связи основного параметра b_1 со степенью полимеризации β
матрицы при пористости материала $V_n \leq 1\%$ или по уравнению этой связи:
 $\beta = \varphi(b_1)$.

Мешающим фактором при определении степени полимеризации β
матрицы по вышеупомянутому параметру является пористость, которая
влияет на зависимость $b_1 = \varphi(\beta)$. Для учета пористости материала необходимо
определять величину нормированной энергии W_n структурного шума.
Корреляционную связь степени конверсии реакционно-способных групп в
матрице ПКМ можно записать в виде:
 $\beta = \varphi(b_1, W_n)$.

Экспериментально исследована корреляционная связь параметра
диагностики b_1 со степенью полимеризации матрицы углепластика
ВКУ-17КЭ0,1, построенная для образцов с низкой пористостью материала.
Получено следующее уравнение регрессии и коэффициент корреляции:
 $\beta = 191,08 \cdot b_1^{-0,6063}$, $R = 0,96$.

Определение прочности зоны соединения деталей ИК

На рис. 2 показаны временные развертки прохождения акустических сигналов (импульсов) в обшивке до сборки-формования ИК и в ИК после сборки-формования ИК и спектры отраженных импульсов. Здесь: а – прохождение сигналов в обшивке до сборки-формования ИК; б – прохождение сигналов в ИК после сборки-формования ($A_{оп. ик} = A_{оп. обш}$); в – прохождение сигналов в ИК после сборки-формования (увеличено усиление сигнала); U, V – амплитуда сигнала, определяемая по экрану осциллографа, в вольтах; $t, мкс$ – время прохождения сигнала по толщине материала в прямом и обратном направлениях в мкс; 1 – зондирующий импульс, возбужденный в приповерхностном слое материала обшивки (с амплитудой $A_{оп. обш}$); 2 – донный импульс в обшивке – импульс, отраженный от противоположной стороны обшивки (с амплитудой $A_{отр. обш}$); 3 – зондирующий импульс, возбужденный в приповерхностном слое материала обшивки (с амплитудой $A_{оп. ик}$); 4 – импульс, отраженный от границы раздела деталей ИК (с амплитудой $A_{отр. ик}$); 5 – донный импульс в ИК – импульс, отраженный от противоположной стороны ИК; г – спектр донного импульса в обшивке (до изготовления ИК); д – спектр импульса, отраженного от зоны соединения деталей ИК (после ее изготовления); е – спектр, равный отношению спектра импульса, отраженного от границы раздела деталей ИК к спектру донного импульса в обшивке до сборки-формования ИК в указанном частотном диапазоне.

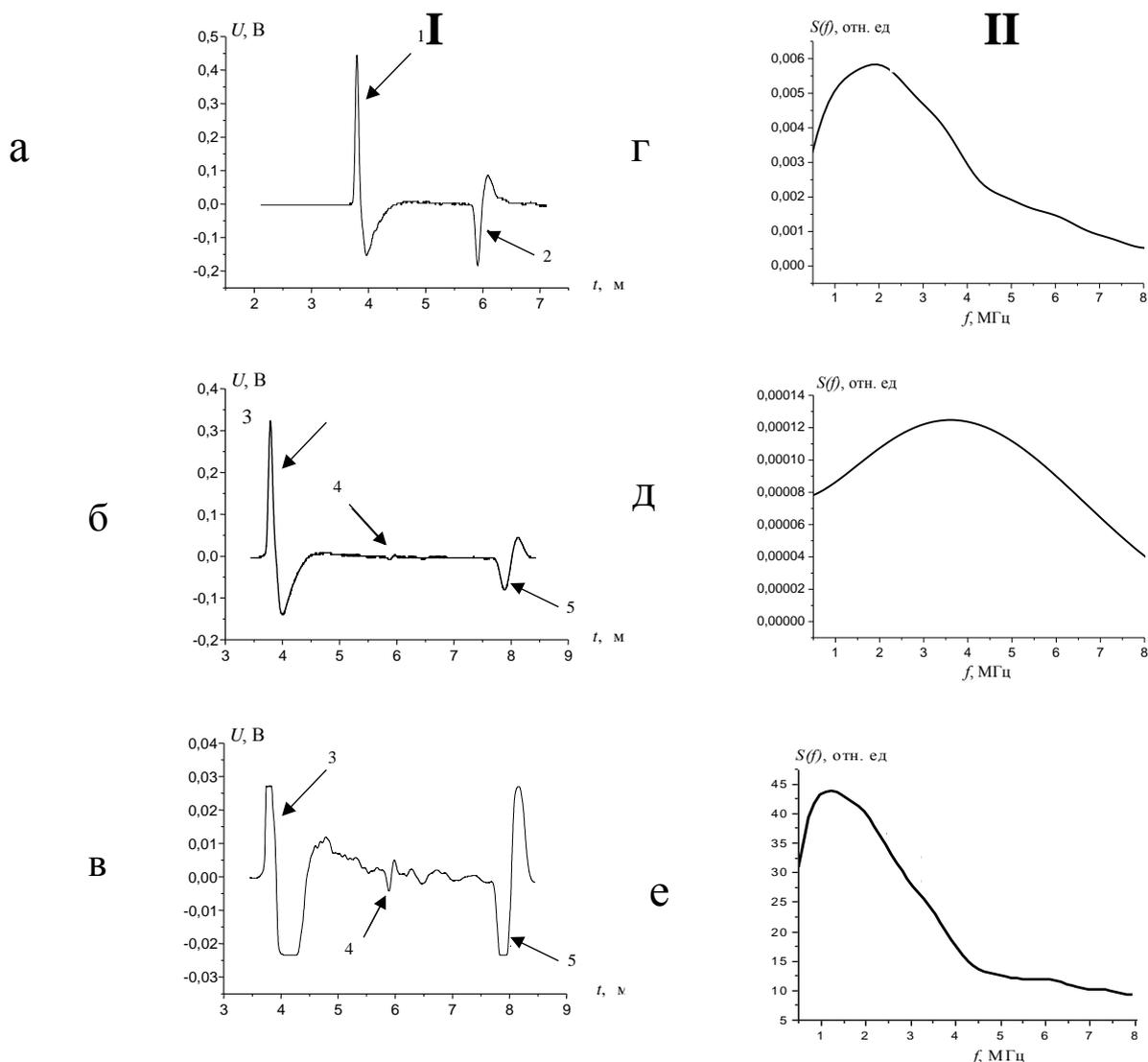


Рисунок 2 – I – временные развертки сигналов при их прохождении по материалу обшивки и ИК по толщине объекта контроля (А-скан); II – спектры импульсов, измеряемые при диагностике прочности на сдвиг по параметру K_2 диагностики

Рассмотрим два возможных варианта комплексного параметра диагностики.

Первый комплексный параметр диагностики равен отношению коэффициента отражения импульса УЗК от зоны соединения деталей ИК к коэффициенту отражения импульса УЗК от противоположной стороны обшивки (донного импульса) до сборки-формования ИК: $K_1 = K_{ик} / K_{обш}$.

Коэффициент $K_{ик}$ отражения импульса УЗК от зоны соединения деталей ИК равен отношению амплитуды отраженного сигнала от границы

раздела деталей ИК к амплитуде опорного сигнала, отраженного от входной поверхности ИК: $K_{ик} = A_{отр. ик} / A_{оп. ик}$,

а коэффициент $K_{обш}$ отражения донного импульса в обшивке равен отношению амплитуды «донного» сигнала к амплитуде опорного сигнала, отраженного от поверхности обшивки, со стороны которой проводится контроль: $K_{обш} = A_{отр. обш} / A_{оп. обш}$.

При равенстве опорных сигналов, т.е. когда $A_{оп. ик} = A_{оп. обш}$ комплексный параметр диагностики K_I равен: $K_I = A_{отр. ик} / A_{отр. обш}$, где $A_{отр. ик}$ – амплитуда отраженного сигнала от границы раздела деталей интегральной конструкции; $A_{отр. обш}$ – амплитуды донного сигнала в обшивке до сборки-формования ИК.

Для определения комплексного параметра диагностики K_I необходимо измерить первичные параметры диагностики ($A_{отр. обш}$ и $A_{отр. ик}$) по временной развертке прохождения сигналов в обшивке до сборки-формования и в ИК после сборки-формования ИК (рис. 2-Г).

Второй комплексный параметр диагностики может быть представлен в спектральном выражении как средняя величина отношения спектра импульса, отраженного от границы раздела деталей ИК к спектру донного импульса в обшивке до сборки-формования ИК в определенном частотном диапазоне при равенстве амплитуд опорных сигналов:

$$K_2 = \left(\frac{1}{f_{max} - f_{min}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{S_{ик}(f)}{S_{обш}(f)} df \right),$$

где $S_{ик}(f)$ – спектр импульса, отраженного от границы раздела деталей в интегральной конструкции, измеренный после сборки и формования интегральной конструкции; $S_{обш}(f)$ – спектр донного импульса в обшивке, измеренный до сборки интегральной конструкции; f_{min} и f_{max} – граничные частоты спектрального диапазона.

Для определения комплексного параметра диагностики K_2 необходимо измерить спектры импульсов $S_{ик}(f)$ и $S_{обш}(f)$, взять интеграл их отношения в

рабочем диапазоне частот и разделить на величину диапазона частот (рис. 2-
II).

Превышение степени полимеризации матрицы в подформованных заготовках выше 5–6% приводит к снижению прочности соединения деталей интегральной конструкции.

Прочность соединения деталей интегральных конструкций из углепластиков определяется по графикам, построенным по установленной корреляционной связи параметра диагностики (K_1 или K_2) с прочностью τ при сдвиге: $\tau = \varphi(K_1)$ или $\tau = \varphi(K_2)$.

В результате оценки тесноты корреляционных связей параметров диагностики с прочностью установлено [40, 41], что коэффициент корреляции связи, полученный при построении кривой «отношение амплитудных коэффициентов отражения - прочность при сдвиге образцов ИК» составил $R_1=0,954$, а коэффициент корреляции связи, полученный для кривой «отношение среднеспектральных коэффициентов отражения - прочность при сдвиге» – $R_2=0,972$.

Корреляционная связь $\tau = \varphi(K_2)$ может быть использована для повышения точности определения прочности в тех случаях, когда точность определения прочности по корреляционной связи $\tau = \varphi(K_1)$ мала ввиду низкого коэффициента корреляции этой связи.

Выводы и рекомендации

Таким образом, в диагностике ПКМ намечен новый подход к решению задач, основанный на лазерном возбуждении ультразвука в контролируемой конструкции и спектральном анализе импульсов ультразвуковых колебаний, прошедших в объекте испытаний и несущих информацию о структуре и физико-механических свойствах ПКМ. Использование лазерного возбуждения упругих колебаний дает возможность получать очень короткие импульсы с широким спектром и проводить анализ затухания ультразвука в достаточно широкой полосе частот, что позволяет повысить точность и

достоверность диагностики структуры и свойств ПКМ неразрушающим методом.

В результате проведенных в ВИАМе работ разработаны технологии контроля и выпущены методические материалы, технологические рекомендации и производственные инструкции по определению пористости, плотности, содержания волокна и матрицы в углепластиках, прочности при межслойном сдвиге и сжатию однонаправленных углепластиков, прочности соединения элементов интегральных конструкций и степени полимеризации матрицы на различных этапах изготовления интегральных конструкций.

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии, 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами //В сборнике: Авиационные материалы. Избранные труды 1932-2007. Москва, 2007. С. 342–347.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль /И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – 2-ое изд., испр. – М.: Машиностроение, 2008. – 864 с.
4. Мурашов В.В. Контроль монолитных и клееных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом //Авиационная промышленность. 2009. № 3. С. 43–48.
5. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов //Контроль. Диагностика. 2007. № 5. С. 31–36, 41–42.

6. Мурашов В.В., Яковлева С.И. Применение акустического метода свободных колебаний для контроля конструкций, содержащих слои из неметаллических материалов //Контроль. Диагностика. 2017. №10. С. 28-35. DOI: 10.14489/td.2017.10.pp.028-035.

7. Мурашов В.В. Исследование характеристик акустического метода свободных колебаний //Контроль. Диагностика. 2017. №3. С. 4-11. DOI: 10.14489/td.2017.03.pp.004-010.

8. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций из разнородных материалов ультразвуковым реверберационным методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №12. С. 18-22.

9. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль клеевых соединений в конструкциях и изделиях из ПКМ ультразвуковым теневым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №5. С. 15-23.

10. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 59-67.

11. Murashov V.V. Identification of Areas of Absence of Adhesive Bonding between Layers in Multilayer Structures //Polymer Science. Series D. Glues and Sealing Materials. 2014. Vol. 7. No. 1. P. 46-48. ISSN 1995-4212.

12. Бакунов А.С., Мурашов В.В., Сысоев А.М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики //Контроль. Диагностика. 2012. № 6. С. 72-74.

13. Murashov V.V. Nondestructive testing of glued joints //Polymer Science. Series D. 2009. T. 2. № 1. С. 58-63. ISSN 1995-4212.

14. Мурашов В.В. Контроль клееных конструкций акустическим импедансным методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2010. №3. С. 13-20.

15. Мурашов В.В. Применение вариантов акустического импедансного метода для контроля деталей из ПКМ и многослойных клееных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 469-482. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-469-482.

16. Мурашов В.В., Генералов А.С. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения //Авиационные материалы и технологии. 2017. №1. С. 69–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-69-74.

17. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосиметрического метода //Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4. С. 86-90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.

18. Мурашов В.В. Контроль качества изделий из полимерных композиционных материалов акустическими методами //Контроль. Диагностика. 2016. №12. С. 16 –29. DOI: 10.14489/td.2016.12.pp.016-029.

19. Мурашов В.В., Слюсарев М.В. Дефектоскопия многослойных конструкций ультразвуковым резонансным методом //Труды ВИАМ. 2016. №11. С. 12. (С. 95–102.) DOI:10.18577/2307-6046-2016-0-11-12-12.

20. Murashov V. V., Slyusarev M. V. Revealing Cracks in Polymer-Composite Parts and in Multilayered Glued Constructions by a Low-Frequency Acoustic Method //Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. Vol. 52. No. 6. P. 324-331. ISSN 1061-8309.

21. Каблов Е.Н., Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Гуняев Г.М., Тищенко А.П., Уральский М.П. Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом. //Патент РФ № 2196982. Оpubл. 20.01.2003. Бюл. № 2.

22. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Карабутов А.А., Мурашов В.В., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Румянцев А.Ф. Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления //Патент РФ № 2214590. Оpubл. 20.10.2003. Бюл. № 29.

23. 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, выпуск № 1, С. 17–24.

24. Мурашов В.В. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами. М.: ИД «Спектр». 2016. 244 с. ISBN 978-5-4442-0115-2.

25. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // *Контроль. Диагностика*. 2008. № 8. С. 13–17.

26. Гершберг М.В., Илюшин С.В., Смирнов В.И. Неразрушающие методы контроля судостроительных стеклопластиков. – Л.: Судостроение, 1971. –С. 124, 179.

27. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами. // *Авиационные материалы. Избранные труды*. – Москва: ВИАМ, 2007, С. 342–347.

28. Kablov E., Murashov V., Rummyantsev A. Diagnostics of Polymer Composites by Acoustic Methods // *Ultragarsas*. Kaunas: Technologija. 2006. No. 2. P. 7–10.

29. Murashov V. Non-destructive testing and evaluation designs by the acoustic methods. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publishing. 2017. 167 p. ISBN 978-3-330-07155-1.

30. Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б., Резников А.В. Применение ND:YAG-лазера с диодной накачкой в неразрушающем ультразвуковом контроле графито-эпоксидных композитов // *Контроль. Диагностика*. –2002. – № 11. – С. 24–29.

31. Карабутов А.А., Мурашов В.В., Подымова Н.Б. Диагностика слоистых композитов с помощью лазерного оптико-акустического преобразователя // *Механика композитных материалов*. – 1999. – Т.35, № 1. – С. 125–134.

32. Karabutov A.A., Murashov V.V., Podymova N.B., Oraevsky A.A. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser

optoacoustic sensor //Conf.: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II (San Antonio, Texas, march-april 1998). San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 3396. P. 103 –111.

33. Мурашов В.В., Алексагин В.М. Контроль прочности зоны соединения элементов интегральных конструкций из полимерных композитов ультразвуковым методом //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №7. С. 15 –19.

34. Mishurov K.S., Murashov V.V. Determination of the Composition and Density of Polymer Composite Materials in Details and Constructions by Nondestructive Methods //Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 176–180. ISSN 1995-4212.

35. Бойчук А.С., Мурашов В.В., Чертищев В.Ю., Диков И.А. Определение пористости в монолитных конструкциях из углепластиков ультразвуковым эхометодом с использованием лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний //Труды ВИАМ. 2016. №12. С. 74 –82. DOI:10.18577/2307-6046-2016-0-12-10-10.

36. Мурашов В.В., Мишуоров К.С. Определение пористости углепластиков в авиационных конструкциях ультразвуковым методом //Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 88 –92.

37. Мурашов В.В. Определение состава и плотности конструкционных углепластиков лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля //Материаловедение. 2014. №11. С. 24 –29.

38. Мурашов В.В., Мишуоров К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом //Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1. С. 81 –85.

39. Каблов Е.Н., Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. и др. Способ определения степени полимеризации композиционных материалов //Патент РФ № 2231054. Оpubл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

40. Мурашов В.В. Определение прочностных характеристик углепластиков в монолитных и интегральных конструкциях лазерно-

акустическим способом ультразвукового контроля //Материаловедение. 2016.
№11. С. 9–16.

41. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Определение прочности соединения
деталей интегральных конструкций из полимерных композиционных
материалов ультразвуковым методом //Контроль. Диагностика. 2006. № 4. С.
45–51.

УДК 629.78:620.22

Использование ВБР для измерения деформаций анизотридных конструкций из углепластика

Анискович В.А.¹; Будадин О.Н.¹; Кутюрин Ю.Г.¹;
Муханова Т.А.¹; Водопьянов В.А.²

¹ АО "Центральный НИИ специального машиностроения", г. Хотьково

² ООО «НПП «МСТД», г. Зеленоград

Аннотация:

Приведены результаты измерения деформаций элементов анизотридной сетчатой конструкции из углепластика в процессе ее нагружения внешней силой. Установлено, что в месте разрушения конструкции регистрируется увеличение температуры на 4–8°С.

Ключевые слова:

углепластик, анизотридная конструкция, деформация, ВБР

Сетчатые конструкции из углепластика получили широкое распространение в авиационной и ракетно-космической технике благодаря своему весовому совершенству и отработанности технологии изготовления. Являясь по сути одним из концептуальных решений по изготовлению фюзеляжей самолетов, переходных отсеков и адаптеров в космических аппаратах [1], они требуют не только тщательного контроля качества в процессе изготовления, но и непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации. Ведущими организациями, занимающимися изучением поведения углепластиков под нагрузкой (ВИАМ, ЦАГИ, ОАО «Композит» и др.), исследуются возможности определения деформаций конструкций из углепластиков с

использованием волоконно-оптических датчиков, в частности решеток Брэгга [2–5]

Нами проведена работа по определению деформаций с использованием решеток Брэгга и стандартных тензометрических датчиков на макете соединительного отсека космического аппарата. На рисунке 1 изображен макет соединительного отсека, установленного на испытательный стенд.

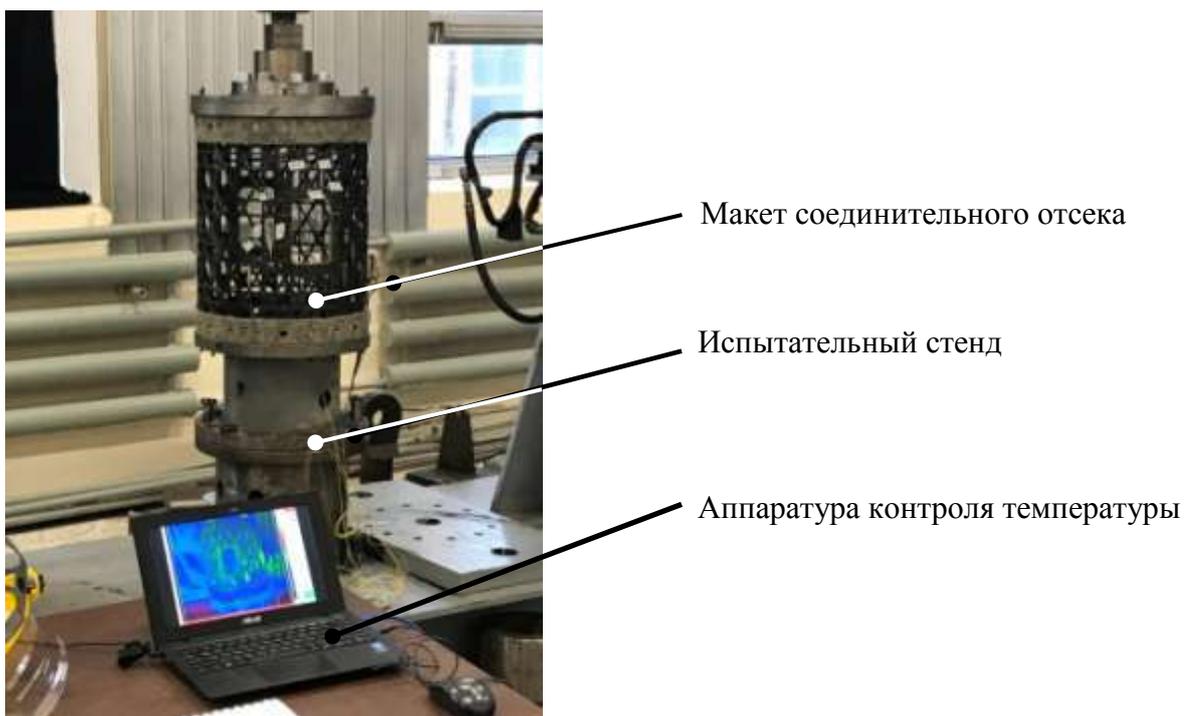


Рисунок 1 – Макет соединительного отсека на испытательном стенде

Непосредственно перед разрушением были зафиксированы показания тензометров и информация с решеток Брэгга. Полученные результаты приведены на рисунке 2.

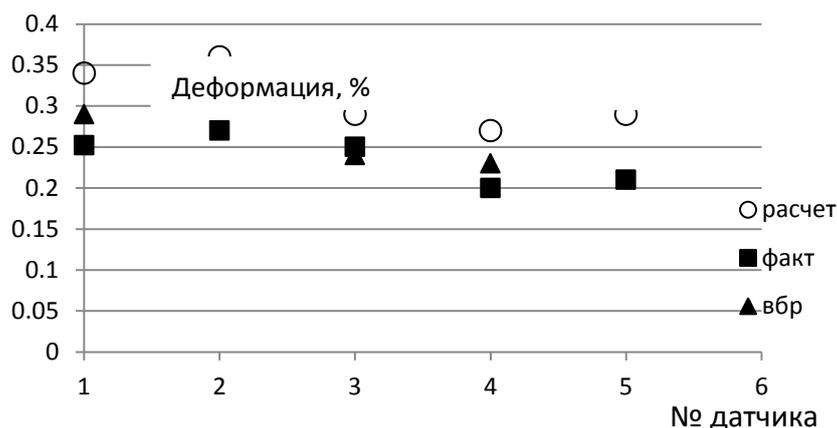


Рисунок 2 – Значения деформации, полученные от разных источников

Следует отметить, что тензометры и ВБР были размещены на различных элементах макета, при этом предполагалось, что они расположены симметрично относительно оси макета и соответственно смещения в точках их расположения в процессе нагружения будут одинаковы. Однако измерения смещений по разным базам с помощью индикаторов часового типа показали не симметричность смещений, что могло повлечь за собой разницу в измерениях деформации $\pm 0.04\%$.

В обобщенном виде показания тензометров и ВБР оказались в хорошем согласии, как между собой, так и по сравнению с порядком величин деформаций, полученных расчетным методом.

В процессе испытаний проводился контроль температуры на поверхности изделия в зоне, где были наклеены ВБР. Контроль проводился с использованием наклеенного волоконно-оптического датчика и тепловизором ИРТИС2000М. При нагружении макета до разрушения температура поверхности не менялась, что было зафиксировано как волоконно-оптическим датчиком, так и тепловизором. Непосредственно в момент разрушения тепловизором в зоне разрушения макета зафиксировано повышение температуры, перепад которой по сравнению с исходной превысил 6°C . Очевидно, что при быстром нагружении (время от начала нагружения и до разрушения макета составило около 2,5 минут) тепло не успевает проявиться на наружной поверхности макета. На рисунке 3

приведено изображение теплового поля на поверхности макета непосредственно после его разрушения. Этот результат хорошо согласуется с результатами, полученными ранее на опытных образцах и на натуральных изделиях другими исследователями [6].

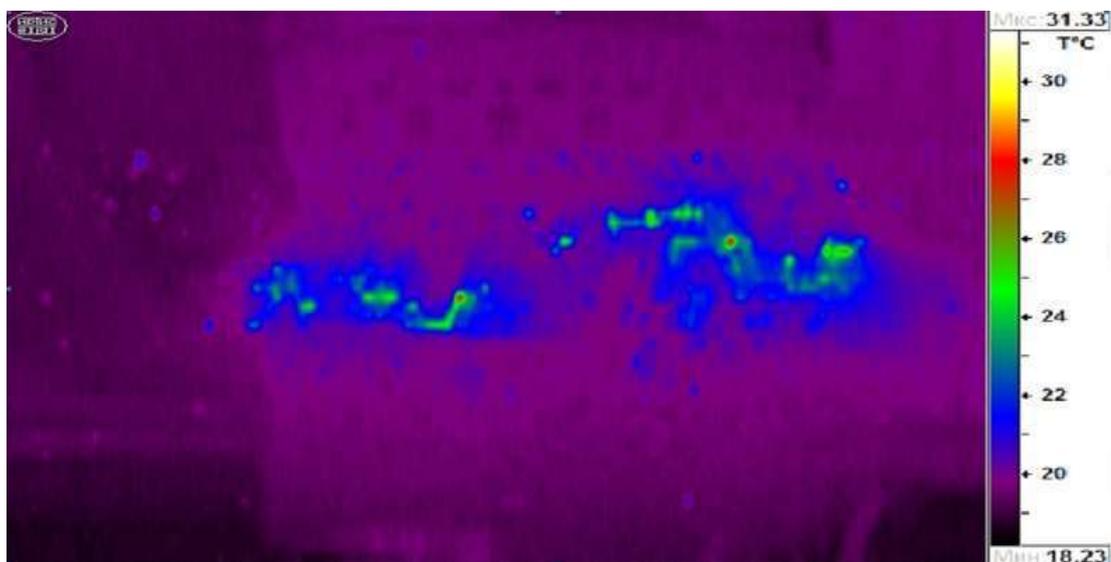


Рисунок 3 – Тепловое поле поверхности макета в момент разрушения

В ходе выполнения исследований установлено следующее.

1. Исследована возможность использования оптического волокна с нанесенными решетками Брэгга (ВБР) в качестве датчиков деформации. Представлены экспериментальные результаты испытаний датчиков ВБР, инкорпорированных в композиционный материал.

2. Путем сравнения результатов измерения деформаций с использованием тензорезисторов и датчиков на основе решеток Брэгга показана принципиальная возможность измерения деформации материала изделий в процессе их испытаний с использованием решеток Брэгга на оптоволоконных линиях отечественного производства.

3. Проведено тепловизионное обследование элемента конструкции из ПКМ в виде сетчатого отсека. Установлено, что максимальной температура регистрируется в момент разрушения. Неравномерность температурного

поля, в дальнейшем может быть использована для оценки тепловых аномалий конструкций при их испытаниях.

Литература

1. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петраковский С.А., Халиманович В.И. "Анизотридные композитные сетчатые конструкции - разработка, и приложение к космической технике", "Композиты и наноструктуры", 2009, №3, С. 38–50

2. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Дианов Е.М., Васильев С.А., Медведков О.И. "Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах", Все материалы. Энциклопедический справочник. №3, 2010.

3. Сорокин К.В., Гончаров В.А., Шиенок А.М., Федотов М.Ю. "Возможности оптоволоконных сенсоров на основе брэгговских решеток в информкомпозитах для регистрации ударного воздействия", "Все материалы. Энциклопедический справочник", №12, 2013 г.

4. Михайловский К.В., Базанов М.А. "Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток". "Конструкции из композиционных материалов", № 2, 2016, С.54–58

5. Щевелев А.С., Кикот В.В., Удалов А.Ю. "Информационно-измерительная система мониторинга изделий космической техники", "Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы", 2016, том 3, выпуск 2, С.60–65.

6. Ключев В.В., Будадин О.Н., Абрамова Е.В. и др. "Тепловой контроль композитных конструкций в условиях силового и ударного нагружения", Издательский дом "Спектр", Москва, 2017.

УДК 621.45:621.791

Определение толщины серебряного покрытия на оребренных стенках методом рентгенофлуоресцентного анализа

Полянский А.М.¹, к.т.н.; Полянский В.М.², , д.т.н.

p_a_m@list.ru, Polyansky@bmstu.ru

¹ «НПО Энергомаш» им. В.П. Глушко

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация:

Отработана методика определения толщины гальванического серебряного покрытия, нанесенного на оребренную бронзовую стенку, методом рентгенофлуоресцентного анализа и получена зависимость толщины покрытия от концентрации серебра. Определена критическая толщина покрытия - граница применимости метода.

Проведена экспериментальная проверка методики путем определения толщины покрытия на оребренных стенках товарных проставок.

Ключевые слова:

рентгенофлуоресцентный анализ, оребренная стенка проставки, толщина покрытия, контактно – реактивная пайка

Введение

В технологии изготовления охлаждаемых стенок камер сгорания, теплообменников, газоводов и других узлов ЖРД применяются контактно – реактивная пайка (КРП), при которой на сопрягаемые поверхности деталей наносятся гальванические покрытия меди и серебра. Как правило, внутренняя деталь такой сборки представляет собой оребренную стенку, изготавливаемую из меди или бронзы $BrX_{0.8}$. На оребренные стенки наносится

гальваническое серебряное покрытие, а на внешнюю стенку сборки гальваническое покрытие меди.

Для получения качественных паяных соединений необходимо, чтобы при контактном плавлении во время пайки образовалось такое количество жидкой фазы припоя (медно-серебряной эвтектики), которого хватило бы для заполнения зазора между сопрягаемыми поверхностями и образования плотных галтелей. Поскольку основой одной из сопрягаемых стенок является медь, то главным фактором, контролирующим количество жидкой фазы припоя, будет толщина серебряного покрытия.

Проводимая по существующей технологии оценка толщины серебряного покрытия по образцам–свидетелям из-за неопределенности в распределении тока между покрываемой стенкой и образцами-свидетелями не является корректной (достоверной). Недостоверность определения толщины серебряного покрытия приводит к случаям получения низкого качества паяных соединений и их преждевременным разрушениям во время гидроиспытаний сборок. В связи с этим разработана методика, позволяющая неразрушающим методом непосредственно на оребренной стенке корректно проводить экспресс-анализ толщины серебряного покрытия, является актуальной проблемой.

Известно, что для определения толщины покрытий может быть использовано рентгеновское излучение, при этом используются как эффекты поглощения рентгеновского излучения, так и эффекты возбуждения (флуоресценции). Например, в [1] приводятся результаты по определению толщины оловянного покрытия, нанесенного на железную подложку. Здесь полихроматическим излучением медной мишени возбуждали K-линию железа в подложке и измеряли ее интенсивность после прохождения через покрытие олова. В [2] толщину хромового покрытия, нанесенного на молибденовую подложку, определяли по изменению интенсивности его K-линии, возбуждаемой излучением рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом.

В данной работе проведена разработка методики неразрушающего контроля толщины серебряного покрытия с использованием рентгенофлуоресцентного анализа.

В настоящее время налажен выпуск компактных переносных приборов рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и в данной работе был использован прибор OLYMPUS DELTA Professional. Этот прибор предназначен для экспрессного определения химического состава сплавов, минералов и других веществ. Источником рентгеновского излучения в нем является рентгеновская трубка с родиевым анодом. Напряжение на трубке – 40 кВ.

Ниже показано, что такой прибор может быть использован и для определения толщины серебряного покрытия, нанесенного на оребренную поверхность бронзовой стенки.

Методика и оборудование

Плоские тест-образцы с различной толщиной серебряного покрытия получали путем гальванического осаждения покрытия на медные подложки из цианистого электролита. Время осаждения покрытия заданной толщины определяли по уравнению:

$$\tau_i = \frac{\rho h_i}{jE\alpha} \quad (1),$$

где τ_i – время осаждения покрытия; ρ – плотность серебра; h_i – заданная толщина покрытия; j – плотность тока, E – электрохимический эквивалент серебра; α – выход по току.

После осаждения серебряного покрытия заданной толщины на часть поверхности тест-образца наносили медное покрытие толщиной ~ 20 мкм, после чего электроэрозией эту часть срезали и изготавливали поперечный шлиф. Толщину серебряного покрытия на тест-образцах проводили прямыми измерениями на микроскопе Axio Vert.A1 MAT. На рис.1 показан поперечный шлиф тест-образца с серебряным покрытием толщиной 12 мкм.

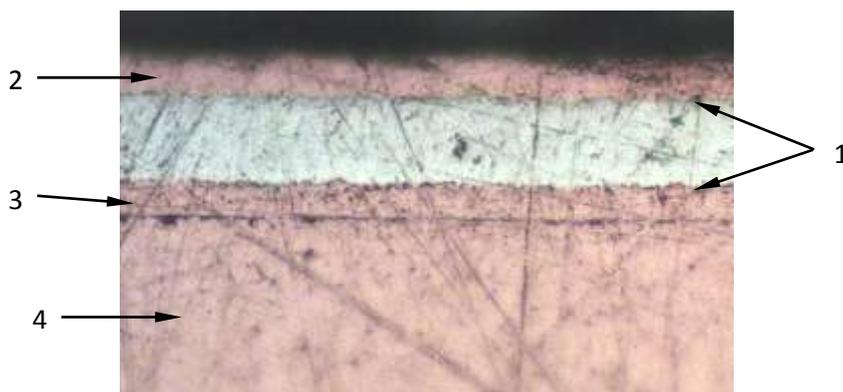


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения тест-образца с серебряным покрытием толщиной 12 мкм. Стрелками отмечены: 1 – серебряное покрытие, 2 – внешний слой медного покрытия, 3 – подслои меди, 4 – медная основа. $\times 830$

Было изготовлено семь тестовых образцов. Проведенные измерения показали, что толщина серебряного покрытия на образцах составляет 1.3, 3.3, 5.3, 6.0, 7.2, 10 и 12.1 мкм соответственно.

Физические основы рентгенофлуоресцентного метода определения толщины покрытия

Явление рентгеновской флуоресценции заключается в испускании элементом А характеристического рентгеновского излучения К, L или M-серий, возникающего при поглощении им рентгеновского моно- или полихроматического излучения, энергия которого превышает величину края поглощения соответствующей серии элемента А.

Схема определения толщины серебряного покрытия на медной подложке с использованием прибора DELTA Professional приведена на рис. 2.

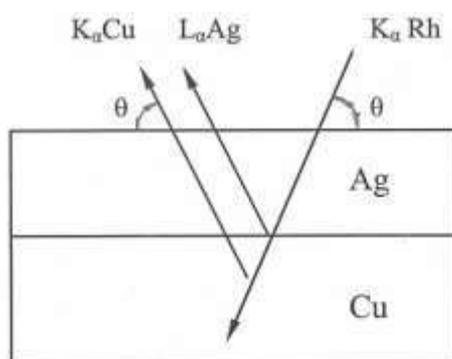


Рисунок 2 – Схема рентгенофлуоресцентного метода определения толщины серебряного покрытия: Ag – покрытие; Cu – подложка; K_{α} Rh – первичный пучок характеристического излучения рентгеновской трубки; K_{α} Cu – линия от подложки; L_{α} Ag – линия от покрытия; θ – углы, образуемые падающим и выходящими пучками с поверхностью образца

Первичный пучок характеристического излучения $K_{\alpha}Rh$, падающий на поверхность образца под углом 62° и проходящий через покрытие и подложку возбуждает в них соответствующие линии характеристического излучения $L_{\alpha}Ag$ и $K_{\alpha}Cu$.

В табл.1 представлены значения длин волн линий $K_{\alpha}Rh$, $L_{\alpha}Ag$ и $K_{\alpha}Cu$, а также массовые коэффициенты поглощения этих линий серебром и медью [4].

Таблица 1

Массовые коэффициенты поглощения μ/ρ и длина волны характеристических линий

Излучение Поглотитель	$K_{\alpha} Rh,$ $\lambda - 0.613 \text{ \AA}$	$L_{\alpha} Ag,$ $\lambda - 4.154 \text{ \AA}$	$K_{\alpha} Cu,$ $\lambda - 1.541 \text{ \AA}$
Ag	17.5	498.5	201.4
Cu	32.4	-	55.0

Как следует из данных таблицы, длина волны линии $K_{\alpha}Rh$ существенно меньше, чем длина волны линий $L_{\alpha}Ag$ и $K_{\alpha}Cu$, поэтому при прохождении первичного родиевого излучения $K_{\alpha}Rh$ через покрытие и подложку в них возбуждаются линии характеристического излучения $L_{\alpha}Ag$ в покрытии и $K_{\alpha}Cu$ в подложке. Концентрации серебра C_{Ag} и меди C_{Cu} , определенные прибором в весовых процентах, пропорциональны интенсивностям соответствующих линий $L_{\alpha}Ag$ и $K_{\alpha}Cu$.

Полученные концентрации C_{Ag} и C_{Cu} можно представить как отношение масс серебра и меди, находящихся в элементах объема, от которых в детектор попадает характеристическое излучение элементов покрытия и подложки, к их общей массе:

$$C_{Ag} = \frac{m_{Ag}}{m_{Ag} + m_{Cu}} \quad C_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{m_{Ag} + m_{Cu}} \quad , \quad (2)$$

где m_{Ag} – масса серебра, m_{Cu} – масса меди.

На площадке единичной площади массы серебра и меди могут быть выражены через их плотности и толщины:

$$m_{Ag} = \rho_{Ag} h_{Ag}, \quad m_{Cu} = \rho_{Cu} h_{Cu}, \quad (3)$$

где ρ_{Ag} – плотность серебряного покрытия, толщина серебряного покрытия h_{Ag} , ρ_{Cu} – плотность меди, h_{Cu} – глубина слоя меди, от которого излучение $K_{\alpha}Cu$ попадает в детектор.

Объединяя уравнения (2) и (3) и проведя преобразования, получим уравнение, связывающее концентрации серебра и меди, определенные прибором, с толщиной серебряного покрытия и глубиной слоя меди, от которого излучение $K_{\alpha}Cu$ попадает в детектор:

$$h_{Ag} = \frac{h_{Cu} \rho_{Cu} C_{Ag}}{\rho_{Ag} C_{Cu}} \quad (4)$$

Из (4) следует, что толщина серебряного покрытия прямо пропорциональна концентрации серебра, определенной прибором.

Экспериментальные результаты

На плоских тест-образцах с известной толщиной серебряного покрытия были проведены измерения концентраций серебра и меди, которые сведены в табл. 2 и представлены графически на рис. 3.

Таблица 2

Результаты РФА поверхности серебряного покрытия на тест-образцах

h Ag, мкм	1.3	3.3	5.3	6.0	7.2	10.0	12.1
C _{Ag} , %	6.5	19.5	31.9	35.2	46.4	67	75.8
C _{Cu} , %	93.5	80.5	68.1	64.8	53.6	33	24.2
h* Cu, км	22.3	20.8	13.2	12.8	9.8	5.8	4.5

* - значения, рассчитанные по уравнению (4).

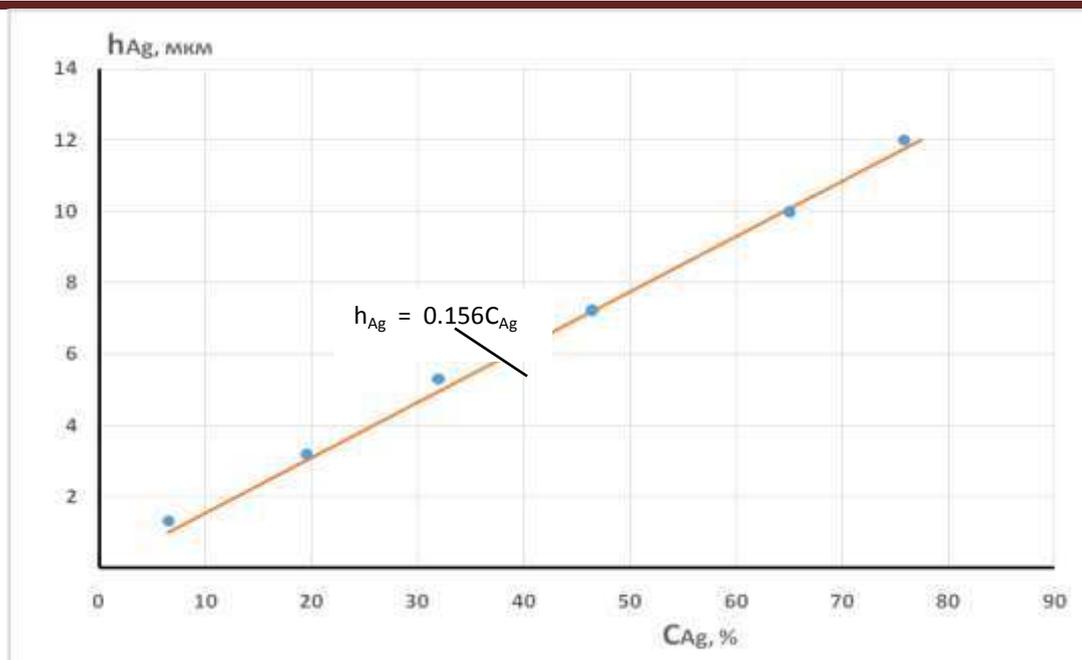


Рисунок 3 – Зависимость толщины серебряного покрытия от концентрации серебра. Экспериментально полученные результаты показаны кружками.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в интервале толщин от 1 до 12 мкм зависимость толщины серебряного покрытия от концентрации серебра, определенной прибором РФА, носит линейный характер. Повышение толщины покрытия на 1 мкм приводит к повышению концентрации серебра в среднем на 6.3%. Экспериментально полученная зависимость может быть аппроксимирована прямой, описываемой уравнением:

$$h_{Ag} = 0.156C_{Ag} \quad , \quad (5)$$

где C_{Ag} – концентрация серебра, определенная прибором.

С увеличением толщины серебряного покрытия линейный характер зависимости толщины покрытия от концентрации серебра изменится на нелинейный и при критической толщине покрытия h_c кривая выйдет на насыщение. При любой толщине, превышающей h_c , из-за полного поглощения покрытием серебра линии $K_{\alpha}Cu$, прибор будет определять 100%-ую концентрацию серебра.

Известно [3], что критическая глубина, на которой происходит полное поглощение рентгеновского излучения, может быть определена по уравнению:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -(\mu\rho d_c) \quad (6)$$

где I – интенсивность поглощенного пучка, I_0 – падающего пучка, μ – массовый коэффициент поглощения, ρ – плотность, d_c – критическая глубина.

Поскольку d_c является расстоянием, которое проходит рентгеновский пучок до полного поглощения, а отбор излучения детектором осуществляется под углом $\theta = 62^\circ$ по отношению к поверхности образца, то критическая толщина покрытия h_c , соответствующая полному поглощению излучения, будет определяться путем умножения d_c на $\sin 62^\circ$:

$$h_c = 0.88d_c \quad (7)$$

Для проведения расчета критической глубины выбирают произвольно некоторое значение отношения I/I_0 , например 0.01, соответствующее поглощению 99% процентов интенсивности падающего пучка, и по уравнению (6) проводят вычисление d_c .

С использованием данных табл.1 и уравнения (6) были определены критические глубины d_c поглощения линии $K_\alpha Rh$ в серебре (250 мкм) и в меди (159 мкм), а также линии $K_\alpha Cu$ в серебре (21.8 мкм).

Критическая глубина поглощения линии характеристического излучения $K_\alpha Cu$ в серебре и соответствующая ей критическая толщина серебряного покрытия $h_c = 19.2$ мкм являются границами, определяющими возможность применения данного метода.

Практическую проверку полученной зависимости толщины покрытия от концентрации серебра проводили на покрытой серебром оребренной стенке проставки коллектора двигателя РД171М (рис. 4).

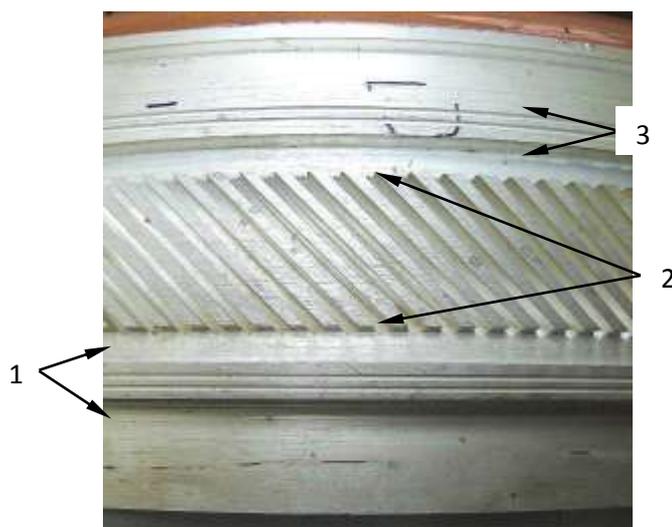


Рисунок 4 – Макроизображение стенки проставки коллектора двигателя РД 171М.
Двойными стрелками отмечены: 1 – уплотнительный бурт 1; 2 – косые ребра;
3 – уплотнительный бурт 2.

Из областей стенки, отмеченных на рис. 4 двойными стрелками 1, 2 и 3, электроэрозией были вырезаны фрагменты с серебряным покрытием, на поверхность которых нанесли покрытие меди. Фрагменты 1 и 3 представляли собой участки уплотнительных буртов (УБ), а фрагмент 2 – участок с "косыми" ребрами. Размеры элементов оребрения участков стенки представлены в табл. 3, а схема оребрения стенки на рис. 5.

Таблица 3

Параметры ребер стенки проставки коллектора двигателя РД 171 М

Участок стенки	L_B , мм	L_D , мм	$2t$, мм	L_T , мм
Косые ребра	3	2.1	3.2	2
Ребра УБ	1	1	1.1	1

Толщину серебряного покрытия на поверхностях торцев ребер (h_T), на дне межреберных каналов (h_D) и на боковых поверхностях ребер (h_B) определяли прямыми измерениями на поперечных шлифах, изготовленных из фрагментов стенки с использованием микроскопа Axio Vert.A1 MAT.

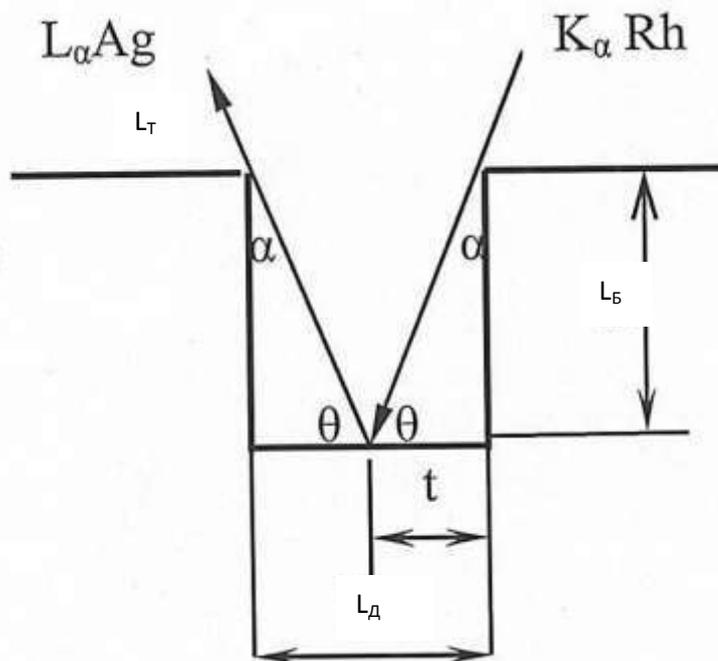


Рисунок 5 – Схема межреберного канала: L_B – высота ребра, L_D – ширина межреберного канала, L_T – ширина ребра, t – ширина «тени», α – угол, образованный падающим пучком и перпендикуляром к поверхности ребра, θ – угол между поверхностью ребер и падающим и выходящим пучками

Результаты прямых измерений показали, что на поверхности торцевых ребер средняя толщина серебряного покрытия $h_T \sim 4.5$ мкм, на поверхности межреберного канала и на боковых поверхностях ребер $h_D \sim h_B \sim 2.3$ мкм. На поверхности ребер уплотнительного бурта средняя толщина покрытия $h_T \sim 4.3$ мкм, на поверхности межреберного канала и боковых поверхностях ребер $h_D \sim h_B \sim 2.5$ мкм. Как следует из полученных результатов толщина покрытия на торцах ребер примерно в два раза больше, чем на дне межреберного канала и боковых поверхностях ребер.

Следует отметить, что при определении концентрации серебра на поверхности оребренной стенки характеристические линии покрытия $L_{\alpha}Ag$ и подложки $K_{\alpha}Cu$, возбуждающиеся в межреберном канале при попадании на его поверхность пучка первичного родиевого излучения RhK_{α} , могут как выходить из канала и попадать на детектор, так и полностью поглощаться боковой поверхностью ребра.

Условия, при которых линии $L_{\alpha}Ag$ и $K_{\alpha}Cu$, возбуждающиеся на поверхности межреберного канала, могут либо попадать в детектор, либо поглощаться поверхностью ребра, иллюстрируются рис. 5, соответствующему случаю, когда направление первичного пучка перпендикулярно оси межреберного канала.

В использованном приборе OLYMPUS DELTA Professional первичный пучок $K_{\alpha}Rh$ образует с перпендикуляром к поверхности ребра угол $\alpha - 28^{\circ}$ и с поверхностью ребра угол $\theta - 62^{\circ}$. При попадании этого пучка в канал с правой стороны образуется "тень" – область шириной $t = L_{\text{Б}} \text{tg } \alpha$, где не возбуждаются линии характеристического излучения покрытия и подложки. Угол отбора характеристического излучения покрытия и подложки также равен 28° . С левой стороны на дне канала образуется еще одна область "тени", в которой возникают характеристические излучения покрытия и подложки, но не попадающие в детектор из-за их поглощения боковой поверхностью ребра. Ширина этой "тени" равна ширине "тени" справа. Из приведенной на рис. 5 схемы видно, что при ширине канала $L_{\text{д}} < 2t$ характеристические линии покрытия и подложки поглощаются вертикальной поверхностью ребра и не попадут в детектор. В этом случае концентрация серебра, определенная прибором, будет соответствовать концентрации серебра на поверхности ребер стенки, а рассчитанная по уравнению (4) толщина покрытия, будет соответствовать средней толщине покрытия на поверхности ребер в области диаметра первичного пучка $K_{\alpha}Rh$.

При $L_{\text{д}} > 2t$ на детектор будет попадать характеристическое излучение покрытия и подложки, как от поверхности ребер, так и от части поверхности межреберных каналов шириной $L_{\text{к}} = L_{\text{д}} - 2t$. При этих условиях концентрация серебра, определенная прибором, будет представлять собой сумму произведений концентраций серебра на поверхностях ребер и межреберных каналов на их относительную длину в области диаметра первичного пучка:

$$C_{Ag} = C_{Ag}^p \left(\frac{L_p}{\Sigma} \right) + C_{Ag}^k \left(\frac{L_k}{\Sigma} \right) , \quad (8)$$

где C_{Ag}^p и C_{Ag}^k – концентрации серебра на поверхности ребер и межреберного канала соответственно, L_p / Σ – относительная ширина ребер и L_k / Σ относительная ширина участков поверхности межреберных каналов, излучение от которых попадает в детектор, $\Sigma = L_p + L_k$ – область на диаметре пучка, занимаемая ребрами и участками поверхности межреберных каналов, излучение от которых попадет в детектор.

Как следует из приведенных в табл. 3 данных ширина межреберных каналов в уплотнительных буртах и на участке косых ребер меньше, чем удвоенная ширина "тени" ($L_d < 2t$), поэтому определенная на этих участках толщина покрытия, будет соответствовать средней толщине покрытия на поверхности ребер h_T .

РФА толщины покрытия на оребренной стенке проводили при ориентации направления первичного пучка перпендикулярно оси межреберного канала. При такой ориентации направления первичного пучка реализуется схема, при которой $L_d < 2t$.

При осаждении серебряного покрытия на оребренную стенку его требуемая толщина, значение которой используется при расчете параметров электролиза по уравнению (1), представляет собой среднюю толщину покрытия на элементах оребрения стенки:

$$h_{cp} = \frac{(h_T L_T + h_d L_d + 2h_B L_B)}{(L_T + L_d + 2L_B)} , \quad (9)$$

где h_T , h_d , h_B – толщина покрытия на торце ребра, на дне канала и на двух боковых поверхностях ребра соответственно, L_T , L_d , L_B – ширина ребра, ширина канала и высота ребра соответственно.

Толщины покрытия на дне канала h_d и боковой поверхности ребра h_B можно выразить через толщину покрытия на торце ребра h_T как:

$$h_d = nh_T \quad h_B = mh_T \quad (10)$$

Подставив (10) в (9) получим

$$h_{cp} = h_T K_2, \quad (11)$$

где K_2 поправочный коэффициент, учитывающий геометрию оребрения и разное значение толщины покрытия на элементах оребрения:

$$K_2 = \frac{(L_T + nL_D + 2mL_B)}{(L_T + L_D + 2L_B)} \quad (12)$$

Таким образом, для определения средней толщины покрытия на оребренной стенке необходимо сориентировать ось прибора перпендикулярно оси межреберного канала и получить значение концентрации серебра C_{Ag} , по уравнению (4) определить значения толщины покрытия на торце ребер h_T , по уравнению (12) значение поправочного коэффициента K_2 и по уравнению (11) определить h_{cp} . Для участка косых ребер стенки $K_2 = 0.61$, для участков уплотнительных буртов $K_2 = 0.63$

Сравнительные результаты по определению толщины серебряного покрытия прямыми измерениями на поперечных шлифах и путем расчета на основании данных рентгенофлуоресцентного анализа приведены в табл. 4 и свидетельствуют о хорошей корреляции между ними.

Таблица 4

Сравнительные результаты определения толщины серебряного покрытия на поверхности торцев ребер стенки проставки коллектора

Область стенки	C_{Ag} , %	расч. h_T , мкм	эсп. h_T , мкм
Бурт 1	30.0	4.7	4.3
Косые ребра	30.8	4.8	4.5
Бурт 2	30.0	4.7	4.3

Используя уравнение (10) и полученные результаты расчета h_T по данным РФА для средней толщины покрытия на участках стенки получим следующие значения:

на участках косых ребер $h_{cp} = 4.8 \cdot 0.61 = 2.9$ мкм, на участках уплотнительных буртов $h_{cp} = 4.7 \cdot 0.63 = 3$ мкм.

На основании полученных данных можно констатировать, что применение неразрушающего рентгенофлуоресцентного метода контроля серебряного покрытия на оребренных стенках проставок позволяет оперативно получать достоверные значения его толщины как на поверхности торцев ребер, так и значения средней толщины покрытия на участках оребрения.

Выводы

1. Отработана и экспериментально проверена методика неразрушающего контроля толщины гальванического покрытия серебра на оребренных бронзовых стенках проставок методом рентгенофлуоресцентного анализа.

2. Установлено, что в интервале толщин от 1 до 12 мкм зависимость толщины серебряного покрытия от концентрации серебра, определенной прибором РФА, носит линейный характер. Изменение толщины покрытия на 1 мкм приводит к повышению концентрации серебра в среднем на 6.3%.

3. Определена критическая толщина серебряного покрытия на медной подложке ($h_c = 19.2$ мкм), определяющая границу применения метода РФА.

Литература

1. Beeghiy H.F. J. Electrochim. Sos., 1950, 97, 152.
2. Liebhafsky H.A., Zemanu P.D., Anal. Chem., 1956, 28, 455.
3. Практическая растровая электронная микроскопия, под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица, М., Мир, 1978, 656 с.
4. Х.А. Либхафски, Г.Г. Пфейфер, Э.Г. Уинслоу, П.Д. Земани, Применение поглощения и испускания рентгеновских лучей, М., Металлургия, 1964, 391 с.

УДК 620.179.16

Модернизация установки автоматизированного неразрушающего контроля изделий из ПКМ в условиях серийного производства

Рыков А.Н.¹; Корсаков А.Н.¹

tsniism@tsniism.ru

¹АО «Центральный научно-исследовательский институт
специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»), г. Хотьково

Аннотация:

Одной из особенностей производства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является непрерывный цикл изготовления: от исходного сырья до готового изделия. Напрямую с этим связаны и сроки поставки готовой продукции, срыв которых при производстве изделий ракетно-космической техники недопустим. В статье рассматривается практический опыт по проведению модернизации установки автоматизированного неразрушающего контроля качества изделий из ПКМ в условиях серийного производства. Приведены сравнительные результаты дефектоскопии до и после модернизации с оценкой погрешности. Проведена оценка результатов проведенных работ.

Ключевые слова:

модернизация оборудования, бесконтактная дефектоскопия, автоматизация, точность оценки дефекта

Основной целью проведения дефектоскопии изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является выявления дефектов типа

нарушений сплошности, например расслоения, непроклеи, трещины, инородные включения и т.п. Перечисленные выше типы дефектов наиболее распространены для данного типа изделий и характеризуют как качество технологического процесса изготовления, так и влияют на его эксплуатационные характеристики.

С 70-х годов прошлого столетия для контроля крупногабаритных цилиндрических изделий (например, сосудов высокого давления) на ряде предприятий внедрялись механизированные установки контроля качества, позволяющие проводить ультразвуковой контроль (УЗК) контактным методом прохождения при помощи катящихся преобразователей. С развитием техники появлялись новые возможности для повышения достоверности неразрушающего контроля (НК), и к началу 90-х годов большинство установок использовало УЗК в бесконтактном варианте [1].

В связи со значительным сокращением финансирования промышленности после распада СССР, покупка нового оборудования практически прекратилась, и к настоящему времени его износ достиг критической отметки. Помимо этого, существующая система контроля перестала удовлетворять современным требованиям к информативности результатов, достоверности выявления и идентификации дефектов и т.п.

На сдерживание процесса внедрения и ввода в эксплуатацию нового оборудования оказывают влияние следующие факторы:

- необходимость подготовки новых производственных площадей;
- высокая стоимость оборудования;
- непрерывная загруженность производственных мощностей при серийном производстве;
- большие сроки отработки технологии на новом оборудовании.

Одним из вариантов решения данного вопроса является модернизация существующего изношенного оборудования путем замены отдельных исполнительных узлов на более современные. Модернизация, как способ обеспечения современными технологиями контроля изделий был выбран из

экономических соображений: при обеспечении требуемых современных технических показателей модернизация оборудования обходится значительно дешевле, чем разработка и изготовление новой установки.

На предприятии АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ») (г. Хотьково) совместно с ООО НПЦ «Кропус-ПО» (г. Ногинск) была проведена модернизация автоматизированной установки дефектоскопа контроля качества (ДКК). Причиной для проведения работ послужил износ многих узлов и компонентов установки и участвовавшие выходы ее из строя, что приводило к задержкам в производственном цикле изготовления серийных изделий и нарушению сроков поставок продукции потребителю. После анализа состояния установки и потребностей предприятия были намечены следующие работы:

- перенос автоматизированной установки ДКК на новую производственную площадку;
- доработка сканера установки в части уменьшения длины рельсового пути и стрелы внутреннего УЗ преобразователя (датчика);
- замена механических редукторов и электродвигателей, предназначенных для управления режимами вращения и перемещения изделия;
- разработка и установка новой конструкции стрелы наружного датчика;
- замена механизма перемещения внутреннего датчика;
- разработка схемы управления силовой частью установки на базе встроеного промышленного компьютера;
- разработка программно – аппаратной части установки ДКК, предназначенной для сбора и обработки информации о результатах проведенной дефектоскопии.

Важной проблемой ввода в эксплуатацию установки контроля является метрологическая технологии контроля, которая включает в себя как метрологические характеристики самой установки контроля, так и непосредственно методики контроля, алгоритмов обнаружения и

идентификации дефектов и ряда других факторов. Это необходимо для корректного проведения сравнительного анализа приемочного и входного контроля на автоматизированных установках подобного рода [2].

Основная проблема заключалась в сроках выполнения работ – один месяц на ввод оборудования в эксплуатацию и обеспечение штатного контроля по скорректированной технологической документации, для чего был «заморожен» контроль серийных изделий.

К подготовительным работам следует отнести:

- разработку эскизного проекта и изготовление помещения пультовой установки ДКК;

- подводку силовых цепей электропитания и шины контура заземления на участок планируемого размещения установки автоматизированного контроля;

- разработку фундаментного задания и заливку фундамента под основные несущие конструкции.

По завершению всех подготовительных работ был осуществлен демонтаж сканера установки ДКК и его транспортировка в новое производственное помещение, где был осуществлена его сборка с учетом требований новых габаритных размеров и монтаж новых исполнительных узлов. Фотография автоматизированной системы приведена на рисунке 1. На рисунках 2 и 3 приведены фотографии узлов внутреннего и наружного датчиков соответственно.

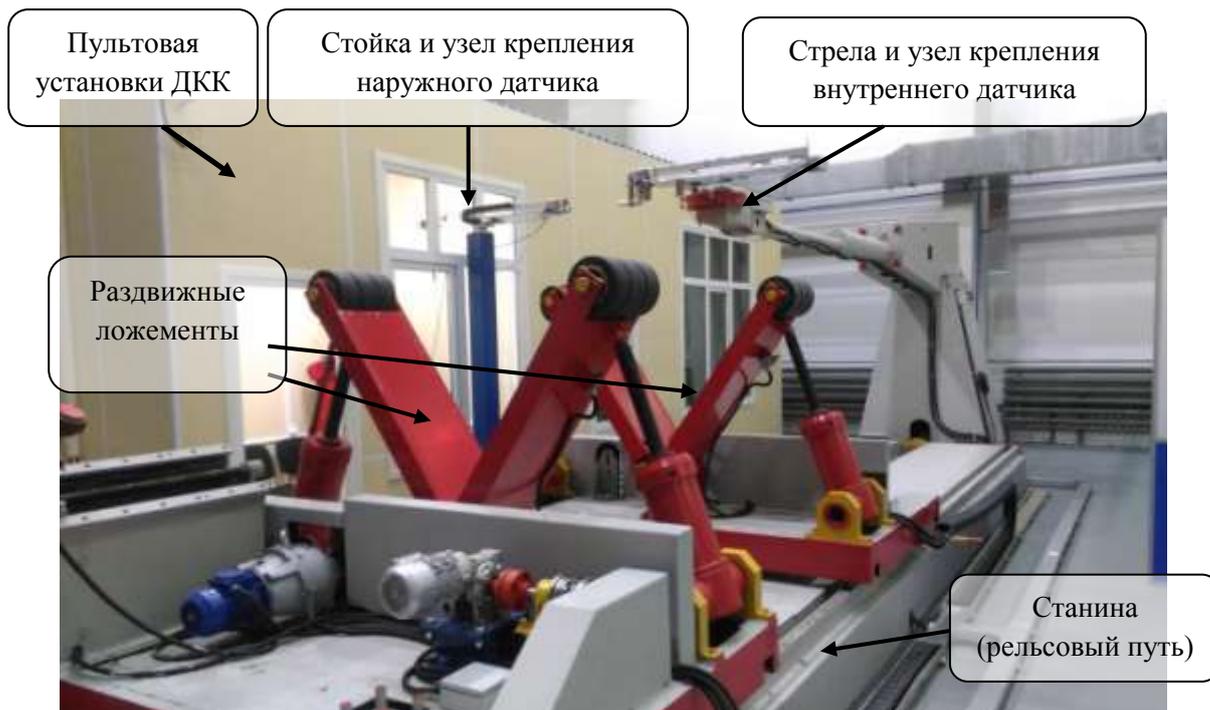


Рисунок 1 – Сканер установки дефектоскопа контроля качества



Рисунок 2 – Узел внутреннего датчика

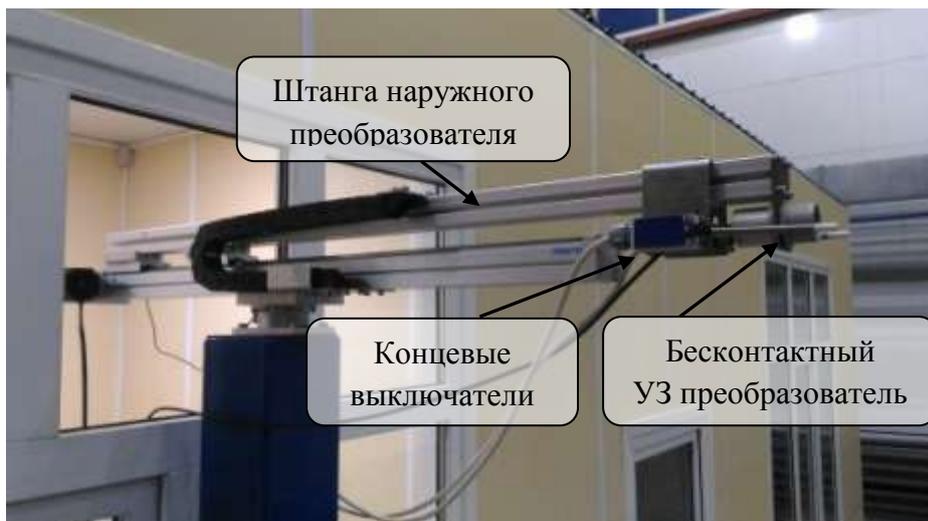


Рисунок 3 – Узел наружного датчика

На рисунке 4 изображен электронная система управления с установленным промышленным компьютером, модулями управления сервоприводами и вспомогательной электроникой. Промышленный компьютер управляет сервоприводами таким образом, чтобы обеспечивались требуемые параметры скорости вращения и перемещения контролируемого изделия.

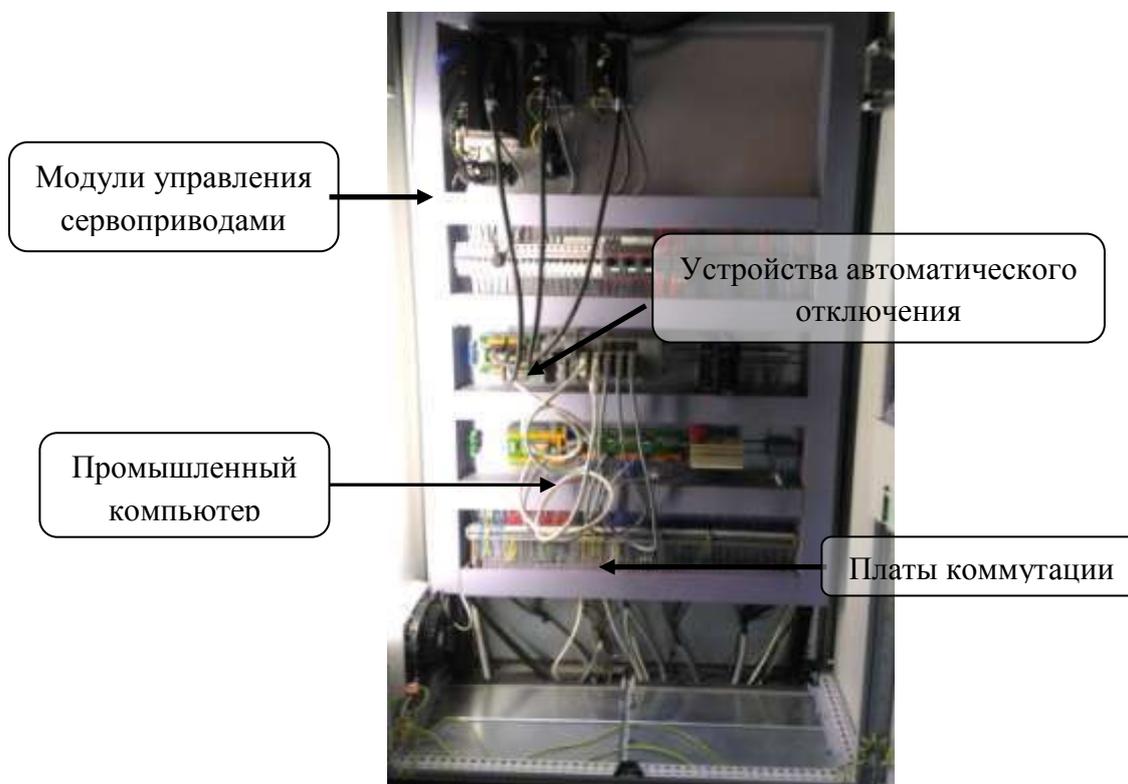


Рисунок 4 – Электронная система управления

Основное рабочее место оператора автоматизированной системы приведено на рисунке 5. Для генерирования и приема ультразвуковых колебаний используется модернизированный низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н, работающий под управлением специализированного программного обеспечения (ПО) УД-СКАН. Данное ПО позволяет проводить сбор и обработку результатов контроля с формированием С-скана, выявлять дефекты, рассчитывать их площади и координаты, а также определять погрешности расчетов с учетом погрешности сканирования, аппаратной части и т.п.[3].



Рисунок 5 – Рабочее место оператора

Пульт управления системы предназначен для ручного управления элементами механической части системы и контроля за ее состоянием в текущий момент работы. Схема расположения органов управления и индикации пульта управления приведена на рисунке 6. Для управления и контроля состояния приводов сканера установки предназначены кнопки верхней центральной кнопочной панели. Кнопки «ВКЛ» и «ОТКЛ» блоков «ПРИВОДА КОНТРОЛЯ» и «ПРИВОДА НАСТРОЙКИ» позволяют отключать неиспользуемую группу приводов от цепей питания для

исключения случайных срабатываний при проведении настройки и штатного неразрушающего контроля соответственно.

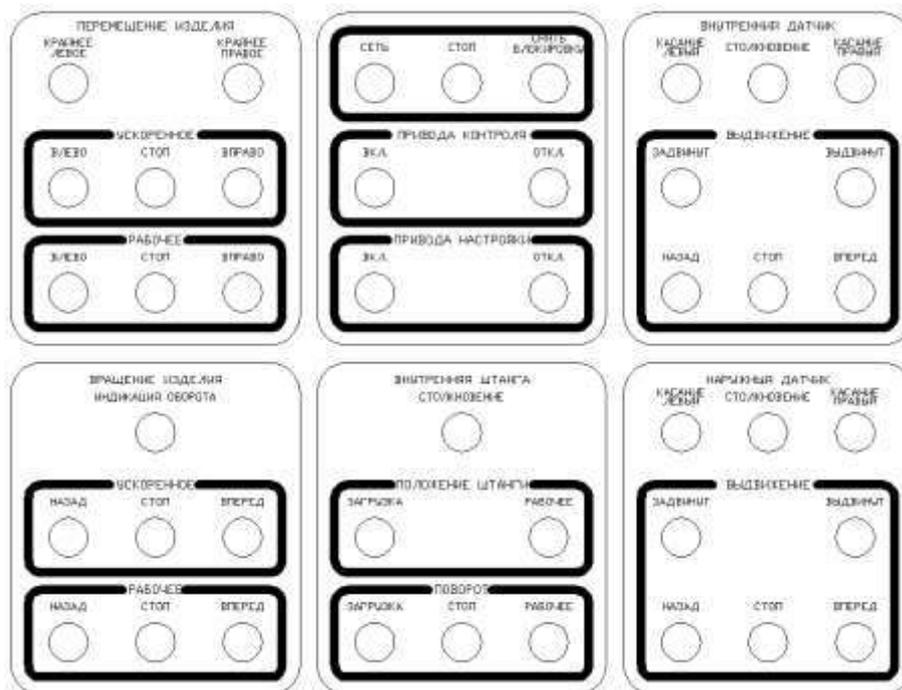


Рисунок 6 – Схема расположения органов управления пульта

Для продольного перемещения изделия, предназначены кнопки «ВЛЕВО» и «ВПРАВО», расположенные на кнопочной панели «ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ» пульта управления. Предусмотрены две скорости перемещения изделия – ускоренная, кнопки этого режима находятся на панели «УСКОРЕННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ» и рабочая (скорость контроля) «РАБОЧЕЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ».

Для вращения изделия используются кнопки «ВЛЕВО» (против часовой стрелки) и «ВПРАВО» (по часовой стрелке) на кнопочной панели «ВРАЩЕНИЕ ИЗДЕЛИЯ» пульта управления. Вращение изделия в режиме «РАБОЧЕЕ» происходит с линейной скоростью на поверхности изделия 100 мм/с, в режиме «УСКОРЕННОЕ» – 200 мм/с.

Для поворота внутренней штанги в положение ввода преобразователя внутрь изделия необходимо нажать кнопку пульта «ЗАГРУЗКА» на кнопочной панели «ПОВОРОТ», для установки в позицию контроля – кнопку

пульта «РАБОЧЕЕ». Поворот внутренней штанги может быть остановлен в любой момент нажатием кнопки «СТОП» на панели «ПОВОРОТ».

Для регулировки положения преобразователей относительно поверхности контролируемого изделия предназначены кнопки «ВПЕРЕД» и «НАЗАД», расположенные на кнопочной панели «ВЫДВИЖЕНИЕ» блоков управления перемещением внутреннего и наружного датчика.

Для придвижения преобразователя ближе к поверхности контролируемого изделия, необходимо нажать кнопку «ВПЕРЕД» соответствующего преобразователя, удерживая её нажатой до достижения необходимого расстояния между преобразователем и поверхностью. Подобным образом, нажав и удерживая кнопку «НАЗАД», преобразователь можно отвести от поверхности изделия.

Движение преобразователя прекращается автоматически при достижении одного из конечных положений, либо при срабатывании датчика касания преобразователя поверхности.

Для подтверждения основных метрологических параметров модернизированной системы контроля были проведены исследования сравнительных характеристик существующей и модернизированной системы контроля. Исследования проводились следующим образом:

- выбрано одно из серийных изделий цилиндрической формы, прошедшее дефектоскопию согласно конструкторской и технологической документации;
- согласно схеме, приведенной на рисунке 7, на изделии были размещены искусственные дефекты в количестве 10 штук с линейными размерами 30×30 мм и 50×50 мм;
- до проведения работ по модернизации проведена серия из пяти последовательных измерений по типовой методике контроля, проведена обработка результатов при различных значениях порога дефектоскопии, определяемого в процентном отношении относительно размера высоты экрана дефектоскопа;

– после завершения пуско-наладочных работ на модернизированной установке вновь провели серию из пяти измерений по доработанной методике контроля, при обработке выбрав аналогичные значения порога.

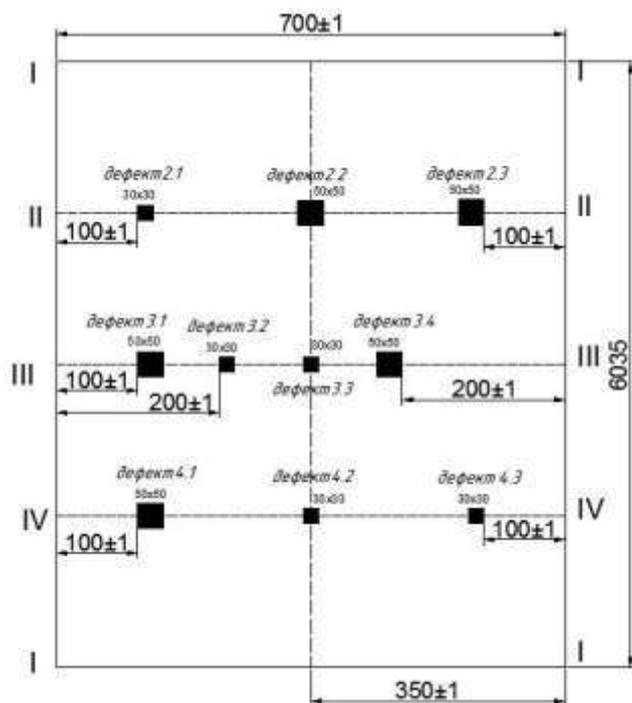


Рисунок 7 – Схема расположения дефектов на изделии

На рисунках 8–11 приведены результаты обработки средних значений площадей дефектов при различных порогах дефектоскопии.

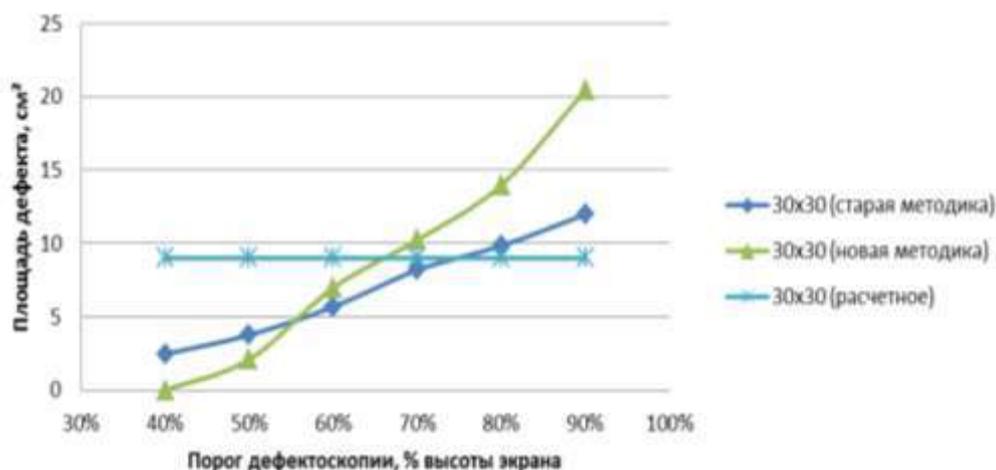


Рисунок 8 – Зависимость средней площади дефекта от порога дефектоскопии (30×30 мм)

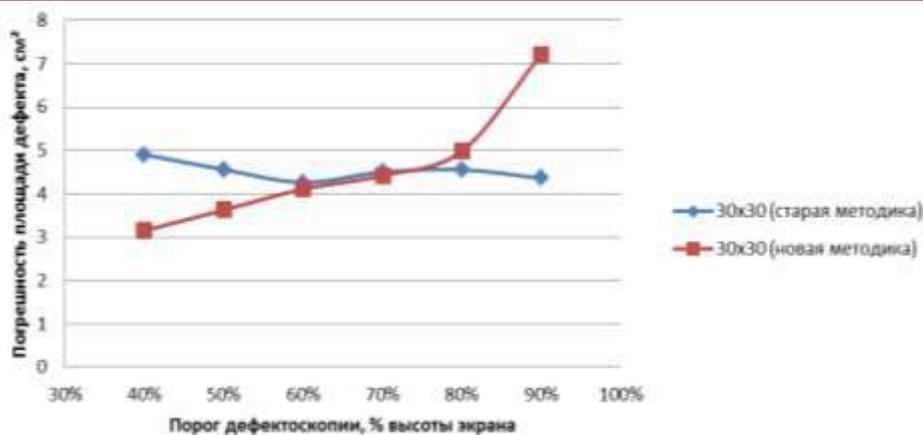


Рисунок 9 – Доверительный интервал определения площади дефекта по критерию 3σ для дефектов с линейными размерами 30×30 мм

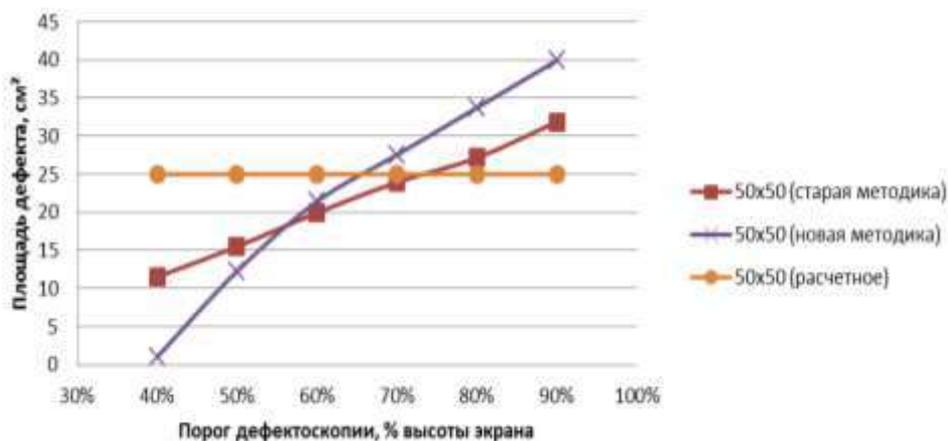


Рисунок 10 – Зависимость средней площади дефекта от порога дефектоскопии (50×50 мм)

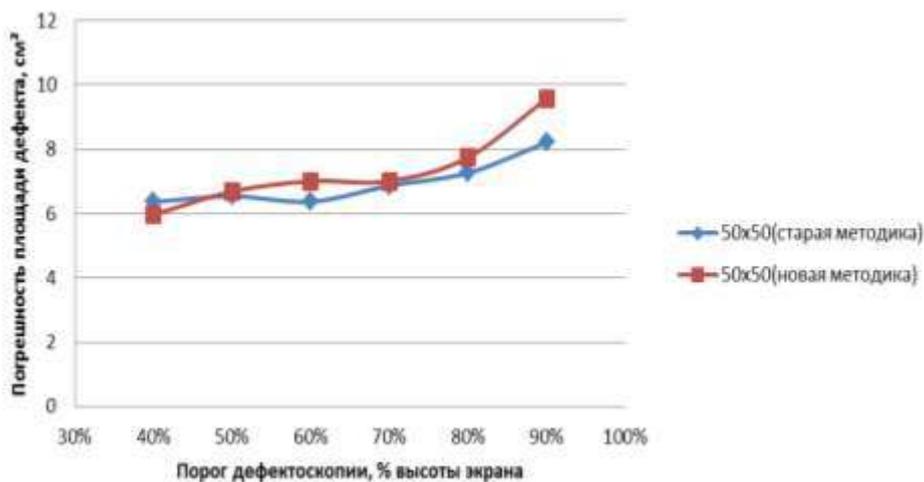


Рисунок 11 – Доверительный интервал определения площади дефекта по критерию 3σ для дефектов с линейными размерами 50×50 мм

На рисунке 12 представлены результаты дефектоскопии, полученные по типовой методике на старом оборудовании, на рисунке 13 – по доработанной типовой методике с учетом внедренного нового оборудования. Видно, что доработанная методика обеспечивает лучшую точность определения площадей дефектов.

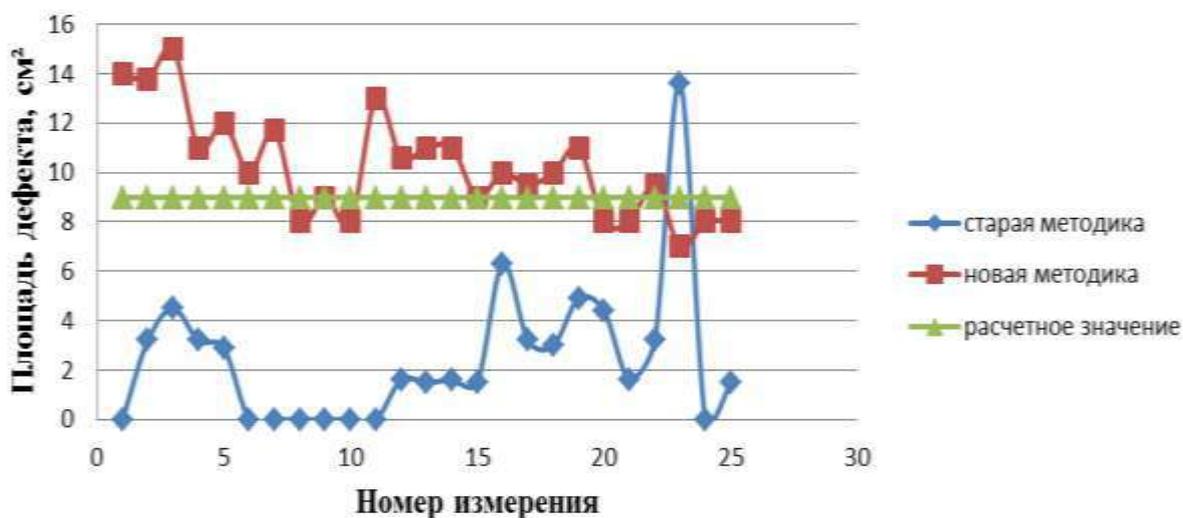


Рисунок 12 – Сравнение площадей дефектов, определяемых при автоматизированном контроле (дефекты 30×30 мм)

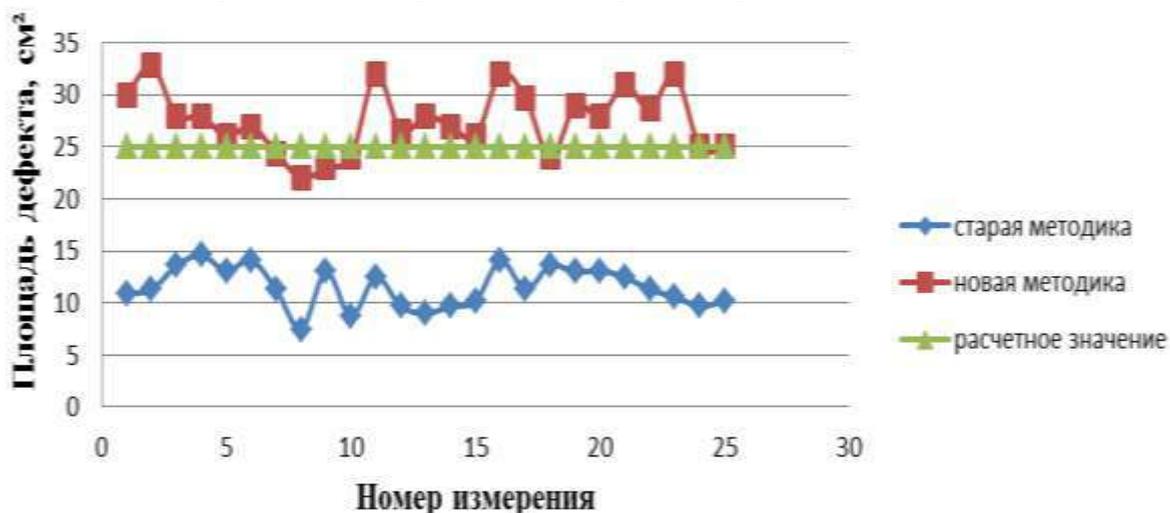


Рисунок 13 – Сравнение площадей дефектов, определяемых при автоматизированном контроле (дефекты 50×50 мм)

Графики, представленные на рисунках 14-15, свидетельствуют о том, что существует область значений порога дефектоскопии (60–75% от

максимального значения), при котором обеспечивается минимальная погрешность результатов определения площади дефектов.

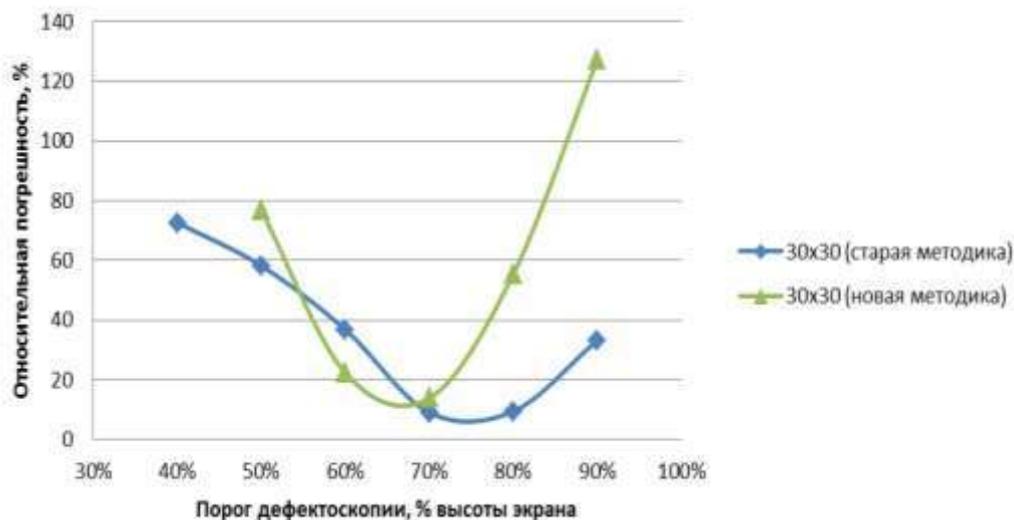


Рисунок 14 – Относительная погрешность определения площади дефектов с линейными размерами 30×30 мм при различных значениях порога дефектоскопии

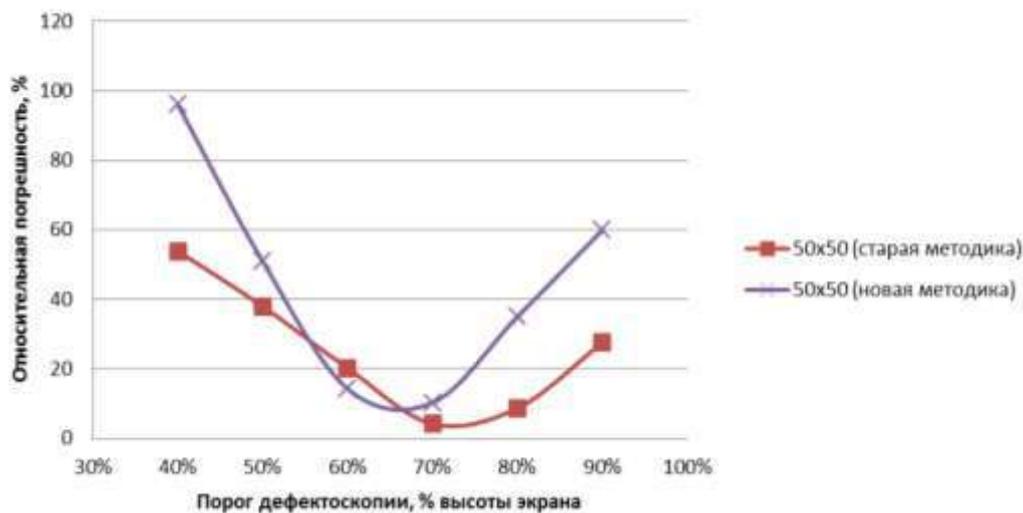
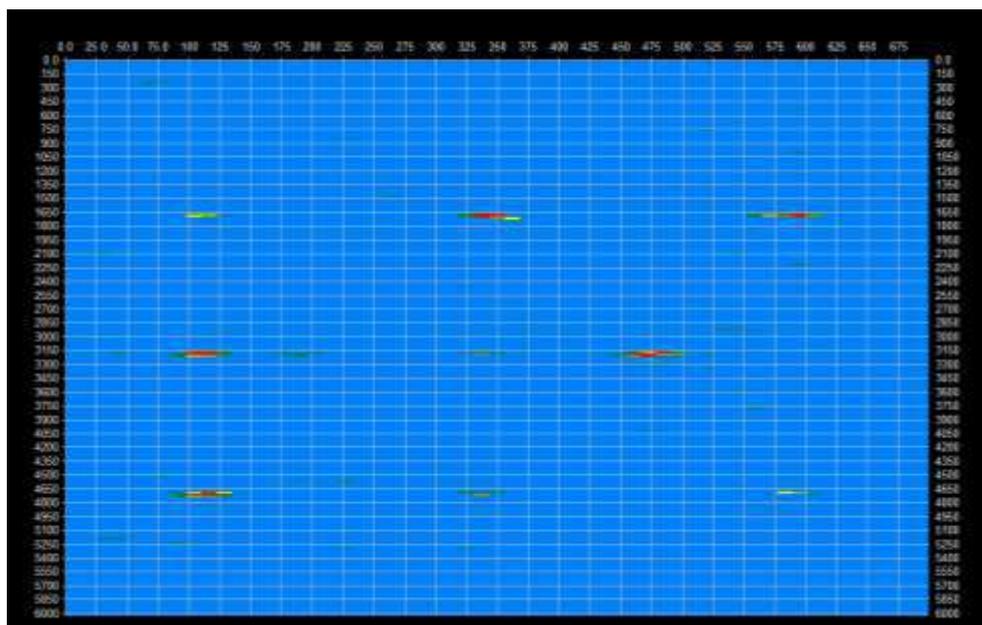
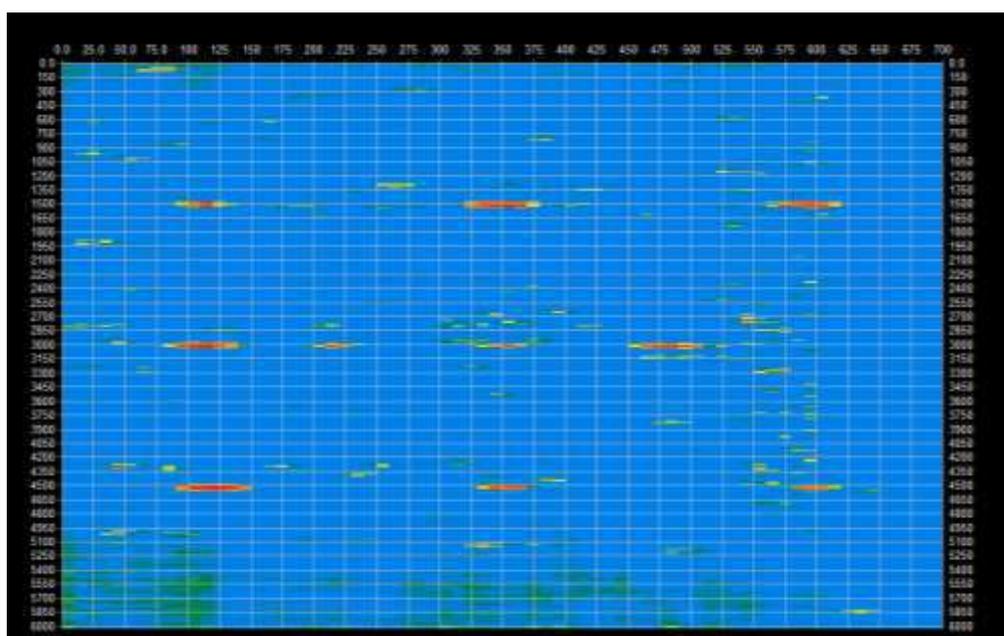


Рисунок 15 – Относительная погрешность определения площади дефектов с линейными размерами 50×50 мм при различных значениях порога дефектоскопии

На рисунке 16 приведены отдельные дефектограммы, полученные при проведении контроля до и после модернизации. Показано, что новая методика, при некотором увеличении шумов на дефектограмме, позволяет обнаруживать все искусственные дефекты, расположенные на контрольном изделии.



а)



б)

Рисунок 16 – Результаты дефектоскопии до (а) и после (б) модернизации

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- проведение модернизации устаревшего оборудования позволяет сократить расходы на его замену, обеспечивая при этом внедрение современных компьютеризированных средств управления и обработки;

– в условиях серийного производства при соответствующей подготовке и организации проведение работ подобного рода обеспечивается в кратчайшие сроки с минимальными финансовыми потерями для предприятия;

– использование современного оборудования открывает широкие перспективы для дальнейшего совершенствования системы сбора и обработки результатов контроля с целью увеличения достоверности выявляемых дефектов;

– наличие минимума на графиках зависимости относительной погрешности определения площади от порога дефектоскопии свидетельствует о необходимости проведения дальнейших работ для выработки критерия определения оптимального значения порога дефектоскопии;

Литература

1. ОСТ 92-1482-79. Материалы неметаллические теплозащитного и конструкционного назначения. Методы неразрушающего контроля толщины, выявление некрепления и расслоений.

2. Рыков А.Н., Юхацкова О.В., Будадин О.Н. Сравнительный анализ результатов автоматизированной дефектоскопии// Электронный научно-технический журнал «Новости материаловедения. Наука и техника», №5, 2015, С. 49–57.

3. Рыков А.Н., Артемьев Б.В. Опыт практического определения погрешности суммарной площади дефектов при автоматизированном ультразвуковом контроле изделий из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2018. № 1, С. 18–24.

УДК 620.179.1

Перспективы развития современных методов неразрушающего контроля и технической диагностики во ФГУП «ВИАМ»

Славин А.В.¹, д.т.н.; Косарина Е.И.¹, д.т.н.;

Генералов А.С.¹, к.т.н.; Диков И.А.¹

admin@viam.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В настоящей работе отражены основные перспективы развития неразрушающих методов контроля в авиационной отрасли. Дана краткая историческая справка о развитии неразрушающих методов контроля во ФГУП «ВИАМ». Описаны основные достижения ФГУП «ВИАМ» в части акустического, рентгеновского, капиллярного, магнитопорошкового и вихретокового методов контроля. Развиваются такие направления, как автоматизация процессов неразрушающего контроля, применение цифровых технологий радиационного контроля, неразрушающий контроль изделий из композиционных материалов и изделий, полученных с помощью аддитивных технологий, математическое моделирование процессов и вероятностная оценка достоверности неразрушающего контроля, обучение специалистов неразрушающего контроля.

Ключевые слова:

Неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, рентгеновский контроль, капиллярный контроль, магнитопорошковый контроль, вихретоковый контроль

Введение

Интенсивное развитие промышленного и оборонного комплекса России привело к разработке современных перспективных материалов [1], для обеспечения требований предъявляемых конструкторами к выпускаемой продукции. Это, в свою очередь, дало резкий толчок для развития средств и методов неразрушающего контроля [2]. Эффективность применения методов неразрушающего контроля бесспорна, несмотря на то, что при этом возрастает трудоемкость и производственные затраты. По определению неразрушающий контроль – совокупность методов и средств проверки качества выпускаемой и эксплуатируемой продукции, в основу которых положено то или иное физическое явление. Как самостоятельная техническая дисциплина неразрушающий контроль сформировался не так давно, около семидесяти лет назад, хотя его отдельные виды, например, визуальный, существует с момента начала производства продукции. В отечественной авиационной промышленности рождение неразрушающего контроля состоялось в научно-исследовательской лаборатории общего металловедения ФГУП «ВИАМ», где небольшая группа ученых в лице Сергеева С.В., Трапезникова А.К., Шрайбера Д.С., возглавляемая Акимовым Г.В., проводила исследования материалов неразрушающими методами и создавали средства для их проведения.

История развития неразрушающих методов контроля во ФГУП «ВИАМ»

Лаборатория «Неразрушающие методы контроля» (НМК) была организована в ВИАМ в 1961 г. Первым начальником лаборатории стал С.М. Рождественский (рисунок 1). Под его руководством разработан ряд новых методов неразрушающего контроля, создан комплекс нормативно-технической документации и основных средств контроля для ее реализации.

Разработанные средства контроля доведены специалистами ФГУП «ВИАМ» до серийного производства.

Начальники лаборатории неразрушающих методов контроля 1961–2004 г.г.



Рисунок 1 – Начальники лаборатории неразрушающих методов контроля с 1961 по 2004 гг.

Благодаря этим достижениям ФГУП «ВИАМ» в 1972 г. назначен головным институтом в авиационной промышленности по неразрушающему контролю изделий авиационной техники. Перед лабораторией НМК была поставлена задача не только научного решения вопросов неразрушающего контроля (НК), но и координации работ других институтов с привлечением предприятий смежных отраслей. А.К. Денель разработал «Положение о службах неразрушающего контроля в конструкторских бюро на опытных и серийных производствах».

Семидесятые годы были периодом интенсивного развития авиакосмической техники и, следовательно, разработки и использования нового класса материалов со сложной структурой. Для решения этих задач требовались высокие технологии, в том числе, и операции неразрушающего контроля. Необходимо было обеспечить повышение чувствительности и разрешающей способности всех стандартизованных методов НК, разработать и освоить новые методы контроля композиционных материалов (КМ). Эти классы материалов в отличие от металлических имеют ярко выраженную анизотропию физических свойств. Поэтому к ним большинство методов НК

совершенно не применимы. В КМ возможны расслоения, непроклеи, трещины, разрывы волокон, инородные включения, разноплотность [3]. Для неразрушающего контроля КМ были применены новые методы, разработана нормативная документация, аппаратура и средства.

ВИАМ является основоположником низкочастотных акустических методов и средств для их обнаружения. В институте созданы амплитудно-частотный дефектоскоп АЧД-2М, АЧД-3 (разработчик Н.Н. Детинов, В.В. Мурашов), импедансно-резонансный дефектоскоп АД-21Р. В лаборатории физики металлов ВИАМ были проведены глубокие исследования по связи структуры и физико-механических свойств металла с условиями распространения ультразвука. Эти исследования впоследствии легли в основу разработки теневого ультразвукового метода и аппаратуры для неразрушающего контроля лопастей и других ответственных деталей планера и двигателя [4].

В 1985 г. М.П. Уральский под руководством А. К. Денеля решил сложную задачу выявления нитридных включений в заготовках деталей из титановых сплавов. Проблема национального значения оказалась непосильной для специалистов академических институтов и университетов. Разработанная в ВИАМ ультразвуковая технология отличалась повышенной чувствительностью и возможностью производственной реализации.

Основы магнитной дефектоскопии в лаборатории физики металлов были заложены А.В. Жигadlo и Л.М. Певзнер. Магнитный метод неразрушающего контроля нашел широкое применение в определении марок стальных заготовок посредством впервые разработанного Г.В. Акимовым и Л.М. Певзнер прибора ТЭДС-2. В 1937 г. была изготовлена небольшая партия этих приборов, нормативно-техническая документация для работы с ним [5, 6]. ТЭДС-2 чрезвычайно быстро был внедрен в производство.

При производстве деталей, редукторов вертолетов, агрегатов самолетов и т.д. использовался широкий ассортимент конструкционных сталей, существенно отличающихся по своим дефектоскопическим свойствам.

Коллектив исследователей (И.И. Кифер, И.Б. Семеновская, В.К. Юренков, В.В. Корсаков и др.) под руководством С.М. Рождественского разработал теоретические основы взаимодействия различных магнитных полей с объектами контроля. Исследования положены в основу нормативных документов по магнитной дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и размагничиванию авиационных деталей [7, 8]. Нормированные в документации режимы намагничивания деталей включены в государственные стандарты по магнитопорошковой дефектоскопии (разработчик И. Б. Семеновская). Особенности намагничивания деталей полями различных форм использованы В.К. Юренковым и В.В. Корсаковым при разработке магнитного полуавтоматического дефектоскопа МДС-15 и универсального дефектоскопа МДС-5, различающихся повышенным порогом чувствительности.

Основы радиационных методов неразрушающего контроля были заложены Трапезниковым А.К. и Сергеевым С.В. [9, 10]. В лаборатории появились первые отечественные рентгеновские аппараты, средства для проведения контроля и уникальные образцы, по сей день используемые для испытания рентгеновской техники, радиографических пленок и разработке технологий контроля. Монографии Трапезникова А.К. «Просвечивание материалов лучами Рентгена», 1939 г. и «Рентгенодефектоскопия» 1948 г. стали ценнейшими хрестоматийными учебниками для инженеров, техников, дефектоскопистов и всех заводских работников, занимающихся рентгеновским неразрушающим контролем. В них подробнейшим образом рассмотрены все актуальные по тому времени аспекты технологии рентгеновского контроля, аппаратного оснащения. А.К. Трапезников и С.В. Чернобровов в 1948 г. провели исследования, используя вместо рентгеновских трубок источники гамма-излучения. Результаты исследования показали, что гамма-дефектоскопия оказалась эффективной при контроле авиационной техники в условиях ангара и аэродрома.

В секторе рентгеновских методов неразрушающего контроля разработаны технологии рентгенографического контроля алюминиевых и магниевых сплавов. Разработаны рентгеновские шкалы эталонных снимков с различными баллами пористости для всех литейных алюминиевых сплавов, используемых в авиастроении и рентгеновские шкалы эталонных снимков с различной степенью микрорыхлоты для целого ряда магниевых сплавов. Проведены исследования и разработаны технологии рентгеноскопического и электрорентгенографического контроля.

Глубокие фундаментальные исследования в области физики взаимодействия излучения с веществом, проводимые С.В. Чернобрововым, Т.Н. Ермаковой, В.А. Гольцевым, Е.И. Косариной, В.Ф. Якушевым позволили проводить контроль неравноплотности КМ рентгеновскими методами с количественной оценкой его результатов [11]. В эти годы в ВИАМ был опробован и разработан новый метод рентгеновской вычислительной томографии. По техническому заданию ВИАМ в НПО «Спектр» разработал рентгеновский вычислительный томограф ВТ-300 ВИАМ, с помощью которого были проведены исследования и установлена возможность послойного контроля композиционных материалов типа «углерод–углерод», «углерод–кремний», многослойных конструкций, в том числе клееных, корпусных деталей сложной конструкции из алюминиевых, титановых и магниевых сплавов и др.

Начиная с 2000-х годов, лаборатория стала пополняться молодыми кадрами, проявляющими интерес к этой необходимой, гуманной и интереснейшей науке, требующей знаний практически во всех разделах физики.

Современное состояние неразрушающих методов контроля во ФГУП «ВИАМ»

За более чем полувековую историю существования, лаборатория неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» превратилась в мощную научно-исследовательскую площадку, оснащенную современным

оборудованием для неразрушающего контроля, позволяющим эффективно выполнять научно-исследовательские работы и производственный контроль в рамках реализации комплексного научного направления 2.3 «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12]. В лаборатории работает 26 человек, из них 5 человек имеют ученую степень (2 д.т.н. и 3 к.т.н.). Более 60% сотрудников лаборатории являются молодыми специалистами в возрасте до 35 лет.

Основными направлениями деятельности лаборатории неразрушающих методов контроля является развитие акустических, рентгеновских, капиллярных, магнитопорошковых и вихретоковых методов контроля. В лаборатории решаются вопросы автоматизации процессов контроля, применения цифровых технологий радиационного неразрушающего контроля, неразрушающего контроля изделий из композиционных материалов и изделий, полученных с помощью аддитивных технологий, математического моделирования процессов и вероятностной оценки достоверности неразрушающего контроля, обучения специалистов неразрушающего контроля.

В распоряжении лаборатории имеется мобильная лаборатория неразрушающего контроля (рисунок 2), которая позволяет ФГУП «ВИАМ» проводить выездные арбитражные работы в области неразрушающего контроля авиационных материалов на предприятиях разработчиках и в процессе эксплуатации оборудования. В состав мобильной лаборатории входит переносная рентгеновская установка и проявочная машина, ультразвуковое оборудование, наборы для проведения капиллярного и визуального контроля. Благодаря мобильной лаборатории в 2016 году ФГУП «ВИАМ» на Казанском авиационном заводе им. С.П. Горбунова провел исследование качества сварных швов балки центроплана стратегического бомбардировщика Ту-160.



Рисунок 2 – Мобильная лаборатория неразрушающего контроля

Акустические методы НК

Сектор акустических методов оснащен современным оборудованием для проведения исследований (рисунок 3).

Современное самолетостроение широко использует полимерные композиционные материалы, которые, несмотря на их достоинства и преимущества по сравнению со сплавами, содержат специфические дефекты. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля является наиболее широко используемым методом контроля качества изделий из ПКМ. Специалисты по акустическим методам НК в тесном сотрудничестве с материаловедческими лабораториями за последние 10 лет разработали и внедрили в производство новые методики и средства контроля заготовок деталей двигателя и деталей планера, изготовленных из полимерных композиционных материалов.



Установка для автоматизированного контроля ScanMaster LS-500LP



Дефектоскоп Olympus Omniscan MX



Дефектоскоп А1550



Ударно-акустический дефектоскоп АД-64М



Импедансный дефектоскоп ДАМИ-С09



Дефектоскоп Epoch1000



Дефектоскопы УСД-60 и УСД-60Н

Рисунок 3 – Оборудование сектора акустических методов контроля

С 2007 года в секторе акустических методов контроля проведены теоретические исследования и разработаны технологии ультразвукового неразрушающего контроля деталей и агрегатов сложной формы из композиционных материалов, таких как вафельные и ребристые панели из углепластика КМУ-7Э. Результаты положили начало ряду разработок в области эхо-импульсного ультразвукового контроля ПКМ. На четырех

предприятиях успешно внедрены технологии контроля агрегатов из ПКМ для новых военных и гражданских самолётов. Ближне-средне магистральный самолёт МС-21 выполнен в основном из ПКМ. Основным несущим элементом конструкции крыла и оперения МС-21 стали панели, подкреплённые стрингерами (рёбрами). Задача НК этих панелей была решена только методом ультразвуковой дефектоскопии в 2009 г.: была разработана технология эхо-импульсного ультразвукового контроля ребристых панелей из ПКМ, применение которой позволяет при производстве выявлять внутренние дефекты размером 10 мм, что полностью соответствует требованиям конструкторов – такое расслоение, по расчетам, не снижает надёжность конструкции, и не будет увеличиваться в размере в течение всего срока эксплуатации МС-21.

Дальнейшее развитие эхо-импульсного метода контроля ПКМ – использование для контроля ультразвуковых фазированных решёток. Это оборудование позволяет существенно повысить достоверность и чувствительность ручного контроля крупногабаритных панелей при достижении высокой производительности (до 60 м²/час) без использования автоматизированных установок, что позволяет проводить контроль в условия эксплуатации. Применение фазированных решёток является одной из ключевых тенденций развития ультразвукового контроля [13].

В 2010–2011 годах после ряда изысканий, в том числе создания специализированной оснастки, была разработана технология ультразвукового контроля конструкций из углепластика с использованием фазированных решёток, которая описывает процедуру контроля панелей, в том числе с криволинейной поверхностью, с целью выявления расслоений, непроклеев, включений размером порядка 5–10 мм [14–16]. В дальнейшем были проведены научно-исследовательские работы, посвящённые применению фазированных решёток для контроля деталей из ПКМ и металлических полуфабрикатов для новых изделий с использованием

ультразвукового дефектоскопа-томографа А1550 отечественного производства.

Одним из наиболее интересных направлений деятельности сектора являются исследования в направлении технической диагностики состояния ПКМ с применением средств акустического неразрушающего контроля. В 2011 году результатом этих исследований явилась разработанная технология диагностики состояния материала, позволяющая определять степень накопления микро и макроповреждений в элементах конструкций из композиционных материалов реверберационно-сквозным методом [17]. В 2016–2017 гг. были проведены исследования по влиянию пористости в ПКМ на характеристики ультразвукового сигнала в процессе автоматизированного контроля, по результатам которых выпущены технологии автоматизированного контроля пористости ПКМ полученных инфузионным и автоклавным методами. Данные технологии распространяются на детали и агрегаты крыла самолёта МС-21.

В 2015 году была завершена работа по разработке полномасштабного макета автоматизированного комплекса контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ «МАК-ПКМ» (рисунок 4). Комплекс позволяет:

- реализовать эхо-импульсный и теневой (без использования контактной жидкости) методы ультразвукового контроля;
- контролировать детали с габаритными размерами: до 2,0x0,5x1,5 для монолитных панелей из углепластика и сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика;
- контролировать детали толщиной: до 24 мм для монолитных панелей из углепластика; до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика;
- представлять результаты в виде А, В и С – сканов. Разрешение С-скана не хуже 4×4 мм;

– настраивать комплекс для контроля деталей сложной формы двумя способами: «обучением» по точкам и импортом 3D-модели детали из CAD-программ.



Рисунок 4 – Полномасштабный макет автоматизированного комплекса контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ «МАК-ПКМ»

Запуск в серию данного автоматизированного комплекса, позволит оснастить по программе импортозамещения ведущие авиационные предприятия отрасли для повышения достоверности, чувствительности и производительности ультразвукового контроля, без необходимости приобретения дорогостоящих зарубежных аналогов.

Новые способы термомеханической обработки деформируемых жаропрочных сплавов позволяют достичь регламентированной равномерной кристаллической структуры дисков из жаропрочных никелевых сплавов, полученных из слитков ВГНК и ВЖ175. Поэтому на ОАО «Ступинский металлургический комбинат» сотрудниками ФГУП «ВИАМ» внедрена технология ультразвукового контроля с чувствительностью, соответствующей выявлению контрольного отражателя диаметром 0,8 мм, что существенно выше достигнутой на тот момент чувствительности. На этой научно-методической базе в настоящее время силами сотрудников

лаборатории неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» на АО «МЗ Электросталь» начаты работы по переходу на повышенную чувствительность УЗК заготовок дисков и колец из сплавов ЭП178-ИД, ВЖ175-ИД, ЭИ-698, стали ЭП517-Ш, предназначенных для изготовления деталей двигателя ПД-14. Утверждены программы, предусматривающие участие сотрудников лаборатории НК ФГУП «ВИАМ» в подобных работах на трёх других предприятиях.

Все ведущие корпорации США и Объединенной Европы, прямо или косвенно связанные с неразрушающим контролем, в настоящее время поставили перед собой задачу вероятностной оценки достоверности неразрушающего контроля. Численная оценка вероятности обнаружения дефектов того или иного размера необходима конструкторам изделий для внедрения новых методов расчёта ресурса, рекомендуемых в настоящее время зарубежными нормативными документами и недавно включенными в отечественные Авиационные правила. Понимая актуальность этой проблемы, в лаборатории НК проводят такие исследования, в которых заняты практически все сотрудники лаборатории НК.

Совместные с ФГУП «ЦИАМ» работы в области оценки вероятности обнаружения дефектов были начаты в 2009 году. Были разработаны требования к образцам с искусственными дефектами, предназначенным для вероятностной характеристики методик контроля основных деталей двигателя. Изготовлены и переданы заказчику несколько паспортизованных комплектов таких образцов, а также материалов для получения искусственных газонасыщенных включений в титановых дисках.

В дальнейшем работа была продолжена в направлении оценки влияния различных факторов на вероятность обнаружения дефектов при неразрушающем контроле заготовок и готовых деталей газотурбинных двигателей. На основе анализа зарубежной НТД выявлены факторы, которые влияют на вероятность обнаружения дефектов в различных методах неразрушающего контроля; в двух действующих на заводах РФ методиках

контроля дисков из жаропрочных никелевых и титановых сплавов выявлены подобные факторы, приведены рекомендации по способам оценки их влияния или по исключению такого влияния. Опробованы и проверены алгоритмы, реализованные в зарубежном программном обеспечении для обработки результатов экспериментов и построении зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размеров [18]. В 2016-17 годах наработки, полученные при выполнении этих работ, позволили лаборатории выполнить масштабную работу по оценке вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле основных деталей двигателя ПД-14 [19]. Кроме прочностных параметров материала, программа подтверждения сертификационного базиса двигателя ПД-14 включала численную оценку эффективности выявления дефектов при неразрушающем контроле основных деталей и их заготовок. Эта процедура называется «специальные испытания систем и технологий неразрушающего контроля». Необходимость такой оценки связана с тем, что даже при высоких прочностных свойствах материала, пропущенный при контроле дефект может привести к разрушению детали. Основная часть работы по оценке вероятности обнаружения дефектов на 3 заводах, входящих в кооперацию по изготовлению ПД-14, была выполнена специалистами ФГУП «ВИАМ». АО «Авиадвигатель» планирует продолжение этой работы совместно с ФГУП «ВИАМ» в рамках программы создания двигателя ПД-35.

Характерной особенностью сектора акустических методов контроля является его тесная связь с предприятиями отрасли. Сотрудники сектора постоянно оказывают научно-техническую помощь предприятиям отрасли, проводя неразрушающий контроль ответственных деталей и агрегатов, изыскивая способы выявления дефектов, рекомендуя аппаратуру и методы для их реализации.

Большое внимание уделяется метрологическому обеспечению ультразвукового контроля. Организован выходной ультразвуковой контроль заготовок дисков из титановых и никелевых жаропрочных сплавов,

выпускаемых на имеющихся в ВИАМ производственных мощностях. Лаборатория в составе ИЦ ВИАМ аккредитована Авиарегистром МАК на проведение сертификационных испытаний и с 2007 года неоднократно подтверждала этот статус.

Рентгеновские методы НК

В секторе радиационных методов под руководством Косариной Е.И. три аспиранта успешно защитили кандидатские диссертации. Научно-исследовательская работа в этом секторе связана с разработкой радиационных методов контроля, исключающих применение радиографической пленки.

Разработанная технология рентгеноскопического контроля сотовых конструкций с целью обнаружения в них влаги, качества заделки дефектных мест после ремонта с помощью рентгеноскопической системы «Норка» была опробована и успешно внедрена при эксплуатации военной авиационной техники на авиационных базах, а также опробована в производственных условиях (КНААПО).

На металлургических заводах проведение рентгенографического контроля отливок из относительно недорогих алюминиевых сплавов значительно повышает себестоимость изделий из них, так как расходным материалом является серебросодержащая радиографическая пленка. Проблема внедрения рентгеноскопического контроля сложных по конфигурации алюминиевых отливок была решена. На ОАО «Русское литье» контроль отливок проводят, применяя рентгенотелевизионную установку «Леда», в программном обеспечении которой заложен алгоритм разбраковки отливок по баллам пористости с использованием разработанной рентгеноскопической шкалы пористости отливок. Технология рентгеноскопического контроля керамических стержней и восковых моделей лопаток ГТД оказалась более эффективной по сравнению с рентгенографией, т.к. позволила в автоматизированном режиме обнаружить трещины в керамическом стержне.

Ответственным объектом авиационной техники является двигатель, все узлы и детали которого в производстве неоднократно проходят стопроцентный контроль. Конструкция лопаток горячего тракта ГТД за последние 15 лет значительно усложнилась, это ухудшает условия контроля, а требования к контролю становятся более жесткими. В 2003 г. сектор разработал новую технологию рентгенографического контроля лопаток ГТД из жаропрочных сплавов, одновременно с ней были разработаны контрольные образцы – показатели качества рентгеновских изображений.

Производимая в настоящее время авиационная техника может попасть на внешний рынок при условии соответствия технологии ее изготовления, в том числе и неразрушающего контроля, международным (EN, ISO) стандартам, требования которых сильно отличаются от российских нормативных документов. Поэтому в 2008 г. была разработана новая производственная инструкция рентгеновского контроля литья сварных и паяных соединений, в которой приведены в соответствие требования российских и европейских норм.

Перед рентгеновским неразрушающим контролем поставлена задача обнаружения микропористости в лопатках ГТД из жаропрочных сплавов. С 2009 г. специалисты по радиационным методам НК, проводя исследования в этом направлении, разработали новый метод микрорентгеноскопии, позволяющий обнаружить микропористость в жаропрочных сплавах размером 9–14 мкм. Причем, результаты микрорентгеноскопии с применением плоскопанельных преобразователей превзошли возможности микрорентгенографии с применением высококонтрастных мелкозернистых радиографических пленок.

Высокие требования к качеству авиационных материалов и изделий из них уже сейчас делают неудовлетворительными для контроля в производстве установки «Норка» и «Леда», успешно используемые до 2010-11г.г.

Существенный прогресс в радиационных методах НК в условиях производства может быть осуществлен благодаря проведению работ в следующих направлениях:

- переоснащение рентгеновских лабораторий на авиационных предприятиях;
- внедрение цифровых технологий регистрации изображений;

Большинство рентгеновских лабораторий эксплуатируют старые рентгеновские аппараты РАП150/300. При этом на трехсоткиловольтных трубках проводят контроль как изделий из легких, так и жаропрочных сплавов, игнорируя регламент действующих нормативных документов. Покупка новых источников излучения осуществляется под действием менеджеров по продаже, преследующих цель продать рекламируемую продукцию. Для рентгеновского контроля в условиях производства необходимы стационарные рентгеновские мощные (сильноточные) аппараты, оснащенные компьютерной памятью, которая позволяет проверить режим экспонирования через продолжительный отрезок времени. Это позволит исключить нарушения при проведении экспонирования. В тех случаях, когда контроль проводят с использованием радиографической пленки, необходимо применение во-первых, такого типа радиографической пленки, которая обладает высокими сенситометрическими показателями (в действующих НТД на них есть определенный регламент); во-вторых – автоматов для ее фотообработки. Автомат исключает нарушение режима фотообработки.

Наиболее приоритетным направлением развития рентгеновского контроля является внедрение цифровых технологий. Сейчас на рынке появилось много разновидностей систем с плоскочувствительными детекторами (ППД). Однако, от покупки той или иной системы до ее использования в производстве необходимо проведение кропотливой работы по адаптации системы к определенной группе объектов контроля. Эта работа имеет, как минимум три аспекта.

Первый аспект определяет адаптацию того или иного типа ППД со своими техническими характеристиками к определенной группе объектов контроля, для которой необходимо обнаруживать недопустимые по ТУ дефекты. *Второй аспект* заключается в следующем: внедрение цифровых технологий эффективным будет тогда, когда помимо адекватного объектам контроля ППД используется устройство перемещения (или робот), обеспечивающее оптимальную схему рентгеновского контроля. При разнообразии объектов контроля, как по конструктивным особенностям, так и материалам, из которых они изготовлены, перемещающее устройство не может быть универсальным. *Третий аспект* – персонал, работающий с цифровыми системами, должен быть достаточно квалифицирован. Помимо сертификата, позволяющего оператору работать с рентгеновской аппаратурой, он должен приобрести знания и навыки эксплуатации цифровых систем.

Зачастую авиационное предприятие, имея в распоряжении ППД, не в состоянии разработать технологию контроля с его применением, в то время как, специалисты ВИАМ способны к разработке цифровых технологий контроля на предприятии и к обучению специалистов предприятий. В этом ВИАМ видит свое назначение при работе с предприятиями отрасли.

Частично такая работа уже проводится сотрудниками сектора рентгеновских методов лаборатории на контрактной основе, в частности с ПАО «Компания «СУХОЙ»; КНААЗ. В перспективе предстоят работы с заводом «Авангард», ОКБ им. М.Л. Миля.

Что касается исследовательской работы собственно сотрудников сектора и лаборатории в целом – это развитие рентгеновской вычислительной томографии, которая по своим физическим свойствам способна обнаруживать внутренние дефекты в слое материала толщиной 1–2 мм и определять их размеры. Таким образом, рентгеновская вычислительная томография представляет собой симбиоз рентгеновской дефектоскопии и

рентгенометрии. Это особенно интересно при исследовании объектов, полученных по аддитивной технологии, поскольку при их создании образуются специфические дефекты. Обнаружение этих дефектов позволит совершенствовать аддитивную технологию и, в конечном счете, исключить их появление.

Капиллярные методы НК

Капиллярный метод НК является одним из старейших и одним из самых чувствительных методов НК поверхностей широко распространенного в производстве авиационной техники. Данный метод контроля основан на явлениях капиллярного проникновения индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объекта контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Практически все заводы авиационной промышленности имеют участки капиллярного контроля. И все они без исключения обращаются во ФГУП «ВИАМ» по вопросам автоматизации процесса капиллярного контроля, применения новых дефектоскопических материалов, внедрения новых технологических процессов. Традиции в проведении исследований при разработке дефектоскопических материалов, установленные много лет назад старейшими сотрудниками были продолжены талантливым инженером Соколовой Л.Н. В настоящее время ее ученики и последователи – сотрудники сектора капиллярных методов НК проводят исследования российских и зарубежных дефектоскопических материалов, разрабатывают новые комплекты материалов со специфическими свойствами, пригодными для контроля узлов и деталей авиационной техники. Данные работы проводятся в тесном контакте с предприятиями, так как на производстве нужны пожаробезопасные, нетоксичные дефектоскопические материалы, обеспечивающие высокую разрешающую способность. С этой целью была изучена научно-техническая и патентная документация России, Германии, США, Великобритании, Японии в области капиллярной дефектоскопии, а

также международные стандарты MiL-I 25135E, MiL STD-6866, QPL 25135-15, ASTM E-165-95, определяющие основные критерии качества дефектоскопических материалов по физико-химическим показателям, а также по пожароопасности, классу чувствительности, сроку стабильности при хранении. Анализ научной и патентной документации показал перспективность разработок дефектоскопических материалов.

В ВИАМ был разработан, запатентован и налажен выпуск водосмываемого проявителя ПР-15, а также был выпущен директивный технологический процесс (ДТП) применения ПР-15, обеспечивающий требования безопасности и охраны окружающей среды.

В 2002 г. был создан цветной пенетрант, состоящий из красителя жирорастворимого темно-красного 5С, растворенного в дибутилсибацинате в смеси с ПАВ пониженной летучести и пожароопасности, с температурой вспышки больше 93°C, высокой чувствительностью, обеспечивающей выявление дефекта с минимальной шириной раскрытия 1–2 мкм, повышающего надежность и стабильность контроля изделий в условиях ремонта и эксплуатации. В 2003 году выпущены ТУ на цветной пенетрант марки КЖ-3 за № 1-595-22-747-2003, и разработана технология его изготовления.

В настоящее время с целью повышения качества капиллярного люминесцентного контроля до мирового уровня, уменьшения доли ручного труда за счет автоматизации процессов и влияния человеческого фактора при оценке качества деталей ответственного назначения, проведена работа по исследованию современных автоматизированных комплексов для люминесцентного капиллярного контроля (рисунок 5). Полученные результаты исследований позволили разработать технологию автоматизированного капиллярного контроля с применением метода электростатического нанесения пенетранта ЛЖ18-НВ ТУ 2662-010-73057924-04 и порошкового проявителя Аэросил А-300 ГОСТ 14922, входящих в

состав набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ с I классом чувствительности по ГОСТ 18442-80.

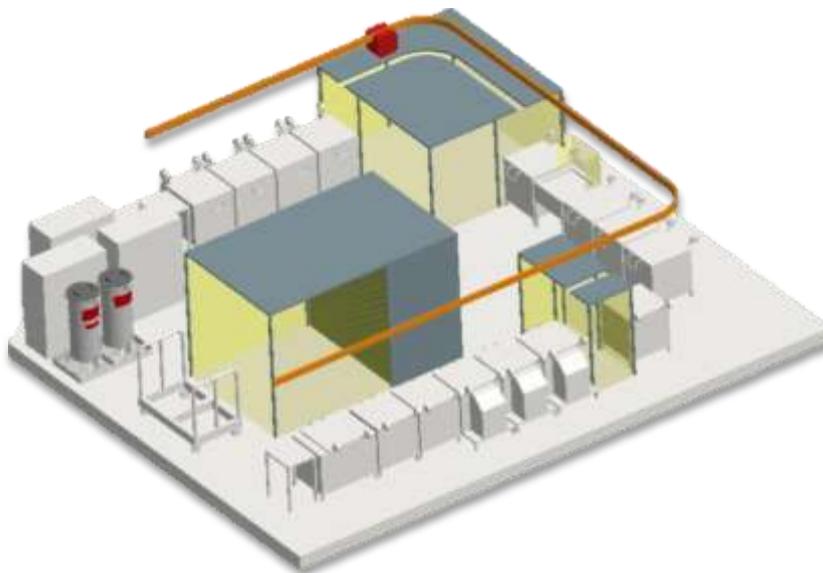
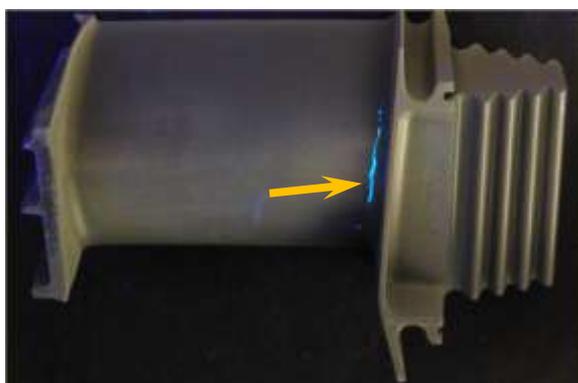
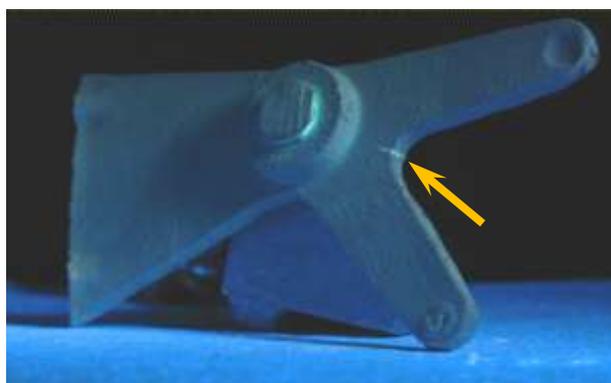


Рисунок 5 – Автоматизированный комплекс для люминесцентного капиллярного контроля

Разработанная технология с применением современных дефектоскопических материалов и аппаратуры предназначена для проведения неразрушающего контроля при производстве с целью своевременного обнаружения недопустимых производственных и эксплуатационных дефектов (рисунок 6) и может быть рекомендована для внедрения на предприятиях машиностроительной отрасли.



а)



б)

Рисунок 6 – Результаты капиллярного люминесцентного контроля:
а) эксплуатационный дефект, б) производственный дефект

Магнитопорошковые методы НК

Магнитопорошковый метод остается одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля стальных деталей как в авиации, так и на многих производствах транспортной, судостроительной, автомобильной отраслей и энергетики.

Сегодня специалисты сектора магнитных методов неразрушающего контроля проводят различные исследования и испытания в области магнитного контроля. Одной из важнейших задач является повышение качества и достоверности магнитопорошкового метода неразрушающего контроля. Отличительной чертой данного метода является высокая чувствительность, которая может достигаться не только в лабораторных условиях, но и на производстве. Одним из факторов, влияющих на чувствительность контроля, является качество индикаторных материалов для магнитопорошковой дефектоскопии.

В 2010–2012 гг. в секторе велась научно-исследовательская работа по разработке комплексной оценки характеристик магнитных суспензий для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей в стальных деталях. В результате выполнения НИР была выпущена технологическая рекомендация по контролю стальных деталей магнитопорошковым методом контроля с применением различных типов магнитных порошков и разработана технология контроля характеристик магнитных суспензий, являющаяся руководством при проведении комплексной оценки качества магнитных индикаторных материалов. Сотрудники сектора регулярно проводят исследования современных магнитных порошков различных производителей (рисунок 7), разрабатывают методики контроля качества индикаторных материалов, оценивают возможность применения тех или иных магнитных индикаторных материалов в зависимости от требований и условий проведения магнитопорошкового контроля.



Рисунок 7 – Различные магнитные индикаторные материалы

Также сотрудниками сектора проводятся такие работы, как проверка контрольных образцов для магнитопорошковой дефектоскопии; разработка технологий магнитопорошкового контроля; магнитопорошковый контроль изделий из ферромагнитных материалов, в том числе сложной формы (рисунок 8); разработка технологий изготовления образцов для магнитопорошкового контроля и др.



Рисунок 8 – Магнитопорошковый контроль изделий сложной формы

Еще одним не менее важным направлением работы сектора является изготовление прибора для экспресс-контроля фазового состава литейных сталей с регламентированным количеством магнитной фазы ИФСС (индикатор фазового состава сталей), а также комплекта образцов ИФС, имитирующих различное содержание магнитной фазы и предназначенных для настройки и калибровки прибора ИФСС-1 (рисунок 9). Приборы могут использоваться как в лабораторных, так и в цеховых условиях, что имеет большое значение на производстве. Однако, не смотря на востребованность данного прибора, перед лабораторией встал вопрос о дальнейшей возможности его выпуска, так как элементная база прибора устарела.

Приходится регулярно подбирать аналоги устаревшим комплектующим и сталкиваться с различными сложностями при изготовлении прибора. Появилась острая необходимость провести модернизацию и разработать новый прибор. В связи с этим было принято решение за счет собственных средств ФГУП «ВИАМ» разработать новый прибор для контроля фазового состава сталей на современной элементной базе.



Рисунок 9 – Прибор ИФСС и комплект образцов ИФС

Вихретоковые методы НК

В 2014 г. была возобновлена работа сектора вихретоковых и электрических методов НК. Специалисты сектора занимаются исследованиями в области контроля коррозионных повреждений, измерения толщины функциональных покрытий, оценки физико-механических свойств; ведется разработка методик и средств проведения контроля различных деталей авиационной техники на наличие усталостных трещин.

Совместно со специалистами магнитного сектора контроля разработан опытный образец прибора для контроля фазового состава сталей (КФСС), который в перспективе придет на замену выпускающемуся в настоящее время ФГУП «ВИАМ» прибору ИФСС. Новый прибор создан с использованием современной электронной базы, что позволило осуществлять цифровую обработку сигналов и существенно упростить процесс настройки и проведения измерений. В настоящее время проводятся испытания прибора на образцах.

Также совместно с другими лабораториями проводятся работы по разработке и изготовлению образцов с имитаторами трещин различного

происхождения, которые используются, в том числе, при определении вероятности обнаружения дефекта системой НК. Вихретоковый метод позволяет после предварительной настройки с высокой точностью определять глубину и длину поверхностных и подповерхностных трещин.

Перспективы развития

Перспективами развития неразрушающих методов контроля ФГУП «ВИАМ» является решение таких задач, как:

- проведение работ по оценке вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле ультразвуковыми, рентгеновскими и капиллярными методами основных деталей двигателя ПД-35;
- автоматизация процессов неразрушающего контроля и внедрение автоматизированного неразрушающего контроля на предприятиях отрасли;
- актуализация нормативной документации в части ультразвукового, рентгеновского, капиллярного, магнитопорошкового и вихретокового контроля;
- организация на базе лаборатории центра аттестации специалистов неразрушающего контроля;
- продолжение работ по разработке полномасштабного макета автоматизированного комплекса контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ «МАК-ПКМ» и запуск его в серийное производство;
- завершение работ по переходу на повышенную чувствительность УЗК заготовок дисков и колец из сплавов ЭП178-ИД, ВЖ175-ИД, ЭИ-698, стали ЭП517-Ш на ряде предприятий;
- внедрение цифровых технологий рентгеновского контроля на предприятиях отрасли;
- развитие рентгеновской вычислительной томографии;
- развитие направления по разработке оборудования для НК;
- разработка технологии изготовления и производство контрольных образцов для неразрушающих методов контроля.

Литература

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 3–8.
3. Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами // В. В. Мурашов. - Москва : Спектр, 2016. - 242 с.
4. Шрайбер Д.С. Современные методы контроля материалов без разрушения. Машгиз, 1961. С. 58
5. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов, М–Л: Изд АН СССР, 1945.– 414 с.
6. Жигadlo А.В., Михневич П.Г. Дефектоскопия методом магнитного порошка//Приборостроение и методы автоматизации контроля. М.: ВИНТИ. 1961. 169
7. Дорофеев А.Л. Неразрушающие испытания методом вихревых токов. М.: Оборонгиз. 1961. 64 с.
8. Рождественский С.М. Новые электрические и магнитные методы неразрушающего контроля //Приборостроение и методы автоматизации контроля. М.: ВИНТИ. т. 1 С. 169
9. Трапезников А.К. Просвечивание материалов лучами Рентгена, М–Л: Оборонгиз, 1939 , 347 с.
10. Трапезников А.К. Рентгенодефектоскопия М–Л, Оборонгиз, 1948 , 350 с.
11. Гагин Е.Н., Гольцев В.А., Ермакова Т.Н, Косарина Е.И. Количественное определение неравноплотности пористых неметаллических материалов в сб-ке докладов пятой отраслевой н-т конф.по НМК, г. Андропов 1986, С. 19–20.

12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

13. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 64–69.

14. Бойчук А.С., Степанов А.В, Косарина Е.И., Генералов А.С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 41–46.

15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Журнал «Все материалы. Энциклопедический справочник. Москва 2012, № 10. С.38–44

16. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Создание акустического контакта между фазированной решеткой и выпуклой поверхностью объекта контроля при ультразвуковом контроле ПКМ // Журнал «Авиационные материалы и технологии». 2016. №4. С. 68–73

17. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом. Научно-технический сборник: Авиационные материалы и технологии. – Вып. 1. – М.: ФГУП «ВИАМ», 2012. – с. 42-47.

18. Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля титановых сплавов с использованием математического моделирования // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4 (66). С. 15–19.

19. Ложкова Д.С. Оценка достоверности автоматизированного ультразвукового контроля полуфабрикатов основных деталей ГТД из титанового сплава с использованием математической модели // "Контроль. Диагностика" 2017. №12. С. 54–63.

УДК 620.1

Использование метода статистического моделирования для оценки выявляемости дефектов при ультразвуковом контроле

Андерсон Э.В.¹; Садкин К.Е.¹, к.т.н.; Сужаева А.С.¹

asuzhaeva@mail.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Санкт-Петербург

Аннотация:

Статья посвящена вопросу разработки математических моделей, имитирующих процесс ультразвукового контроля (УЗК) совмещенными прямыми преобразователями, с применением статистического моделирования методом Монте-Карло. Данная работа позволяет определять вероятности обнаружения дефектов при различных параметрах УЗК и выбирать наиболее оптимальные параметры контроля.

Ключевые слова:

статистическое моделирование, вероятность выявления дефекта, ультразвуковой контроль

Введение

При назначении объемов неразрушающих методов контроля необходимо иметь инструмент, обеспечивающий вероятностную оценку выявляемости различных типов дефектов этими методами.

Также вопрос вероятностной оценки выявляемости дефектов актуален при сравнении систем автоматизированного контроля. Такое сравнение

обычно требует больших материальных затрат и сопряжено с изготовлением определенного количества образцов, содержащих большое количество дефектов различных типов и размеров. Каждый из образцов должен многократно контролироваться сравниваемыми системами неразрушающего контроля (НК).

В связи с вышесказанным возникает необходимость в статистическом моделировании процесса контроля, позволяющего решить поставленные задачи.

Статистическое моделирование с применением метода Монте-Карло

Метод Монте-Карло – численный метод имитационного моделирования вычислительных экспериментов с математическими моделями [1, 2].

При указанном методе моделирования используются модели, в которых влияние случайных факторов учитывается с помощью задания вероятностных характеристик случайных процессов (законы распределения вероятностей, спектральные плотности или корреляционные функции).

То есть решение задачи с применением статистического моделирования с использованием метода Монте-Карло основано на учете вероятностного влияния параметров, входящих в состав данной задачи.

Технология расчета функций выявляемости базируется на решении уравнения акустического тракта с учетом возможной вариации параметров, входящих в это уравнение и описывающих прохождение колебаний от пьезопластины излучающего преобразователя к дефекту и далее до пьезопластины приемного преобразователя. Пределы вариации определяются техническими характеристиками системы, разбросом свойств материалов и т.д.

Уравнение акустического тракта описывает зависимость амплитуды сигнала, регистрируемого преобразователем, от физических и геометрических характеристик акустического тракта [3].

Акустический тракт включает в себя все объекты на пути от пьезопластины преобразователя до пьезопластины того же преобразователя при совмещенном режиме, которые влияют на амплитуду регистрируемого сигнала.

В общем случае в акустический тракт входят:

– акустический путь излучаемой волны в призме передающего преобразователя от пьезопластины до поверхности преобразователя и аналогичный путь регистрируемой волны в призме приемного преобразователя;

– акустический путь от поверхности преобразователя в слое контактной жидкости до поверхности контролируемой среды и обратно в зонах ввода и регистрации соответственно;

– для контроля совмещенным преобразователем прямым лучом - акустический путь упругой волны в металле контролируемого элемента от точки её ввода до точки отражения на дефекте и аналогичный путь от дефекта до её точки выхода на поверхность контроля;

– дефект, отражающий упругую волну.

В общем случае при расчете акустического тракта используется формула:

$$K = \frac{A}{A_0} = S_d \cdot S_{\Pi} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \varphi \cdot F \cdot D \cdot \Phi \cdot \cos \gamma \cdot \psi, \quad (1)$$

где K – коэффициент передачи акустического тракта по амплитуде смещений;

A – амплитуда смещений, регистрируемых пьезопластиной приемного ПЭП, дБ;

A_0 – амплитуда смещений, генерируемых пьезопластиной излучающего ПЭП, дБ;

S_d – площадь дефекта, мм²;

S_{Π} – площадь пьезопластины, мм²;

β , α – углы падения и преломления волны в ПЭП для луча, достигающего центра дефекта; град.

φ – функция, описывающая уменьшение амплитуды смещений при расхождении фронта волны с увеличением расстояния от поверхности ввода;

F – квадрат диаграммы направленности для совмещенного ПЭП;

D – произведение коэффициентов трансформации продольной волны в поперечную и поперечной в продольную при прохождении зоны контакта материалов призмы и контролируемой среды через слой контактной жидкости в прямом и обратном направлениях (коэффициент трансформации по энергии);

Φ – индикатриса рассеяния волны дефектом;

γ – угол между центральным лучом зондирующего пучка и лучом, достигающим (после преломления на поверхности контроля) центра дефекта, град.;

ψ – функция, описывающая затухание колебаний в материалах призмы ПЭП и контролируемого элемента.

Расчет по уравнению акустического тракта выполняется в следующей последовательности:

- определение расчетной схемы для рассматриваемого метода УЗК.
- выбор геометрии, положения и ориентации расчетного дефекта и определение номинальных значений характеристик преобразователей.
- описание возможной вариации расчетных характеристик контролируемой среды, дефекта и преобразователей.
- определение расчетных значений параметров акустического тракта.
- расчет амплитуды сигнала для выбранных значений параметров акустического тракта.
- определение вероятности обнаружения дефектов с использованием результатов расчета амплитуд сигналов по уравнению акустического тракта.

Для определения вероятности обнаружения дефекта необходимо учесть возможные вариации параметров акустического тракта [4]. Необходимо отметить, что параметры, которые не могут изменяться в процессе контроля в расчете уравнения акустического тракта принимаются фиксированными. К их числу относятся:

- форма и размеры контролируемого элемента;
- форма, ориентация и положение дефекта по глубине;
- форма и размеры пьезопластины преобразователя.

Параметры, которые в определенных пределах могут меняться случайным образом в процессе контроля при расчете уравнения акустического тракта, варьируются. Ниже рассмотрены различные факторы, влияющие на достоверность УЗК.

При анализе выявляемости дефектов при УЗК необходимо учитывать следующие параметры продукции:

- акустические свойства металла контролируемого элемента;
- типы и параметры дефектов металла контролируемого элемента;
- нормы оценки качества продукции.

Однако акустические свойства металла контролируемого элемента могут изменяться в определенных пределах во время проведения контроля, а остальные параметры принимаются фиксированными.

При анализе выявляемости дефектов при УЗК необходимо учитывать следующие характеристики ультразвукового оборудования:

- рабочая частота и номинальные углы ввода и регистрации упругой волны;
- положение дефекта относительно преобразователя в пределах шага сканирования и шаг сканирования;
- параметры акустического контакта преобразователя с контролируемым элементом.

При этом все вышеперечисленные параметры могут изменяться в определенных пределах во время проведения контроля.

Одной из самых существенных проблем статистического анализа УЗК является трудность получения информации о реальных распределениях внутренних дефектов в металле. Законам распределения тех или иных параметров УЗК посвящено много работ, в том числе и научно-технические отчеты сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей». Законы распределения изучались долгие годы экспериментально. Проведенные работы показывают, что рабочая частота f_p преобразователя, величина шага сканирования S_t , коэффициент прохождения упругой волны через границу «призма – контактная жидкость – металл» в прямом и обратном направлениях являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону.

В данной статье при расчете функций выявляемости в качестве расчетного дефекта принимается одиночный компактный плоскостной дефект. В качестве размера расчетного дефекта используется его площадь S . Расчет функций выявляемости выполняется для плоскостных дефектов круглой, квадратной или прямоугольной формы.

Площади дефектов определяют по следующим формулам:

– для дефекта круглой формы радиусом b :

$$S_d = \pi \cdot b^2, \quad (2)$$

– для дефекта квадратной формы со стороной $2b$:

$$S_d = 4 \cdot b^2, \quad (3)$$

– для дефекта прямоугольной формы со сторонами b и $2b$:

$$S_d = 2 \cdot b^2, \quad (4)$$

где S_d – площадь дефекта, мм.

Плоскость расчетного дефекта ориентирована по нормали к направлению зондирующего пучка (базовая ориентация) или отклонена от неё на некоторый угол ε .

Схема акустического тракта для рассматриваемого случая показана на рисунке 1.

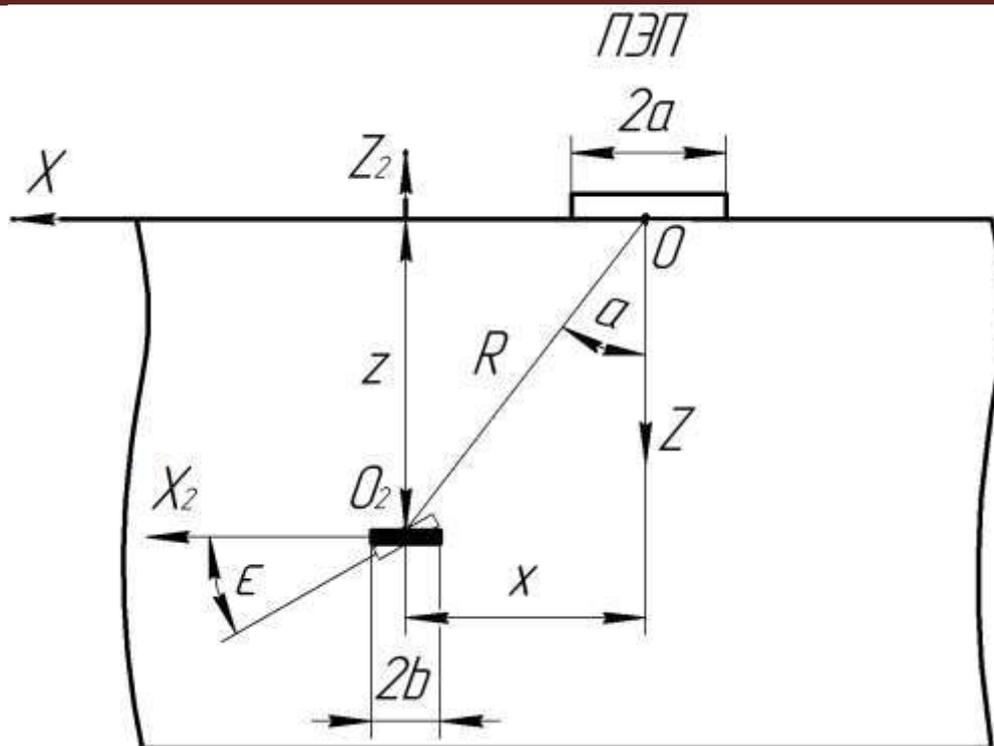


Рисунок 1 – Расчетная схема акустического тракта для контроля плоскостных горизонтальных дефектов совмещенным прямым преобразователем

На рисунке 1 использованы следующие обозначения:

- α – угол направления распространения луча продольной волны на центр дефекта O_2 , отсчитываемый от нормали в точке O (центре преобразователя), град.;
- значение $\alpha = 0$ соответствует распространению волны в направлении оси OZ ;
- пьезопластина преобразователя – круглой или квадратной формы с протяженностью $2a$ в основной плоскости падения – отражения (XOZ);
- дефект круглой или квадратной формы с протяженностью $2b$ в основной плоскости падения – отражения;
- O_2Z_2 – нормаль к плоскости дефекта $O_2X_2Y_2$ (ось O_2Y_2 – на рисунке 5 не показана);
- в системе XOZ координаты центра дефекта O_2 – x, z соответственно в направлении осей OX и OZ , отсчитываемых от начала координат O ;
- R – расстояние от центра дефекта O_2 до точки O , мм;

– базовая ориентация плоскости дефекта выбрана так, что нормаль в его центре (O_2Z_2) параллельна направлению оси OZ (составляет с направлением на точку O_2 угол α);

– допускается поворот плоскости дефекта (нормали O_2Z_2) на угол ε вокруг оси, ортогональной основной плоскости падения – отражения (OY – на рисунке 1 не показана), при этом угол $\varepsilon > 0$ при повороте в направлении от преобразователя, как показано на рисунке 5, и $\varepsilon < 0$ при повороте в противоположном направлении.

Расстояние R вычисляется по формуле:

$$R = \sqrt{x^2 + z^2}, \quad (5)$$

Угол направления луча α в точке O (на центр дефекта O_2) определяется соотношением:

$$\alpha = \arctg \frac{x}{z}, \quad (6)$$

Уравнение акустического тракта (коэффициента K_d) для расчетного дефекта записывается в следующем виде:

$$K_d = \frac{\cos \alpha \cdot S_d \cdot S_n}{R^2 \cdot \lambda_l^2} \cdot D_{ll} \cdot R_{ll}(\alpha) \cdot F_n^2(\alpha) \cdot \Phi_d(\theta) \cdot \exp -2 \cdot \delta_l \cdot R, \quad (7)$$

Обозначения в уравнении (7) и формулы для их расчета приведены ниже.

$$\lambda_l = \frac{c_l}{f_p}, \quad (8)$$

λ_l – длина продольной волны в контролируемой среде, мм;

f_p – рабочая частота преобразователя, МГц;

δ_l – коэффициент затухания продольных волн в контролируемой среде;

S_n – площадь пьезопластины преобразователя, мм²:

для круглой пьезопластины радиусом a

$$S_n = \pi \cdot a^2, \quad (9)$$

для квадратной пьезопластины со стороной $2a$

$$S_n = 4 \cdot a^2, \quad (10)$$

S_d – площадь дефекта, которая рассчитывается по формулам (2-4) в зависимости от формы дефекта, мм².

$F_H(\alpha)$ – диаграмма направленности пьезопластины преобразователя в основной плоскости рассчитывается по формулам:

$$F_H \alpha = F_H(t), \quad (11)$$

для круглой пьезопластины радиусом a

$$F_H t = \frac{2 \cdot J_1(t)}{t}, \quad (12)$$

где J_1 – цилиндрическая функция Бесселя первого рода, первого порядка;

для квадратной пьезопластины со стороной $2a$ в основной плоскости

$$F_H t = \frac{\sin t}{t}, \quad (13)$$

где

$$t = a \cdot k_l \cdot \sin \alpha, \quad (14)$$

$$k_l = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_l}, \quad (15)$$

$\Phi_d(\theta)$ – индикатриса рассеяния продольных волн дефектом рассчитывается по формулам:

для дефекта круглой формы радиусом b

$$\Phi_d \theta = \frac{2 \cdot J_1(2 \cdot b \cdot k_l \cdot \sin \theta)}{2 \cdot b \cdot k_l \cdot \sin \theta} \cdot \cos \theta \cdot I(\theta), \quad (16)$$

для дефекта квадратной формы со стороной $2b$ в основной плоскости

$$\Phi_d \theta = \frac{\sin 2 \cdot b \cdot k_l \cdot \sin \theta}{2 \cdot b \cdot k_l \cdot \sin \theta} \cdot \cos \theta \cdot I(\theta), \quad (17)$$

где

$$I \theta = \frac{\cos \theta \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\sin^2 \theta + \cos \theta \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \text{ при } n \geq \sin \theta, \quad (18)$$

$$I \theta = \frac{\cos \theta \cdot \sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\sin^4 \theta + \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta - n^2}, \text{ при } n < \sin \theta, \quad (19)$$

где

$$\theta = \alpha + \varepsilon, \quad (20)$$

$$n = \frac{c_\tau}{c_l}, \quad (21)$$

где c_τ , c_l – скорости поперечной и продольной волн в контролируемой среде.

D_{ll} – коэффициент передачи упругих смещений для продольной волны при её прохождении через слой контактной жидкости в прямом и обратном направлениях, принимаемый равным 0,5.

$$R_{ll} \alpha = \frac{2 \cdot \sin^2 \alpha - \frac{1}{n^2}}{2 \cdot \sin^2 \alpha - \frac{1}{n^2} + 4 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{n^2} - \sin^2 \alpha}, \quad (22)$$

R_{ll} – угловой коэффициент ослабления продольной волны вследствие частичной трансформации в поперечную при излучении.

При расчете акустического тракта (коэффициента K_{Π}) для эталонного отражателя при его оптимальном положении относительно ПЭП принимается, что $x = x_0 = 0$ (рисунок 1). При этом $\alpha = \varepsilon = \theta = 0$.

При выполнении условий (23-26) K_{Π} для эталонного отражателя площадью S_0 рассчитывается по формуле (29).

$$F_{\Pi} \alpha = 1, \quad (23)$$

$$\Phi_{\Pi} \theta = 1, \quad (24)$$

$$D_{ll} = 1, \quad (25)$$

$$R_{ll} \alpha = 0, \quad (26)$$

$$K_{\Pi} = \frac{S_0 \cdot S_{\Pi}}{R_0^2 \cdot \lambda_{l0}^2} \cdot \exp -2 \cdot \delta_{l0} \cdot z, \quad (27)$$

где λ_{l0} – длина продольной волны, мм;

δ_{l0} – коэффициент затухания на номинальной рабочей частоте f_{p0} ;

$R_0 = z$ – расстояние между центрами эталонного отражателя и пьезопластины, мм.

Расчет вероятности обнаружения дефектов проводится решением уравнения акустического тракта в вероятностной трактовке.

Принимается, что искомый дефект будет обнаружен, если амплитуда регистрируемого сигнала, пришедшего от дефекта, превышает поисковую чувствительность.

При использовании уравнения акустического тракта в форме (7) условие выявления дефекта имеет вид:

$$\frac{K_d}{K_n} \geq 1, \quad (28)$$

где K_d , K_n – значения коэффициента передачи по амплитуде смещений для акустического тракта с рассматриваемым дефектом и с эталонным отражателем соответственно, рассчитанные по уравнению акустического тракта.

Расчет вероятности выявления дефекта выполняется дискретно для каждого размера рассматриваемого расчетного дефекта в интересующем диапазоне, отдельно для каждого варианта его ориентации и расположения дефекта по толщине контролируемого элемента.

Расчет вероятности обнаружения дефекта данного размера выполняется методом Монте-Карло. В каждом численном опыте для выборки значений варьируемых параметров по уравнению акустического тракта выполняется расчет величины K_d . Выборка значений варьируемых параметров выполняется с использованием генератора случайных чисел для принятых законов их вероятностного распределения.

Величина K_n рассчитывается для стандартного эталонного отражателя, по которому выполняется настройка поисковой чувствительности, при его оптимальном положении относительно ПЭП и номинальных значениях параметров контроля.

После каждого опыта определяется значение величины p_m по формуле:

$$p_m = \frac{n}{m}, \quad (29)$$

где n – число опытов, в которых условие (28) выполнено;

m – общее число опытов.

Опыты повторяются до тех пор, пока выполняется условие:

$$\frac{\Delta p_m}{p_m} = \frac{\Delta n}{n} - \frac{\Delta m}{m} > \delta, \quad (30)$$

где δ – допустимая погрешность;

Δp_m , Δn – приращение p_m и n при увеличении общего числа опытов на Δm .

Рекомендуемое число опытов составляет $m \geq 15 \div 30 \cdot 10^3$, а величина погрешности $\delta \leq 0,05$.

В качестве вероятности P_K обнаружения дефекта площадью S_K принимается значение p_m , полученное для числа опытов m , при котором выполняется условие:

$$\frac{\Delta p_m}{p_m} \leq \delta, \quad (31)$$

Расчет P_K выполняется дискретно для всего интересующего диапазона значений S_K с шагом ΔS , для которого выполняется условие:

$$\Delta S \leq \frac{S_0}{5}, \quad (32)$$

где S_0 – площадь эталонного отражателя, по которому выполняется настройка поисковой чувствительности, мм².

Результаты расчета зависимости $P_K S_K$ используются для построения функций выявляемости.

Выбор параметров поиска дефектов при УЗК совмещенными прямыми ПЭП рассматриваемого элемента основывается на величине вероятности обнаружения в нем искомого дефекта при однократном контроле.

В том случае, если для рассматриваемого элемента установлено несколько допускаемых дефектов различного вида, положения и ориентации, то вероятность обнаружения дефектов при УЗК определяется для каждого дефекта.

Вероятность обнаружения дефектов при УЗК совмещенными прямыми ПЭП рассматриваемого элемента для каждого этапа контроля определяется с учетом кратности контроля.

При определении вероятности обнаружения искомого дефекта при многократном контроле принимается, что результат каждого контроля является независимым событием. При этом под многократным контролем понимается проведение контроля данного элемента по данной методике УЗК несколько раз, в том числе, на разных этапах эксплуатации. Вероятность обнаружения дефекта при многократном УЗК принимается равной значению

интегральной вероятности обнаружения искомого дефекта после выполнения всех этапов контроля и рассчитывается по формуле:

$$P_N = 1 - \prod_{i=1}^N P_i, \quad (33)$$

где P_N – вероятность обнаружения дефекта при выполнении N этапов контроля;

N – количество этапов контроля, выполненных за интересующий промежуток времени;

P_i – вероятность обнаружения дефекта на i -том этапе контроля.

Зависимость вида (33) применима и в том случае, если на i -том этапе контроля применяется несколько различных методик проведения УЗК. При этом под методикой УЗК понимается совокупность процедуры, техники, метода и средств контроля, а также ориентации направления сканирования относительно контролируемого элемента. В этом случае значения P_i в формуле (33) определяются по формуле:

$$P_i = 1 - \prod_{j=1}^k 1 - P_j, \quad (34)$$

где P_j – вероятность обнаружения дефекта, рассчитанная для j -той методики УЗК;

k – число использованных методик проведения УЗК на i -том этапе контроля.

Выбор параметров контроля осуществляется на основании анализа полученных расчетных вероятностей обнаружения дефектов. В качестве параметров контроля выбираются параметры, при которых вероятность обнаружения дефектов наибольшая.

Пример функций выявляемости дефектов, рассчитанных с использованием метода Монте-Карло

Функции выявляемости дефектов были рассчитаны для случая ультразвукового контроля эхо-методом прямым совмещенным преобразователем типа П111-2,5-К12 (с диаметром пьезоэлемента 12 мм) изделия из углеродистой стали со следующими параметрами: плотность 7800

кг/м³, скорость продольной волны 5920 м/с, скорость поперечной волны 3250 м/с. В качестве расчетных дефектов выбрали одиночные компактные плоскостные дефекты круглой формы, залегающие на глубине 40 мм, с эквивалентной площадью от 1 до 50 мм². Графики зависимости функций выявляемости дефектов построены для следующих значений чувствительности поиска S_n : 2 и 10 мм² и для следующих значений шага сканирования: 3, 6, 9, 12, 15 и 18 мм.

Ниже на рисунках 2 и 3 показаны примеры кривых вероятности обнаружения плоскостного горизонтального отражателя прямым совмещенным преобразователем, полученных при помощи статистического моделирования с использованием метода Монте-Карло.

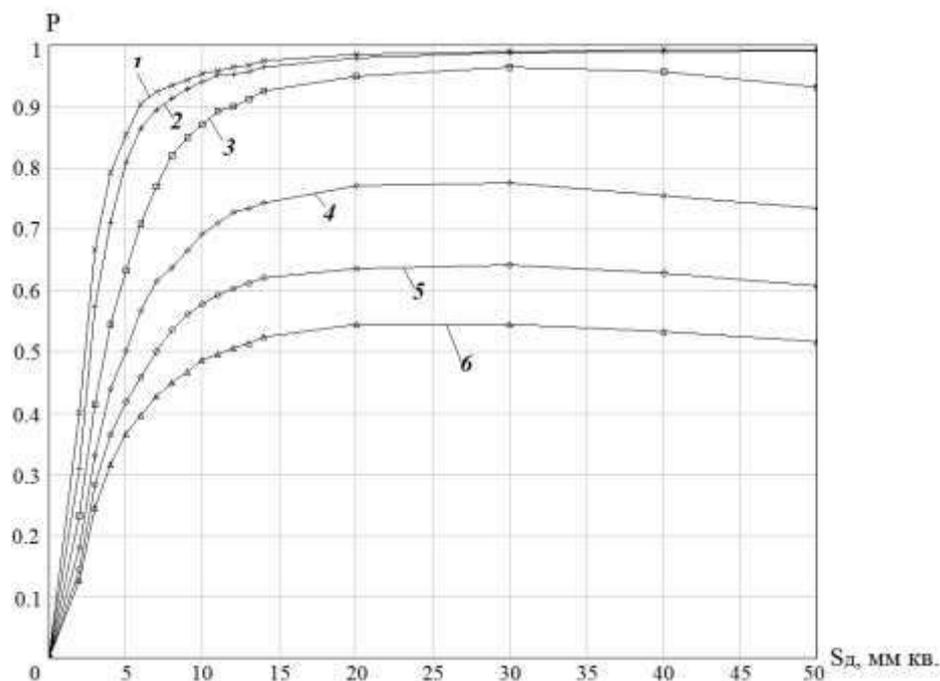


Рис. 2 – Кривые вероятности обнаружения дефектов при чувствительности поиска S_n 2 мм²:

- 1 – при шаге сканирования 3 мм; 2 – при шаге сканирования 6 мм;
- 3 – при шаге сканирования 9 мм; 4 – при шаге сканирования 12 мм;
- 5 – при шаге сканирования 15 мм; 6 – при шаге сканирования 18 мм

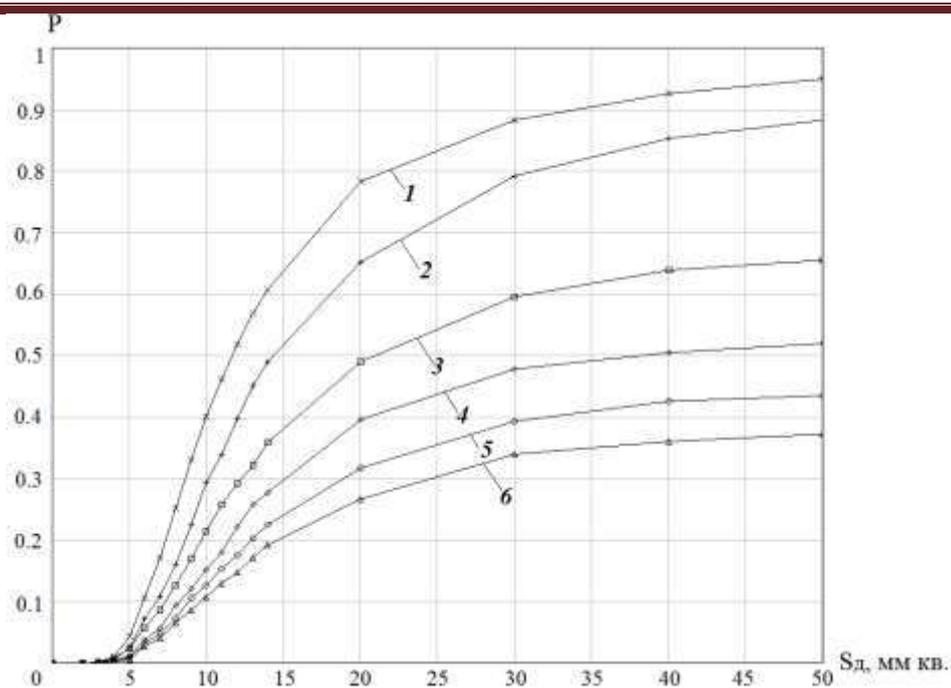


Рис. 3 – Кривые вероятности обнаружения дефектов при чувствительности поиска $S_n 10 \text{ мм}^2$:

- 1 – при шаге сканирования 3 мм; 2 – при шаге сканирования 6 мм;
- 3 – при шаге сканирования 9 мм; 4 – при шаге сканирования 12 мм;
- 5 – при шаге сканирования 15 мм; 6 – при шаге сканирования 18 мм

Из полученных графиков видно снижение вероятности обнаружения дефектов при увеличении его эквивалентной площади, что связано с особенностями используемой математической модели для дефектов, описывающих полное зеркальное отражение без учета параметра шероховатости отражающей поверхности дефекта.

Заключение

В данной статье авторами предложен вариант статистического моделирования процесса ультразвукового контроля с применением метода Монте-Карло. Полученные результаты будут в дальнейшем подвергнуты экспериментальным исследованиям. Проверка корректности математического моделирования на примере выявления компактных плоских дефектов эхо-методом прямым совмещенным преобразователем при ручном контроле планируется выполняться на большом количестве образцов со сварными соединениями из углеродистой стали различных толщин (от 6 до

60 мм), содержащих дефекты. Также вероятности обнаружения дефектов будут рассчитаны и экспериментально оценены для случаев ультразвукового контроля наклонными совмещенными преобразователями и фазированными решетками.

В случае подтверждения корректности используемого математического аппарата полученные математические расчеты позволят существенно упростить процедуру сравнения методик ручного контроля и автоматизированных систем контроля и выбрать оптимальные параметры поиска дефектов.

Однако авторы отмечают, что данный способ статистического моделирования позволяет только качественно, а не количественно оценить вероятности обнаружения дефектов. Это связано с тем, что количественная вероятность обнаружения дефектов должна определяться с учетом реальных статистических данных по дефектности рассматриваемых изделий, полученных для конкретного технологического процесса изготовления.

Литература

1. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Изд. «Наука», 1968, с. 64 с.
2. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Изд. Центр «Академия», 2006, 368 с.
3. Ермолов И.Н., Вовилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). – М.: Изд. ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2004, С. 40–69.
4. Круглов Б.А. Применение метода Монте-Карло для исследования функций выявляемости дефектов при ультразвуковой дефектоскопии. Сб. докладов XVI Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – СПб, 9-12 сентября 2002.

УДК 620.1

Разработка технологии ультразвукового контроля поковок штампованных сложной конфигурации

Ташланова О.В.¹; Зорихина Е.Ю.¹

tashlanova.o@mail.ru; Zorihina_ey@vsm-po.ru

¹ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Верхняя Салда

Аннотация:

На примере поступивших от заказчика требований по изготовлению поковок штампованных сложной конфигурации, описана процедура разработки технологии ультразвукового контроля.

Ключевые слова:

технология, ультразвуковой контроль, поковка штампованная сложной конфигурации

В настоящее время в производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий проверить качество продукции без нарушения ее пригодности к использованию по назначению. Ультразвуковой контроль изделий остается основным, а зачастую и единственным, методом неразрушающего контроля, позволяющим обнаруживать внутренние дефекты [1].

Ультразвуковой метод является практичным по применению ко многим сферам деятельности. Выбор вида ультразвукового контроля определяется исходя из габаритов и формы контролируемого изделия [2].

ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», является крупнейшим в России производителем и поставщиком полуфабрикатов (заготовок деталей)

из титана и титановых сплавов. Основным направлением деятельности Корпорации является производство титановой продукции: слитки, прутковые заготовки, слябы, поковки штампованные простой и сложной конфигурации, заготовки дисков и лопаток авиационных двигателей, раскатные кольца, профили, бесшовные и сварные трубы и другие изделия.

Ультразвуковой контроль на ВСМПО является одной из важнейших операций технологического процесса производства изделий. Одной из задач для сотрудников Корпорации ВСМПО является проведение ультразвукового контроля изделий сложной конфигурации.

На ВСМПО поступают заказы на изготовление поковок штампованных сложной конфигурации.

Стандарт Заказчика на производство поковок штампованных определяет требования по сертификации и контролю технологических процессов, используемых в производстве поковок для авиастроения.

Согласно требованиям стандарта Заказчика, поставщик до перехода к серийному производству изделий должен сертифицировать технологический процесс для каждого отдельного наименования (шифра) детали. В соответствии с требованиями Заказчика ультразвуковой контроль поковок с толщиной сечения более 76,2 мм должен проводиться в соответствии с требованиями международной спецификации

AMS-STD-2154 класс А [3]. Так как поковки штампованные имеют сложную конфигурацию и нет возможности провести контроль 100 % объема материала изделия на соответствие требованиям стандарта Заказчика, специалисты ВСМПО направили предложение по отмене ультразвукового контроля на поковках штампованных. Было предложено введение операции ультразвукового контроля сплошности материала только на стадии прутковой заготовки в иммерсионном варианте в соответствии с технологической картой ультразвукового контроля.

В соответствии со своими внутренними требованиями Заказчик сообщил о необходимости провести ультразвуковой контроль на стадии

прутковой заготовки и дополнительно провести проверку "деталь за деталью", т.е. каждой поковки штампованной отдельного сертификационного наименования (шифра).

Заказчику было направлено предложение о возможности проведения ультразвукового контроля с указанием примерного объема контроля с указанием поверхностей сканирования (смотри рисунок 1). При этом было сообщено, что возможность проведения ультразвукового контроля на данных участках ограничивается размером плоского участка поверхности штамповки. Поверхность данных участков подлежит доработке (мехобработке, зачистке или полировке и т.д.) до требуемой шероховатости, необходимой для проведения ультразвукового контроля.

Требования ВСМПО по состоянию поверхности для проведения ультразвукового контроля:

на поверхностях, подвергаемых контролю, не должно быть трещин, локальных углублений после шлифовки, ступенек после механической обработки и других дефектов поверхности, которые могли бы исказить результаты ультразвукового контроля. Значение параметра шероховатости R_a не должно превышать 2,5 мкм.

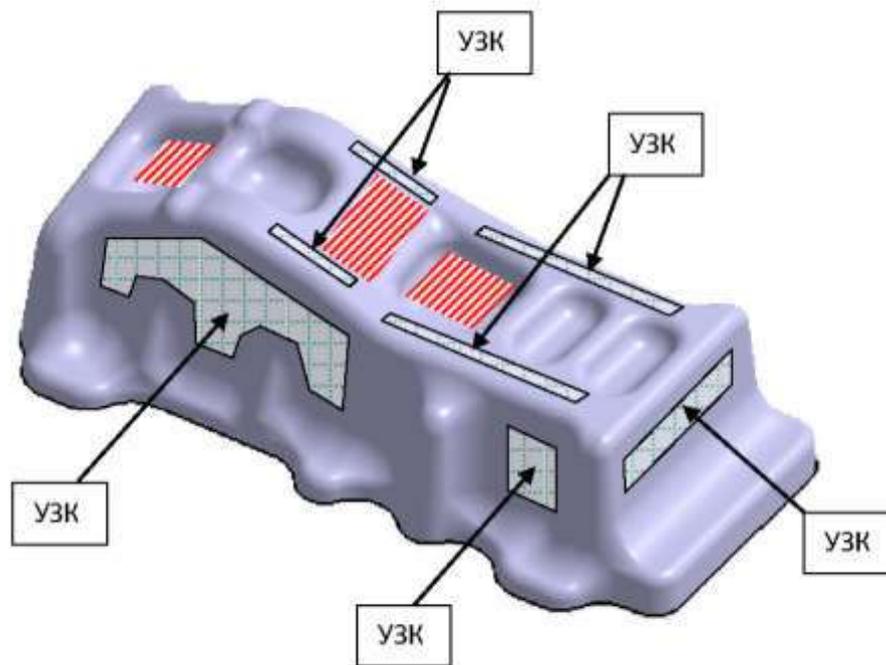


Рисунок 2 – УЗК контроль штамповки на дополнительных участках

Возможность проведения ультразвукового контроля дополнительных участков ограничена размером плоского участка поверхности штамповки (кармана).

Согласно уточнениям Заказчика, требования по ультразвуковому контролю для поковок штампованных, изготовленных в закрытом штампе должны проводиться в соответствии с стандартом заказчика и AMS-STD-2154 [3], класс контроля А, продольная волна, тип II (контактный метод). Скан-планы (технологические карты ультразвукового контроля) должны разрабатываться для каждого основного шифра. Ультразвуковой контроль проводится на каждом наименовании (шифре) штампованной детали, чтобы удостовериться, что во время процесса штамповки не образовалось никаких дефектов.

На основании полностью согласованной технологии было принято решение о разработке технологической карты контроля поковок штампованных сложной конфигурации, пример конфигурации штамповки приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 - Конфигурация штамповки

Для подготовки эскизов для технологической карты контроля были привлечены специалисты конструкторского бюро научно-технического центра ВСМПО. После проработки конструкторской документации на изделия отправлен запрос в конструкторское бюро ВСМПО по предоставлению дополнительных размеров, сечений и разрезов поковки штампованной (рисунок 4). Данная информация была необходима для оценки и построения в технологической карте контроля эскизов, разрезов и сечений детали с изображением неконтролируемых зон, максимальных глубин ультразвукового прозвучивания каждого сложного сечения поковки штампованной.

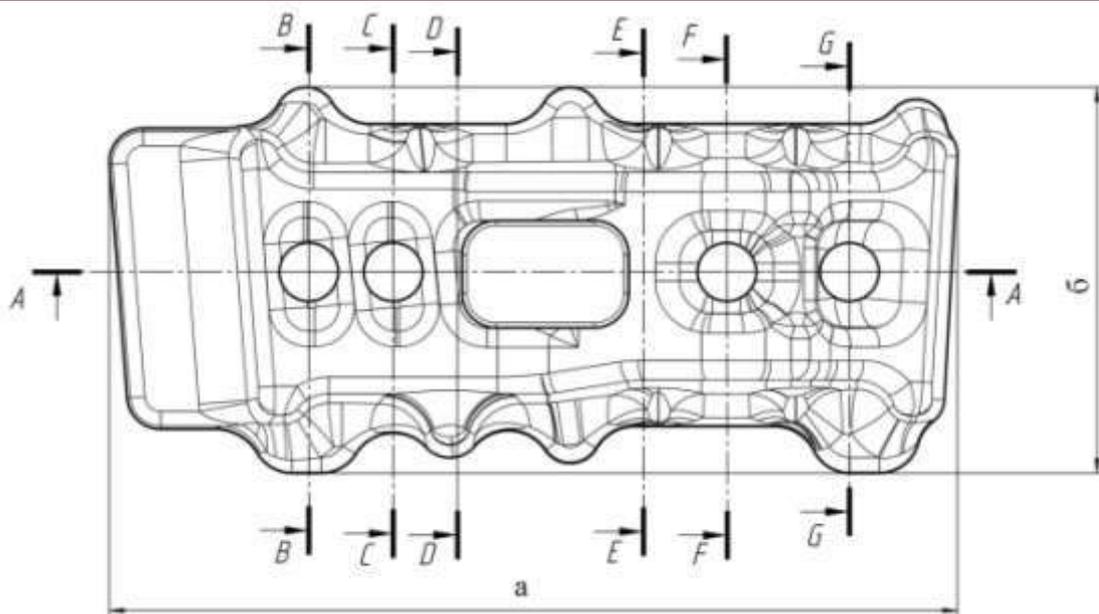


Рисунок 4 – Конфигурация поковки

После получения информации авторами был произведен анализ чертежей с основными видами детали, сечений и разрезов. Произведена оценка наличия оборудования, пьезоэлектрических преобразователей для контроля и их подбор. Сделаны выводы на основании опыта ВСМПО по определению максимальной толщины прозвучивания с настройкой на плоскодонный отражатель диаметром 1,2 мм для поволок больших габаритов. В настоящее время для подобной конфигурации поволок величина не превышает 130 мм. На основании данной проработки выбран набор стандартных образцов для настройки аппаратуры.

Результатом проведенной работы является технологическая карта ультразвукового контроля поковки штампованной. На эскизах технологической карты, приведенных на рисунке 5, указаны поверхности сканирования для контроля поковки, выбранные с целью обеспечения наиболее полного контроля всего объема материала изделия. Для примера на рисунке 6 указаны примечания для контроля сертификационной поковки по эскизам, указанным в технологической карте.

Поволки штампованные не должны содержать ни одной из неоднородностей, таких, как закалочные трещины, неслитины, швы, складки

(заковы), разрывы и т.д., на сечении поковки или внутри материала, размеры которых позволяют их обнаружить при контроле с чувствительностью соответствующей классу А, стандарта AMS-STD-2154 [3].

В соответствии с технологической картой ультразвукового контроля проведен ультразвуковой контроль сертификационной поковки. В результате контроля изделия было подтверждено отсутствие дефектов, которые могли образоваться при выполнении технологического цикла изготовления поковки. Это свидетельствует о соответствии выполненного технологического процесса производства поволок штампованных предъявляемым требованиям.

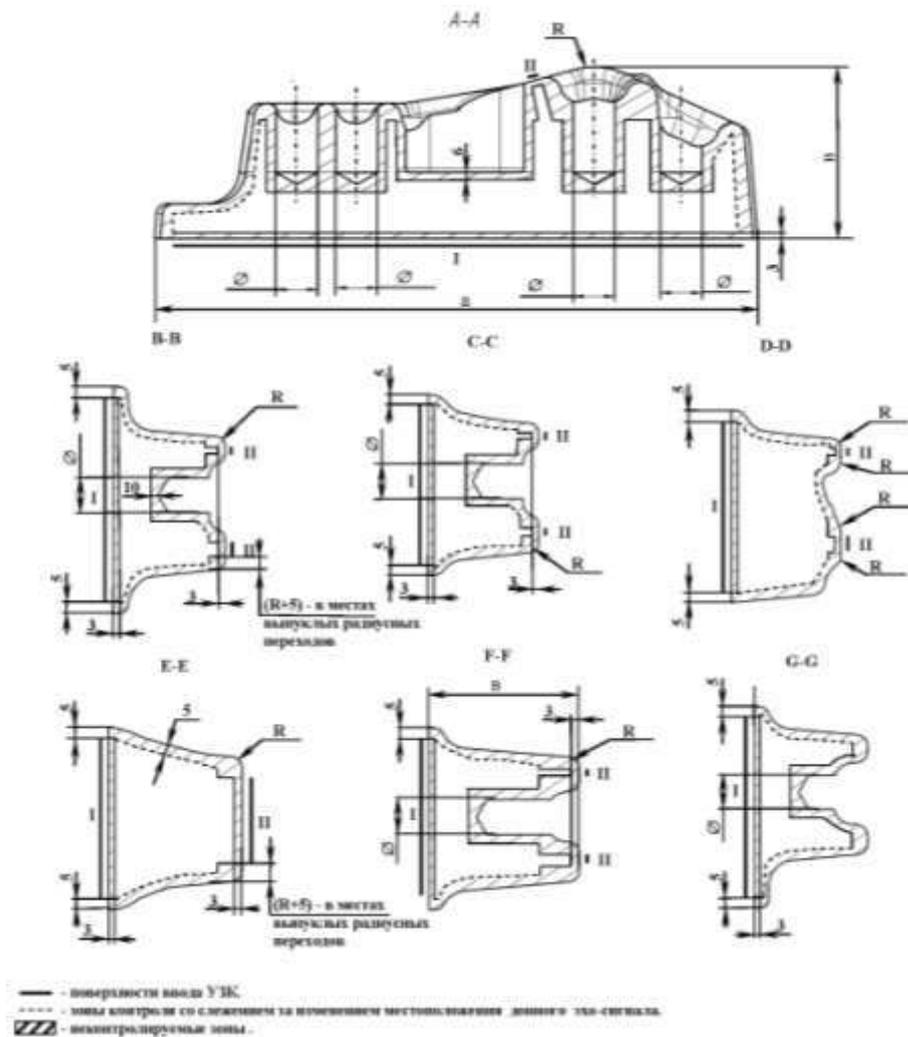


Рисунок 5 – Эскиз поковки

Примечания для ультразвукового контроля изделия

- 1 При настройке применять РСО, соответствующие требованиям технологической карты.
- 2 Допускается применять РСО с ПО диаметром не более 2,0 мм, с последующей коррекцией чувствительности до ПО диаметром 1,2 мм.
- 3 Значение параметра шероховатости контролируемых поверхностей Ra не более 2,5 мкм.
- 4 Размеры указаны на эскизах для справки.
- 5 Контроль поверхности I проводить со слежением за изменением местоположения донного эхо-сигнала.
 - 5.1 При контроле "Р-С" ПЭП окончание зоны контроля установить не более 20 мм.
 - 5.2 При контроле "С" ПЭП окончание зоны контроля установить не более 130 мм при проведении контроля с настройкой по стандартным образцам (ПО diam. 1,2 мм) и не более 180 мм при проведении контроля с настройкой по стандартным образцам (ПО diam. 2,0 мм).
- 6 Допускается проводить контроль совмещенным ПЭП (№2) с разбивкой на большее количество зон в указанных диапазонах с перекрытием зон по глубине не менее 5 мм.
- 7 При уровне фоновых шумов выше 40 % высоты экрана дефектоскопа допускается устанавливать уровень АСД ≤ 63 % высоты экрана при условии измерения ширины УЗ пучка ПЭП на уровне минус 2 дБ, при этом шаг сканирования необходимо уменьшить в соответствии с полученным значением ширины УЗ пучка ПЭП.

Литература

1. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник. Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: «Машиностроение», 1976. – 456 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. Под ред. В.В. Ключева. – М.: «Машиностроение», 2005. – 656 с.
3. AMS-STD-2154. Спецификация на аэрокосмический материал. Процесс ультразвукового контроля деформируемых материалов.

УДК 621.891:519.28

Сравнительная оценка работоспособности сопряжений с твердосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования

Хопин П.Н.¹, к.т.н.

chopinp@mail.ru

¹Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Аннотация:

Выявлено преимущество по триботехническим показателям сопряжений с твердосмазочными покрытиями (ТСП) на основе MoS₂ со связующими компонентами при работе в вакууме и в среде азота. Проведен сравнительный анализ по долговечности, коэффициенту и температуре трения пар с ТСП для условий вакуума и нормальной атмосферы.

Ключевые слова:

твердосмазочные покрытия, вакуум, нормальная атмосфера, среда азота, трибологические показатели

Введение

Твердосмазочные покрытия (ТСП) широко используются в трущихся сопряжениях различных механизмов и агрегатов, функционирующих как в условиях нормальной атмосферы, так и в экстремальных условиях космического пространства [1–4]. Используются сопряжения с ТСП на основе MoS₂, графита, ПТФЭ со связующими в виде силиката натрия, фосфатов, эпоксидной, акриловой смол и др. для диапазона температур от –218°С до 760°С. Область применения твердых смазок по данным зарубежных авторов [3, 4] распространяется и на объекты военной техники, где они

используются в конструкциях направляющих пусковых установок, реактивных снарядов и ракет, трущихся частей артиллерийских орудий и стрелкового оружия.

Диапазоны контактных давлений и скоростей скольжения для трущихся сопряжений, функционирующих в условиях космоса, представлены в работе [4]. Сопряжения трения функционируют при контактных давлениях от 10^7 до 10^{10} Па и скоростях скольжения от почти нуля до 20 м/с в гироскопах контроля момента. Отмечается, что многие системы, функционирующие в условиях космического пространства, могут оставаться в космосе в течение 10–30 лет. На них воздействуют такие факторы, как атомарный кислород, солнечное излучение, частицы с высокой энергией, температурные циклы от криогенной до 400°C . Кроме того, эти системы часто проверяются на земле и много лет хранятся под воздействием окружающей среды перед запуском. Кроме того, повторно используемые ракеты-носители предполагают, что они будут работать в космически-земной атмосфере циклами с температурными всплесками сверх 800°C во время возвращения.

В связи с вышесказанным актуальным является задача сравнительной оценки работоспособности сопряжений с применением твердосмазочных покрытий для различных условий эксплуатации.

Методики и результаты исследований

Анализ триботехнических показателей покрытий в различных средах

Сравнительные испытания современных ТСП и износостойких алмазоподобных покрытий приведены в работе [3]. Были исследованы следующие покрытия: дисульфид молибдена (MoS_2) со связующим, наиболее широко используемое на практике ТСП – MoS_2 (связ.); магнетронно-напыленный MS (Magnetron-sputtered) MoS_2 -MS MoS_2 ; ионно-осажденное серебро (Ag); ионно-осажденный свинец (Pb); магнетронно-напыленный алмазоподобный углерод (Magnetron-sputtered diamantlike carbon) (MS DLC);

CVD алмазоподобные покрытия с применением плазмы (Plasma-assisted, chemical-vapor-deposited diamantlike carbon (PA CVD DLC).

Характеристики исследуемых покрытий представлены в таблице 1.

Триботехнические показатели указанных выше покрытий исследовались в сверхвысоком вакууме, во влажном воздухе при относительной влажности 20% и в сухом азоте при относительной влажности <1%. Результаты испытаний, проведенных по схеме «палец-диск», приведены в табл. 2. Диаграмма антифрикционных свойств исследуемых покрытий по установившемуся коэффициенту трения $f_{тр}$ приведена на рисунке 1.

Таблица 1

Характеристики исследуемых твердых смазочных пленок
(материал основы – нержавеющая сталь 440С)

Номер пленки	Материал пленки	Толщина пленки, мкм	Шероховатость R_a , нм	
			Значение	Стандартное отклонение
1	MoS ₂ (связ.)	10±4	1,2·10 ³	2,4·10 ²
2	MS MoS ₂	1±0,2	32	4
3	Серебро	0,5±0,2	30	3,2
4	Свинец	0,55	98	15
5	Покрытие MS DLC: С и WC	2–3	43	5,1
6	Покрытие PA CVD DLC: С и Si	3–5	29	3,2

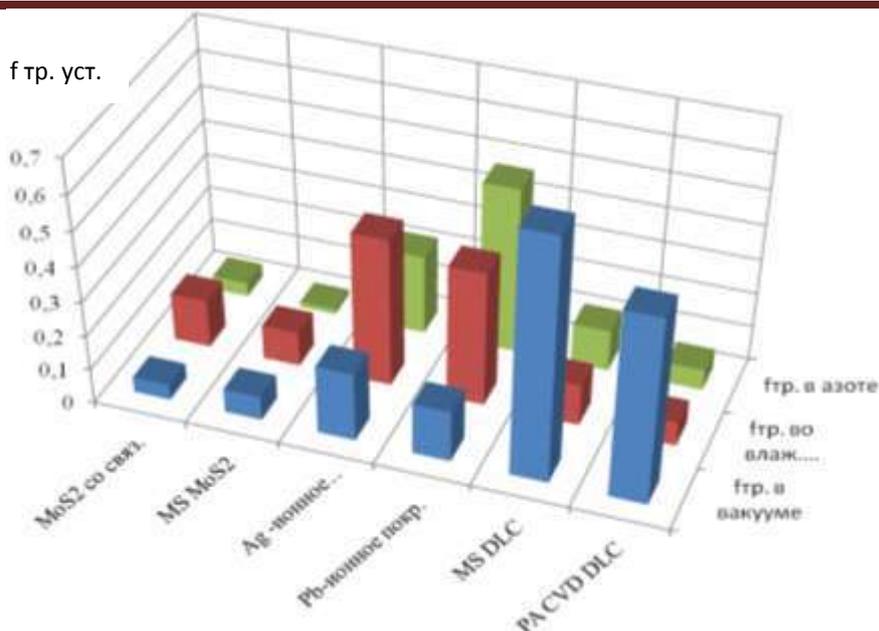


Рисунок 1 – Диаграмма коэффициентов трения установившегося режима для покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота

Таблица 2

Значения установившихся коэффициентов трения, срока службы и скорости износа твердосмазочных пленок в скользящем контакте с шариками, изготовленными из нержавеющей стали 440С

Пленка	Окружающая среда	Установившиеся коэффициенты трения	Срок службы пленки*	Скорость износа пленки, $\frac{мм^3}{Н \cdot м}$	Скорость износа шариков, $\frac{мм^3}{Н \cdot м}$
MoS ₂ со связующим	Вакуум	0,045	>1 млн.	$6 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$
	Воздух	0,14	113 570	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,04	>1 млн.	$4,4 \cdot 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-10}$
MS MoS ₂	Вакуум	0,07	274 130	$9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
	Воздух	0,1	277 377	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
	Азот	0,015	>1 млн.	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-10}$
Ионно - осажденное серебро	Вакуум	0,2	364 793	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$
	Воздух	0,43	8	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	Азот	0,23	1040	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Ионно - осажденный свинец	Вакуум	0,15	30 294	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$
	Воздух	0,39	82	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
	Азот	0,48	1530	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
MS DLC	Вакуум	0,7	<10	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
	Воздух	0,12	>1 млн.	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,12	23965	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
PACVD DLC	Вакуум	0,54	<10	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	Воздух	0,07	>1 млн.	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$
	Азот	0,06	>1 млн.	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$

* - Срок службы пленки был определен числом проходов (оборотов) до достижения коэффициента трения $f_{тр.} = 0,30$.

Анализ представленных на рисунке 1 данных, показал, что:

- в условиях вакуума наилучшие антифрикционные свойства обнаружил ТСП на основе MoS_2 ($f_{тр.}=0,045$) со связующим компонентом и MoS_2 магнетронного напыления ($f_{тр.}=0,07$);
- в условиях влажного воздуха наилучшие антифрикционные свойства показало PACVD алмазоподобное покрытие ($f_{тр.}=0,07$);
- в среде азота наилучшие антифрикционные свойства обнаружил MoS_2 магнетронного напыления ($f_{тр.}=0,015$) и ТСП на основе MoS_2 ($f_{тр.}=0,04$) со связующим компонентом.

Диаграмма сроков службы (до возрастания $f_{тр.} = 0,3$) при трении для исследуемых покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота, представлена на рис. 2.

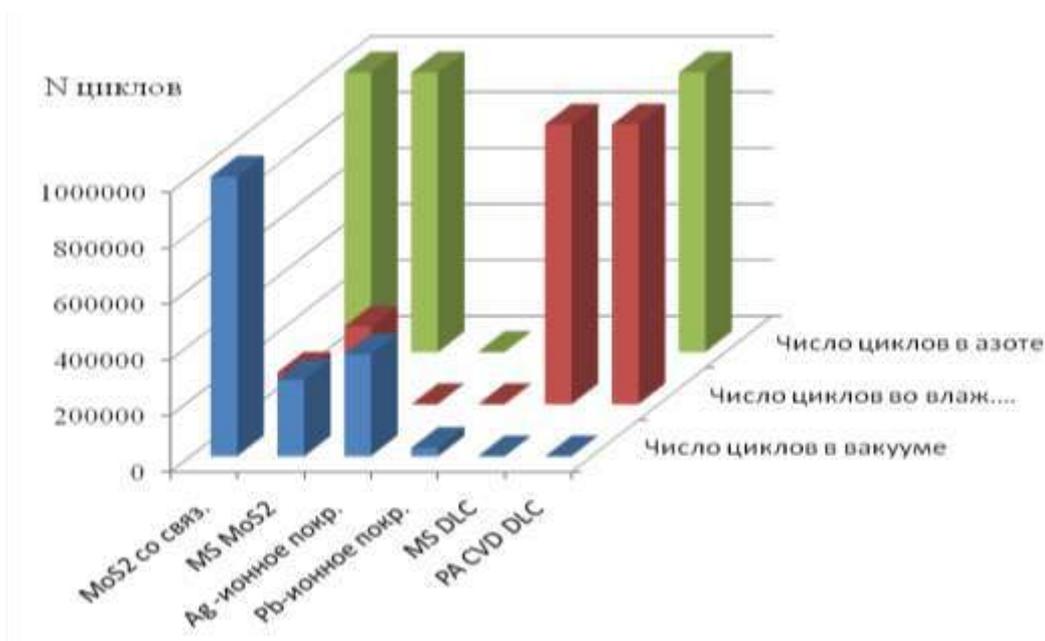


Рисунок 2 – Диаграмма срока службы покрытий до возрастания коэффициента трения до значения $f_{тр.} = 0,3$ при трении для покрытий различных типов, функционирующих в условиях вакуума, влажного воздуха и азота

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что:

- в условиях вакуума наибольший срок службы обнаружил ТСП на основе MoS_2 со связующим компонентом ($N = 10^6$);

- при трении в условиях влажного воздуха наилучшие характеристики обнаружили алмазоподобные покрытия ($N = 10^6$);
- при трении в среде азота наибольший срок службы обнаружили ТСП на основе MoS_2 обоих типов нанесения (со связующим и магнетронного типа) и PACVD алмазоподобное покрытие ($N = 10^6$).

Методики и результаты исследований

Анализ результатов испытаний ТСП на основе MoS_2 в условиях нормальной атмосферы

Учитывая результаты предыдущих исследований различных типов ТСП, выявившие преимущества триботехнических показателей ТСП со связующими компонентами (далее обозначено, как ТСП), на следующем этапе были проведены сравнительные испытания указанных сопряжений в условиях нормальной атмосферы и вакуума [5, 6].

На первом этапе была разработана методика и проведено исследование комплексного влияния нагрузочно – скоростных факторов на истираемость и коэффициент трения пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 при повышенной температуре. Схема испытаний приведена на рис. 3.

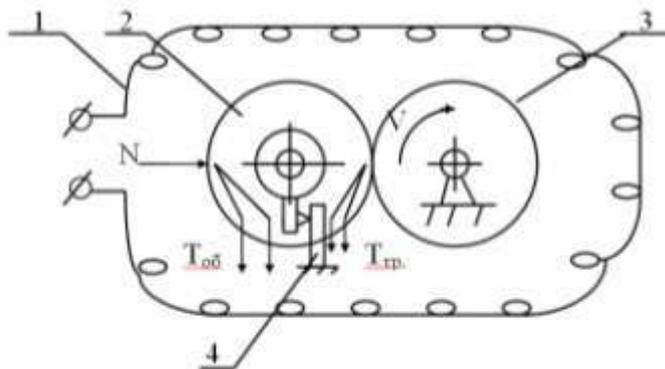


Рисунок 3 – Схема испытаний в эксперименте по исследованию триботехнических свойств пар трения с ТСП при повышенной температуре: 1 – нагреватель; 2 – контрообразец; 3 – образец с ТСП; 4 – тензобалка

Учитывая нелинейный характер влияния исследуемых факторов контактного давления P и скорости скольжения V на истираемость пары трения с ТСП, которая была принята в качестве параметра оптимизации,

решение задачи осуществлялось методом центрального композиционного ортогонального планирования 2-го порядка, включающим матрицу, состоящую из 15 опытов. Диапазоны варьирования составили $V=0,174-1,146$ м/с, $N = 308-1260$ Н и $T_{об.} = 23-217^{\circ}\text{C}$. После проведения соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, приняла вид:

$$\tau = 1794 - 1449 \cdot V - 7,55 \cdot P - 8,37 \cdot T_{об.} + 3 \cdot P \cdot V + 3,33 \cdot V \cdot T_{об.} + 2,55 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot T_{об.} + 334,92 \cdot V^2 + 0,01034 \cdot T_{об.}^2, \quad (1)$$

где V – [м/с], P – [МПа], $T_{об.}$ – [$^{\circ}\text{C}$], τ – [мин.].

Графическая интерпретация выражения (1) представлена на рис. 4. Анализ полученных данных свидетельствует о существенном влиянии рассмотренных факторов на долговечность пары трения о ТСП ВНИИ НП 212. Из рис. 4 видно, что на предельных режимах трения в исследуемых диапазонах варьирования P и V объемная температура нагрева практически перестает оказывать существенное влияние на долговечность пары трения, что вызвано высокой контактной температурой трения, при которой вследствие ускоренного разложения связующего идет быстрый износ смазочной пленки.

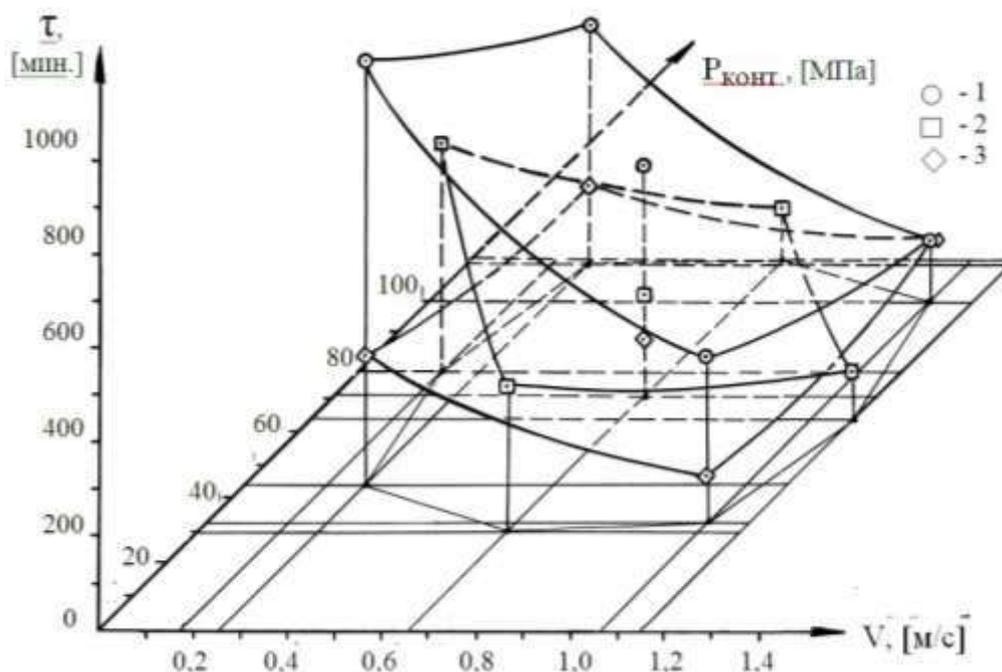


Рисунок 4 – Графическая интерпретация зависимости вида $\tau = f(P, V)$ для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212:
 1 – $T_{об.} = 40^\circ\text{C}$; 2 – $T_{об.} = 120^\circ\text{C}$; 3 – $T_{об.} = 200^\circ\text{C}$

Однако даже в этих экстремальных условиях ТСП оказалось работоспособным в течение 1,5–2 часов непрерывной эксплуатации. Проверка корректности полученной выше математической модели (1) типа $\tau = f(P, V, T_{об.})$ проводилась путем сравнения этой зависимости с экспериментальными результатами, приведенными в работе [7]. В диапазоне температур от 150 до 300°C включительно отклонение расчетных значений долговечности ($\tau = 586\text{--}131$ мин.) от результатов, полученных авторами работы [7] ($\tau = 650\text{--}175$ мин.), составило 9,9–24,3%, что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ.

Т.к. при испытаниях производилась непрерывная запись коэффициента трения $f_{тр.}$ была произведена обработка полученных результатов по антифрикционным характеристикам и после проведения соответствующих преобразований получена математическая модель для оценки влияния исследуемых факторов P , V и $T_{об.}$ на $f_{тр.}$:

$$f_{тр.} = 0,177 - 6,94 \cdot 10^{-2} \cdot V - 1,776 \cdot 10^{-3} \cdot P - 4,19 \cdot 10^{-4} \cdot T_{об.} + 2,32 \cdot 10^{-6} \cdot T_{об.} \cdot P + 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot T_{об.} \cdot V + 1,814 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V +$$

$$2,6 \cdot 10^{-2} \cdot V^2 + 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot P + 7,75 \cdot 10^{-7} \cdot T_{об.}^2, \quad (2)$$

Графическая интерпретация полученного выражения представлена на рис. 5, где в качестве базовых координатных осей были приняты факторы скорости скольжения и объемной температуры нагрева, как параметров, определяющих тепловой режим трения пары в месте контакта.

Анализ результатов, представленных на рис. 5, показывает, что наибольшее влияние на коэффициент трения в данных условиях оказывает контактное давление, с ростом которого происходит существенное улучшение антифрикционных свойств, что объясняется, по-видимому, размягчением связующих составляющих смазочной пленки вследствие повышения контактной температуры трения. Вероятно, этой же причиной объясняется сближение значений $f_{тр.}$ для различных уровней контактного давления при более напряженных режимах трения (при $V=1,06$ м/с, $T_{об.}=200^{\circ}\text{C}$). Проверка корректности полученной выше математической модели (2) типа $f_{тр.}=f(P, V, T_{об.})$ производилась путем сравнения с экспериментальными результатами, приведенными в работе [8]. В диапазоне температур от 50 до 300 $^{\circ}\text{C}$ отклонение расчетных значений долговечности (через каждые 50 $^{\circ}$) от результатов, полученных автором работы [8], составило от 1,4, до 34,7 %%, что считается удовлетворительным при испытаниях на трение и износ.

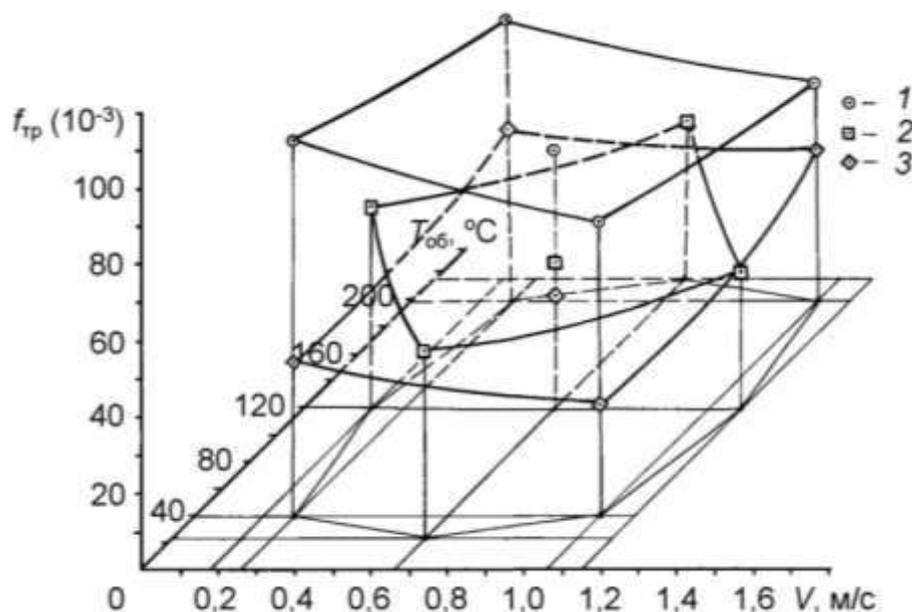


Рисунок 5 – Графическая интерпретация зависимости $f_{тр.} = f(P, V, t_{об.})$ для ТСП ВНИИ НП 212 (1 – $P=32,5$ МПа; 2 - $P=72,8$ МПа; 3 – $P=113$ МПа)

Анализ результатов испытаний ТСП на основе MoS_2 в условиях вакуума

К числу важнейших экстремальных условий, в которых эксплуатируются узлы трения с применением ТСП, относятся условия вакуума. В связи с этим решалась задача комплексной оценки работоспособности рассматриваемых фрикционных сопряжений в вакууме. Исследования основных параметров работоспособности узлов трения с ТСП проводились с использованием математического планирования экспериментов по методу центрального композиционного ротатабельного униформ-планирования 2-го порядка на стенде для изучения трения и износа в вакууме [6] [а.с. 926573] (рис. 6).

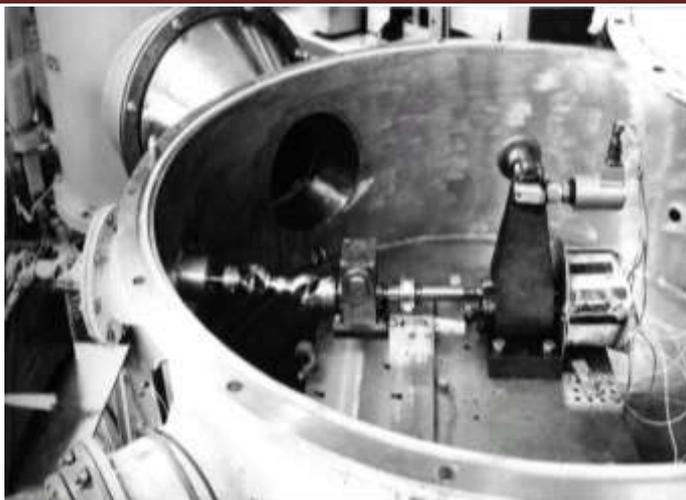


Рисунок 6 – Компоновка нагрузочно-измерительного механизма стенда для изучения трения и износа в вакууме

Диапазоны варьирования факторов контактного давления и скорости скольжения составили соответственно $P=61-121$ МПа, $V = 0,087-0,504$ м/с. После проведения преобразований искомые математические модели долговечности и коэффициента трения пары с ТСП ВНИИ НП 212, выраженные в натуральных значениях факторов, приняли вид:

– для зависимости долговечности $\tau = f(P, V)$:

$$\tau = 10804,7 - 34849 \cdot V - 66,75 \cdot P + 22791,34 \cdot V^2 + 166,03 \cdot V \cdot P, \quad (3)$$

– для зависимости $f_{тр.} = f(P, V)$:

$$f_{тр.} = 0,1564 - 0,153 \cdot V - 1,443 \cdot 10^{-3} \cdot P + 0,164 \cdot V^2 + 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot P + 1,824 \cdot 10^{-4} \cdot P \cdot V, \quad (4)$$

$$T_{тр.} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P_{конт.} - 282,19 \cdot V^2, \quad (5)$$

где V - [м/с], P - [МПа].

Графическая интерпретация полученного выражения $\tau = f(P, V)$ в сравнении с испытаниями на воздухе представлена на рис. 7.

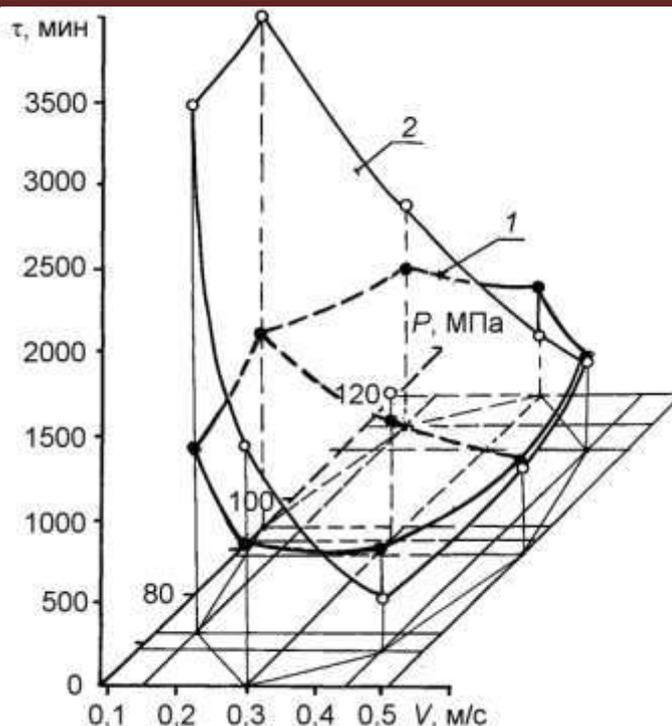


Рисунок 7 – Графическая интерпретация влияния нагрузочно - скоростных факторов на истираемость трения с ТСП ВНИИ НП 212: —○— - в условиях вакуума ($p \sim 4$ МПа)(поз.2);
—●— - в нормальных атмосферных условиях (поз.1)

Сравнивая приведенные на рис. 7 зависимости долговечности пар трения с ТСП от нагрузочно-скоростных факторов, полученные при испытаниях в вакууме и в нормальных атмосферных условиях, следует отметить, что при менее напряженных режимах трения долговечность рассматриваемого фрикционного сопряжения в условиях вакуума выше, чем в нормальных атмосферных условиях, и, наоборот, при больших значениях P и V износостойкость данной пары трения выше на воздухе.

Результаты проверки корректности математической модели оценки долговечности пар с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме (3) представлены в таблице 7.

Проверка корректности математическая модели (3) $\tau = f(P, V)$ для вакуума

Тип пары трения	Литературные данные				Расчет	% отклонения
	P, МПа	V, м/с	T, °C	τ	τ	
Схема «диск-палец»; машина трения УТИ-1, $p=10^{-7}$ мм рт. ст., ТСП ВНИИ НП 212 [9]	28,3	0,4	20	315 (400) мин.	502 мин.	37 (20,3)
Схема «вал-втулка», $p=10^{-4}$ мм рт. ст., ТСП ВНИИ НП 212 [10]	9,8	0,008	20	143 час.	165 час.	13,2

Графическая интерпретация зависимости $f_{тр.} = f(P, V)$ для вакуума представлена на рис. 8, где для сравнения приведен аналогичные характеристики, полученные при испытаниях в нормальных атмосферных условиях. Анализ представленных данных показывает, что на всех режимах испытаний антифрикционные свойства пар с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума значительно ниже (в 2 раза и более), чем в нормальных атмосферных условиях.

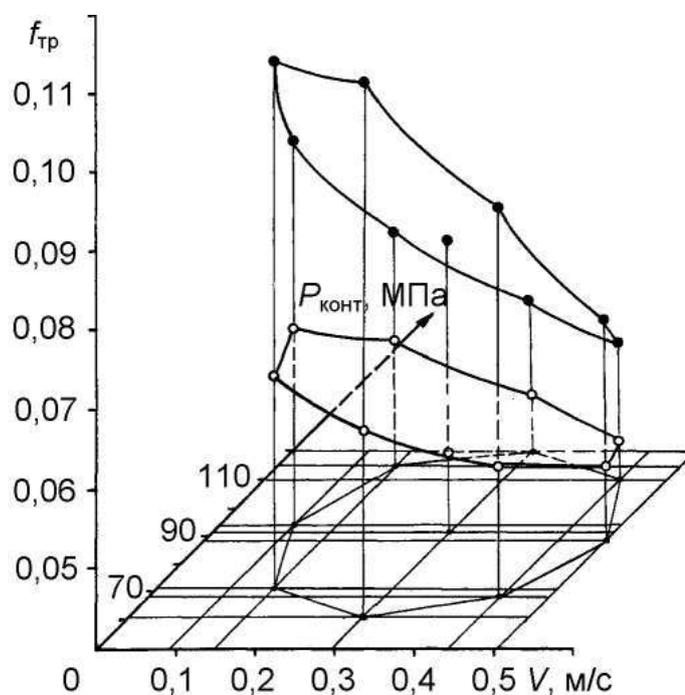


Рисунок 8 – Графическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных факторов на $f_{тр.}$ пары с ТСП ВНИИ НП 212:

- - в условиях вакуума ($p \sim 4$ МПа);
- - в нормальных атмосферных условиях

Графическая интерпретация зависимости $T_{тр.} = f(P, V)$ для вакуума полученного выражения представлена на рис. 9, где также приведена аналогичная зависимость для нормальных атмосферных условий.

Сравнение приведенных поверхностей показывает, что, как и предполагалось, контактная температура трения для пары с ТСП в условиях вакуума оказалась выше, чем в нормальных атмосферных условиях вследствие отсутствия теплообмена с окружающей средой в разряженной атмосфере.

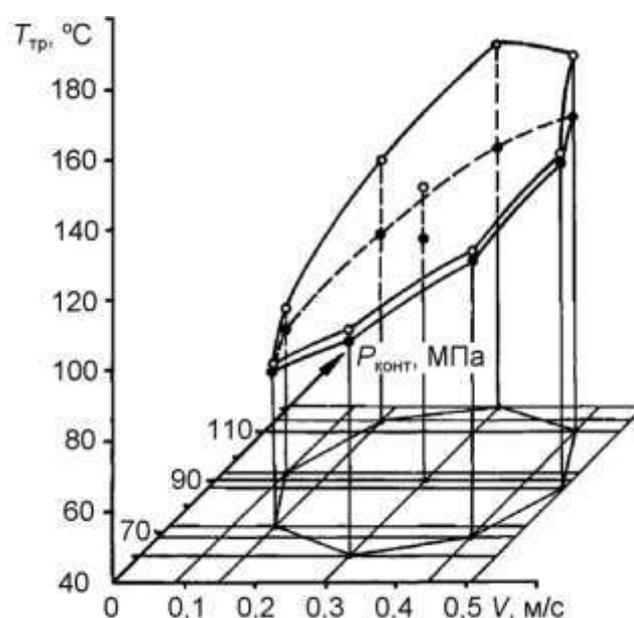


Рисунок 9 – Графическая интерпретация влияния нагрузочно - скоростных факторов на тепловой режим трения пары о ТСП ВНИИ НП 212:

- — в условиях вакуума ($p \cong 4$ МПа);
- — в нормальных атмосферных условиях

Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Анализ результатов сравнительных испытаний современных ТСП и износостойких алмазоподобных покрытий, показал, что в условиях вакуума и азотной среды наилучшие триботехнические показатели обнаружили сопряжения с ТСП на основе MoS_2 со связующими компонентами; в условиях влажной атмосферы наилучшие характеристики показали CVD

алмазоподобные покрытия, нанесенные с применением плазмы (Plasma-assisted, chemical-vapor-deposited diamantlike carbon (PA CVD DLC)).

2. В результате проведения планируемых экспериментальных исследований сопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях нормальной атмосферы при повышенной температуре построены полиномиальные модели 2 порядка зависимостей наработки и коэффициента трения от нагрузочно-скоростных факторов и температуры нагрева.

3. В результате проведения планируемых экспериментальных исследований сопряжений с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума получены полиномиальные модели 2 порядка зависимостей наработки, коэффициента и температуры трения от нагрузочно-скоростных факторов.

4. Сравнение полученных при испытаниях в вакууме и в нормальных атмосферных условиях трибологических зависимостей показало, что при менее напряженных режимах трения долговечность рассматриваемого фрикционного сопряжения в условиях вакуума выше, чем в нормальных атмосферных условиях, и, наоборот, при больших значениях P и V износостойкость данной пары трения выше на воздухе. На всех режимах испытаний антифрикционные свойства пар с ТСП ВНИИ НП 212 в условиях вакуума значительно ниже (в 2 раза и более), чем в нормальных атмосферных условиях. Контактная температура трения для пары с ТСП в условиях вакуума оказалась выше, чем в нормальных атмосферных условиях.

Литература

1. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка). Москва, ЭкоПресс, 2010. 604 с.

2. Ковалев Е.П., Игнатъев М.Б., Семенов А.П., Смирнов Н.И., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор). *Трение и износ*, 2004, т. 25, № 3, С. 316–336.

3. Miyoshi, K.: Solid Lubrication. Fundamentals and Applications

Characterization of Solid Surfaces. NASA Glenn Research Center. Cleveland. Ohio. MARCEL DEKKER, INC. NEW YORK I BASEL. 2001. 400 p.

4. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. Composites Science and Technology. 65 (2005), P. 741–748.

5. Хопин П.Н., Попов О.В., Комаров В.А. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочным покрытием в зависимости от температурного фактора, ж. Трение и износ. 1985, т.6, №6, С. 1109–1116.

6. Хопин, П. Н. Методика и результаты оценки эксплуатационных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования / П. Н. Хопин // Трение и износ. 2012. Т. 33, № 1. С. 23–31.

7. Сентюрихина, Л.Н. Твердые дисульфидмолибденовые смазки / Л.Н. Сентюрихина, Е.М. Опарина. - М.: Химия, 1966 . - 152с.

8. Матвеевский, Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов / Р.М. Матвеевский.: монография. М.: Наука.- 1971.- 228с.

9. Гамуля Г.Д., Юхно Т.П., Яковлев И.А. И др. Планирование эксперимента при оценке долговечности твердых смазочных покрытий. Ж. Надежность и контроль качества. 1978, №8, С.44–50.

10. Ярош В.М., Моишеев А.А., Броновец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны. ж. Трение и износ. 2003 ,т.24, №6, С.626–635.

УДК 620.179.16

**Неразрушающий контроль акустическими методами многослойных
конструкций из полимерных композиционных материалов
мотогондолы авиационного двигателя**

Чертищев В.Ю.¹; Бойчук А.С.¹, к.т.н.; Диков И.А.¹;

Генералов А.С.¹, к.т.н.

chertishchevv@mail.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

Рассмотрены основные вопросы, встающие при разработке технологий контроля акустическими методами (в том числе автоматизированного) многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) мотогондолы авиационного двигателя. Проведены исследования, направленные на определение наилучшего метода неразрушающего контроля для выявления дефектов в 3-, 5- и 7-слойных конструкциях с сотовым наполнителем и определения глубины их залегания для последующего ремонта. Представлены достигнутые результаты на текущий момент, а также разрабатываемые перспективные технологии для изделий нового поколения. Также рассмотрены вопросы оценки достоверности автоматизированного ультразвукового контроля. Приведено общее описание математического аппарата оценки достоверности. Приведены результаты оценки достоверности результатов автоматизированного неразрушающего контроля качества многослойных

конструкций из ПКМ (вероятности обнаружения дефектов различных типов и размеров) теневым методом контроля.

Ключевые слова:

ультразвуковой контроль, теневой метод, акустический импедансный метод, вероятность обнаружения дефектов, полимерные композиционные материалы, ПКМ

Введение

Применение неразрушающих методов контроля и диагностики [1–4] при разработке новых материалов, производстве и эксплуатации изделий и конструкций авиационной техники является обязательным условием обеспечения контроля качества продукции, и, следовательно, безопасности воздушных судов. Данная работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.3: Методы неразрушающих исследований и контроля («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Прочностные свойства изделий авиационной техники реализуются только при отсутствии дефектов, которые могут быть внесены в материал при изготовлении детали или образоваться в процессе эксплуатации, что делает необходимым применение неразрушающих методов контроля и диагностики. Это относится как к контролю монолитных изделий из ПКМ (углепластиков и стеклопластиков) на наличие расслоений, отсутствие связующего и т.д., так и к контролю многослойных клееных и интегральных конструкций в том числе с сотовым наполнителем на наличие расслоений, непроклеев, подмятия сот и т.д. Для обеспечения контроля многослойных конструкций из ПКМ в особенности для таких конструктивно сложных изделий, как мотогондола авиационного двигателя семейства ПД-14 (и в перспективе ПД-35), которая включает в себя широкий спектр деталей в виде 3-, 5- и 7-слойных конструкций из ПКМ в том числе с сотовым наполнителем,

требуется решение как научно-исследовательских задач, направленных на повышение достоверности контроля, так и решение задач автоматизации процесса контроля.

Основной объем выпускаемых изделий из ПКМ в отечественной авиационной отрасли контролируется вручную. Ручной контроль характеризуется высокой трудоемкостью, малой информативностью результатов и низкой надежностью, в силу влияния «человеческого фактора». На ведущих иностранных авиастроительных фирмах (Boeing, Airbus, Bombardier) ручной контроль при производстве деталей и полуфабрикатов из металлов и композитов давно исключен.

В последние годы увеличиваются объемы производства и применения современных материалов на отечественных заводах авиационной отрасли: АО «Аэрокомпозит» развернул новые производственные мощности в Ульяновске и Казани, существенному дооснащению подверглось производство на АО «ОНПП «Технология» и ПАО «ТАНТК им. Бериева», новые композитные детали выпускаются и применяются в составе изделий на ПАО «ПЗ «Машиностроитель», филиале ПАО «Компания «Сухой» - «КнААЗ им. Гагарина», ПАО «ВАСО», ПАО «Роствертол», ПАО «ААК «Прогресс», ПАО «КВЗ», ПАО «КумАПП».

К современным методам контроля предъявляются высокие требования по достоверности контроля. Это обусловлено тем, что оценка достоверности, основанная на расчете вероятности обнаружения дефектов, при неразрушающем контроле деталей и конструкций изделий современной авиационной техники в процессе их изготовления и эксплуатации является неотъемлемой частью расчета ресурса и интервалов между техническими осмотрами.

Выявление дефектов в 3-, 5- и 7-слойных конструкциях с сотовым наполнителем и определения глубины их залегания

Конструкция мотогондол большинства авиационных двигателей наряду с монолитными деталями включает также 3-, 5- и 7-слойные сотовые элементы конструкции, в том числе с перфорированными обшивками. Для выявления производственных дефектов таких элементов конструкции необходимо применение комплексной методики неразрушающего контроля, включающей несколько методов. Наиболее перспективными методами являются акустические методы [5, 6]. Дефекты монолитных деталей хорошо выявляются ультразвуковым эхо-импульсным методом, в том числе с применением технологии фазированных решеток. Трехслойные сотовые конструкции хорошо контролируются теневым низкочастотным методом и акустическим импедансным. При этом для теневого контроля наиболее важны вопросы связанные с автоматизацией контроля из-за необходимости обеспечения строгой соосности датчиков при контроле изделий со сложной геометрией, а также выбор способа создания акустического контакта. Наибольшую трудность представляет контроль пяти- и семислойных сотовых конструкций. Основными дефектами при производстве трех-, пяти- и семислойных деталей и элементов конструкции мотогондолы двигателя с сотовым наполнителем являются: инородные включения; расслоения (непроклеи) в обшивках, а также между обшивкой и сотовым наполнителем; пористость в обшивках; потеря устойчивости (подмятие) сотового наполнителя; затеки связующего в соты; не растянутые соты и т.д. Для выявления инородных включений и расслоений в монолитных частях сотовых деталей и элементов конструкции, а также в монолитных обшивках до сборки сотовых конструкций хорошо показали себя ультразвуковые эхо-импульсный и амплитудно-теневой методы. Для выявления дефектов объемного характера в сотовом наполнителе (смятие сот, нестыковка сот, нарушение геометрии сот, несплошности наполнения пастой (типа ВПЗ) сотового наполнителя, инородные объекты в сотовом наполнителе) возможно

применение рентгеноскопического контроля. Пористость хорошо выявляется при рентгенографическом контроле. Наибольшую трудность представляет выявление дефектов типа расслоений и непрочности пяти- и семислойных сотовых конструкций и определение их местоположения относительно слоев этой конструкции.

Для проведения необходимого комплекса исследований, направленных на определение наилучшего метода выявления дефектов в 5- и 7-слойных объектах контроля с сотовым наполнителем по автоклавной технологии были изготовлены конструктивно-подобные образцы деталей и элементов конструкции мотогондолы двигателя с искусственными дефектами:

- два конструктивно-подобных образца корпуса воздухозаборника (передняя и задняя часть) мотогондолы двигателя. Образцы представляют собой пятислойные конструкции с сотовым наполнителем ССП-1-8Т высотой 23 и 7 мм и размером ячейки 8 мм (2 ряда сот). Обшивки (толщиной 0,64; 0,81; 1,3; 1,6 и 2,6 мм) изготовлены из углепластика ВКУ-27тр;
- два конструктивно-подобных образца корпуса переднего мотогондолы двигателя. Образцы представляют собой семислойные конструкции с сотовым наполнителем ССП-1-8Т высотой 10 мм и размером ячейки 8 мм (3 ряда сот). Каждый образец включает изготовленные из углепластика ВКУ-39 две обшивки толщиной 0,86 мм и две обшивки толщиной 1,2 мм;
- конструктивно-подобный образец створки реверса мотогондолы двигателя. Образец представляет собой пятислойную конструкцию с сотовым наполнителем ССП-1-8Т высотой 21 и 7 мм и размером ячейки 8 мм (2 ряда сот) и обшивками (толщиной 0,81; 1,0 и 1,2 мм) из углепластика ВКУ-39.

Искусственные дефекты, имитирующие непрочности и расслоения в образцах, были получены путем закладки между слоями графитовой фольги различного диаметра и толщиной 120 мкм, клиньев из стальной фольги (толщиной 90 мкм) и закругленным концом (радиусом 3 мм) с последующим их удалением после формования образцов, а также путем подрезов сотового

заполнителя различного диаметра на глубину до 6 мм и фрезерования отверстий различного диаметра в обшивках и сотовом заполнителе на различную глубину. На рис. 1 изображены искусственные дефекты, имитирующие расслоения и непроклеи в конструктивно-подобном образце корпуса переднего мотогондолы двигателя, полученные путем фрезерования отверстий различного диаметра на различную глубину.



Рисунок 1 – Искусственные дефекты, имитирующие расслоения и непроклеи в конструктивно-подобном образце корпуса переднего мотогондолы двигателя (дефекты получены путем фрезерования отверстий различного диаметра на различную глубину)

Для выявления искусственных расслоений и непроклеев в монолитных обшивках и между обшивками и сотовым заполнителем были опробованы ударно-акустический, импедансный, резонансный и амплитудно-теневым акустические методы контроля с использованием приборов АД-64М, ДАМИ-С НА-1 (ДАМИ-С 09), Olympus Bondmaster 1000E+, УСД-60Н соответственно.

Наилучшие результаты по выявлению дефектов такого типа показал импедансный метод при использовании прибора ДАМИ-С НА-1 (ДАМИ-С 09) в комплекте с пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) ПАДИ8-С. При двухстороннем доступе к конструктивно-подобным образцам данный метод обеспечил уверенное выявление дефектов размером:

- не менее 20 мм между обшивкой I и сотовым заполнителем II, обшивкой V и сотовым заполнителем IV, сотовым заполнителем II и обшивкой III, и не менее 25 мм между сотовым заполнителем IV и обшивкой III в пятислойных конструктивно-подобных образцах (рис. 2);
- не менее 16 мм между обшивкой I и сотовым заполнителем II, обшивкой VII и сотовым заполнителем VI, не менее 20 мм между сотовым заполнителем II и обшивкой III, сотовым заполнителем VI и обшивкой V, и не менее 30 мм между обшивкой III и сотовым заполнителем IV, обшивкой V и сотовым заполнителем IV в семислойных конструктивно-подобных образцах (рис. 3).

При контроле семислойных конструктивно-подобных образцов корпуса переднего мотогондолы двигателя, если дефект был расположен между обшивкой III и сотовым заполнителем IV, несмотря на то, что ПЭП находился в зоне дефекта, наблюдались пропадания звуковой автоматической сигнализации о дефекте (АСД). При попадании ПЭП на стенку сотового заполнителя II в зоне расслоения маркер дефектоскопа перемещался в направлении отличном от «нулевого» направления, т.е. направления маркера при отрыве ПЭП от поверхности образца (рис. 4, б), и происходило срабатывание сигнала АСД (дефект обнаруживался), при попадании ПЭП на середину ячейки сотового заполнителя II в зоне дефекта маркер перемещался в сторону «нулевого» направления, колебания маркера происходили в пределах очерченной зоны фрикционных шумов (ЗФШ), сигнал АСД при этом не срабатывал (рис. 4, а). В последнем случае механической связи верхних слоев с нижними не достаточно для выявления дефекта, поэтому дефект не обнаруживался. Данный факт является

мешающим фактором при контроле, так как может ввести в заблуждение дефектоскописта, а кроме того, вызвать затруднения при оконтуривании дефектной зоны. Его, безусловно, необходимо принимать во внимание при контроле семислойных конструкций с сотовым наполнителем.

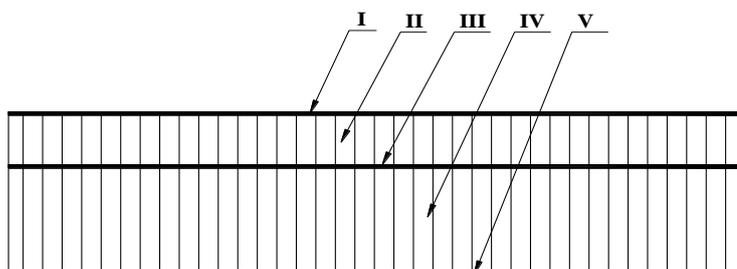


Рисунок 2 – Нумерация слоев в 5-слойной конструкции с сотовым наполнителем:
I, III, V – монолитные обшивки; II, IV – сотовый наполнитель

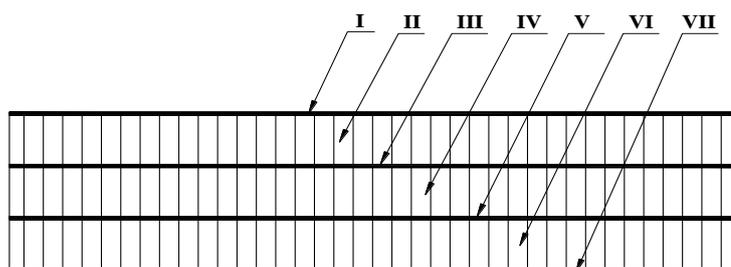


Рисунок 3 – Нумерация слоев в 7-слойной конструкции с сотовым наполнителем:
I, III, V, VII – монолитные обшивки; II, IV, VI – сотовый наполнитель

Отдельной проблемой при контроле семислойных конструкций является определение местоположения дефектов относительно слоев этих конструкций. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что при обнаружении в семислойном конструктивно-подобном образце дефекта типа расслоения в обшивке I или непрочности между обшивкой I и сотовым наполнителем II, маркер отклоняется от центра экрана в «нулевом» направлении, т.е. в ту же сторону, что и при отрыве датчика от поверхности образца как показано на рис. 4а. При обнаружении непрочности между обшивкой III и сотовым наполнителем IV маркер отклоняется как показано на рис. 6б и только при расположении преобразователя над стенкой сотового

заполнителя II. Таким образом, можно приближенно судить о месте расположения дефекта относительно слоев образца без привлечения дополнительных методов.

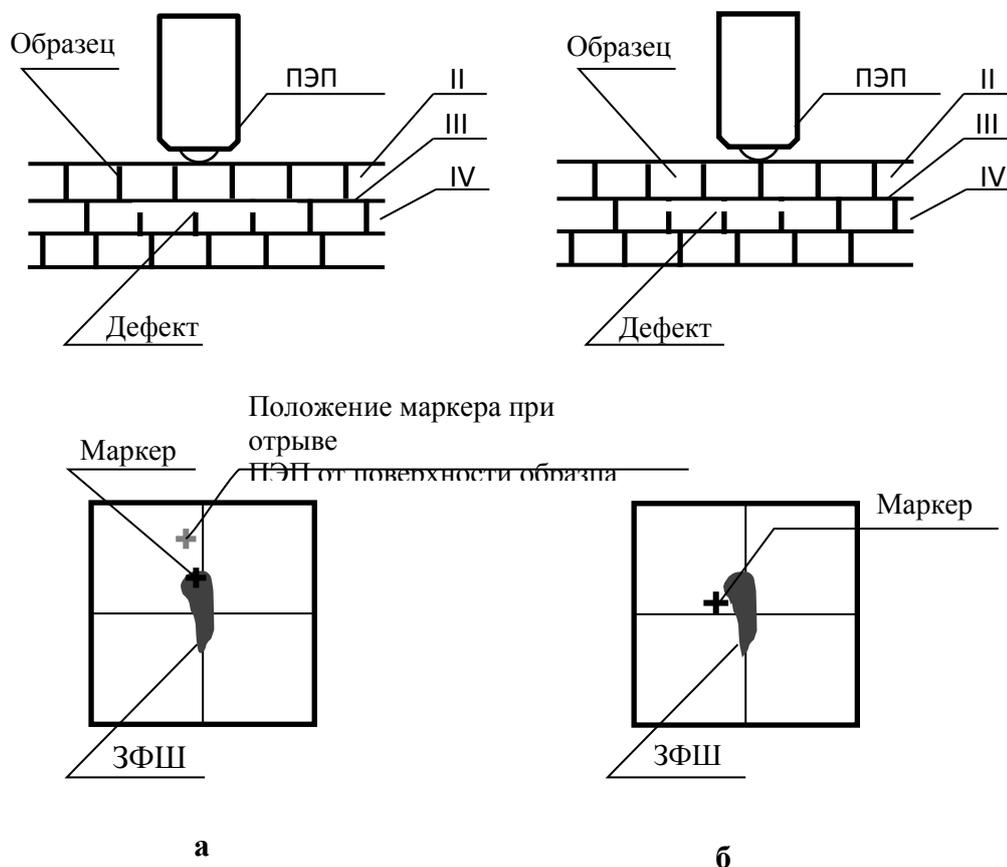


Рисунок 4 – Выявление дефектов в 7-слойных конструктивно-подобных образцах между обшивкой III и сотовым заполнителем IV при различном расположении ПЭП относительно ячейки сотового заполнителя II: а – ПЭП расположен на середине ячейки сотового заполнителя; б – ПЭП на стенке соты сотового заполнителя

Для проверки возможности определения расположения дефекта относительно слоев только по смещению фазы детектированного сигнала на КПО корпуса мотогондолы (рис. 1) был построен С-скан по поверхности образца. При этом измеряемым параметром было смещение фазы детектированного сигнала в каждой точке относительно «нулевого» значения смещения фазы при отрыве датчика от поверхности образца. На С-скан записывались только дефектные точки, в которых происходило срабатывание АСД. Результат приведен на рис. 5. Выявлено как значительное отклонение фазы детектированного сигнала на более глубоком дефекте, так и

продемонстрирован эффект отсутствия срабатывания АСД дефектоскопа на дефекте в слое IV при нахождении датчика над центрами сот слоя II.

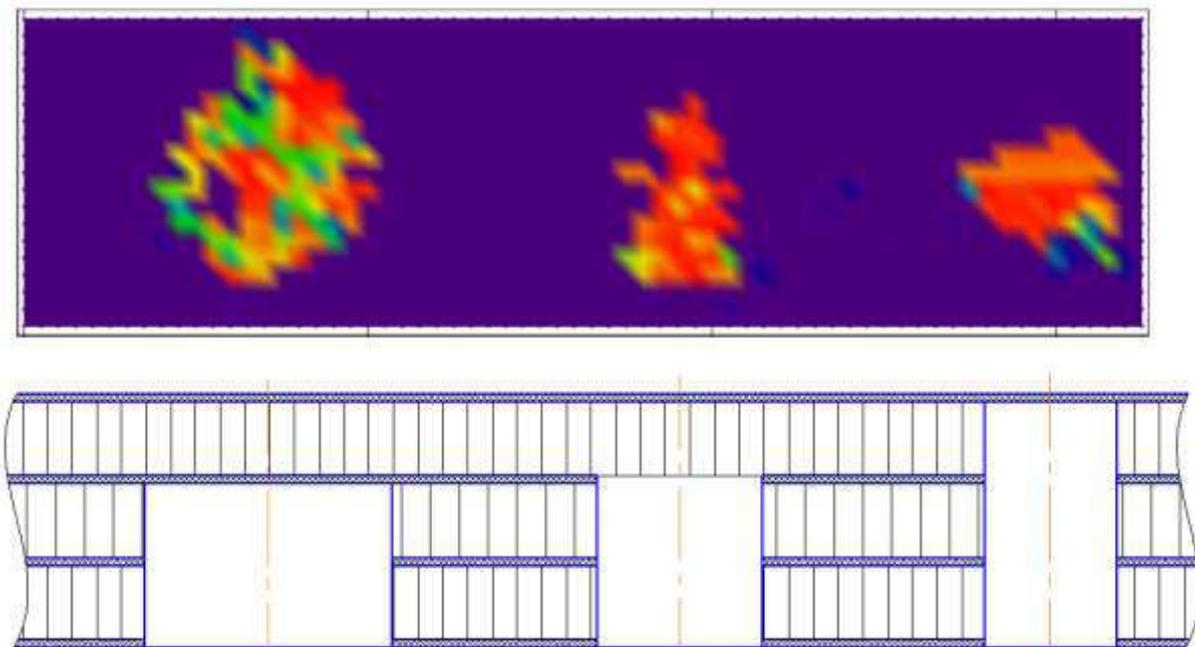


Рисунок 5 – С-скан КПО корпуса мотогондолы двигателя при контроле импедансным методом по критерию смещения фазы сигнала

Развитие методов автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля

Для создания новых методов исследований, контроля качества и диагностики технологических процессов, деталей и конструкций, обеспечивающих конкурентоспособный уровень качества и надежности авиационной техники гражданского, военного, специального назначения и технологий их производства, наибольшее внимание уделено созданию методов автоматизированного контроля.

Задачу автоматизированного контроля изделий из ПКМ в том числе многослойных с применением существующего на рынке оборудования решить в полной мере оказалось невозможным. Основные причины: наличие многочисленных недостатков у существующих комплексов и их чрезмерная стоимость для отечественной авиационной промышленности. На данный момент в России функционирует лишь одна установка подобного класса фирмы Tecnatom (стоимостью около 2 млн. долларов), реализующая только

теневого метод контроля с использованием струйного акустического контакта. Поэтому ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» в 2014-2015 г. был разработан и изготовлен полномасштабный макет автоматизированного комплекса для контроля деталей и агрегатов из ПКМ «МАК_ПКМ» (рис. 6). Разрабатывается опытно-промышленный комплекс для внедрения на технологической базе ОНПП «Технологии».

Комплекс «МАК_ПКМ» позволяет:

- реализовать эхо-импульсный и теневой (без использования контактной жидкости) методы ультразвукового контроля;
- контролировать детали с габаритными размерами до $2,0 \times 0,5 \times 1,5$ м;
- контролировать детали толщиной: до 24 мм для монолитных панелей из углепластика; до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика;
- представлять результаты в виде А, В и С – сканов. Разрешение С-скана не хуже 1×1 мм;
- настраивать комплекс для контроля деталей сложной формы двумя способами: «обучением» по точкам и импортом 3D-модели детали из CAD-программ.



Рисунок 6 – Макет автоматизированного комплекса для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ

На базе комплекса «МАК_ПКМ» были разработаны три технологических рекомендации по автоматизированному ультразвуковому неразрушающему контролю деталей и агрегатов из ПКМ (ТР 1.001-2015, ТР 1.002-2015 и ТР 1.003-2015) для эхо-импульсного и теневого методов контроля монолитных деталей и многослойных конструкций с сотовым наполнителем, а также для контроля тонкостенных конструкций двойной кривизны зеркально-теневым методом.

В части разработки новых методов применения электромагнитных и акустических полей для исследования структуры и процессов, протекающих в материалах при их производстве и эксплуатации ФГУП «ВИАМ» разработан метод автоматизированного теневого контроля многослойных и монолитных конструкций из ПКМ (таких как детали механизации крыла, рули высоты и направления самолетов, различных обтекателей, элементов лопастей вертолетов) с помощью роликовых катящихся ультразвуковых преобразователей (см. рис. 7). При использовании данных преобразователей акустический контакт обеспечивается без применения контактной жидкости, а также возможно проведение высокопроизводительного контроля при скорости движения датчика по поверхности изделия до 500 мм/с. Иностранные аналоги используют струйный контакт, что недопустимо для многих видов многослойных конструкций из ПКМ.



Рисунок 7 – Автоматизированный теневой ультразвуковой контроль изделий из ПКМ роликовыми катящимися преобразователями

Оценка достоверности результатов контроля

В части обеспечения возможности применения новых методов расчета ресурса, учитывающих вероятность разрушения детали из-за дефектов, пропущенных при НК, запланированной к реализации к 2030 г. ФГУП «ВИАМ» достигнуты существенные успехи. На данный момент задача решена практически в полном объеме.

На основе анализа научно-технической информации по вероятности обнаружения дефектов от их размеров [7, 8], для обработки статистических данных УЗК ПКМ ФГУП «ВИАМ» разработаны 2 алгоритма математической обработки данных УЗК для построения зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размеров и границ доверительного интервала. За аналог алгоритма обработки статистических данных, полученных при неразрушающем контроле ПКМ, был взят алгоритм обработки данных неразрушающего контроля металлических изделий, приведенный в [5]. Разработанный алгоритм основан на регрессионном анализе данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов и

транслировании данных анализа в вероятностную зависимость (рис. 8). Суть алгоритма заключается в следующем:

– для набора данных результатов контроля проводится линейная регрессия, по результатам которой строится линия регрессии вида $y(x) = a \cdot \ln x + b$

(x – площадь дефекта, $y(x)$ – амплитуда эхо-сигнала от дефекта, a и b – параметры линии регрессии) в системе координат с логарифмическим масштабом по оси x .

Вычисление дисперсии линии регрессии производится по формуле:

$$D = \frac{1}{n - k} \cdot \sum_{i=1}^n y_i - y(x_i) -^2, \quad (1)$$

где k – число коэффициентов, входящих в аналитическое выражение регрессии (для линейной регрессии $k = 2$); n – число данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов.

– Транслирование линии регрессии в вероятностную зависимость осуществляется путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей вида:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dt, \quad (2)$$

где a и σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение (СКО) нормального распределения вероятностей.

В качестве математического ожидания берется значение функции $y(x)$ в точке x_i , а в качестве СКО – корень квадратный из дисперсии линии регрессии.

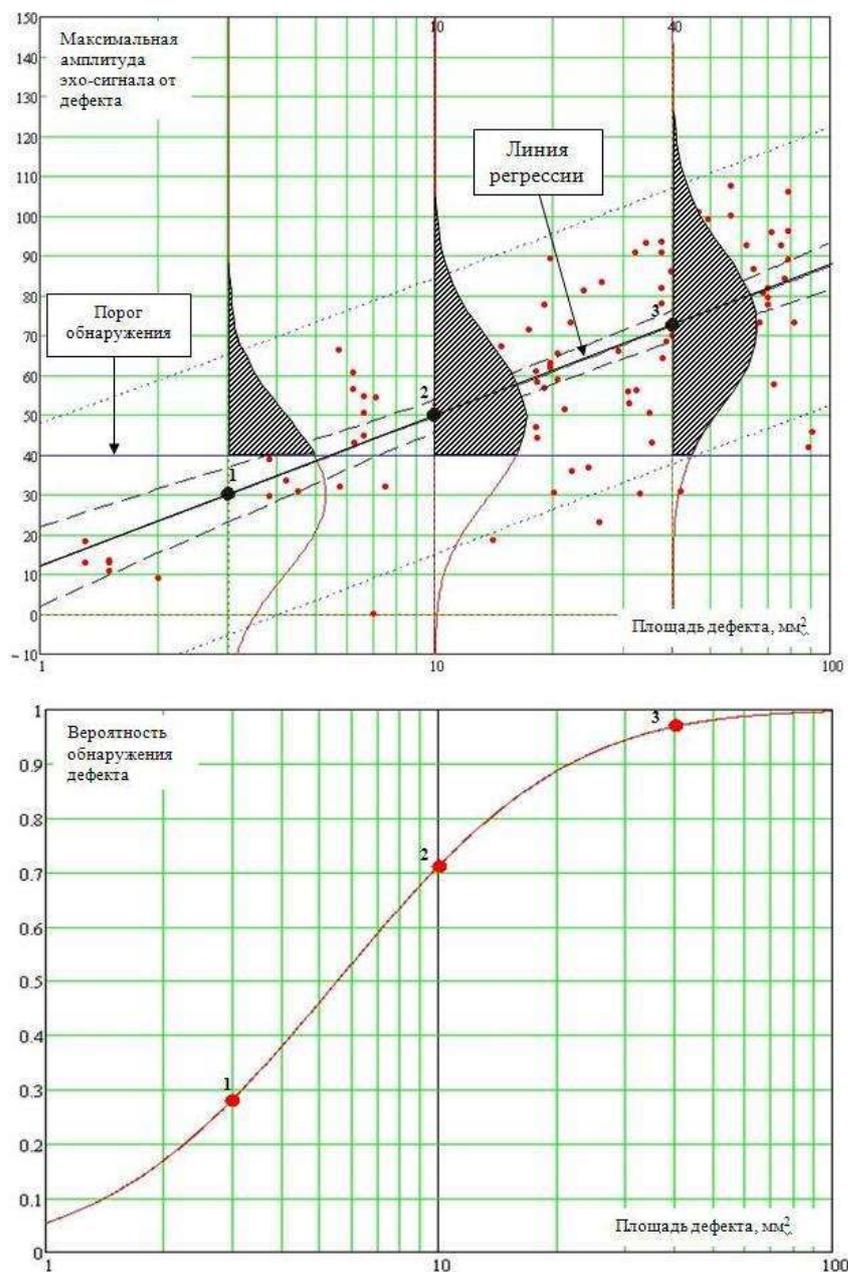


Рисунок 8 – Принцип транслирования данных регрессионного анализа в вероятностную зависимость

– Для построения границ доверительного интервала вероятности обнаружения дефектов от их размеров строятся границы доверительного интервала для регрессионной модели по формуле:

$$y_p(x) = y(x) \pm t_{p,n-2} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-2}}, \quad (3)$$

где $t_{p,n-2}$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% и $(n-2)$ степеней свободы; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$.

После чего эти границы транслируются в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей.

В программном комплексе MathCad реализован алгоритм построения зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров и границ 95%-ого доверительного интервала.

На основе разработанного алгоритма математической обработки статистических данных разработаны методический материал ММ 1.2.138-2012 «Определение вероятности обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле углепластиков» и руководящий технический материал РТМ 1.2.207–2012 «Оценка вероятности обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах различными методами неразрушающего контроля», которые являются руководствами при проведении вероятностной оценки достоверности результатов УЗК конструкций из углепластика. Разработанный ММ является первым нормативным документом в России, позволяющим проводить вероятностную оценку достоверности результатов НК при УЗК конструкций из углепластика по методикам эхо-импульсного НК с использованием ультразвуковых фазированных антенных решеток, а также с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. В основу разработанного ММ положен принципиально новый подход построения зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров. Согласно разработанной ММ можно определить величину параметра $a_{90/95}$, представляющую значение размера дефекта ПКМ,

выявляющегося при неразрушающем контроле в 90% случаев с доверительной вероятностью 95%. Этот параметр необходим конструкторам для расчета ресурса и периодичности технических осмотров изделий авиационной техники, содержащие детали и конструкции из ПКМ.

В соответствии с разработанным математическим аппаратом была проведена численная оценка вероятности обнаружения дефектов в трехслойных конструкциях из ПКМ при автоматизированном неразрушающем контроле тeneвым методом с созданием акустического контакта роликовыми катящимися преобразователями без применения контактной жидкости.

В соответствии с РТМ 1.2.207–2012 были построены зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размера при автоматизированном ультразвуковом контроле трехслойных сотовых конструкций из ПКМ тeneвым методом (рис. 9, 10).

В соответствии с данными графиками площадь дефекта, выявляемого разработанными технологиями автоматизированного неразрушающего контроля ультразвуковым тeneвым методом в 90% случаев с доверительной вероятностью 0,95 (95%) составляет 143,9 мм² при высоте сотового заполнителя до 40 мм, что соответствует выявлению расслоений и непрочлеев между сотами и обшивкой диаметром 13,5 мм при высоте сотового заполнителя до 40 мм, что соответствует мировым требованиям (технология должна обеспечивать выявление расслоений и непрочлеев между сотами и обшивкой диаметром 14 мм при высоте сотового заполнителя до 40 мм).

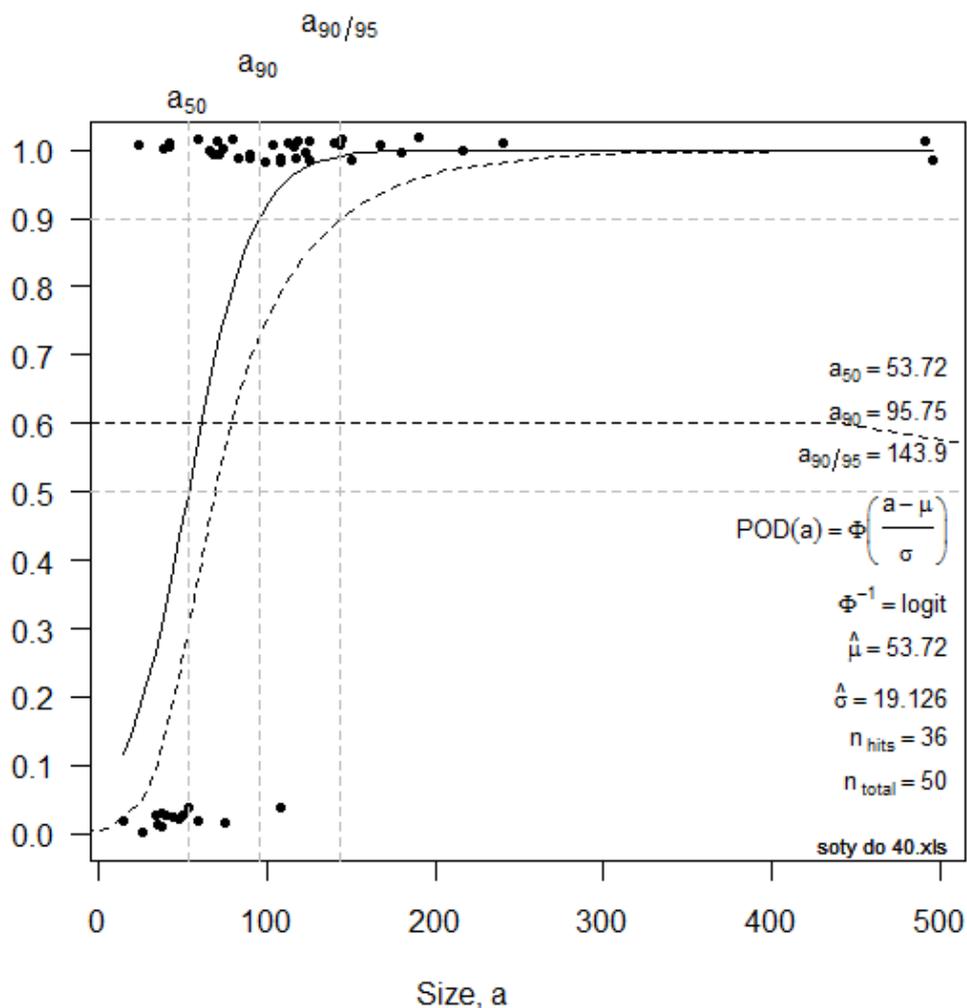


Рисунок 9 – Зависимость вероятности обнаружения дефектов от их размера при использовании разработанной технологии автоматизированного неразрушающего контроля ультразвуковым теньевым методом монолитных и сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика при высоте сотового заполнителя до 40 мм

Для конструкций с высотой сотового заполнителя до 80 мм, надежно выявляется дефект площадью 203,3 мм² что соответствует выявлению расслоений и непрочлеев между сотами и обшивкой диаметром 16,1 мм при высоте сотового заполнителя до 80 мм, что существенно превышает мировые требования (технология должна обеспечивать выявление расслоений и непрочлеев между сотами и обшивкой диаметром 25 мм при высоте сотового заполнителя до 80 мм).

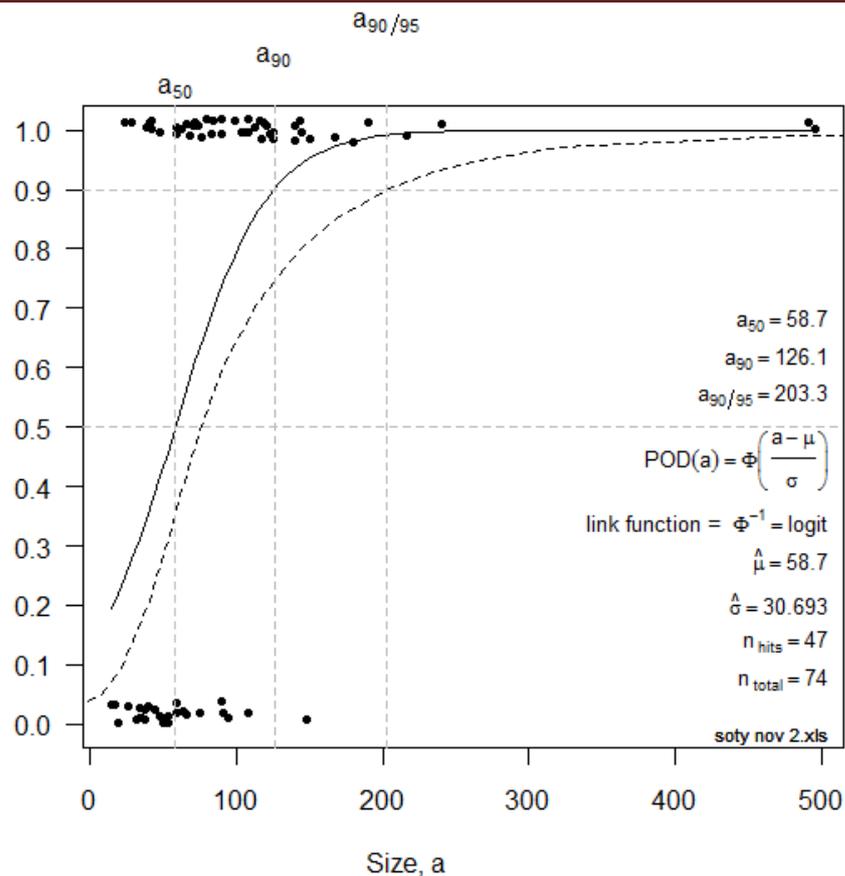


Рисунок 10 – Зависимость вероятности обнаружения дефектов от их размера при использовании разработанных технологий автоматизированного неразрушающего контроля ультразвуковым теневым методом монолитных и сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика при высоте сотового заполнителя до 80 мм

Выводы

В рамках проводимых ФГУП «ВИАМ» исследований по развитию методов неразрушающего контроля акустическими методами изделий авиационного назначения в виде трехслойных конструкций из ПКМ был разработан и изготовлен полномасштабный макет автоматизированного комплекса для контроля деталей и агрегатов из ПКМ. Комплекс позволяет реализовать эхо-импульсный и теневой (без использования контактной жидкости благодаря применению роликовых катящихся преобразователей) методы контроля, контролировать детали толщиной до 24 мм для монолитных панелей из углепластика и до 80 мм для сотовых панелей с обшивками из углепластика и стеклопластика.

В результате проведенных экспериментов и исследований конструктивно-подобных образцов мотогондолы двигателя была показана возможность применения импедансного метода для автоматизированного неразрушающего контроля пяти- и семислойных конструкций с целью выявления дефектов сотового заполнителя, а также дефектов между сотовым заполнителем и монолитными обшивками из углепластика. Кроме того, рассмотрена возможность определения местоположения (глубины) дефектов в пяти- и семислойных сотовых конструкциях.

Разработаны 2 алгоритма математической обработки данных контроля для построения зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размеров и границ доверительного интервала, основанных на регрессионном анализе данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов и транслировании данных анализа в вероятностную зависимость. Выпущена и внедрена на производстве соответствующая нормативная документация.

Изучена достоверность разработанных технологий автоматизированного контроля деталей из ПКМ с построением зависимостей вероятности обнаружения от размера дефектов. Выявляемость дефектов по ключевому параметру вероятности $a_{90/95}$ соответствует мировому уровню.

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3–33.

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 7–17.

3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники //Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 3–8.

4. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

5. Далин М.А., Генералов А.С., Бойчук А.С., Ложкова Д.С. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 64–69.

6. Генералов А.С., Чертищев В.Ю. Выявление расслоений и непроклеев в 5- и 7-слойных сотовых деталях и элементах конструкций из ПКМ акустическим методом // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3.

7. Department of Defense Handbook: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment, MIL-HDBK-1823A, 7 April 2009.

8. Ulf SCHNARS, Andreas KÜCK «Application of POD Analysis at Airbus». // 4th European-American Workshop on Reliability of NDE – We.3.A.1.

УДК 620.179.13

Разработка методики активного одно-и двухстороннего теплового контроля углепластиковых элементов планера самолета ТВС-2ДТС в условиях производства

Чулков А.О.¹, к.т.н.; Вавилов В.П.¹, д.т.н.; Серьёзов А.Н.², д.т.н.;
Брагин А.А.², к.т.н.

chulkovao@tpu.ru¹, vavilov@tpu.ru¹, sibnia@sibnia.ru², bragina@sibnia.ru²

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

²*Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени
С.А. Чаплыгина*

Аннотация:

*Описана методика и аппаратура активного теплового контроля на
примере диагностики элементов цельнокомпозитного самолета в условиях
производства.*

Ключевые слова:

*композиционный материал, дефект, неразрушающий контроль,
активный тепловой контроль*

Введение

Технический прогресс в области изготовления различного рода элементов конструкций из композиционных материалов сделал возможным создание цельнокомпозитных самолетов, призванных снизить экономические издержки на их производство и эксплуатацию [1].

Большие площади несущих композиционных элементов авиационных конструкции, несмотря на высокий запас прочности благодаря их

существенной толщине, требуют использования высокопроизводительных неразрушающих испытаний. В настоящее время дефекты в углепластиковых и стеклопластиковых авиационных панелях, в основном, обнаруживают с помощью ультразвукового метода [2].

В последнее время отечественные производители авиакосмической и ракетной техники проявляют активный интерес к тепловому контролю (ТК). Ввиду высокой производительности испытаний и приемлемой достоверности результатов контроля основной задачей теплового метода является проведение предварительной диагностики с целью локализации дефектных областей [3]. Разнообразие используемых методов тепловой стимуляции объектов контроля обеспечивает обнаружение различных типов скрытых дефектов как в отдельных элементах, так и в готовых крупногабаритных конструкциях [4, 5].

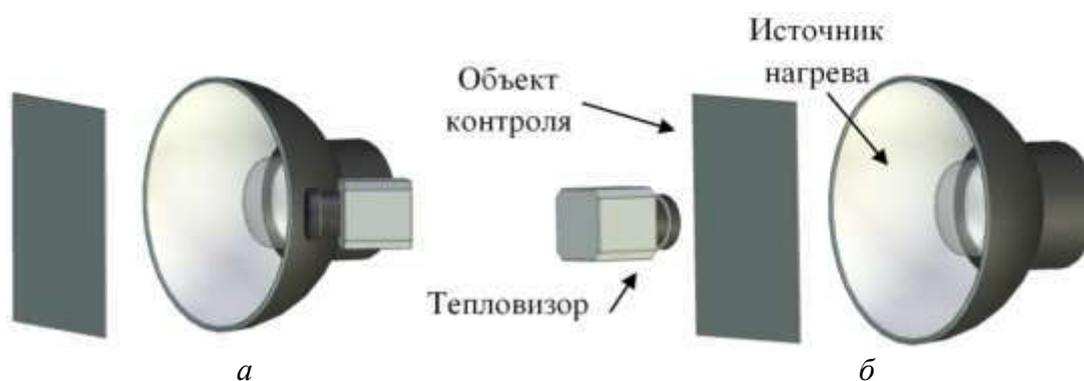
В данной работе описаны методика и аппаратура активного ТК элементов конструкции введенного в эксплуатацию цельнокомпозиционного легкого многоцелевого самолета ТВС-2ДТС, разработанного СибНИА им. Чаплыгина, г. Новосибирск.

Методика и аппаратура для проведения теплового контроля в условиях производства

Изготовление композиционных элементов конструкции и планера самолета путем формирования препрегов в ручном режиме сопровождается появлением скрытых дефектов на стадии производства, зачастую вызванных ошибками персонала. К дефектам подобного рода относятся посторонние предметы, попавшие между слоями изготавливаемого элемента конструкции. Наиболее распространенными включениями являются фрагменты бумаги и полиэтилена, не удаленные с клеевых поверхностей отдельных слоев препрега и попавшие, таким образом, в пирог заготовки изделия. Несплошность в виде бумаги препятствует адгезии между слоями и представляет собой дефект в виде расслоения, который с высокой вероятностью обнаруживается активным ТК. Дефекты в виде

полиэтиленовых включений, в большинстве случаев, трудно обнаруживаются из-за расплавления полиэтилена и спекания слоев композита в процессе отверждения заготовки в автоклаве. Кроме посторонних включений, существует вероятность возникновения дефектов в виде трещин и расслоений вследствие механических нагрузок при обработке и транспортировке отдельных элементов, а также при сборке готовых конструкций.

Проведение неразрушающих испытаний в условиях производства подразумевает наличие полного доступа к объекту контроля для реализации одно- и двухстороннего ТК (рисунок 1).



а – односторонняя процедура; *б* – двухсторонняя процедура
Рисунок 1 – Процедуры теплового контроля

Двухсторонний ТК, при котором источники тепловой стимуляции размещают с одной стороны контролируемого изделия, а тепловизор - с другой, обеспечивает лучшие показатели обнаружения дефектов за счет прямого распространения тепла от одной поверхности объекта контроля до другой, вследствие чего обеспечивается лучший температурный контраст дефектов по сравнению с односторонней процедурой. Кроме того, двухсторонняя процедура характеризуется низким уровнем тепловых помех, вызванных побочным излучением источников нагрева. В случае наличия одностороннего доступа к изделию процедура активного ТК дополняется аппаратными и программными средствами подавления тепловых помех, вызванных отраженным излучением источника нагрева как во время его

работы, так и после выключения. В данном случае речь идет о реализации классического оптического нагрева с использованием галогеновых ламп или импульсных ламп в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1. Оптический нагрев применим для обнаружения дефектов в виде расслоений и включений размерами от 10 мм в диаметре и раскрытием более 10% от толщины изделия, при этом контролируемая толщина, как правило, ограничивается 6 мм.

Для обнаружения мелких дефектов и трещин в отдельных элементах простой и сложной формы может применяться контактный способ ультразвуковой стимуляции (сам метод называют ультразвуковой ИК термографией). В объект контроля точно посредством пьезоэлектрических или магнитострикционных преобразователей (рисунок 2) электрической мощностью до 2 кВт вводят механические колебания с ультразвуковой частотой от 1 до 110 кГц, которые обеспечивают генерацию тепла трущимися поверхностями дефектов. Температурные сигналы над дефектами могут достигать десятков градусов на фоне ненагретых бездефектных областей, что обеспечивает их надежное обнаружение. К сожалению, особенности данного метода малоизучены.

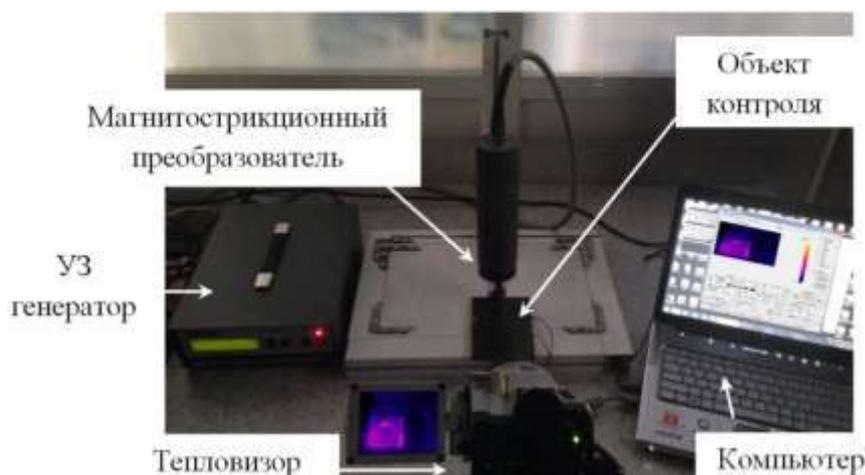


Рисунок 2 – Аппаратура для реализации контактного ТК с использованием ультразвуковой тепловой стимуляции

Для регистрации нестационарных тепловых процессов на поверхности контролируемых изделий используют тепловизор, например, в нашем случае

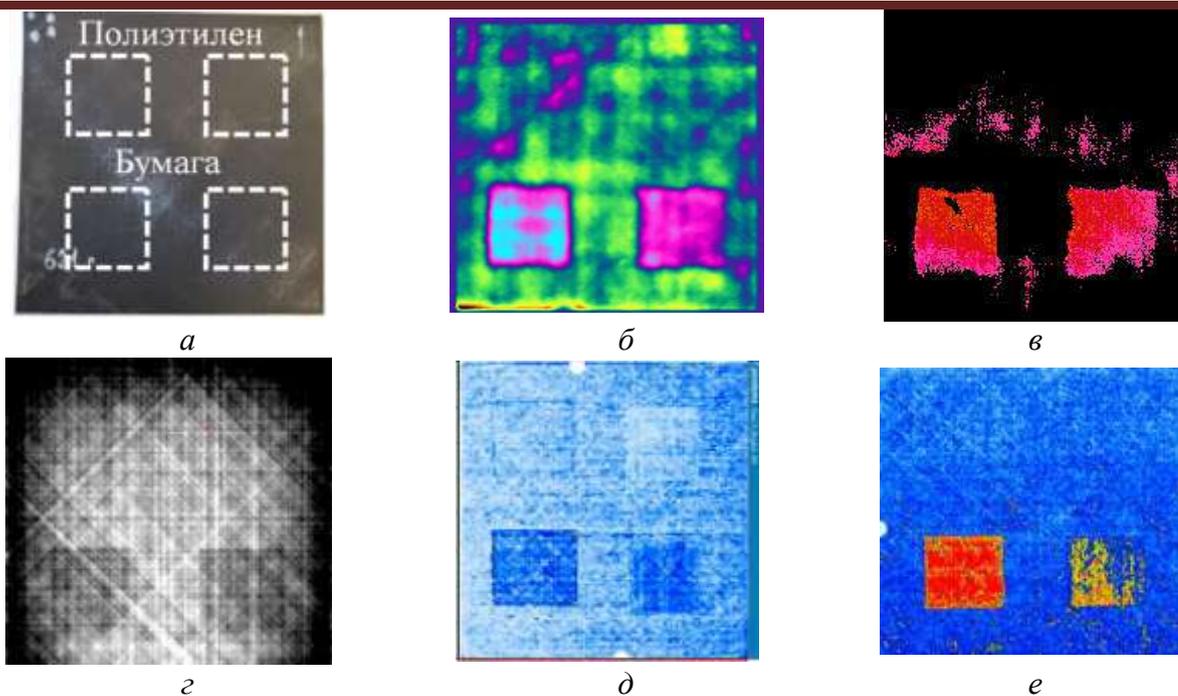
мы применяем тепловизионный модуль FLIR A325sc с температурной чувствительностью 0,06 К и спектральным диапазоном 7-13 мкм.

Для одностороннего контроля композиционных изделий толщиной до 6 мм в большинстве случаев длительность нагрева составляет 5 секунд, в двухсторонней - 10 секунд, если применяют галогеновые лампы. Длительность ультразвукового нагрева также устанавливают равной 5 секундам. Регистрацию нестационарной температуры объектов контроля осуществляют как на стадии нагрева, так и на стадии охлаждения. Выбор расстояния от контролируемого изделия до тепловизора обуславливается мощностью нагревателя и углом зрения камеры; в описанных ниже процедурах стандартное расстояние составляло 0,4 м. Результаты контроля обрабатывают специализированным программным обеспечением, например, Thermofit Pro (НИ ТПУ), для определения параметров выявленных дефектов, а том числе в автоматизированном режиме.

Результаты проведения активного ТК углепластиковых конструктивных элементов самолета

Для анализа возможностей обнаружения ранее описанных производственных дефектов с использованием ТК были проконтролированы три стандартных образца с искусственными дефектами.

Первым образцом служила углепластиковая пластина размером 300×300×2,3 мм с четырьмя искусственными дефектами из полиэтилена и бумаги размерами 100×100 мм, заложенными на различных глубинах. Использовали активный ТК в двухсторонней процедуре. В качестве контрольных методов неразрушающего контроля были применены рентгеновский, а также ультразвуковой метод с использованием фазированных решеток, причем объект контроля размещали в «водяной ванне». Результаты контроля данного образца приведены на рисунке 3.



a – фото изделия и схема дефектов; *б* – карта температуропроводности; *в* – тепловая томограмма; *г* – рентгенограмма на 100 кЭв; *д* – ультразвуковой контроль, С-срез на глубине 1,9-2,19 мм; *е* – ультразвуковой контроль, С-срез на глубине 0,4-0,62 мм
Рисунок 3 – Результаты контроля стандартного образца из углепластика.

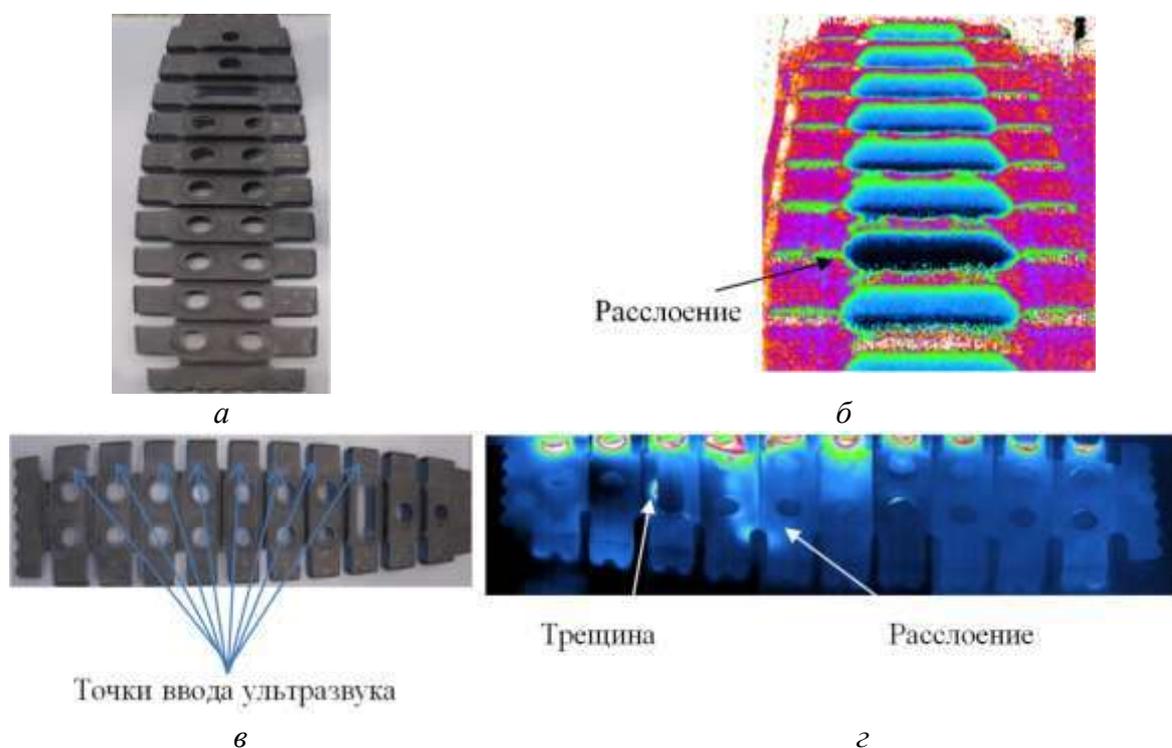
Для нагрева пластины были использованы две галогеновые лампы мощностью по 1 кВт каждая. Дефекты из полиэтилена тепловым методом практически не обнаруживались, по-видимому, вследствие отсутствия расслоений, а также сходных теплофизических характеристик полиэтилена и матрицы композита. Что касается контрольных методов, то полиэтилен был обнаружен только с использованием ультразвукового контроля на срезе глубины 1,9-2,19 мм.

Вторым образцом являлась углепластиковая нервюра, содержащая расслоения вокруг технологических отверстий, а также расслоения ребер жесткости. Изделие было проконтролировано тепловым методом с применением оптической и ультразвуковой стимуляции; результаты приведены на рисунке 4.

Классическую двухстороннюю процедуру реализовали с помощью галогеновой лампы мощностью 1 кВт, расположенной под углом к ребрам жесткости нервюры. Температуру снимали с другой стороны нагреваемых ребер с помощью тепловизора, расположенного под углом к контролируемой

поверхности. Выявленная дефектная зона характеризуется низким значением теплопроводности ввиду наличия воздушной прослойки в качестве дефекта (рисунок 4б).

Ультразвук вводили в каждую отдельную секцию нервюры согласно рисунку 4в. Результирующая ИК термограмма, сшитая из отдельных термограмм секций, приведена на рисунке 4г. Выявленные трещины, распространившиеся от дефектного ребра в основную пластину, а также локализованные вокруг некоторых отверстий, характеризуются зонами повышенных температур с достаточно резкими границами.

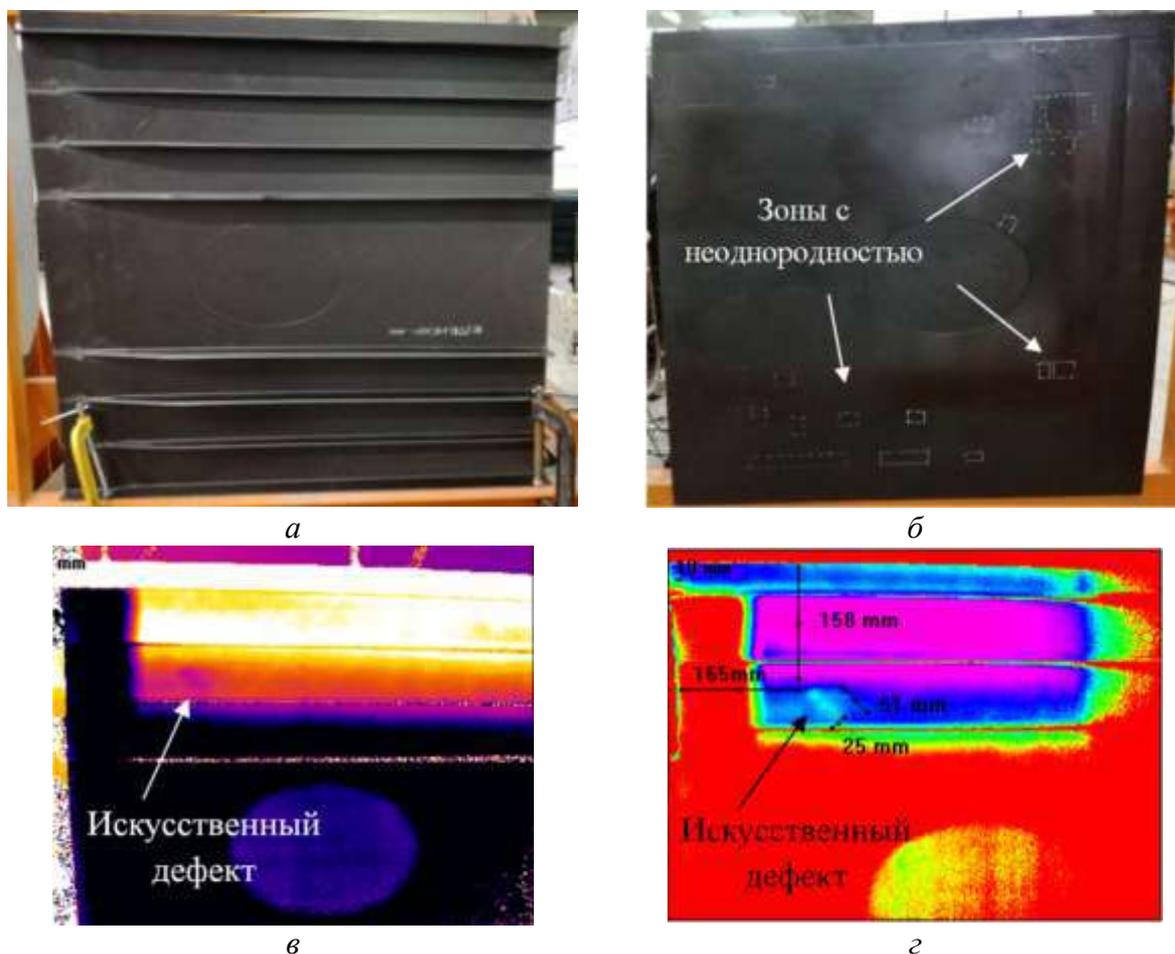


а – фотография изделия; б – карта теплопроводности; в – схема ввода ультразвуковых колебаний; г – результирующая термограмма при ультразвуковом возбуждении

Рисунок 4 – Результаты активного ТК нервюры из углепластика при оптическом нагреве

Третий стандартный образец представляет собой часть углепластиковой панели – крыла самолета ТВС-2ДТС (рисунок 5а) размерами 1×1 м. Панель усилена стрингерами и ее толщина варьируется от 2,26 до 11,3 мм. Изделие содержало искусственные дефекты в виде

полиэтилена и бумаги, заложенные на различных глубинах. Предварительные испытания ультразвуковым методом выявили зоны с неоднородностью, которые обозначены белым маркером на рисунке 5б.



а – внутренняя поверхность, сторона А; б – внешняя поверхность, сторона Б; в – карта температуропроводности; г – коррелограмма

Рисунок 5 – Фото стандартного образца с выявленными дефектами ультразвуковым методом (области, отмеченные белым маркером):

ТК изделия проводили в условиях производственного цеха в одно- и двухсторонней процедурах, осуществляя нагрев галогеновыми лампами общей мощностью 30 кВт и 2 кВт. Результаты дефектоскопии приведены на рисунках 5в и 5г. Обнаружен один искусственный дефект, представляющий собой расслоение размером 25×51 мм. Низкая эффективность контроля, в первую очередь, связана с существенной толщиной изделия, которая варьируется вдоль образца. Кроме того, влияние тепловой помехи в виде отраженного излучения источника нагрева при его длительной работе осложнило интерпретацию результатов контроля. Одним из путей решения

данной проблемы является перекрытие или перемещение нагревателя после окончания нагрева.

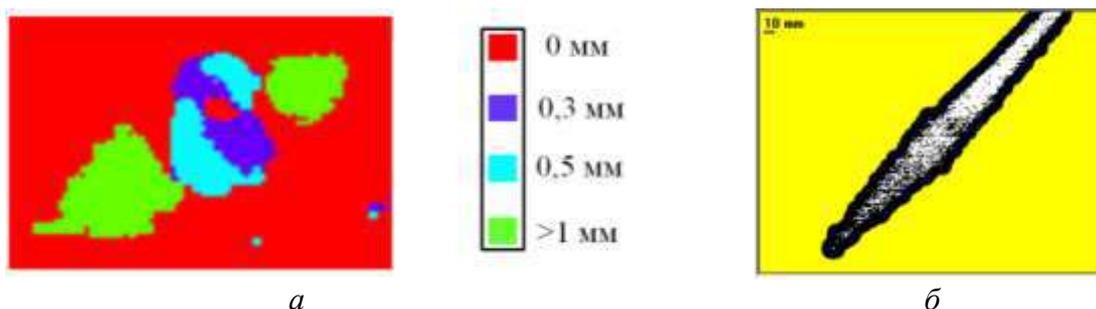
На рисунке 6 приведен модульный тепловой дефектоскоп, разработанный в НИ ТПУ, с автоматизированным механизмом изменения направления светового потока. Источники нагрева в исходном положении отвернуты от контролируемой поверхности. В момент начала контроля поворотный механизм, контролируемый компьютером, направляет поток излучения ламп на область контроля. После окончания нагрева лампы возвращаются в исходное положение. Данная техника исключает отражение горячих элементов нагревателей от поверхности изделия после их выключения, что, в свою очередь, обеспечивает снижение уровня аддитивных помех.



Рисунок 6 – Модульный тепловой дефектоскоп на базе галогеновых ламп суммарной мощностью 2 кВт

В ТК широко применяют программное подавление тепловых помех и повышение температурного контраста над скрытыми дефектами. Используют различные приемы обработки ИК термограмм, например, анализ главных компонент, Фурье анализ, корреляционный анализ, временную и пространственную фильтрацию, построение карт температуропроводности и тепловой инерции и другие алгоритмы, входящие, в частности, в программу ThermoFit Pro Томского политехнического университета. В последнее время ведутся активные исследования в области тепловой томографии и автоматизации обнаружения дефектов. Примеры применения алгоритмов приведены на рисунке 7. Метод тепловой томографии позволяет

проанализировать изменение формы и расположения многокомпонентных дефектов на различных глубинах (в большинстве случаев до 4 мм) в многослойных композитах. Алгоритм автоматизации процедуры обнаружения дефектов и определение их габаритных размеров призван снизить разброс контролируемых параметров, что зачастую обусловлено человеческим фактором, включая уровень подготовки операторов-термографистов.



a – тепловая томография ударного повреждения углепластикового композита толщиной 4 мм; *б* – пример автоматизированный обнаружения дефектной области с учетом диффузионного размывания её границ

Рисунок 7 – Примеры использования программных алгоритмов для проведения дефектометрии

Заключение

Высокая производительность, бесконтактный характер испытаний, наглядность результатов, а также гибкость в отношении формы контролируемых элементов и типов скрытых дефектов, что обеспечивается широкой номенклатурой аппаратуры для тепловой стимуляции, делает тепловой метод контроля весьма привлекательным для авиакосмической, ракетной и других высокотехнологичных отраслей промышленности. Однако для определения предельных возможностей активного ТК применительно к авиационным композиционным материалам требуется определенная база стандартных образцов с искусственными дефектами, имитирующими такие реальные дефекты, которые приводят к ослаблению прочности ответственных конструкций. Дальнейшее разработка и усовершенствование программных алгоритмов и аппаратной части тепловых дефектоскопов приведет к созданию роботизированных комплексов для проведения

теплового неразрушающего контроля крупногабаритных изделий с производительностью до 30 м²/час (такие работы проводятся в Томском политехническом университете).

Алгоритм идентификации дефектов разработан и реализован в рамках гранта Российского научного фонда № 17-79-10143. В экспериментальных исследованиях использованы образцы и аппаратура, изготовленные в рамках гранта Российского научного фонда № 17-19-01047.

Литература

1. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность. 1997. № 3. С. 1–7.
2. Zhang Z., Richardson M., Nondestructive Testing of Composite Materials // Handbook of Multiphase Polymer Systems. 2011. Vol. 1. P. 777–796.
3. Nondestructive Testing Handbook. Infrared and Thermal Testing. A.S.N.T., U.S.A., 2001. Vol. 3. P. 714.
4. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A., Pan Y. Thermal NDT research at Tomsk Polytechnic University // Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2016. P. 1–16.
5. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Vol. 53. Issue 10. P. 707–730.

УДК 620.178.151.2

О необходимости единого подхода к определению механических характеристик материалов изделий, изготовленных по аддитивным технологиям методами индентирования

Краснов И. О.; Ильинский А.В.; Степанова К.А.; Кашапова И.А.

kio@ntc-etalon.ru, allill003@mail.ru, ledy.xs93@yandex.ru, fox1g90@mail.ru

¹ Университет ИТМО.

Аннотация:

Рассмотрены актуальные вопросы контроля механических характеристик материалов, изготовленных по аддитивным технологиям. Обозначены актуальность и перспективность перехода к безобразцовому контролю механических характеристик аддитивных материалов. В качестве безобразцового метода неразрушающего контроля предложен метод динамического индентирования. Рассмотрена проблематика определения действительных значений механических характеристик аддитивных материалов. Предложены тезисы, которые могут послужить основой для разработки единого подхода в определении механических характеристик материалов изделий, синтезированных по аддитивным технологиям.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, механические характеристики, твердость, индентирование

Аддитивные технологии сегодня являются одним из самых динамично развивающихся направлений цифрового производства. Практическая реализация аддитивных технологий требует комплексного решения задач разработки:

- технологий синтеза деталей;
- исходных материалов и полуфабрикатов;
- установок аддитивных производств;
- технологий испытаний и контроля.

Следует отметить, что одним из ключевых моментов для их внедрения, как отмечалось специалистами ВИАМ, ОАО «Композит» и др., является разработка технологий неразрушающего контроля изделий, синтезированных с помощью аддитивных технологий.

На сегодняшний день нормативное регулирование в сфере контроля материалов и изделий, изготовленных по аддитивным технологиям осуществляется следующими стандартами:

1) ГОСТ Р 57556-2017 Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. Этот стандарт регламентирует порядок испытаний металлических порошков, являющихся сырьем в аддитивном производстве [1].

2) ГОСТ Р 57587-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Настоящий стандарт устанавливает основные требования к методам контроля и испытаний изделий, полученных методом аддитивных технологических процессов [2].

Указанные нормативные документы были введены в действие 1 декабря 2017 года.

Кроме этого, в настоящее время ряд других стандартов находится на стадии рассмотрения.

При этом стоит отметить, что предлагаемые в ГОСТ Р 57556-2017 методы контроля и испытаний механических характеристик металлических

порошков и металлических композиций, а именно испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, на ударный изгиб, являются разрушающими [3].

Однако, данный подход имеет следующие недостатки:

- 1) необходимость дорогостоящего стационарного оборудования;
- 2) необходимость наличия образцов-свидетелей из одного производственного цикла вместе с объектом контроля;
- 3) невозможность оперативной оценки без нарушения целостности объекта контроля;

Видится целесообразным, что наряду с разрушающими методами испытаний следует шире внедрять безобразцовые методы и средства контроля механических свойств материалов изделий, синтезированных с помощью аддитивных технологий.

Отдельного внимания заслуживает метод динамического индентирования, в основе которого лежит непрерывная регистрация процесса ударного локального контактного взаимодействия индентора с испытываемым изделием (материалом). Данный метод является одним из наиболее перспективных методов механических неразрушающих испытаний и используется как при исследованиях механических характеристик материалов, так и при контроле качества материалов в процессе производства и эксплуатации.

Однако, для корректного применения данного метода, а также использования других стандартизированных методов испытаний на твёрдость, например, метод инструментального индентирования (ГОСТ Р 8.748-2011), метод Бринелля (ГОСТ 9012-59) и т.д. необходима разработка единого методического подхода в определении действительных значений механических свойств материалов изделий, синтезированных с помощью аддитивных технологий [4-5].

Таким образом, мы можем выделить два актуальных вопроса в части контроля механических характеристик материалов, синтезированных по аддитивным технологиям:

1) переход от образцовых методов контроля механических характеристик изделий (материалов), изготовленных по аддитивным технологиям к безобразцовым испытаниям;

2) необходимость разработки единого методического подхода при переходе к безобразцовым методам определения действительных значений механических свойств изделий (материалов), произведенных по аддитивным технологиям.

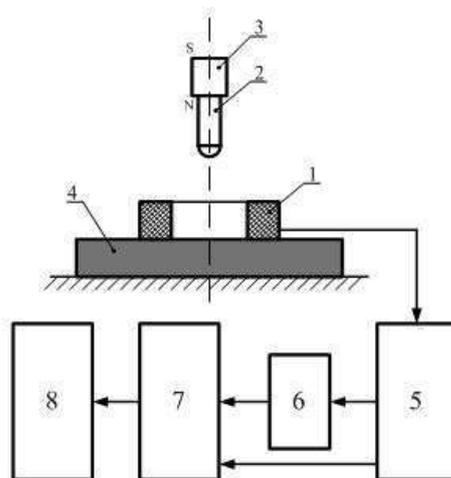
2. Переход к безобразцовым методам контроля механических характеристик изделий (материалов), изготовленных по аддитивным технологиям

Как уже отмечалось, в качестве безобразцового метода контроля мы предлагаем использование метода динамического индентирования. В основе данного метода лежит модификация Метода Либа (HL), предложенного в 1975г швейцарским инженером Дитмаром Либом, работавшим в компании Proseq SA. Метод динамического индентирования схож по своему физическому смыслу с методом Шора, с той лишь разницей, что в рассматриваемом методе определяющим параметром является не высота отскока индентора (бойка), а соотношение скорости индентора до и после удара.

Данный метод заключается в оценке физико-механических характеристик по параметрам процесса внедрения индентора в испытуемый материал. Изменение механических характеристик можно оценить только при условии, что приборное оборудование позволяет получить полную диаграмму «контактное усилие - глубина внедрения» («P – h»), получаемую в результате процесса испытаний. Такими возможностями обладает магнитоиндукционная установка, позволяющая бесконтактным способом определять скорость перемещения индентора в процессе его внедрения в испытуемый материал.

Электрическая часть данной установки представляет собой систему аналого-цифрового преобразования сигнала индукционного датчика с выводом

информации в цифровом виде в память персонального компьютера (ПК) для ее последующей обработки. Общий вид схемы получения и преобразования первичных данных приведен на рисунке 1.



1 – индукционный преобразователь;

2 – индентор; 3 – постоянный магнит; 4 – исследуемый материал;

5 – предварительный усилитель; 6 – блока синхронизации; 7 – АЦП; 8 – ПК

Рисунок 1 – Схема получения и преобразования первичных данных процесса внедрения индентора в материал

Чувствительным элементом магнитоиндукционной установки является индукционный преобразователь (катушка индуктивности) 1, входной величиной которого является скорость изменения магнитного потока, создаваемого закрепленным на инденторе 2 постоянным магнитом 3 при его перемещении относительно преобразователя 1. Энергия, при которой происходит взаимодействие индентора 2 и исследуемого материала 4, определяется только начальной высотой падения индентора 2, т.е. дополнительные внешние силы, ускоряющие падение индентора 2, к нему не прикладываются. Следовательно, в процессе удара на индентор 2 действуют только сила тяжести и силы сопротивления деформируемого материала 4. Наводимая при этом в индукционном преобразователе 1 электродвижущая сила (ЭДС) индукции, линейно масштабируется с помощью предварительного усилителя 5, а затем подается на вход аналого-цифрового

преобразователя (АЦП) 7 и блока синхронизации 6, ответственного за определение момента времени, когда начинается процесс соударения индентора 2 и испытуемого материала 4. Использование блока 6 позволяет производить аналого-цифровое преобразование только той части сигнала с чувствительного элемента 1, которая несет в себе информацию о свойствах контролируемого материала 4. Дальнейшая обработка сигнала осуществляется ПК 8 по специальным алгоритмам.

3. Единый методический подход в определении действительных значений механических свойств изделий (материалов), произведенных по аддитивным технологиям.

Как известно, при проведении измерений механических характеристик материалов, в том числе изготовленных по аддитивным технологиям известными методами, мы можем столкнуться с необъективностью и недостоверностью получаемых результатов. Подобные исследования, проводимые по различным методикам, существенно затрудняют контроль и определение действительных значений механических свойств и как следствие затрудняют их дальнейшие сопоставление и оценку.

Рассмотрим этот тезис подробнее на примере определения значений твердости материалов различными методами.

Твердость - способность материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размера.

Существуют несколько методов определения твердости на основе индентирования:

- метод Бринелля (HB);
- метод Виккерса (HV);
- метод Роквелла (HRA, HRB, HRC и т.д.);
- метод Шора (HS);
- метод Либа (HL).

Суть данных методов всем широко известна, тем не менее, стоит обратить внимание на размерность получаемых значений твердости.

Прежде всего, представленные методы следует разделить на две категории по характеру индентирования: статические и динамические. К статическим относятся методы Бринелля (1), Виккерса (2), Роквелла (3), а к динамическим – методы Либа (4) и Шора. Сгруппировав методы по характеру воздействия, следует определить размерность получаемых значений твердости. Общепринято, что получаемые в ходе измерений представленными методами величины являются безразмерными и обозначаются в соответствии с нормативными документами на каждый из методов, но если посмотреть на расчётные формулы вычисления получаемых значений также корректно будет перейти к размерности:

$$HB \quad HBW = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D \sqrt{D - \sqrt{D^2 - d^2}}} = \frac{H}{\text{мм}^2} \quad 1 ,$$

где D – диаметр шарика, мм; F – усилие, Н; d – диаметр отпечатка, мм.

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} = \frac{H}{\text{мм}^2} \quad 2 ,$$

где F – усилие, Н; d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

$$HR = N - \frac{H - h}{s} = \text{мм} \quad 3 ,$$

где N , s – константы, зависящие от конкретной шкалы; H – глубина проникновения индентора по основной нагрузкой, мм; h – глубина проникновения индентора по предварительной нагрузкой.

$$HL = \frac{v_1}{v_2} \quad (4)$$

Таким образом, в статических методах численным значением твердости является отношение приложенной нагрузки к площади поверхности получаемого отпечатка индентора (методы Бринелля и Виккерса) или глубина проникновения твердого индентора в исследуемый материал (метод Роквелла).

В случае с динамическими методами значения твердости действительно являются безразмерными величинами (метод Либа), поскольку вычисляются как соотношение скорости индентора до и после ударного взаимодействия с исследуемой поверхностью. В случае, когда определяется высота отскока бойка (индентора) в результате его падения с заданной высоты (метод Шора) на поверхность исследуемого материала (изделия) значения твердости оцениваются в миллиметрах.

Таким образом на представленном примере можно сделать вывод: каждый метод с той или иной точностью позволяет определить значения твердости исследуемого материала, однако сопоставить полученные результаты и оценить насколько они близки к действительным значениям сложно.

Поэтому на наш взгляд необходима разработка единого методического подхода в определении действительных значений механических свойств изделий (материалов), произведенных по аддитивным технологиям который бы учитывал следующие факторы:

1) Масштабный фактор – совокупность геометрических характеристик (форма и размеры) оказывающих влияние на определение значений механических свойств исследуемого образца. В данном случае стоит обратить внимание на то, что размер образцов влияет на напряженное состояние и как следствие, при увеличении размера, влечет за собой снижение механических свойств по объему образца. Таким образом при одинаковых условиях и параметрах нагружения, для образцов разных размеров, различие получаемых значений механических свойств обуславливаются масштабным фактором.

2) Механический фактор – фактор определяющий воздействие схемы и величины прикладываемой нагрузки, а также формы и размера индентора на проведение измерений. В зависимости от указанных параметров и при геометрическом подобии исследуемых образцов мы можем получать различные значения показателей механических свойств исследуемых

аддитивных материалов. Так, например, при увеличении нагрузки на исследуемый образец полученные значения твердости будут снижаться, а при уменьшении нагрузки, значения наоборот будут расти.

Подводя итоги, следует сказать, что измерение действительных значений показателей механических свойств зависит от большого количества переменных, которые необходимо учитывать. Поэтому в качестве дальнейшего направления работ по решению данного вопроса следует выделить следующие направления:

1. Переход к безобразцовому контролю аддитивных материалов (изделий) синтезированных по аддитивным технологиям. Современные стандарты делают ставку в первую очередь на разрушающий контроль с использованием образцов свидетелей, что как отмечалось, существенно осложняет и удорожает контроль. Поэтому первым шагом будет являться переход к безобразцовому контролю аддитивных материалов (изделий) методом динамического индентирования.

2. Совершенствование нормативно-технической базы в области контроля механических свойств аддитивных материалов. Следующим шагом будет являться разработка нормативно-технической документации, на основе единого методического подхода в определении действительных значений механических характеристик аддитивных материалов (изделий). Также при разработке конструкторской документации на то или иное изделие, стоит обращать особое внимание на регламентирование применяемых методов и средств выходного контроля.

Список использованной литературы:

1. ГОСТ Р 57556-2017 Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. - М.: Стандартинформ, 2017.

2. ГОСТ Р 57587-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. – М.: Стандартинформ, 2017.

3. ГОСТ Р 57556-2017 Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. – М.: Стандартинформ, 2017.

4. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. – М.: Стандартинформ, 2013.

5. ГОСТ 9012-59 Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – М.: Стандартинформ, 2007

УДК 629.78

Физические основы неразрушающих методов контроля и особенности их применения для малогабаритного спутникового приборостроения

Н.С.Данилин¹, д.т.н.; С.А. Волков¹, к.т.н.

Morozov_IA@ Spacecorp.ru

¹АО «Российские космические системы»

Аннотация:

Представлены физические основы неразрушающих методов контроля. Показана целесообразность таких методов и эффективность их использования для малогабаритного спутникового приборостроения.

Ключевые слова:

неразрушающие методы контроля, оптические методы, рентгеновские и электрофизические методы, методы микроволнового зондирования, электронная компонентная база, малогабаритное спутниковое приборостроение

Широкое распространение цифровых технологий с использованием космических систем на основе современных малогабаритных космических аппаратов позволяет обеспечить решение ряда новых задач по глобальному контролю за обстановкой в любой точке земного шара и одновременно реализовывать высокоскоростной обмен информацией между различными потребителями. Решение этих задач в настоящее время базируется на широком внедрении в электронное приборостроение интегральной микроэлектроники. Потенциально высокая надежность, возможность полной автоматизации производственных процессов, введения значительной

функциональной, схемотехнической, конструктивно-технологической избыточности позволяет ожидать от нового поколения электронных компонентов на основе интегральной микроэлектроники высоких показателей надежности и стойкости в том числе и при работе в космическом пространстве.

Для реализации этих направлений ведутся интенсивные работы как в направлении совершенствования исходных материалов, технологических процессов и оборудования, конструкций и схемотехники, так и в направлении совершенствования и оптимизации методов и средств контроля и надежности интегральных схем и микропроцессорной техники.

Одно из перспективных направлений работ в этой области является создание методов и средств неразрушающего контроля. Под неразрушающим контролем (НК) понимают контроль, позволяющий по косвенным «вторичным» признакам обнаруживать скрытые от невооруженного глаза дефекты проведение любого измерения, которое позволит оценить признак, параметр или показатель качества изделий без ухудшения присущих ему на момент контроля свойств. Именно неразрушающий контроль создает условия для управления качеством изделий при массовом производстве малоразмерных космических аппаратов различного назначения, особенно эта проблема актуальна для аппаратов типа «кубсат». В ходе разработки создания и использования малоразмерных космических аппаратов целесообразность таких методов определяется специфическими особенностями ЭКБ на основе средств интегральной микроэлектроники и использовании новых кристаллов.

Отличительными особенностями при реализации этих процедур являются следующие моменты:

- сокращение количества элементов, входящих в технологические и целевые блоки изделий;
- уменьшение числа физических процессов и явлений, лежащих в основе функционирования элементной базы;

- уменьшение числа используемых при изготовлении технологических процессов и их большая физическая и физико-химическая однородность;
- идентификация характеристик и свойств элементной базы как результат групповых методов изготовления интегральных схем и автоматизации процессов их производства;
- схемотехническая и конструктивно-технологическая однородность оборудования.

Данные особенности создают объективные предпосылки для выявления типовых (свойственных нескольким типам и классам элементов и оборудования) механизмов отказов и типовых косвенных признаков, характеризующих процессы, приводящие к отказам. Это позволяет разрабатывать эффективные методы и средства неразрушающего контроля, применяемые для широкого класса малогабаритного оборудования используемого в ракетно-космической промышленности.

Физическую основу неразрушающих методов контроля составляют исследования физических характеристик вещества и обнаружение таким путем несовершенств его структуры. Эти методы базируются на результатах анализа физики и исследований процессов, приводящих к отказам. В общем случае любая характеристика элемента (устройства и вообще контролируемого объекта) зависит от физических и химических свойств исходных материалов. Изменение характеристик во времени или при воздействии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов представляет собой следствие определенных изменений свойств исходных материалов.

В настоящее время наибольшее распространение получили неразрушающие методы контроля (НМК), базирующиеся на исследовании структуры контролируемого вещества с помощью электромагнитных колебаний с различными диапазонами волн.

Эти методы могут быть подразделены на ряд классов.

О п т и ч е с к и е м е т о д ы контроля базируются на использовании электромагнитных колебаний оптического диапазона.

Р е т г е н о в с к и е м е т о д ы контроля основаны на исследовании взаимодействия контролируемого вещества с электромагнитными волнами радиодиапазона.

Указанные методы получили широкое распространение в машино-, самолето-, и судостроении. Однако специфика электронного космического приборостроения потребовала их критической переработки и переосмысливания, а в ряде случаев – создание принципиально нового подхода к методологии их использования и интеграции полученных результатов.

М е т о д ы в и з у а л ь н о г о контроля используют для исследования поверхностных характеристик контролируемого вещества (определение поверхностных повреждений, контроль конфигурации и взаимного расположения ,обнаружения посторонних включений и т. д.). При этом контроль осуществляется с помощью всевозможных оптических приборов, начиная от увеличительных линз и бинокулярных микроскопов и кончая растровыми микроскопами и лазерными профилометрами.

М е т о д ы м и к р о в о л н о в о г о з о н д и р о в а н и я используют энергию электромагнитного поля в диапазоне миллиметровых волн. Они основаны на способности миллиметровых волн проникать сквозь различные материалы и применяются для обнаружения неоднородностей(их размеров и форм)внутри изделий из диэлектриков и плохих проводников.

М е т о д ы к о н т р о л я ш у м о в ы х х а р а к т е р и с т и к основаны на том .что неоднородности в различных электрических соединениях и кратковременные замыкания или обрывы внутри компонентов служат источниками генерирования радиочастотного шума, который может быть зарегистрирован соответствующей аппаратурой.

М е т о д н е л и н е й н ы х и с к а ж е н и й основан на изменении степени нелинейности гармонического сигнала, подаваемого на исследуемый

объект, его применяют для контроля качества пассивных компонентов и различных электрических соединений.

Метод теплового возбуждения применяют для оценки качества различного рода электрических соединений. Суть метода теплового возбуждения заключается в регистрации с помощью чувствительных индикаторов изменения сопротивления контактов после воздействия кратковременного теплового цикла.

Для выявления грубых дефектов в герметических закрытых конструкциях наибольший эффект дает применение просвечивания рентгеновскими и гамма-лучами, а также ультразвуковая локация. Дефекты образующие в процессе обработки давлением, легче обнаружить ультразвуковым и магнитными методами. Дефекты возникающие при термической, химико-термической и электрохимической обработке наиболее эффективно обнаруживаются магнитными, электроиндуктивными и инфракрасными методами.

Неразрушающие методы контроля имеют исключительно широкие возможности при решении задач обеспечения качества, надежности и стойкости малогабаритных приборов используемых при создании и эксплуатации малоразмерных космических аппаратов так как обладают высокой информативностью, а будучи неразрушающими позволяют осуществить контроль материалов и изделий малогабаритного спутникового приборостроения на всех этапах изготовления. Однако успешное применение неразрушающих испытаний для контроля производства и испытаний в области ракетно-космического приборостроения особенно при использовании их в автоматизированных системах управления производственными процессами требует учета специфики дальнейшего использования этих изделий в космосе.

При этом необходимо отметить что каждый в отдельности метод неразрушающих испытаний не всегда дает исчерпывающую и абсолютно достоверную информацию о годности или негодности изделия. В связи с

этим в космическом приборостроении целесообразно применять одновременно несколько различных методов неразрушающего контроля, позволяющих сопоставить информацию и принять обоснованное решение об отбраковке.

В настоящее время в АО «Российские космические системы» разработаны и используются достоверные критерии неразрушающего контроля базирующие на опыте длительной эксплуатации изделий в условиях космического пространства при критических нагрузках. Для разработки критериев неразрушающего контроля для изделий, опыт эксплуатации которых в условиях космоса пока отсутствует проводится испытания опытной партии ужесточенных условиях с тщательной фиксацией всех проявлений дефектов и сопоставления результатов этих исследований с предварительной оценкой качества.

Литература.

1. Данилин Н.С., Степанов А.А., Белослудцев С.А. Сканирующая акустическая микроскопия как перспективный метод диагностики Вопросы радиоэлектроники 2005.№ 1
2. Данилин Н.С., Урличич Ю.М. Неразрушающий контроль паяных соединений в радиоэлектронной аппаратуре Мир измерений. 2010. № 6
3. Данилин Н.С., Сашов А.А., Белослудцев С.А. Способ термoeлектрического контроля паяного соединения и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RUS 2347232 27/03/2007
4. С.А Волков, Н.С. Данилин Перспективные направления малогабаритного спутникового приборостроения малоразмерных космических аппаратов» материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» Москва 2017
5. С.А. Волков, Н.С.Данилин, А.Ю. Потюпкии, И.А.Булаев «Микроминиатюризация электронной компонентной базы на основе

микросистем в корпусе СВЧ-диапазона для малых спутников» Электронная
техника, сер.1, СВЧ-техника, вып.3(534), Москва 2017

Автоматизированный ультразвуковой контроль билетов

И.В. Казачков¹

¹ АО «СМК»

Аннотация:

Описан опыт эксплуатации автоматизированной иммерсионной системы сканирования фирмы «Matec» для контроля билетов на АО «СМК»

Ключевые слова:

неразрушающие методы контроля, автоматизированная система сканирования

В современном мире в условиях массового производства перед каждым предприятием стоит цель повышать качество производимой продукции. При массовом производстве для лабораторий неразрушающего контроля, действующих на предприятии, важной задачей является незамедлительное обеспечение готовой продукции всеми необходимыми методами неразрушающего контроля. Каждое изделие, отгружаемое на склад, в процессе производства должно обеспечивать соответствие требованиям технических условий и нормативно-технической документации на поставку на разных стадиях производства – например, готовое изделие или полуфабрикат в виде прутковой заготовки–биллета. И всё это должно проходить таким образом, чтобы не замедлять, и тем более, не останавливать процесс производства.

С этой целью, на предприятиях с массовым производством вводится автоматизация процессов неразрушающего контроля. Таким предприятием является АО «СМК». И, если вопрос автоматизации ультразвукового

контроля готовой продукции в виде заготовок дисков решен уже давно, то автоматизация ультразвукового контроля на стадии производства прутковых полуфабрикатов-биллетов стала важной задачей для предприятия.

С этой целью в сентябре 2015 года АО «СМК» приобрело автоматизированную иммерсионную систему сканирования для контроля биллетов фирмы «Matec» производства США.

Механически, система состоит из:

1) иммерсионной ванны размером $10 \times 1,2 \times 2,2$ м, позволяющей загружать биллеты длиной от 400 до 5000 мм и диаметром 100 – 350 мм;

2) подъемной платформы с максимальной нагрузкой до 6т, на которой размещается как биллет, так и настроечный стандартный образец. Скорость вращения поворотного устройства не ниже 30 об/мин при максимальной нагрузке;

3) подвижной каретки с двумя мультizonными модулями и устройством для установки пьезоэлектрических преобразователей с фазированной решеткой. Каждый мультizonный модуль может перемещаться по двум взаимноперпендикулярным осям (Y и Z, не считая общей для всех модулей оси X), с помощью чего, при наличии соответствующих требований, можно применять не только продольные, но и сдвиговые ультразвуковые волны в плоскости поперечного сечения прутковой заготовки для обнаружения внутренних и подповерхностных дефектов. Система пневматических приводов с программируемым управлением давления позволяет каждому мультizonному модулю поддерживать постоянное значение водного пути и центровку по всей длине биллетов, искривленных в следствие механической обработки.

В качестве «умной начинки» выступают:

1) пять программируемых дефектоскопов типа «TRX», которые позволяют работать с десятью независимыми каналами данных, в соответствии с общим количеством пьезоэлектрических преобразователей.

Каждый канал способен одновременно отображать основные типы разверток (А, В, С-сканы) в режиме реального времени;

2) программируемые предусилители для каждого канала данных, увеличивающие общий динамический диапазон системы;

3) мощные персональные компьютеры под современной операционной системой исключают вылеты и системные сбои в работе, а новейшее программное обеспечение «Aragorn» обладает такими функциями, как динамические стробы, мультizonный контроль с объединением всех сканов отдельных зон в один объединенный профиль скана и файл данных, куда входят параметры настройки каждого канала, параметры ВРЧ, стробов, характеристики преобразователей и т.д., определение локации и размера дефектов, калькулятор соотношения «сигнал-шум», архивирование данных и т.д.

4) аппаратура управления перемещениями сканнера обладает функцией «look-ahead/look-back» (прогноз вперед и назад), обеспечивающей буферизацию прогнозируемых и произошедших перемещений и ускорений. Система выполняет анализ траекторий движения заранее, обеспечивая плавное и быстрое прослеживание контура изделия механикой сканнера. Таким способом устраняются периодические остановки и паузы, характерные для других сканнеров, во время которых выполняется расчет траекторий.

АО «СМК» проводит автоматизированный ультразвуковой контроль билетов, предназначенных как для дальнейшего запуска в производство на предприятии, так и подлежащих продаже сторонним организациям. И в первом, и во втором случае ультразвуковым контролем необходимо обеспечить максимальный охват объема билета с чувствительностью, соответствующей требованиям технических условий и нормативно-технической документации заказчика. С этой целью в лаборатории ультразвукового контроля применяют стандартные образцы из сплавов,

аналогичных сплавам билетов (ЭП742-ИД, ЭИ698-ВД, ЭИ437БУ-ВД, Nimonic901, Inconel718, ВТ-22).

По своей форме стандартные образцы выполнены в виде билетов, по диаметру повторяющие диаметр инспектируемой продукции, что исключает влияние кривизны поверхности при контроле продольными волнами. В качестве отражателей, в стандартных образцах выполнены плоскодонные отверстия. Контроль осуществляется с чувствительностью 1,5; 2,0 и 3,0 мм, диапазон расположения глубин плоскодонных отражателей в стандартных образцах составляет от 5 до 175 мм.

Таким образом, контролируемый объем билетов стремится к 100%, а это, в свою очередь, гарантирует, что исходный материал для дальнейшего изготовления продукции, является бездефектным.

Автоматизированная иммерсионная система сканирования для контроля билетов территориально находится на специально отведенном участке кузнечно-прессового цеха, производящего прутковые заготовки-билеты. К иммерсионной ванне подходят рельсовые пути, по которым ходит платформа-вагонетка, доставляющая на участок ультразвукового контроля инспектируемую продукцию. Таким способом осуществляется непрерывная подача билетов, прошедших механическую обработку и отгрузка непосредственно прошедшей ультразвуковой контроль продукции. На участке ультразвукового контроля работают подъемные механизмы-тельферы, загружающие билеты в иммерсионную ванну, на специальную подъемную платформу.

При проведении ультразвукового контроля билетов мы применяем многозональный контроль. Сущность многозонального контроля заключается в следующем: мы берем первый пьезоэлектрический преобразователь с частотой 3,5 МГц и настраиваем его для выявления плоскодонных отражателей, залегающих на глубинах от 5 до 43 мм. Берем второй пьезоэлектрический преобразователь с частотой 2,25 МГц и настраиваем его на глубины от 43 до 175 мм. Таким образом, мы «разбиваем»

зону контроля на участки, где каждый пьезоэлектрический преобразователь передает полученную информацию на отдельный канал дефектоскопа, что облегчает оценку оператором полученных данных. Такое разграничение зоны контроля на участки уменьшает влияние размера зерна биллета на результаты контроля, ведь, как известно, большую толщину изделия необходимо пробивать преобразователями с меньшей частотой, в то время как для ближней зоны подходят преобразователи с большей частотой. Так же хочется отметить, что при ультразвуковом контроле важную роль играет не только контроль за внутренними дефектами, но и контроль за ослаблением амплитуды донного эхо-сигнала. Ведь, как известно, снижение амплитуды донного эхо-сигнала может косвенно свидетельствовать о наличии дефекта в контролируемом материале. Поэтому, мы берем преобразователь с частотой 2,25 МГц, настраиваем его по диаграмме «амплитуда-расстояние», полученной с наших стандартных образцов, на слежение за ослаблением амплитуды донного эхо-сигнала и выводим информацию на третий канал.

Интерфейс программы «Aragorn» позволяет оператору незатруднительно получать информацию со всех работающих пьезоэлектрических преобразователей и каналов, а функция записи в режиме реального времени и последующее сохранение, скажем, развертки типа С-скан, позволяет анализировать полученную информацию.

Если говорить о преимуществах автоматизированного иммерсионного контроля перед ручным контактным, то они вполне очевидны:

– Раньше, при использовании контактного метода, ультразвуковой контроль биллетов проводился по взаимно перпендикулярным «лыскам» (обычно, в количестве от 2 до 8 штук) по образующей поверхности биллета. Такие требования указаны в большинстве технических условиях на поставку. Далее, применяемые типы контактных преобразователей создавали большую «мертвую зону» (до 20 мм), что никак не гарантировало 100% охват объема инспектируемого биллета. По сравнению с контактным ручным методом, автоматизированный иммерсионный контроль позволил использовать

иммерсионные фокусирующие пьезоэлектрические преобразователи с улучшенной чувствительностью, разрешающей способностью и соотношением «сигнал-шум». А это, в свою очередь, позволило разбивать зону контроля на отдельные участки, где каждый преобразователь работает на определенном диапазоне глубин и отвечает только за конкретный участок.

–Скорость контроля. При контактном методе, дефектоскопист обязан поддерживать определенную скорость контроля и шаг сканирования, чтобы не пропустить дефект. Но людям свойственно уставать и не всегда получается к концу рабочей смены сохранить те темпы контроля, которые были в начале смены. Автоматизация контроля позволила оператору самому установить скорость контроля и шаг сканирования и поддерживать их постоянными.

–Система записи развертки С-скан позволяет оператору наблюдать за проведением ультразвукового контроля в режиме реального времени, а функция системы «перехода на индикацию» позволяет переместить каретку с преобразователями в любую точку иммерсионной ванны для локализации и оценки характеристик зафиксированных эхо-сигналов.

–Специальная конструкция подвижной каретки позволяет устанавливать и применять до 10 пьезоэлектрических преобразователей, по сравнению с системой «один дефектоскоп – один преобразователь», применяемой при ручном контактном контроле. Таким образом, одновременно можно проводить ультразвуковой контроль продольными, сдвиговыми, поверхностными волнами и осуществлять контроль за ослаблением амплитуды донного эхо-сигнала, не говоря уже о возможности применения преобразователей типа «фазированная решетка».

–Использование воды в качестве контактной жидкости дешевле, чем использование специализированных гелей для контактного контроля, глицерина или технических масел и обеспечивает идеальный контакт между преобразователем и инспектируемым билетом.

Как итог, после приобретения АО «СМК» автоматизированной системы сканирования билетов фирмы «Matec», скорость контроля, а главное, качество контроля билетов по сравнению с применением ручных контактных приборов, возросло в разы. Функционал установки позволил лаборатории ультразвукового контроля ужесточить требования, предъявляемые для контроля билетов техническими условиями и нормативно-технической документацией на поставку продукции. Как пример, был достигнут 100% охват объема билета при ультразвуковом контроле и введено слежение за амплитудой донного эхо-сигнала.

Всё это привело к тому, что автоматизация ультразвукового контроля помогла увеличить объем проконтролированных билетов на фоне растущих объемов производства. Цифры говорят сами за себя: в 2014 году, было проконтролировано 146 прутковых заготовок, в то время как в 2017 году, когда система уже широко использовалась на предприятии, было проконтролировано приблизительно 1300 прутковых заготовок.

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб; Загл. с экрана.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статьи, точность приведенных фактов и цитирование
несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 10 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»
ГНЦ РФ)

Изд-во ФГУП «ВИАМ»

admin@viam.ru

