

NDT World, 2021, v. 24, no. 1, pp. **-***
DOI:

Автоматизированный ультразвуковой контроль клеевых соединений и трёхслойных конструкций из полимерных композиционных материалов

Рассматриваются результаты автоматизированного ультразвукового контроля с использованием теневых методов для образцов клеевых соединений и трёхслойных конструкций из полимерных композиционных материалов с искусственными дефектами, имитирующими основные типы реальных дефектов в деталях аэрокосмической техники.

Submitted 06.10.20
Accepted 25.02.21

Сотрудники АО ОНПП «Технология
им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск

V.G. Ivanov¹, G.P. Starikovskiy¹, A.A. Boitsov¹, A.E. Zagumenova², N.V. Kruchinkin², E.V. Tyshov¹

Automated Ultrasonic Inspection of Adhesive Joints and Three-Layer Structures Made of Polymer Composite Materials

Introduction. The research considers the NDT results with through-transmission ultrasonic techniques of samples of adhesive joints and three-layer polymer composite structures with artificial defects simulating the common failures of parts for aerospace equipment. The purpose of the conducted research was to determine the detectability of common defects in such structures during an automated ultrasonic testing. A set of samples prepared for the research had artificially embedded defects, simulating the delamination of skins and disbonds of adhesive joints. The set consisted of four types of samples with different skin material; with different material, height and size of honeycomb cells (for three-layer structures) and with different types of adhesive joints – for reinforced stringer structures.

Method. These samples were analyzed using two types of automated through-transmission ultrasonic techniques. The first type is transmission of ultrasound through a layer of air, the second type is through a jet of water. Two automated systems were used: a Technische Beratung Schittko GmbH machine for the first case, and Tecnatom robotic system for the second case. Pseudocolor C-scan is a diagnostic testing document for both systems. C-scan analysis is based on the thresholding method.

Results

1. The inspection of stringer samples demonstrated that they can be inspected with a non-contact technique using an air inlet at frequencies of 40 and 500 kHz with a sensitivity of at least 1 cm². The water jet inspection of adhesive joints at frequencies of 1 MHz and 5 MHz can provide a sensitivity of 0.3 cm².
2. All samples of three-layer structures, including honeycomb cores of various thicknesses, turned out to be uninspectable when tested with an air inlet at a frequency of 500 kHz.
3. Three-layer structures with a honeycomb core height of up to 8 mm can be inspected with the non-contact through-transmission ultrasonic technique at a frequency of 40 kHz with a sensitivity of 5 cm². Such structures can also be inspected with the jet method at a frequency of 1 MHz with a sensitivity of 1 cm².
4. Three-layer structures with a honeycomb core height of 80 mm and more cannot be inspected with the through-transmission ultrasonic technique using an air inlet due to the significant ultrasonic attenuation. They can be inspected with the jet method at a frequency of 1 MHz with a sensitivity of 1.8 cm².

Conclusion. Automated through-transmission ultrasonic testing of three-layer structures and adhesive joints ensures reliable detection of defects with a diameter of 15 mm for adhesive joints of monolithic parts and detection of defects with a diameter of 15–25 mm for three-layer structures, depending on the thickness of the skin and core.

Keywords: polymer compounds, UT, transducer, mode, adaptive quantization, probability distribution, ultrasonic signal thresholding

Введение

НК занимает важное место для обеспечения качества авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Однако ручные методы контроля субъективны как при проведении контроля, так и при оценке его результатов. Применение автоматизированных методов контроля позво-

ляет не только повысить его производительность, но и снизить субъективный фактор при оценке качества контролируемых изделий. Целью настоящих исследований являлась оценка выявляемости различных типов дефектов, возможных при производстве аэрокосмических изделий, при использовании автоматизированного ультразвукового контроля (АУЗК) теневыми методами.

ИВАНОВ
Владимир Геннадиевич
С. н. с. сектора НК, к. т. н.



СТАРИКОВСКИЙ
Геннадий Петрович
Начальник сектора НК,
III уровень по УЗК



БОЙЦОВ
Андрей Анатольевич
Ведущий инженер



Сотрудники Авиационного завода
«КАПО-Композит», г. Казань

ЗАГУМЕННОВА
Анастасия Евгеньевна
Инженер 2 категории,
II уровень по УЗК



КРУЧИНКИН
Николай Владимирович
Инженер 1 категории
II уровень по УЗК



ТЫШОВ
Егор Викторович
Ведущий инженер
АО ОНПП «Технология
им. А. Г. Ромашина»,
г. Обнинск



¹ A. G. Romashin ORPE Technologiya, Obninsk, the Kaluga Region, Russia; vladimir.obninsk@gmail.com

² Aircraft Plant "КАПО-Композит", Kazan, Russia; nkruchinkin@mail.ru

Аппаратное обеспечение

Для контроля образцов из ПКМ с искусственными дефектами использовался теневой метод АУЗК с бесконтактным [1, 2] и струйным вводом [3].

Бесконтактный АУЗК был реализован на установке фирмы Technische Beratung Schittko GmbH [4, 5] (рис. 1). Эта установка портального типа позволяла контролировать в иммерсионной среде крупногабаритные детали с шагом сканирования до 1мм. Установка была модернизирована для сухого контроля контактным способом с катящимися ультразвуковыми преобразователями (ПЭП) [6] и при бесконтактном вводе [7] (рис. 2).

В ультразвуковом блоке этой установки при бесконтактном вводе использовались:

- модернизированный для связи с ЭВМ PDP-11/23 [7] низкочастотный дефектоскоп УСД-60Н (рис. 3);
- два типа бесконтактных преобразователей на 40 кГц НПЦ «Кропус» (рис. 4а) и на 0,5 МГц тип NCG500-D13 [8], «The Ultran Group» (США) (рис. 4б).

УЗК при бесконтактном вводе выполнялся с шагами сканирования 2 и 4 мм по осям X и Z при расстоянии от ПЭП до поверхности объектов контроля (ОК) 2 мм (рис. 2) со скоростью сканирования 100 мм/с. Диагностическим документом контроля в этой системе являются псевдоцветные С-сканы, цвета на которых даются в абсолютной шкале единиц (так называемых единицах «AS» [4]).

Для УЗК при струйном вводе использовалась роботизированная система производства фирмы «Теснатом» [9], с двумя прецизионными роботами «КУКА» (рис. 5). Диагностическим документом контроля в системе «Теснатом» являются псевдоцветные С-сканы, цвета на которых даются в логарифмической шкале. Контроль выполнялся с шагами сканирования 3 и 2 мм по осям X и Z при расстоянии от ПЭП до поверхности ОК 50 мм (рис. 5) со скоростью 300 мм/с. Основные сравнительные характеристики используемых систем АУЗК представлены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики систем АУЗК.

Характеристика	Бесконтактный АУЗК	Струйный АУЗК
Механика системы сканирования	Портальная система с одной линейной осевой направляющей	Два независимых робота КУКА с двумя линейными осевыми направляющими
Дефектоскоп	УСД-60Н модернизированный	8-канальная система SUMIAD-F1
Частота ПЭП	f = 40 и 500 кГц	f = 1 и 5 МГц
Программное обеспечение	Система "Tews Datentechnik"	Система "MIDAS"
Тип ОК	Изделия из ПКМ	Любые
Габариты ОК	5500×2200×100 мм	7000×3000×100 мм



Рис.1. Установка бесконтактного АУЗК



Рис. 2. АУЗК образца при бесконтактном вводе



Рис. 3. Дефектоскоп УСД-60Н



Рис. 4. Бесконтактные ПЭП: а — 40 кГц фирмы «Кропус»; б — 0,5 МГц фирмы «The Ultran Group», тип NCG500-D13 (США) [8]



Рис. 5. АУЗК образца при струйном вводе

Методика оценки результатов АУЗК

В результате сканирования ОК на обеих установках были получены С-сканы — пространственное распределение амплитуд ультразвукового сигнала по поверхности ОК, которое является цифровым изображением. Это изображение как матрица поля амплитуд сигнала полностью характеризуется функцией плотности распределения вероятности (функцией ПРВ или

гистограммой). Задачей дефектоскопии является определение на С-сканах областей локализации дефектов.

Обрабатывая изображение, обычно предполагают, что функция ПРВ есть дискретная аппроксимация некоторой стандартной, например гауссовой, функции распределения или смеси из таких функций [10,11]. Предположения такого типа лежат в основе обнаружения объектов на изображении методом адаптивного квантования мод (метод АКМ) [12,13], известным за рубежом более как метод сегментации по порогу [11,14]. При этом для визуализации С-развёртки весь диапазон амплитуд сигнала оцифрованного изображения разбивается на участки посредством пороговых значений, выбранных исходя из вида полученной экспериментально функции ПРВ, а именно предполагается, что каждый локальный максимум (мода) функции ПРВ соответствует определённым зонам изображения, то есть областям контролируемого объекта с определёнными свойствами.

Каждому такому непрерывному участку амплитуд сигнала можно поставить в соответствие желаемый цвет при визуализации, и таким образом получить псевдоцветной С-скан ОК [4, 15–17]. При стационарности системы функция ПРВ изображения должна стремиться к квазинормальному закону распределения при условии отсутствия дефектов. При наличии дефектов одномодальность функции ПРВ нарушается — в общем случае она становится многомодальной, — если дефекты обладают различными акустическими свойствами. Независимо от типа материала ОК и параметров УЗК в большинстве случаев дефектам будет соответствовать первый локальный максимум функции ПРВ в области низких значений амплитуд.

Тогда для теневого контроля в общем случае наличия дефектов в изделии из ПКМ функция ПРВ 1-го порядка или гистограмма должны представлять из себя сумму одномодального квазинормального распределения, соответствующего доброкачественному материалу, и некоторого числа δ -образных локальных максимумов в области низких значений амплитуд, соответствующих дефектным участкам изделия с различными акустическими свойствами.

Для такой модели формирования дефектоскопического изображения дефектный пороговый уровень сигнала определяется по графику функции ПРВ в точке минимума между основной

квазинормальной модой и ближайшим к ней дефектным локальным максимумом. При наличии нескольких дефектных кластеров пороговые значения

между ними выбираются аналогичным образом.

Одномодальность функции ПРВ, близкая к нормальному распределению, для

Табл. 2. Выявляемость искусственных дефектов в образце с сотовым наполнителем, $h = 8$ мм, бесконтактный ввод, $f = 40$ кГц

№ дефекта	Тип дефекта	Ø, мм	Ручной УЗК	АУЗК
I	Неприклеенный — удаляемый клин из фольги	В зоне перехода	—	нет
II	Неприклеенный клин из фольги	—	да	да
III	Расслоение — удаляемый клин из фольги	—	нет	да
IV	Неприклеенный	25	нет	да
V		10	нет	нет
VI		15	нет	да
VII	Фрезерованное отверстие в сотоблоке	15	да	да
VIII		10	да	да
IX	Расслоение между слоями 15 и 16	25	нет	нет
X		10	нет	нет
XI		15	нет	нет
XII	Фрезерованное отверстие в сотоблоке	25	да	да
XIII	Расслоение между слоями 15 и 16	25	да	нет
XIV		10	да	нет
XV		15	да	нет
XVI		15	да	нет
XVII		10	да	нет
XVIII	Расслоение между слоями 15 и 16 в зоне «Д» (заполнитель ВПЗ-5)	25	да	нет
XIX		25	+/-	+/-
XX		10	+/-	+/-
XXI		15	+/-	+/-
XXII		15	+/-	+/-
XXIII		10	+/-	+/-
XXIV	25	+/-	+/-	
XXV	Неприклеенный — удаляемый клин из фольги	—	нет	да

Табл. 3. Выявляемость искусственных дефектов в образце с сотовым наполнителем, $h = 8$ мм, струйный ввод

№ дефекта	Тип дефекта	Ø, мм	Частота, МГц	
			1	5
I	Неприклеенный — удаляемый клин из фольги	В зоне перехода	—	+/-
II	Неприклеенный клин из фольги	—	да	да
III	Расслоение — удаляемый клин из фольги	—	да	да
IV	Неприклеенный	25	да	да
V		10	да	да
VI		15	да	да
VII	Фрезерованное отверстие в сотоблоке	15	да	да
VIII		10	да	да
IX	Расслоение между слоями 15 и 16	25	да	да
X		10	да	да
XI		15	да	да
XII	Фрезерованное отверстие в сотоблоке	25	да	да
XIII	Расслоение между слоями 15 и 16	25	да	да
XIV		10	да	да
XV		15	да	да
XVI		15	да	да
XVII		10	да	да
XVIII	Расслоение между слоями 15 и 16 в зоне «Д» (заполнитель ВПЗ-5)	25	да	да
XIX		25	да	да
XX		10	да	да
XXI		15	да	да
XXII		15	да	да
XXIII		10	да	да
XXIV	25	да	да	
XXV	Неприклеенный — удаляемый клин из фольги	—	да	да

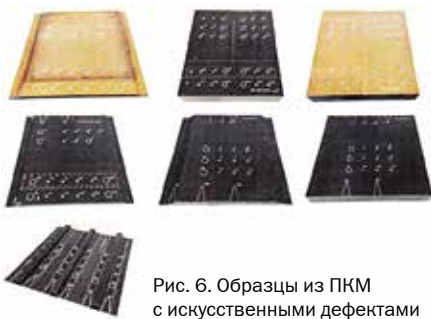


Рис. 6. Образцы из ПКМ с искусственными дефектами

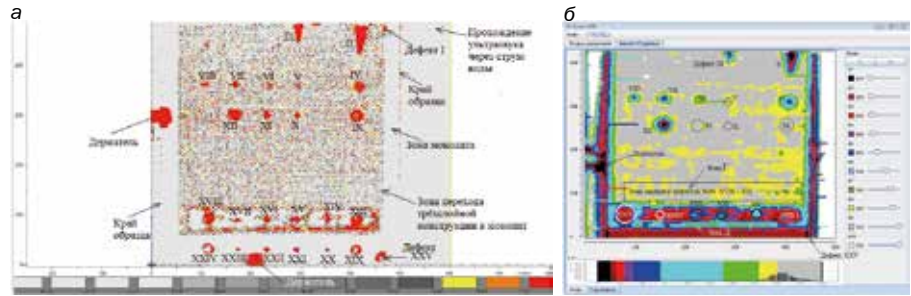


Рис. 7. С-сканы образца: а — струйный ввод, $f = 5$ МГц; б — бесконтактный ввод, $f = 40$ кГц

бездефектных изделий и нарушение одномодальности при наличии дефектов в случае контроля изделий из ПКМ в теневом варианте экспериментально показаны в [4, 16].

Образцы для исследований

Для исследований был изготовлен комплект образцов (рис. 6) из ПКМ размером 480×480 мм с искусственно заложенными дефектами, имитирующими расслоения в обшивках и непроклеи в клеевых соединениях. В каждый образец было внесено по 25 дефектов разного типа с минимальным размером

искусственных отражателей $\varnothing 10$ мм ($S \approx 1 \text{ см}^2$).

В комплект входили:

- трёхслойные конструкции с обшивками из углепластика и стеклопластика и полимерным сотовым наполнителем высотой $h = 8$ и 80 мм и с ячейками 2; 3,5 и 4,2 мм;
- трёхслойные конструкции с вспенённым наполнителем высотой 20 и 50 мм и обшивками из углепластика;
- клеевые соединения Ω -образных стрингеров с монолитной обшивкой из углепластика и различными типами клея.

Примеры полученных результатов

Результаты УЗК образца с $h = 8$ мм и 25-ю внесёнными дефектами представлены для струйного и бесконтактного ввода. В случае струйного контроля (рис. 7а) все 25 дефектов были выявлены.

При бесконтактном вводе (рис. 7б) бездефектные области образца прозвучивались хорошо. Для зон с заложенными дефектами:

- зона «Д», содержащая наполнитель ВПЗ-5, практически не прозвучивалась в четырёх изготовленных образцах этого типа, что не позволило обнаружить искусственные расслоения с №№ XIX–XXIV, заложенные в этой зоне, ни в одном из этих образцов;
- из четырёх клинообразных дефектов I, II, III и XXV не выявляются дефекты I и XXV, находящиеся в зоне перехода трёхслойной конструкции в монолит и имитирующие непроклеи;
- дефект II (имитация непроклея) и дефект III (имитация расслоения в обшивке) уверенно выявляются;
- дефекты, имитирующие непроклеи, IV и XII ($\varnothing 25$ мм), VI и VII ($\varnothing 15$ мм), VIII ($\varnothing 10$ мм) также выявляются;
- дефекты IX, X, XI и XIII–XXIV, имитирующие расслоения, не выявляются.

В табл. 2–4 представлены результаты экспериментов. Для всех таблиц приняты следующие обозначения: дефект выявлен — да; не выявлен — нет; неуверенное обнаружение — +/-; для случаев, когда искусственный дефект моделируется кругом, указан диаметр \varnothing .

Образец с $h = 80$ мм оказался неконтролепригодным при бесконтактном вводе: при $f = 500$ кГц он не прозвучивался полностью; при $f = 40$ кГц прозвучивался, но уверенно идентифицировать дефекты не удалось.

На рис. 8 представлен С-скан образца с $h = 80$ мм, $f = 1$ МГц, струйный ввод. Образец состоял из двух частей с обшивкой толщиной 0,9 мм и 4,12 мм, правая/левая половина на С-скане соответственно.

Табл. 4. Выявляемость искусственных дефектов в образце с сотовым наполнителем, $h = 80$ мм, струйный ввод

№ дефекта	Тип дефекта	\varnothing^* , мм	Частота, МГц		
I	Фрезерованное отверстие в сотоблоке	15	да	нет	
II		10	да	нет	
III		25	да	нет	
IV		25	да	нет	
V		10	да	нет	
VI		15	да	нет	
VII	Непроклеи	15	да	нет	
VIII		10	нет	нет	
IX		25	+/-	нет	
X		25	+/-	нет	
XI		10	нет	нет	
XII		15	+/-	нет	
XIII	Расслоение между слоями	15	+/-	нет	
XIV		14/15	10	да	нет
XV			25	да	нет
XVI			25	да	нет
XVII		3/4	10	да	нет
XVIII			15	да	нет
XIX	Расслоение между слоями		15	нет	нет
XX		14/15	10	нет	нет
XXI			25	нет	нет
XXII			25	нет	нет
XXIII		3/4	10	нет	нет
XXIV			15	нет	нет
XXV	Расслоение между слоями		15	нет	нет
XXVI		14/15	10	нет	нет
XXVII			25	нет	нет
XXVIII			25	нет	нет
XXIX		3/4	10	нет	нет
XXX			15	нет	нет

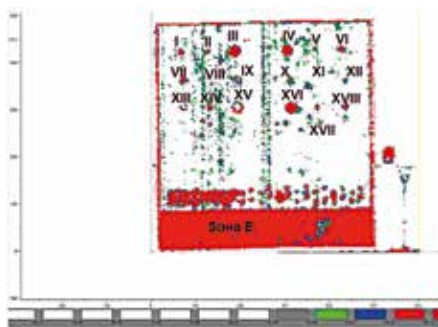


Рис. 8. С-сканы образца с $h = 80$ мм, струйный ввод

№ дефектов	Ø, мм
II, V, VIII, XI, XIV, XVII	10
I, VI, VII, XII, XIII, XVIII	15
III, IV, IX, X, XV, XVI	25

В образец на разных глубинах были заложены дефекты, имитирующие расслоения в обшивках и непрочности. Все дефекты $\varnothing 15$ и $\varnothing 25$ мм и часть $\varnothing 10$ мм выявляются хорошо. Дефекты VIII и XI в толстой и тонкой частях не были выявлены. Эти дефекты были получены путём закладки фрагментов технологической ленты AirtechTooltecCS5 между обшивкой и сотами для имитации непрочности. Все дефекты в зоне «Е», заполненной полимерным наполнителем ВПЗ-5, не выявляются, поскольку вся эта зона не прозвучивается.

Выводы

1. Контроль клеевых соединений типа «лист-лист», выполненный в подкреплённых стрингерами образцах на клее ВК-36 и ВК-9, подтвердил возможность контроля таких изделий теневым методом при бесконтактном вводе на частотах 40 и 500 КГц и выявления непрочностей и расслоений с чувствительностью не хуже 1 см^2 ($\varnothing 10$ мм).

Автоматизированный контроль клеевых соединений при струйном вводе на частотах 1 и 5 МГц может обеспечить выявление непрочностей и расслоений с чувствительностью на уровне $0,3 \text{ см}^2$ ($\varnothing 6$ мм).

2. Все образцы трёхслойных конструкций, включающие сотовые наполнители из стеклосотопласта и полимеросотопласта различной толщины, оказались неконтролепригодными при бесконтактном вводе на частоте 500 КГц.

3. Трёхслойные конструкции из ПКМ с высотой сотового наполнителя из стеклосотопласта и полимеросотопласта толщиной до 8 мм могут быть проконтролированы при бес-

контактном вводе на частоте 40 КГц с чувствительностью 5 см^2 ($\varnothing 25$ мм). При использовании струйного ввода на частоте 1 МГц контроль может быть выполнен с чувствительностью 1 см^2 ($\varnothing 10$ мм). Зоны с сотовым наполнителем, заполненным пастой ВПЗ, проконтролированы быть не могут.

4. Трёхслойные конструкции из ПКМ с высотой сотового наполнителя из полимеросотопласта 80 мм и более не могут быть проконтролированы при струйном вводе из-за высокого затухания сигнала, при струйном вводе на частоте 1 МГц контроль может быть выполнен с чувствительностью $1,8 \text{ см}^2$ ($\varnothing 15$ мм).

5. Трёхслойные конструкции с пористым наполнителем (пензаполнителем) Rohacell при толщине наполнителя до 20 мм могут быть проконтролированы при бесконтактном вводе на частоте 40 КГц с чувствительностью $1,8 \text{ см}^2$. На частотах 500 КГц и 1 МГц такие конструкции не могут быть проконтролированы из-за полного затухания ультразвука.

Таким образом, при автоматизированном теневом ультразвуковом контроле трёхслойных конструкций и клеевых соединений из ПКМ обеспечивается уверенное выявление дефектов диаметром 15 мм для клеевых соединений монолитных деталей и диаметром 15–25 мм для трёхслойных конструкций в зависимости от толщин обшивок и наполнителя.

Благодарности

Авторы признательны сотрудникам ФГУП ВИАМ М.А. Далину, А.С. Генералову, С.И. Трифоновой и Д.С. Ложковой за полезное обсуждение.

Литература

- Hillger W., Ahrholdt M., Rohling H., Henrich R. Non-Contact Ultrasonic Imaging Techniques for Composite Components. — In: 16th World Conference on NDT/Conf. Proc. on CD. — Montreal, Canada: 2004.
- Hsu D.K., Barnard D.J., Peters J.J., Polis D.L. Application of air-coupled ultrasound in NDE of composite space structures. — In: Rev. of Progress in Quantitative NDE. V. 23./AIP Conf. Proc. — Melville, NY: 2004, p. 851–858.
- Aguado C.E. Innovative Non-Destructive Testing Applied to Detection and Evaluation of Defects. — Madrid, Spain: Tecnatom, 2012. — 75 p.
- Скоробогат Л.И., Иванов В.Г. Математическое обеспечение автоматизированной системы ультразвукового контроля. — Дефектоскопия. 1988. № 11. С. 65–72.

- Abels C., Schittko H., Spitzke W. Pruefroboter fuer grosse Bauteile. — Metall Wirtschaft, Wissenschaft und Technik. 1985. Bd 39. N. 4. S. 339–342.

- Иванов В.Г., Скоробогат Л.И. Автоматический ультразвуковой контроль композитов катящимися преобразователями. — Дефектоскопия. 1990. № 5. С. 30–37.

- Мухин Н.В., Стариковский Г.П., Иванов В.Г. и др. Автоматизированный ультразвуковой бесконтактный контроль изделий из ПКМ. — В кн.: XIX Межд. научно-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»/Тезисы докладов. — Обнинск: ГНЦ РФ ФГУП «ОНПП «Технология», 2010, с. 65–66.

- Bhardwaj M.C. High Efficiency Non-Contact Transducers and a Very High Coupling Piezoelectric Composite. — In: 16th World Conference on NDT/Conf. Proc. on CD. — Montreal, Canada: 2004.

- Документация по эксплуатации автоматизированной системы УЗ контроля Tecnatom B161-GEN-TGL-01. — Мадрид, Испания: Tecnatom, 2013. — 201 с.

- Прэтт У.К., Фожра О.Д., Гагалович А. Применение моделей стохастических текстур для обработки изображений. — ТИИЭР/Пер. с англ. — М.: Мир. 1981. Т. 69. № 5. С. 54–64.

- Розенфельд А., Дейвис Л.С. Сегментация и модели изображения. — Там же. 1979. Т. 67. № 5. С. 71–81.

- Беликова Т.П., Ярославский Л.П. Использование адаптивных амплитудных преобразований для препарирования изображений. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн. 1974. Вып.14. С. 88–98.

- Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. радио, 1979. — 312 с.

- Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 399 с.

- Blake R.A., Scott W.R. Pseudocolor C-scan with quantitative image histogram evaluation and enhancement. — In: Proc. 14-th Symp. Nondestruct. Eval. — San Antonio, Tex.: 1983, p. 175–181.

- Иванов В.Г. Автоматическое разделение по порогу при цифровой обработке ультразвуковых дефектоскопических изображений изделий из композитов. — Дефектоскопия. 1990. № 5. С. 37–43.

- Mott G., Taszarek B.J. Ultrasonic characterization of an interference fit. — Mater. Evaluation. 1985. V. 43. No. 8. P. 990–994.

- Трифорова С.И., Генералов А.С., Далин М.А. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов. — В мире НК. 2016. Т. 19, № 1. С. 31–35.

Статья получена 6 октября 2020 г., в окончательной редакции — 25 февраля 2021 г.