

ТЕПЛОВОЙ СКАНЕР-ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2022 г. А.О. Чулков^{1*}, В.П. Вавилов¹, Д.А. Нестерук¹, Б.И. Шагдыров¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия
634050 Томск, пр. Ленина, 30
*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022; после доработки 15.03.2022

Принято к публикации 25.03.2022

Разработан самоходный тепловой дефектоскоп для контроля плоских крупногабаритных изделий методом тепловизионного сканирования, обеспечивающего более высокую эффективность и производительность испытаний по сравнению с классической схемой теплового контроля по отдельным зонам. Дефектоскоп предназначен для обнаружения расслоений, ударных повреждений и инородных включений в композиционных материалах и может использоваться для контроля коррозии в металлических оболочках, обеспечивая непрерывный контроль с производительностью до 20 м²/ч.

Ключевые слова: самоходный тепловой дефектоскоп, тепловой неразрушающий контроль, инфракрасная термография, сканирование, композиционный материал, крупногабаритное изделие, дефект, расслоение.

DOI: 10.31857/S0130308222040066, EDN: BLKSSL

ВВЕДЕНИЕ

В России за последнюю декаду произошел существенный рост интереса к активному тепловому неразрушающему контролю со стороны высокотехнологичных предприятий. В первую очередь, это связано с объективными преимуществами теплового контроля (ТК), например, при испытаниях композиционных материалов: 1) метод является безопасным и бесконтактным (для нагрева традиционно используют оптические источники стимуляции – галогенные и ксеноновые лампы) [1—3]; 2) испытания могут быть реализованы как в односторонней (источники нагрева и тепловизор расположены с одной стороны от контролируемой поверхности), так и в двухсторонней процедурах ТК [4—6]; 3) результаты контроля, представляющие собой набор термограмм (количество которых может достигать нескольких тысяч), хорошо воспринимаются операторами, а температурные аномалии в зонах дефектов сравнительно легко идентифицируются; 4) производительность ТК при испытаниях по зонам достигает 4 м²/ч при размерах зоны одновременного контроля около 1 м², а при реализации способа тепловизионного сканирования производительность ТК может достигать 25 м²/ч; 5) метод наиболее эффективен для обнаружения приповерхностных дефектов (оптимальный диапазон глубин выявляемых дефектов в композитах в односторонней процедуре составляет от 0 до 4 мм). Факт наилучшей чувствительности ТК к приповерхностным дефектам говорит о целесообразности комбинирования ТК с ультразвуковым (УЗ) методом контроля, для которого глубина «мертвой» зоны при контроле композиционных материалов находится в диапазоне от 0 до 1 мм.

В последние годы в Томском политехническом университете разработан ряд тепловых дефектоскопов, в том числе устройство для классического одностороннего ТК фюзеляжей цельнокомпозитных самолетов, устройство для контроля конусовидных изделий из композитов, роботизированная система для контроля теплозащитных покрытий крупногабаритных цилиндрических изделий, а также роботизированная система, осуществляющая неразрушающие испытания композиционных изделий сложной формы путем комбинирования классического одностороннего ТК и метода у.з. инфракрасной термографии (УИТ) [7].

Комбинирование различных устройств нагрева, а именно: оптических (на базе галогенных или ксеноновых ламп) и ультразвуковых (на базе магнитострикционных или пьезоэлектрических преобразователей), в одной процедуре испытаний представляет новое направление в ТК. Данный подход позволяет выявить больше скрытых дефектов по сравнению с реализацией каждого метода в отдельности. Например, оптический нагрев эффективен для обнаружения расслоений, а УЗ нагрев — для обнаружения закрытых («слипнутых») трещин. Для комбинированного ТК разработаны программные алгоритмы, которые «сшивают» термограммы при испытаниях крупногабарит-

ных изделий и позволяют проводить обработку результатов испытаний с использованием нейронных сетей (НС) с целью автоматизированного обнаружения и классификации дефектов [7].

В соответствии с тенденцией к роботизации неразрушающих испытаний, а также благодаря использованию широкоформатных ИК тепловизоров, в ТК возрос интерес к устройствам тепловизионного сканирования, в основе которых лежат способы точечного/линейного сканирования, разрабатывавшиеся еще в СССР [8, 9]. Отличие современного способа тепловизионного сканирования от более ранних заключается в регистрации температуры контролируемой поверхности в пределах полного кадра тепловизора, а не в отдельных точках или строках [10—12]. Полученные при тепловизионном сканировании последовательности полноформатных термограмм реконструируют в изображения, соответствующие определенному времени контроля (методика реконструкции описана в [13]). Кроме того, рост интереса к устройствам тепловизионного сканирования связан с внедрением НС в качестве инструмента дефектоскопии и дефектометрии [14—18].

Использование роботизированной техники обеспечивает высокую повторяемость и производительность испытаний, позволяет унифицировать результаты контроля однотипных изделий и применять автоматизированные алгоритмы для их обработки. Такие алгоритмы, основанные на комбинировании формул инверсии и НС, улучшают повторяемость результатов контроля и повышают производительность обработки данных по сравнению с «ручными» процедурами. Следует отметить, что применение алгоритмов дефектоскопии и дефектометрии, ориентированных на применение НС, требуют строгого соответствия параметров контролируемых материалов, а также условий проведения контроля, тем параметрам и условиям, при которых были получены данные, использованные для обучения НС [14—18].

При испытаниях крупногабаритных композиционных изделий новым подходом в ТК является применение самоходных дефектоскопов. Domin и др. разработали самоходный тепловой дефектоскоп, реализующий ТК по принципу классического одностороннего способа испытаний [19]. Устройство перемещается по поверхности, останавливается в заданной области, запускает нагрев и записывает термограммы, после чего перемещается для проведения контроля следующей зоны. Однако контроль крупногабаритных изделий по зонам требует значительного времени, и применение данного самоходного дефектоскопа подразумевает соблюдение определенной последовательности испытаний отдельных зон. Это затрудняет процедуру «сшивки» отдельных термограмм, а сами термограммы, как правило, неоднородны и менее информативны по сравнению с панорамными термоизображениями, полученными способом сканирования. Следует отметить эффективность данного дефектоскопа при выявлении дефектов, расположенных на различных глубинах, в ходе однократного испытания. Это связано с особенностями классического ТК, при котором температуру контролируемой поверхности регистрируют как в процессе нагрева, так и на стадии охлаждения, а процесс испытаний длится столько, сколько необходимо для проявления температурных сигналов от дефектов, расположенных в широком диапазоне глубин.

Авторами разработан самоходный тепловой дефектоскоп, реализующий ТК способом тепловизионного сканирования. Устройство предназначено для проведения контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов, в частности обнаружения производственных (расслоения и непроклеи) и эксплуатационных (ударные повреждения) дефектов крыльев самолетов, например, самолета МС-21, выполненных из композитов. В приборе реализован способ тепловизионного сканирования без использования роботизированного манипулятора. В отличие от описанного выше аналога [20], данное устройство способно за один проход выявлять дефекты, расположенные в определенном диапазоне глубин, задаваемом оператором. Ниже описаны технические характеристики самоходного дефектоскопа и приведены примеры результатов ТК.

САМОХОДНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП

Основу дефектоскопа составляют оптический нагреватель и тепловизор, а также шаговые двигатели с системой беспроводного управления. Подвижная платформа реализована на базе роликов и поликлиновых ремней, которые обеспечивают плавность хода и достаточную площадь контакта с контролируемой поверхностью, предотвращая «сползание» прибора при передвижении по поверхности с небольшим уклоном. Фото дефектоскопа приведено на рис. 1.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики дефектоскопа, а также области его применения.

Перед проведением контроля оператор «настраивает» дефектоскоп на выявление дефектов в определенном диапазоне глубин, для чего устанавливает скорость перемещения дефектоскопа, мощность нагрева и частоту записи термограмм. С учетом того, что размер поля зрения тепло-



Рис. 1. Самоходный тепловой дефектоскоп.

Таблица 1

Технические характеристики самоходного теплового дефектоскопа

Объекты контроля	Плоские крупногабаритные изделия из угле- и стеклопластиков, сотовые и сэндвич-панели, теплозащитные покрытия, нанесенные на металлическое основание
Глубины залегания выявляемых дефектов, мм	0 — 9*
Минимальный размер обнаруживаемого дефекта, мм	3×3**
Площадь зоны одновременного контроля, м ²	0,07
Производительность сплошного контроля, м ² /ч	До 20
Способ управления движением	Дистанционный (wi-fi)
Максимальная избыточная температура нагрева объекта контроля, °С	До 70
Температурная чувствительность, мК	30
Масса дефектоскопа, кг	12
Габариты дефектоскопа, м	0,5×0,4×0,4
Потребляемая мощность, кВт	2

*Предельная глубина обнаружения дефектов зависит от материала, поперечного размера дефекта и его толщины, а также скорости перемещения дефектоскопа.

**Для расслоения толщиной 0,3 мм, расположенного на глубине 3 мм в углепластике (зависит от материала, глубины залегания дефекта и его толщины).

визора в самоходном дефектоскопе равен $0,35 \times 0,25$ м², а скорость перемещения дефектоскопа может изменяться от 5 до 50 мм/с, обнаруживаемые дефекты характеризуются оптимальным временем обнаружения τ_c (моментом наступления максимального температурного контраста C) от 4 до 11 с (при скорости перемещения дефектоскопа 50 мм/с) и от 30 до 110 с (при скорости 5 мм/с). Например, дефект размером $10 \times 10 \times 0,5$ мм, расположенный на глубине 1,5 мм в полиметилметакрилате, характеризуется $\tau_c \sim 30$ с с момента начала нагрева, а такой же дефект на глубине 6 мм создает максимальный сигнал на контролируемой поверхности при $\tau_c \sim 130$ с. Следует отметить, что, несмотря на наличие оптимального времени контроля, дефекты обнаруживаются в некотором интервале времен (например, если $\tau_c \sim 130$ с, то соответствующий дефект проявляется в интервале времени от 100 до 160 с в зависимости от материала).

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ПО ЗОНАМ И ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Как было отмечено выше, ТК характеризуется определенными методологическими особенностями в зависимости от используемой процедуры (контроль от зоны к зоне или путем сканирования). Для сравнения результатов, получаемых в двух вышеуказанных процедурах ТК, был проконтролирован набор из 20-и контрольных образцов с искусственными дефектами. Образцы в виде пластин с размерами $300 \times 130 \times 10$ мм³ имитировали многослойную теплозащиту, нанесенную на металлическую основу. Для имитации теплозащиты использовали три слоя полиметилметакрилата толщиной 2 мм каждый, обладающего близкими теплофизическими характеристиками. Образцы содержали плоскодонные дефекты квадратной формы, имитирующие расслоения с различными поперечными размерами и глубиной залегания. Дефекты были выполнены с помощью лазерной резки (погрешность глубины дефектов не превышала $\pm 0,05$ мм от запланированной глубины). Схема расположения дефектов приведена на рис. 2. Пластины полиметилметакрилата и дюралюминия толщиной 4 мм были склеены в виде пакета. Для исключения влияния частичной прозрачности полиметилметакрилата при оптическом нагреве образцы были окрашены черной матовой краской с коэффициентом излучения около 0,96.

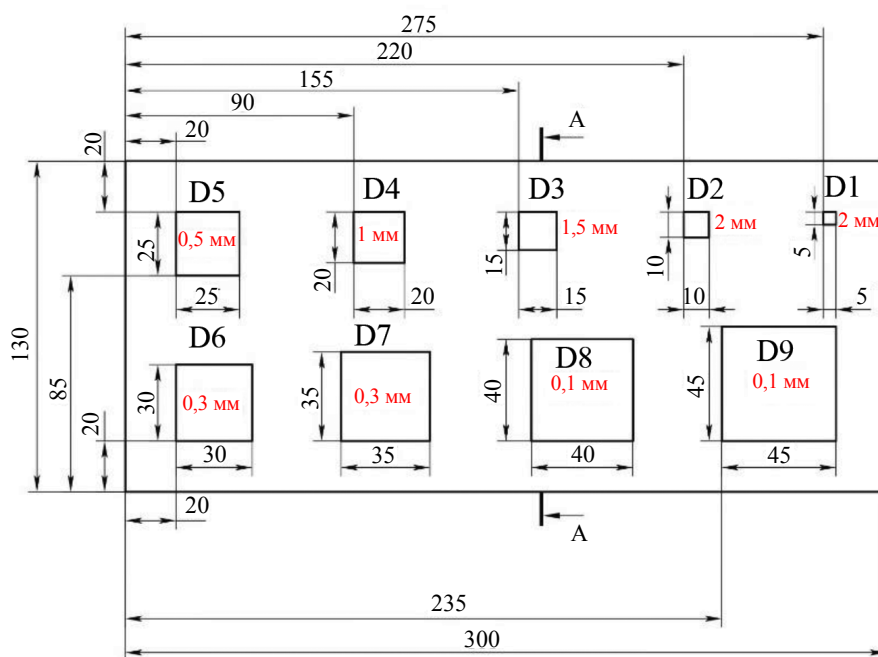


Рис. 2. Схема расположения дефектов в слое полиметилметакрилата контрольного образца.

Ниже приведены результаты испытаний одного из стандартных образцов, проконтролированного как классическим способом ТК, так и способом тепловизионного сканирования с помощью самоходного дефектоскопа. Следует отметить, что выбранный образец содержал наиболее трудные для идентификации дефекты (параметры дефектов вышеупомянутого образца приведены в табл. 2). Оптимальное время t_c выявления скрытых дефектов исследуемого образца по результатам численного моделирования (программа ThermoCalc-3D, НИ ТПУ) находится в диапазоне от 140 до 190 с.

Как было отмечено выше, конструкционные особенности самоходного дефектоскопа позволяют проводить контроль в ограниченном диапазоне времени. Наиболее подходящий режим работы самоходного дефектоскопа обеспечивает контроль в диапазоне от 30 до 110 с с момента начала нагрева при скорости перемещения дефектоскопа 5 мм/с. При данной скорости движения длительность нагрева каждой точки поверхности образца составляет 6 с. Для унификации параметров испытания в классической процедуре ТК температуру образца регистрировали в диапазоне от 0 до 110 с при той же длительности нагрева. В обоих способах ТК нагреватели представляли собой галогенные лампы мощность 2 кВт, а для регистрации температуры с частотой 10 Гц был использован тепловизор Optris PI640.

Дефекты контрольного образца из полиметилметакрилата на основании из дюралюминия*

Параметр ТК	Поперечные размеры дефектов, мм								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
	5×5	10×10	15×15	20×20	25×25	30×30	35×35	40×40	45×45
Толщина дефекта, мм	2	2	1,5	1	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1
Глубина дефекта, мм	4	4	4,5	5	5,5	5,7	5,7	5,9	5,9

*Дефекты в виде плоскостных выемок выполнены в полиметилметакрилате. Глубину дефектов отсчитывают от передней поверхности полиметилметакрилата. Толщина дефектов соответствует высоте выемки в полиметилметакрилате.

На рис. 3 приведены исходные термограммы для 110-й секунды контроля, полученные способом классического ТК (рис. 3а) и способом тепловизионного сканирования (рис. 3б). Термограмма на рис. 3б получена путем прямой реконструкции по способу, описанному в [15], без применения фильтрации и других алгоритмов, повышающих выявляемость дефектов. Данный способ основан на синтезе термограмм изделия путем анализа последовательности термограмм, записанных тепловизором в процессе сканирования. Синтезированную термограмму «складывают» из столбцов отдельных термограмм, причем скорость сканирования, размер элемента изображения на поверхности изделия и частоту записи термограмм выбирают таким образом, чтобы избежать как пропуска, так и наложения столбцов изображений. Каждая синтезированная термограмма соответствует определенной временной задержке относительно момента нагрева, а, изменяя номер столбца, возможно изменять время задержки в требуемом диапазоне.

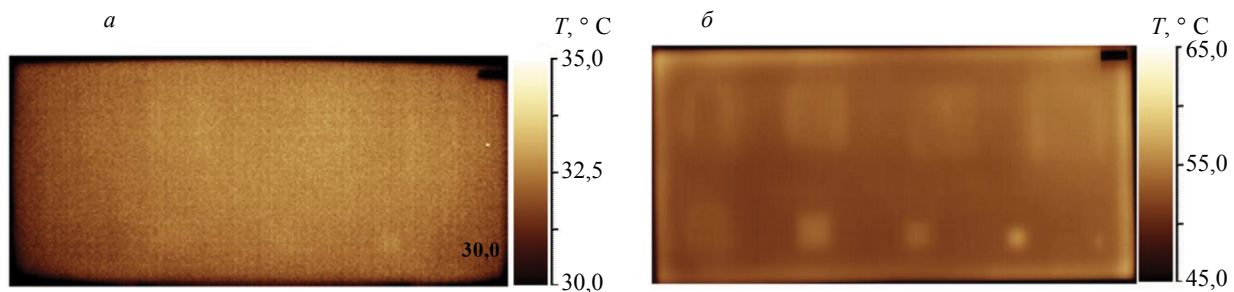


Рис. 3. Термограммы на 110-й секунде контроля, полученные классическим ТК (а) и с помощью самоходного теплового дефектоскопа (б).

Из рис. 3 видно, что при одинаковом времени контроля результаты самоходного дефектоскопа существенно лучше результатов классического ТК (оператором выявляются все девять дефектов в сравнении с 2-3 дефектами при классическом ТК). Это объясняется более интенсивным и равномерным нагревом при сканировании (напомним, что длительность нагрева каждой точки образца в обеих процедурах составляла 6 с).

Важным фактором, влияющим на результаты ТК, являются тепловые помехи, создаваемые нагревателем. Для классического ТК характерно остаточное тепловое излучение ламп, которое приводит к неоднородному температурному полю. Для решения данной проблемы используют ряд способов подавления паразитного излучения: фильтры из стекла, непрозрачные шторы и т.п. В случае сканирующего ТК нагреватель находится за пределами контролируемой области, а кожух дефектоскопа защищает зону регистрации температуры от тепловых помех.

Обработка результатов (рис. 4) с помощью метода анализа главных компонент (МАГК) существенно улучшила результаты, полученные с помощью обеих процедур ТК, в частности все дефек-

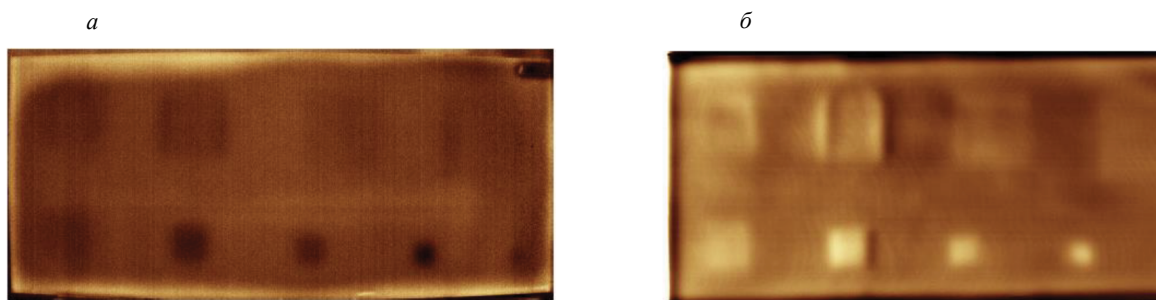


Рис. 4. Обработка результатов классического (а) и сканирующего (б) ТК с помощью МАГК:
а — классический ТК, вторая компонента МАГК; б — сканирующий ТК, вторая компонента МАГК.

Таблица 3

Сравнение способов ТК по величине отношения сигнал/шум
(использованы изображения второй компоненты рис. 4)

Номер дефекта	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Классический ТК									
Отношение сигнал/шум	3,5	10,5	9,2	9,0	3,5	2,4	3,1	1,1	2,0
ТК способом тепловизионного сканирования									
Отношение сигнал/шум	24,5	60,1	42,3	34,5	10,7	5,4	15,4	13,0	8,3

ты контрольного образца в той или иной степени были обнаружены. Однако способ тепловизионного сканирования обеспечил более высокую величину отношения сигнал/шум (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты ТК, полученные с помощью самоходного теплового дефектоскопа, характеризуются большими величинами отношения сигнал/шум по сравнению с классическим ТК, т.е. лучшей выявляемостью дефектов, что связано с более интенсивным и равномерным нагревом. Данный способ тепловизионного сканирования требует более тщательной подготовки испытаний, а именно оптимального выбора параметров контроля: 1) скорости перемещения для обнаружения дефектов, расположенных на определенных глубинах и характеризующихся различными оптимальными временами обнаружения; 2) мощности нагрева в соответствии со скоростью перемещения (во избежание перегрева контролируемого материала); 3) частоты записи термограмм в соответствии со скоростью перемещения для исключения пропусков и наложения строк при реконструкции термограмм. Способ тепловизионного сканирования обеспечивает большую производительность испытаний крупногабаритных изделий, а использование самоходного дефектоскопа позволяет реализовать данный вид испытаний без участия роботизированных манипуляторов, применение которых целесообразно для контроля изделий сложной формы.

Настоящая разработка выполнена в рамках стипендии Президента РФ № СП-2305.2021.1 (методика испытаний), грантов Российского научного фонда №22-29-01469 (экспериментальное оборудование) и Российского фонда фундаментальных исследований №19-29-13004 (моделирование и обработка данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oswald-Tranta B.* Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography // *NDT E Int.* 2017. V. 91. P. 36—46.
2. *Shepard S.M.* Flash Thermography of Aerospace Composites 2. Thermographic Signal Reconstruction // *Materials Evaluation.* 2007. V. 65. P. 690—696.

3. *Ibarra-Castanedo C., Genest M., Servais P., Maldague X., Bendada A.* Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007. V. 22. P. 199—215.
4. *Maldague X., Marinetti S.* Pulse phase infrared thermography // *Journal of Applied Physics*. 1996. V. 79. P. 2694—2698.
5. *Gordiyenko E.Y.* Nondestructive Testing of Composite Materials of Aircraft Elements by Active Thermography // *Nauka ta innovacii*. 2018. V. 14. P. 39—50.
6. *Grys S.* Determining the dimension of subsurface defects by active infrared thermography — experimental research // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2018. V. 7. P. 153—160.
7. *Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P.* Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2021. 57. P. 619—626.
8. *Денисов С.С., Волков Я.А., Стороженко В.А., Рапопорт Д.А.* Сканирующая оптическая головка для активного неразрушающего контроля // *Дефектоскопия*. 1975. № 6. С. 116—118.
9. *Гавинский Ю.В., Ворожцов Б.И., Немиров Ю.В.* Использование околоповерхностных приемников при тепловом контроле слоистых изделий // *Дефектоскопия*. 1976. № 4. С. 40—47.
10. *Cramer K.E., Winfree W.P.* Thermographic detection and quantitative characterization of corrosion by application of thermal line source // *Proc. SPIE «Thermosense-XX»*. 1998. V. 3361. P. 291—297.
11. *Woolard D., Cramer K.* The thermal photocopier: A new concept for thermal NDT // *Proc. SPIE «Thermosense-XXVI»*. 2004. V. 5405. P. 366—373.
12. *Cramer K., Perey D.F., Brown J.L.* The application of line scan thermography using multiple collaborative robots // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 2019. Portland, USA. P. 4.
13. *Chulkov A.O., Tuschl C., Nesteruk D.A., Oswald-Tranta B., Vavilov V.P., Kuimova M.V.* Detecting and characterizing defects in metal/non-metal structures by using active thermal NDT based on optical/inductive uniform and line-scanning heating approaches // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2021. V. 40. P. 44.
14. *Moskovchenko A.I., Vavilov V.P., Chulkov A.O.* Comparing the efficiency of defect depth characterization algorithms in the inspection of CFRP by using one-sided pulsed thermal NDT // *Infrared Physics and Technology*. 2020. V. 107. P. 103289.
15. *Dudzic S.* Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography // *Infrared Physics and Technology*. 2015. V. 71. P. 187—197.
16. *Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P., Moskovchenko A.I., Saeed N., Omar M.* Optimizing input data for training an artificial neural network used for evaluating defect depth in infrared thermographic nondestructive testing // *Infrared Physics and Technology*. 2019. V. 102.
17. *Saeed N., Omar M.A., Abdulrahman Y.* A neural network approach for quantifying defects depth, for nondestructive testing thermograms // *Infrared Physics and Technology*. 2018. 94. P. 55—64.
18. *Fernandes H.C., Zhang H., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.* Artificial neural networks and infrared thermography for fiber orientation assessment // *Proceedings of Brazilian Conference on Intelligent Systems*. 2017. P. 210—215.
19. *Domin J., Górski M., Bialecki R., Zajac J., Grzyb K., Kielan P., Adamczyk W., Ostrowski Z.* Wheeled Robot Dedicated to the Evaluation of the Technical Condition of Large-Dimension Engineering Structures // *Robotics*. 2020. V. 9. P. 28—42.