

В.И. Гончаренко<sup>1</sup>, С.Л. Васильев<sup>1</sup>, С.А. Дмитриев<sup>1</sup>, С.А. Юргенсон<sup>1</sup>, В.М. Юров<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, [fvo@mai.ru](mailto:fvo@mai.ru), <sup>2</sup> Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан, [exciton@list.ru](mailto:exciton@list.ru)*

### **Анализ распространения ударных повреждений в композиционных материалах методом вычислительной рентгеновской томографии**

Вычислительная рентгеновская томография (ВРТ) в настоящее время является наиболее перспективным методом неразрушающего контроля, связанного с интроскопией наиболее ответственных элементов конструкций аэрокосмического назначения. Получаемая этим методом, с учётом пространственного положения контролируемых сечений, обширная томографическая информация, кроме яркостных изображений содержит десятки и сотни тысяч количественных оценок свойств материала с точной пространственной привязкой каждого элемента томограммы.

Авиационная техника требует широкого применения методов неразрушающего контроля на всех этапах жизненного цикла. Это связано с высокими действующими напряжениями в элементах конструкции, достижение которых позволяет обеспечить минимальный вес конструкции. Наиболее высокие требования по уровню неразрушающего контроля готовых изделий предъявляются к конструкциям, созданным по специальным технологическим процессам, которые влияют на структуру материала. К таким технологиям относится, литье, сварка, производство изделий из композиционных материалов (ПКМ) и т.д. [1-4].

Одним из наиболее точных методов определения состояния структуры материала является метод вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ), позволяющий с высокой точностью (до 50 мкм) выявить внутренние несплошности внутри конструкции.

Основные параметры, применяемые при контроле методом ВРТ, базируются на анализе коэффициента линейного ослабления, значения которого зависит от плотности материала. На базе этого коэффициента разработан ряд параметров, позволяющих оценивать состояние структуры материала [5].

Традиционным приложением рентгеновской томографии – поиск внутренних дефектов, возникающих на различных этапах жизненного цикла изделий. При производстве наиболее интересен данный метод для композиционных материалов, литья, сварки, аддитивных технологий. На этапе эксплуатации – для конструкций из ПКМ, т.к. для них характерно появление и развитие внутренних повреждений.

В рамках работ, проведенных на кафедре «Технологическое проектирование и управление качеством» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) выделены следующие основные области применения метода ВРТ при разработке авиационной техники.

- Этап проектирования:
  - разработка новых моделей поведения ПКМ при статическом и усталостном нагружении;
  - оценка влияния технологических факторов на структуру ПКМ в регулярных и проблемных зонах проектируемых конструкций;
  - исследование процесса накопления и развития повреждений при послойном анализе.
- Разработка технологических процессов:
  - отработка параметров специальных технологических процессов;
  - определение норм дефектов, допустимых к эксплуатации и ремонту;
  - верификация и уточнение (разработка методик) возможностей других методов неразрушающего контроля для рассматриваемой конструкции.

- Этап производства элементов конструкций:
  - выборочная или сплошная оценка качества получаемых изделий из ПКМ и их элементов;
  - верификация методов неразрушающего контроля изделий из ПКМ в промышленном производстве.
- Этап эксплуатации:
  - оценка изменения структуры ПКМ в высоконагруженных узлах и элементах конструкции в процессе эксплуатации;
  - верификация методов неразрушающего контроля изделий из ПКМ в эксплуатации.

Особое внимание в рамках разрабатываемых методик исследования сфокусировано на конструкциях из ПКМ для которых разработан ряд методов контроля развития повреждений [6, 7]. Связано это с применением данных материалов в высоконагруженных элементах конструкции и необходимостью отработки технологических процессов их изготовления.

Одним из самых опасных типов эксплуатационных повреждений для изделий из ПКМ является ударное повреждение, которое вызывает обширное внутреннее расслоение материала. Для авиационных конструкций устанавливаются требования по площади внутренних расслоений материала в зависимости от периода его обнаружения визуальными и инструментальными методами. Для каждой конструкции такие требования могут устанавливаться индивидуально в зависимости от применяемых методов контроля и периодов обязательных осмотров [8-11].

Для оценки площади внутренних расслоений в конструкции наиболее распространен ультразвуковой или тепловой (вакуумный) методы контроля. Для уточнения данных, получаемых этими методами целесообразно на этапе отработки методик контроля провести их верификацию.

В рамках анализа возможности контроля внутренних расслоений методом ВРТ с использованием линейного детектора был проведен эксперимент по исследованию образцов с ударными повреждениями энергиями 30 и 50 Н\*м из углепластика (рис. 1).

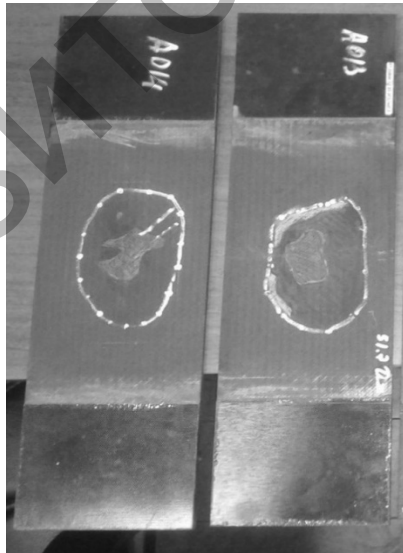


Рисунок 1. Общий вид контролируемых образцов

Разработанная методика контроля включает в себя следующие этапы:

- послойное сканирование образцов с дефектами;

- разбиение плоских сечений на зоны, в рамках которых проводится осредненный по площади анализ линейного коэффициента ослабления (ЛКО) и его среднеквадратичного отклонения;
- построение плоских карт распределения данных коэффициентов и анализ площади внутренних дефектов.

Необходимость такого подхода вызвана ограничениями метода компьютерной томографии, а именно наклоном графика распределения ЛКО в местах раздела двух сред, что затрудняет анализ расслоений в конструкциях из ПКМ. Пример томограммы образцов с ударным повреждением представлен на рис. 2.

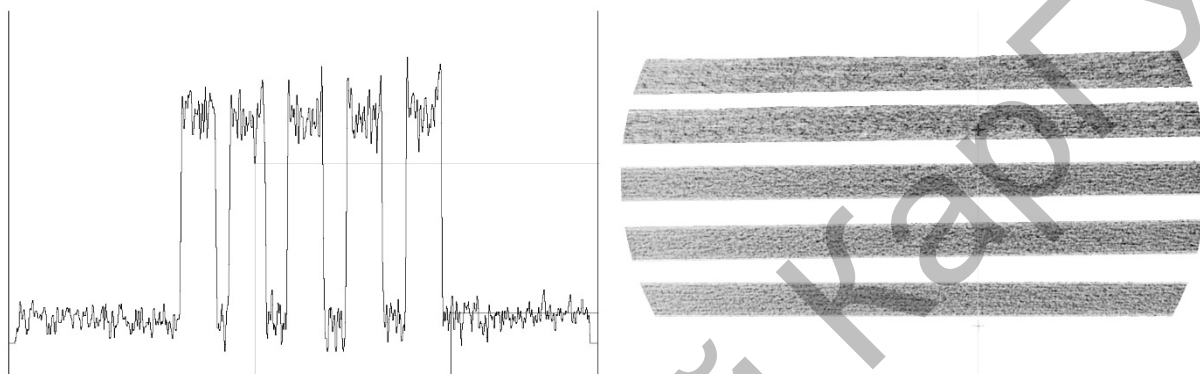


Рисунок 2. Томограмма и график распределения ЛКО для образцов с ударным повреждением.

Плоские карты распределения представлены на рис. 3 и 4 для мест с ударными повреждениями. Размеры контролируемых зон составляют 100 на 100 мм.

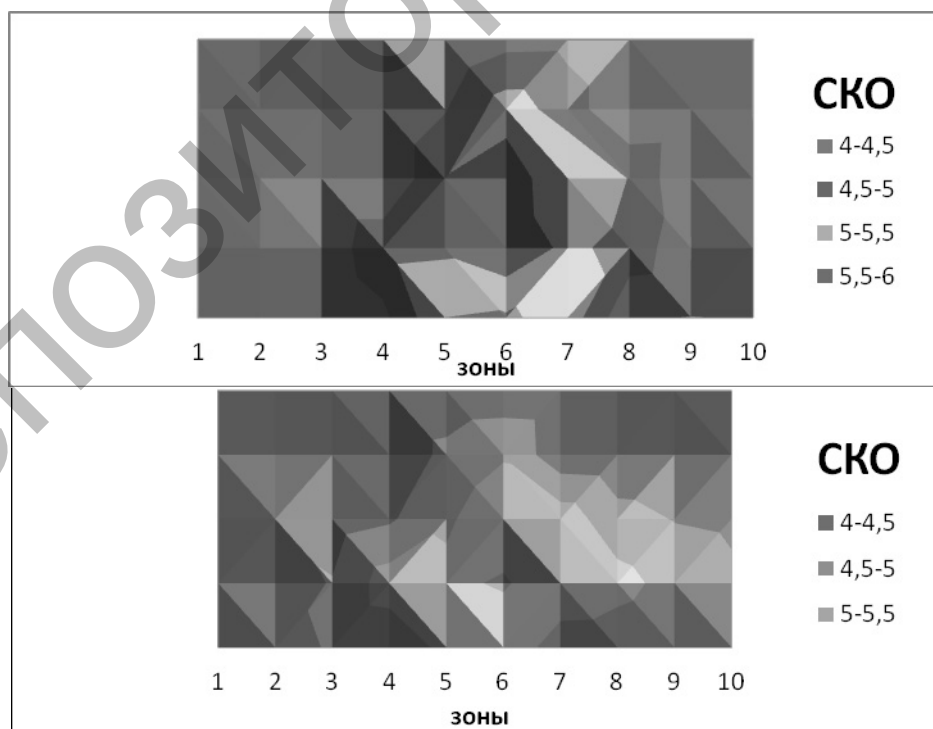


Рисунок 3. Карта распределения СКО в зоне ударного повреждения

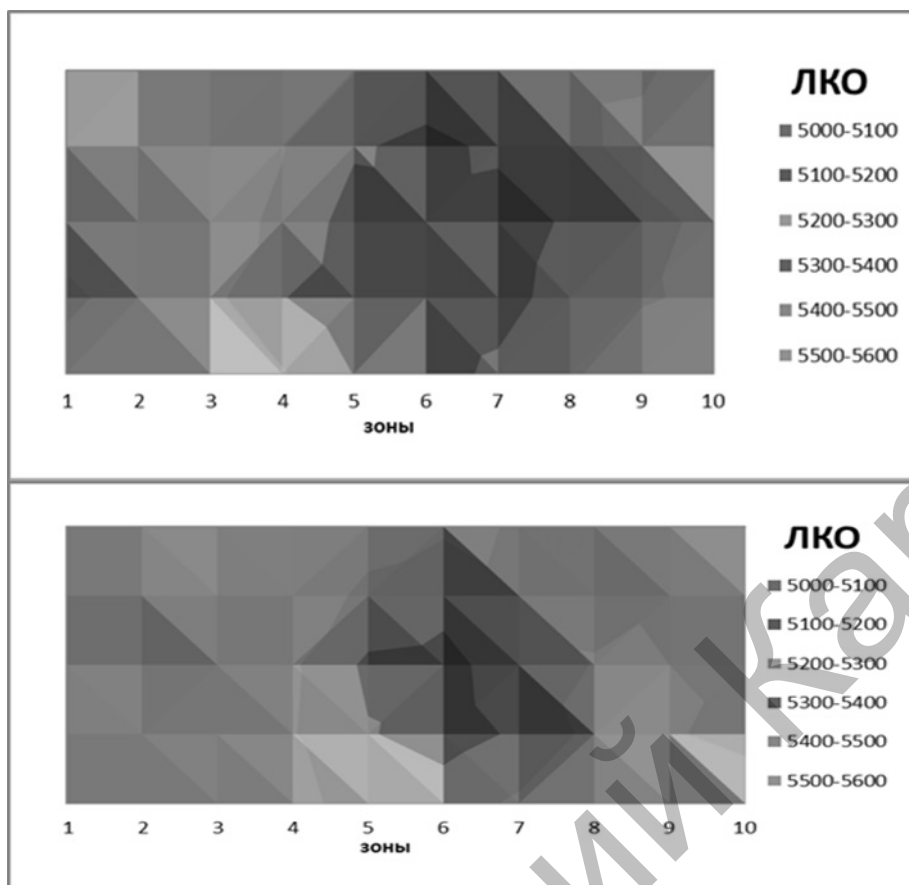


Рисунок 4. Карта распределения ЛКО в зоне ударного повреждения

По представленным картам видно явное различие между зонами распространения ударных повреждений для разных уровней удара. При этом можно обратить внимание на то, что по данным ЛКО возможна оценка площади и распространения расслоения, в то время как по карте СКО возможна оценка раскрытия расслоения в образце.

Предложенная методика позволяет упростить процедуру анализа расслоений при применении томографов с линейным детектором и верифицировать данные мобильных методов контроля. Кроме этого методика может применяться при разработке методов ремонта конструкций из ПКМ.

#### *Литературы:*

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Сосин, А.В. Ковалев, Э.И. Вайнберг и др. 2-е изд. М. Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Компьютерные томографы для неразрушающего контроля и количественной диагностики изделий аэрокосмической промышленности // Двигатель. 2008. № 2. С. 19–23.
3. Гончаренко В.И., Олешко В.С. Расчёт твёрдости инструмента в авиастроении // СТИН. 2017. № 1. С. 19-21.
4. Гончаренко В.И., Олешко В.С. Определение величины поверхностной энергии инструмента в авиастроении // СТИН. 2017. № 2. С. 24-27.
5. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов / Б.В.Бойцов, С.Л.Васильев, А.Г.Громашев, С.А.Юргенсон // Труды МАИ: электронный журнал. 27.12.2011. Вып. №49. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/>.
6. Васильев С.Л., Артемьев А.В., Юргенсон С.А. Анализ методом вычислительной рентгеновской томографии воздействия статической нагрузки на структуру полимерного композиционного материала // Материалы X Международной конференции по неравновесным

процессам в соплах и струях (NPNJ 2014), 25-31 мая 2014 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2014. С. 543-545.

7. Контроль образцов методом вычислительной рентгеновской томографии под нагрузкой / С.Л.Васильев, А.В.Артемов, В.Н.Бакулин, С.А.Юргенсон. // Дефектоскопия. 2016. №5. С. 63-73.

8. Advisory Circular № 20-107B Composite aircraft structure, USA, FAA, 2009.

9. Prediction of flange debonding in composite stiffened panels using an analytical crack tip elementbased methodology / Z. Mikulik, D.W. Kelly, B.G. Prusty, R.S. Thomson // Composite Structures. – 2008. – Vol. 85. – No. 3. – P. 233–244. DOI:10.1016/j.compstruct.2007.10.027.

10. Nishino T., Hirokane D., Nakamae K. X-ray diffraction studies of the environmental deterioration of a transversely loaded carbon-fibre-reinforced composite // Composites Science and Technology. – 2001. – Vol. 61. – No. 16. – P. 2455–2459. DOI:10.1016/S0266-3538(01)00174-9.

11. Microfocus radiography studies during model interlaminar fracture tests on composites / T. De Kalbermatten, R. Jäggi, P. FLüeler, H.H. Kausch, P. Davies // Journal of Materials Science Letters. – 1992. – Vol. 11. – No. 9. – P. 543–546.

Tabiyeva Y.Y.<sup>1</sup>, Rakhadilov B.K.<sup>2</sup>, Uazyrhanova G.K.<sup>1</sup>, Zhurerova L.G.<sup>1</sup>, Sagdoldina Zh.B.<sup>2</sup>,  
Kurbanbekov Sh.K.<sup>3</sup> Serikbayev D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>East-Kazakhstan State Technical University, <sup>2</sup>S. Amanzholov East-Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, <sup>3</sup>K.A.Yassawi International Kazakh-Turkish University, Kazakhstan  
<sup>1</sup>[erkezhan.tabiyeva@mail.ru](mailto:erkezhan.tabiyeva@mail.ru), <sup>2</sup>[rakhadilovb@mail.ru](mailto:rakhadilovb@mail.ru), <sup>3</sup>[guazyrhanova@mail.ru](mailto:guazyrhanova@mail.ru), <sup>4</sup>[leila\\_uka@mail.ru](mailto:leila_uka@mail.ru),  
<sup>5</sup>[sagdoldina@mail.ru](mailto:sagdoldina@mail.ru), <sup>5</sup>[Sherzod05\\_88@mail.ru](mailto:Sherzod05_88@mail.ru)

### **Research of change in tribological properties of steel grade 2 after electrolytic-plasma exposure**

Electrolyte-plasma hardening (EPSH) of the surface of parts is a simple and effective process of surface hardening of working surfaces of parts and tools. Plasma tempering develops rapidly in industry and its purpose is manufacturing of parts and tools with hardened surface layers of thickness from 0.1 to 2 mm, with constant total chemical composition of the material and preservation in internal layers of initial properties of starting metals [1-4]. The essence of this method is high-grade heating by concentrated energy flows of the surface layer of metal and its rapid cooling as a result of the transfer of heat to the deep layers of the material of the part, which, due to the phase transformation, the structure of the surface layer changes. In the works of many scientists, the problem of wear of the ridges of bandages of wheel pairs of locomotives was highlighted, as the most significant reason for the impossibility of increasing the interrepair runs of locomotives, which in turn significantly increases the costs of maintenance and simple locomotives in repair depots [5-6]. It is known that over the past 20 years there has been a gradual increase in the wear rate of the wheelset of locomotives on Kazakhstan Railways. This is due to the increase in distillation speeds of trains and axial loads, as well as the transition to reinforced concrete sleepers. At the same time, steel for the manufacture of bandages has not changed.

Therefore, the study and generalization of data on the influence of the properties of electrolyte solutions and EPSH regime parameters on the structure and properties of bandage steel of mark 2 is topical. The purpose of this work is to determine the optimal EPSH parameters for mark 2 steel.

For the study was chosen bandage steel mark 2. This steel is carbon steel, it is used in the field of metallurgy and machine building, for the production of bandages of freight, passenger and shunting locomotives, motor cars and diesel trains, metro cars and bandages of wheel cars for pairs of tram cars. The chemical composition of steel: 0.55-0.65% C; 0.5-0.9 % Mn; 0.22-0.45 % Si; No more 0.1% V; No more 0.03% S; No more 0.035% P; the rest of Fe, also the permissible mass fraction (%): Ni≤ 0.25, Cr=0.20, Cu=0.30 to GOST 398-96[7].