

~~ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ~~
~~ТЕХНИКА~~

УДК 681.586.54

**ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
КОМПОЗИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ¹**

©2026 г. А. А. Склезнев^а, В. Ю. Кутюрин^{б, *}, Н. А. Родин^с,
М. Ю. Федотов^б

^аАкционерное общество «Центр перспективных разработок»

Россия, 141371, Хотьково Московской обл., ул. Черняховского, 18Б

^бКазанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

Россия, 420111, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 10

^сМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 129993, Москва, Волоколамское ш., 4

*E-mail: kutjurin@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Предлагаются способы и средства решения отдельных технических проблем, возникающих в процессе монтажа волоконно-оптических датчиков для измерения температуры и деформации в крупногабаритных (площадью десятки квадратных метров) изделиях из композитов. Рассмотрена математическая модель расчета внутренних напряжений в композитах, позволяющая оценить влияние размеров и физико-механических характеристик защитных элементов волоконных датчиков, интегрированных в композит. Приведены результаты экспериментов.
Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, контроль крупногабаритных изделий, контроль композитных конструкций.

1. ВВЕДЕНИЕ

Спецификой конструкций из композитов является зависимость физико-механических характеристик как от точности соблюдения технологических режимов в процессе изготовления, так и от условий эксплуатации. Это приводит к необходимости контроля изменения свойств материала в процессе формирования конструкции практически на всех этапах ее жизненного цикла: от изготовления до эксплуатации. Одним из способов такого контроля является использование волоконно-оптических датчиков (ВОД), сформированных на кварцевых

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

световодах, обладающих рядом несомненных преимуществ по сравнению с традиционными датчиками контроля и, в первую очередь, возможностью интеграции ВОД в материал конструкции непосредственно в процессе формирования изделия из композита. На рис. 1 приведен пример сетчатой анизотридной конструкции, изготовленной методом непрерывной намотки в автоматическом режиме из углепластика.

Рис. 1. Пример сетчатой структуры – силовой корпус космического аппарата

При использовании встроенных в материал ВОД для контроля деформаций и температуры крупногабаритных конструкций из композитов возникает ряд технических проблем, которые, как правило, не появляются в процессе исследования свойств композитов с использованием ВОД на образцах. Крупногабаритными здесь будем считать изделия (конструкции), протяженность которых составляет до 12 м или площадь поверхности которых составляет от нескольких десятков квадратных метров. Такими габаритами, как правило, обладают сетчатые конструкции из углепластика: соединительные и переходные отсеки космических аппаратов, несущие фермы, фюзеляжи авиационных аппаратов, изготовленные из органических волокон методом непрерывной намотки баллоны высокого давления, цистерны, баки [1, 2].

В качестве ВОД в основном используются волоконные брэгговские решетки (ВБР) на оптическом кварцевом волокне SMF-28e [3] с полиимидным, или акрилатным покрытием, или оптически совместимыми с ними покрытиями на волокне диаметром световедущей части 80 мкм SM1500(9/80)P.

Технологической проблемой, связанной с большими габаритами конструкций, является существенное сжатие волокна в поперечном направлении в процессе непрерывной намотки и термообработки, что приводит к многочисленным микроизгибам и, в конечном итоге, к полной потере оптического сигнала на входе регистрирующих устройств. Рис. 2, на котором изображен фрагмент типичной структуры баллонов и баков высокого давления, иллюстрирует наличие перепадов толщин конструкции в пределах 0.2 мм и показывает направления осей, по которым в процессе эксплуатации следует проводить измерения. При попадании ВБР в зону пересечения основных направлений намотки в процессе нагружения изделия, например, избыточным внутренним давлением, при общем увеличении геометрических размеров возможна регистрация отрицательной деформации. Кроме того, практика показывает, что в зависимости от конструктивных особенностей изделия максимальная длина оптического световода, размещенного в такой конструкции, составляет не более 750 – 900 мм, что, конечно, неприемлемо для габаритов изделия, существенно больших, чем указанные размеры.

Рис. 2. Типовая структура силового слоя конструкции баллона высокого давления

Решение этой проблемы заключается в дополнительной защите непосредственно световода и размещении световода в зоне ВБР в специальную капсулу. Наличие такой капсулы приведет к появлению механического напряжения, величина которого будет зависеть от материала и размеров капсулы относительно толщины конструкции в зоне ее размещения.

Как показано в работе [4], методов расчета предельных размеров капсулы, которая в данном случае является инородным включением, инициирующим возникновение механических напряжений, на сегодняшний день не существует. Авторы предлагают модель расчета, построенную на общих принципах механики композитов [5] с некоторыми упрощениями и измененными граничными условиями.

2. МОДЕЛЬ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА

Для моделирования поставленной задачи рассмотрим элемент слоистого композита, образованного тремя слоями, расположенными под углом друг к другу, как показано на рис.3. Проекция сил данного элемента могут быть записаны в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned} 2(\sigma_{x1}\bar{h}_1 + \sigma_{x2}\bar{h}_2) &= \sigma, \\ 2(\sigma_{y1}\bar{h}_1 + \sigma_{y2}\bar{h}_2) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь относительные толщины и полная толщина слоистого пакета определяются соотношениями $\bar{h}_1 = h_1 / h$, $\bar{h}_2 = h_2 / h$ и $h = 2(h_1 + h_2)$; σ_{x1} , σ_{x2} , σ_{y1} , σ_{y2} – нормальные напряжения, действующие в слоях 1, 2 по соответствующим координатам x , y (рис. 3).

Рис. 3. Растяжение слоистого композитного материала

Физические соотношения имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} &= \bar{E}_1(\varepsilon_x + \nu_{12}\varepsilon_y), \\ \sigma_{x2} &= \bar{E}_2(\varepsilon_x + \nu_{21}\varepsilon_y), \\ \sigma_{y1} &= \bar{E}_2(\varepsilon_y + \nu_{21}\varepsilon_x), \\ \sigma_{y2} &= \bar{E}_1(\varepsilon_y + \nu_{12}\varepsilon_x), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{E}_{1,2} = E_{1,2} / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$.

Введем допущение, что деформации ε_x и ε_y не изменяются по толщине слоистого пакета. Подставляя соотношения (2) в выражения (1), мы можем найти деформации, а затем напряжения, снова используя уравнения (2). В итоге получим

$$\sigma_{x1} = \frac{\sigma E_1 [E_2 \bar{h}_1 + E_1 \bar{h}_2 - E_1 \nu_{12}^2 (\bar{h}_1 + \bar{h}_2)]}{2[(E_1 \bar{h}_1 + E_2 \bar{h}_2)(E_2 \bar{h}_1 + E_1 \bar{h}_2) - E_1^2 \nu_{12}^2 (h_1 + h_2)^2]}, \quad (3)$$

$$\sigma_{x2} = \frac{\sigma E_2 [E_2 \bar{h}_1 + E_1 \bar{h}_2 - E_2 \nu_{21}^2 (\bar{h}_1 + \bar{h}_2)]}{2[(E_1 \bar{h}_1 + E_2 \bar{h}_2)(E_2 \bar{h}_1 + E_1 \bar{h}_2) - E_1^2 \nu_{12}^2 (h_1 + h_2)^2]}.$$

На рис. 4 приведен график распределения относительных нормальных напряжений σ_1, σ_2 (в направлениях 1, 2 на рис. 3) в слое композитного материала относительно инородного включения, показывающий, что рассматриваемое включение является существенным концентратором напряжений в том случае, если физико-механические характеристики инородного включения отличаются от физико-механических характеристик основного материала конструкции.

Рис. 4. График распределения механических напряжений σ относительно инородного включения

Поперечные слои, растянутые продольными слоями, обладающими гораздо большей жесткостью и удлинением, разрушаются, поскольку их предельное удлинение в поперечном армированию направлении существенно меньше. Это разрушение сопровождается образованием системы трещин, параллельных волокнам, которые можно наблюдать не только в поперечно-слоистых материалах, но и во многих других слоистых структурах (например, в анизотридных сетчатых ребрах), включающих однонаправленные слои, испытывающие поперечное растяжение, вызванное взаимодействием с соседними слоями, или внедренные на этапе изготовления инородные структуры – оптоволоконные датчики различного вида, в том числе с защитными оболочками.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Предварительные эксперименты проводились для двух различных ситуаций. В первом случае было изготовлено кольцо из углепластика шириной 5 мм, толщиной 4 мм и диаметром 145 мм. Кольцо изготавливалось методом непрерывной намотки на металлическую оправку, которая одновременно являлась устройством для испытания кольца на растяжение, кольцо состояло из 4 секторов. В процессе намотки 40 слоев после нанесения первых шести витков было уложено оптическое волокно с ВБР, которое предварительно было обработано эпоксидным клеем холодного отверждения. После такой обработки диаметр кварцевого световода увеличился до 0.6 ± 0.05 мм, что соответствует примерно толщине 6 слоев кольца.

При указанных выше геометрических характеристиках кольца и натяжении нити при намотке 18 кГс контактное давление в зоне расположения ВБР составляло около 4 МПа [6], что не привело к потере работоспособности ВБР при несущественном искажении формы огибающей ее спектра. После термообработки кольцо было испытано до разрушения на установке УТС 110М-100 1-У (рис. 5). Зона разрушения находилась вне места расположения ВБР, что косвенно подтверждает отсутствие влияния ВБР в защитной оболочке на прочность

конструкции. На рис. 6 приведено сечение образца в зоне расположения ВБР, полученное методом компьютерной рентгеновской томографии. Как видно из рисунка, в зоне расположения ВБР не наблюдается растрескивание материала и отсутствуют расслоения. Сама защитная оболочка не видна, так как ее плотность соответствует плотности окружающего материала.

Рис. 5. Общий вид испытательного стенда

Рис. 6. Рентгеновская томограмма зоны ВБР

Во втором эксперименте в качестве объекта был выбран баллон высокого давления из органопластика, силовая оболочка которого имела толщину 4 мм и была изготовлена методом непрерывной намотки с комбинацией кольцевых и спирально-тангенциальных слоев. Примерно на середине толщины оболочки между кольцевым и двойным спирально-тангенциальным слоями были заложены 2 ВБР. Одна из ВБР была вклеена между двумя пластинками отвержденного органопластика толщиной 0.3 мм, вторая была вмонтирована в металлический капилляр диаметром 0.75 мм.

На рис. 7 приведен график изменения показаний ВБР и тензодатчика, наклеенного на наружную оболочку баллона и ориентированного по образующей цилиндрической части этого баллона. Таким же образом ориентированы ВБР внутри материала. В процессе нагружения баллона внутренним гидравлическим давлением сняты показания ВБР и тензодатчика. Из графика видно, что показания ВБР в стальном капилляре существенно отличаются от показаний ВБР, предварительно вмонтированного в пластик. Наиболее вероятной причиной является эффект проскальзывания стальной оболочки относительно органопластика. По окончании эксперимента проведен неразрушающий контроль баллона ультразвуковым методом прохождения и рентгеновским методом, которые не зарегистрировали дефектов типа трещин и расслоений в зоне закладных ВБР.

Рис. 7. График изменения показаний ВБР и тензодатчика в процессе нагружения баллона

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Дополнительная защита ВБР перед установкой в материал изделия позволяет сохранить работоспособность ВБР при контактном давлении до 4 МПа.
2. Защищенная ВБР позволяет ориентировать ее в материале изделия даже поперек направления намотки, т.е. под углом 90°.
3. ВБР в металлическом капилляре может быть использована для защиты ВБР только при использовании ее в качестве датчика температуры.
4. Размер систем защиты ВБР примерно в 3-4 раза превышает толщину слоя в намотанном углепластике и вдвое толщину слоя в намотанном органопластике без образования

дефектов, что превышает данные из расчетных методов, полученные на основании предлагаемой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Azarov A.V., Skleznev A.A., Polilov A.N., Volkova O.Yu.* Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2026. V. 67. №. 2. P. 379. <https://doi.org/10.1134/S0021894426700380>.
2. *Склезнев А.А.* Физика и технология перспективных материалов : сборник трудов Международной конференции (Уфа, 6–10 октября 2025 года). Уфа : Уфимский университет науки и технологий. 2025. С. 308.
3. *Ягодников Д.А., Барышев А.Н., Таурова Л.П. и др.* Конструкции из композиционных материалов. 2024. Т. 174. №2. С.47. https://doi.org/10.52190/2073-2562_2024_2_47.
4. *Федотов М.Ю., Васильев С.А.* Контроль. Диагностика. 2025. Т.28. №10. С. 66 <https://doi.org/10.14489/td.2025.10.pp.066-072>.
5. *Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov* Advanced Mechanics of Composite Materials United States, New York. 2018. ISBN 978-0-08-102209-2.
6. *Vasiliev V.V., Salov V.A., Skleznev A.A.* Mechanics of Solids. 2022. V. 57. № 6. С. 1330.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Пример сетчатой структуры – силовой корпус космического аппарата

Рис. 2. Типовая структура конструкции баллона высокого давления

Рис. 3. Растяжение слоистого композитного материала

Рис. 4. График распределения механических напряжений σ относительно инородного включения

Рис. 5. Общий вид испытательного стенда

Рис. 6. Рентгеновская томограмма зоны ВБР

Рис. 7. График изменения показаний ВБР и тензодатчика в процессе нагружения баллона



Рис. 1.

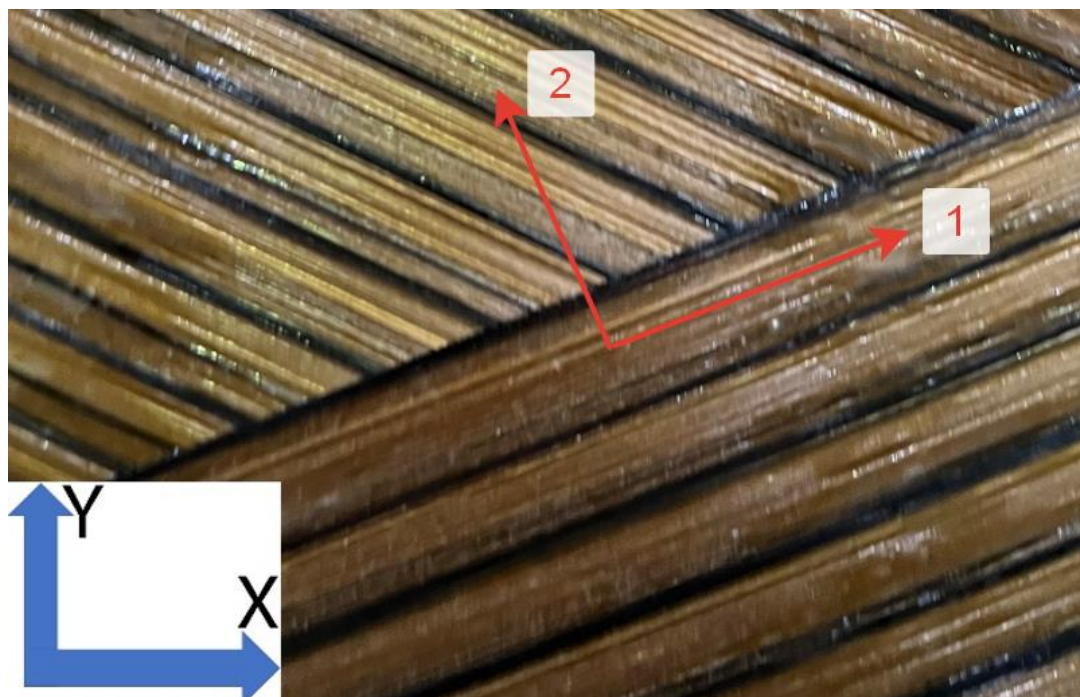


Рис. 2.

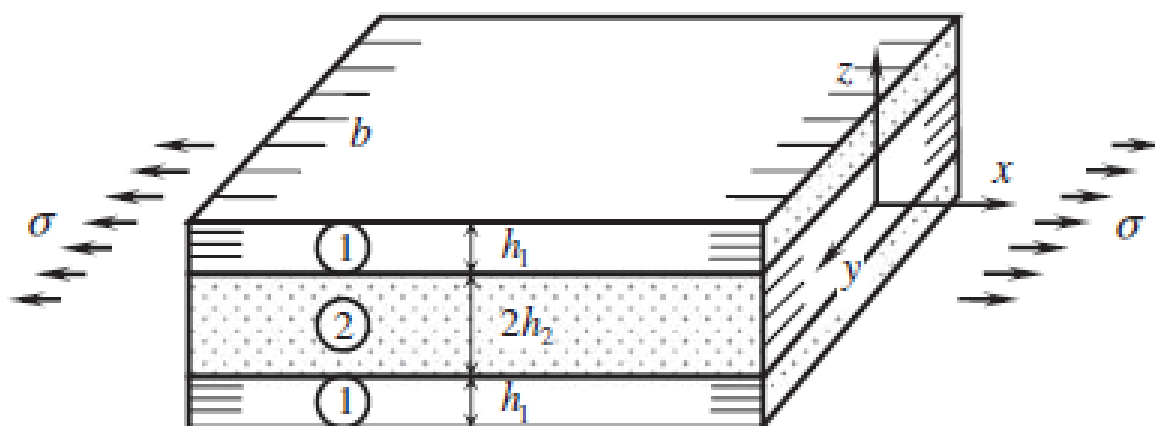


Рис. 3.

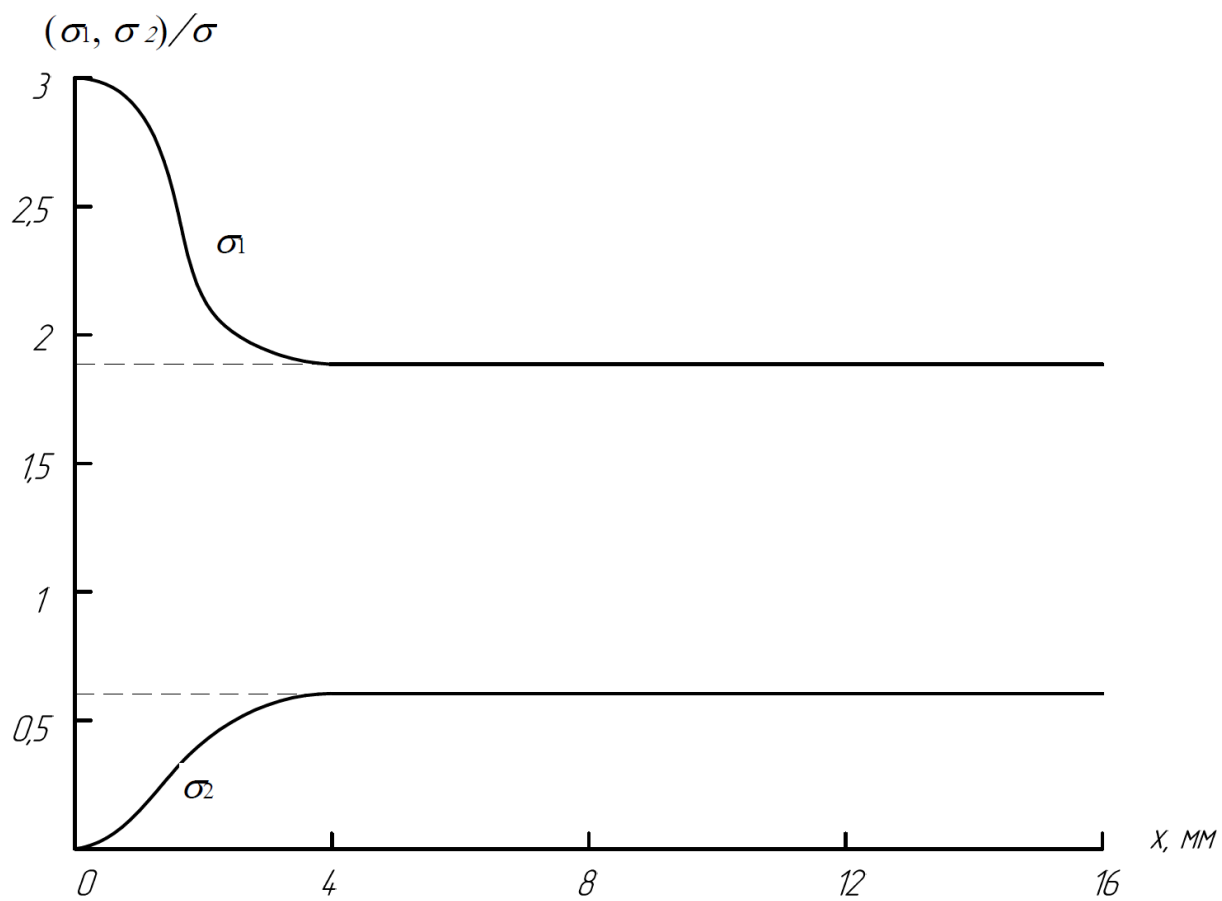


Рис. 4.



Рис. 5.

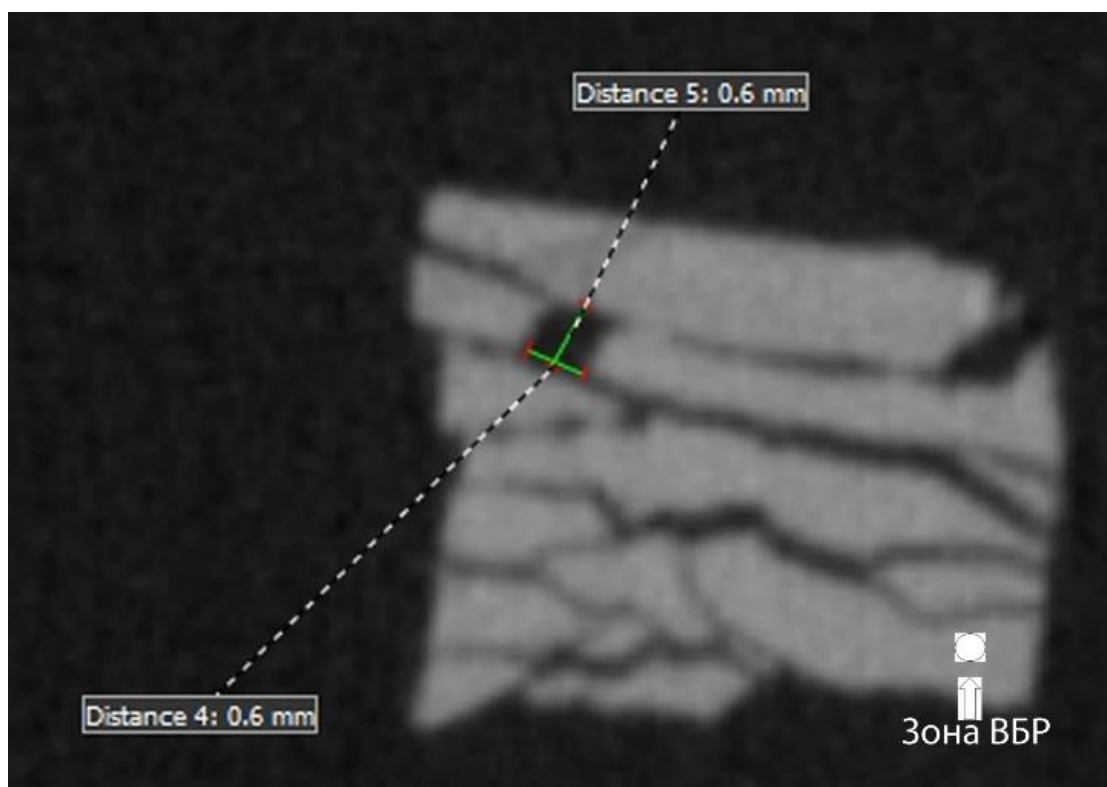


Рис. 6.

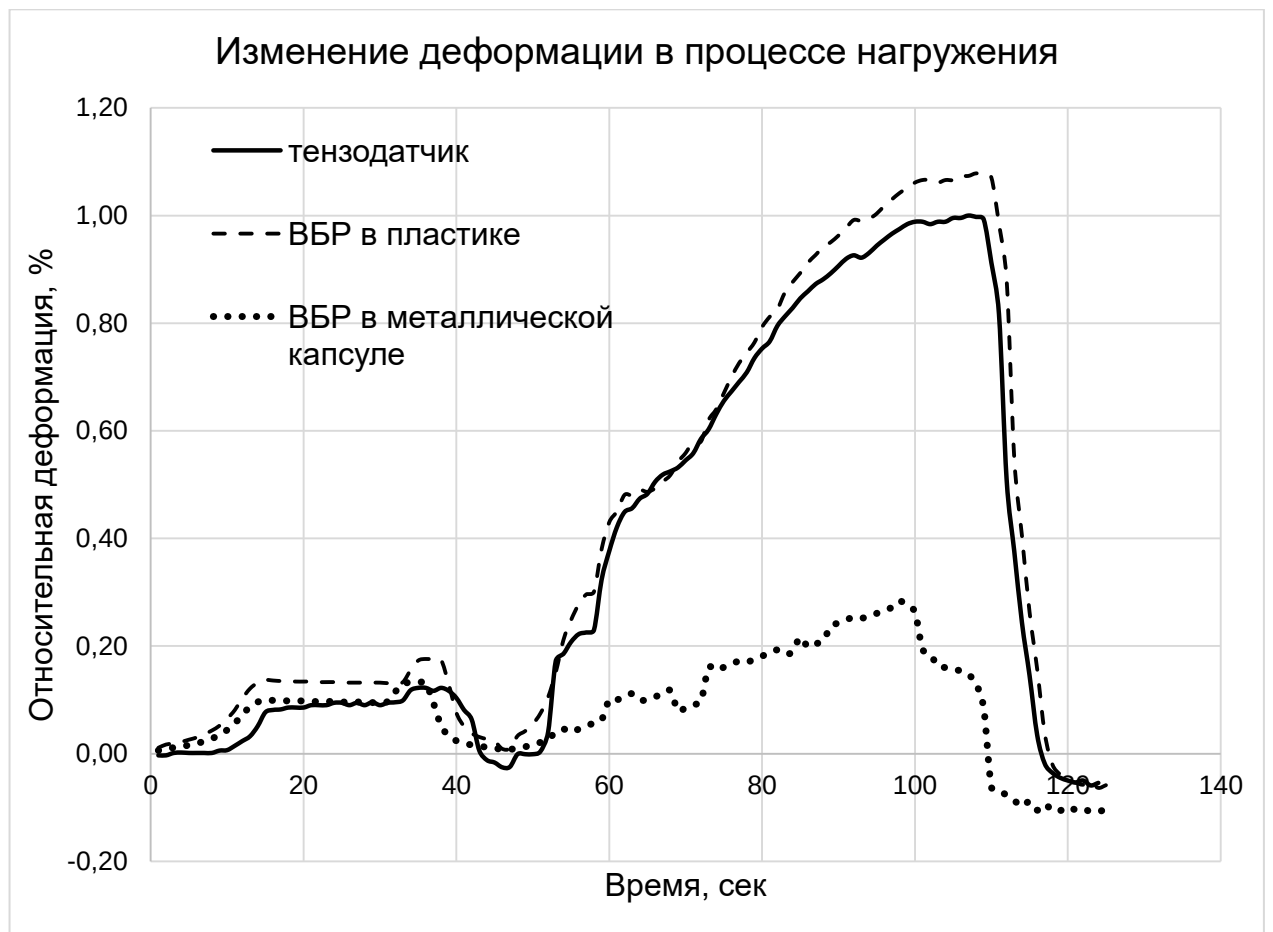


Рис. 7.