



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

УДК678

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.028



## ДИАГНОСТИКА СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО КОМПОЗИТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРА ПО НЕУПРУГОСТИ Инна Алексеевна Дудкевич <sup>1</sup>, Елена Сергеевна Ананьева <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Авиаэксперт», Москва, Россия

<sup>2</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> i-dudkevich@mail.ru

<sup>2</sup> eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

**Аннотация.** Повышение точности получаемых данных, стабильности результатов исследования скважин, улучшение прочностных свойств радиопрозрачного корпуса, и как следствие, повышение ресурса геофизического прибора невозможно без диагностики свойств материала корпуса и оценки уровней нагрузок, способных привести материал к потере несущей способности. Исследовано влияние разных схем циклического нагружения на форму и размеры петли неупругости при испытаниях кольцевых образцов из стеклопластика (0 °–90 °), изготовленных методом косослойно-продольно-поперечной намотки стеклянного волокна на основе алюмоборосиликатного и магнийалюмоборосиликатного стекла. В результате исследования влияния схем нагружения было показано изменение формы и петли неупругости и переход от релаксационного типа неупругости к неупругости гистерезисного типа из-за накопления остаточных деформаций при изменении угла нагружения с 30 ° на 45 ° и увеличении амплитуды нагрузки. Результаты разрушения образцов при схемах нагружения аналогичны условиям нагружения в эксплуатации и могут быть использованы для оценки процесса разрушения.

**Ключевые слова:** стеклопластик, схема нагружения, петля неупругости, остаточная деформация, выносливость, жесткость, кривая регрессии, локальная пластическая деформация.

**Для цитирования:** Дудкевич И. А., Ананьева Е. С. Диагностика стеклопластикового композита, используемого для изготовления корпуса геофизического прибора по неупругости // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 224–228. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/ALGZIK>.

Original article

## DIAGNOSTICS OF THE FIBERGLASS COMPOSITE USED TO MANUFACTURE THE BODY OF A GEOPHYSICAL INSTRUMENT BY INELASTICITY

Inna A. Dudkevich <sup>1</sup>, Elena S. Anan'eva <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aviaexpert LLC, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

<sup>3</sup> Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> i-dudkevich@mail.ru

<sup>2,3</sup> eleana2004@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5768-3912>

© Дудкевич И. А., Ананьева Е. С., 2024

## ДИАГНОСТИКА СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО КОМПОЗИТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРА ПО НЕУПРУГОСТИ

**Abstract.** Increasing the accuracy of the data obtained, the stability of well exploration results, improving the strength properties of the radio-transparent body, and as a result, increasing the service life of the geophysical instrument is impossible without diagnosing the properties of the body material and assessing load levels that can lead to the loss of the material's load-bearing capacity. The influence of different cyclic loading schemes on the shape and dimensions of the inelastic loop was studied when testing ring-shaped fiberglass samples ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) made by obliquely longitudinally winding glass fiber based on aluminoborosilicate and magnesium aluminoborosilicate glass. As a result of studying the influence of loading schemes, a change in the shape and loop of inelasticity and a transition from the relaxation type of inelasticity to the hysteresis type of inelasticity due to the accumulation of residual deformations when changing the loading angle from  $30^{\circ}$  to  $45^{\circ}$  and increasing the load amplitude were shown. The results of sample destruction under loading schemes are similar to the loading conditions in operation and can be used to evaluate the destruction process.

**Keywords:** fiberglass, loading scheme, inelastic loop, residual deformation, endurance, rigidity, regression curve, local plastic deformation.

**For citation:** Dudkevich, I.A. & Anan'eva, E.S. (2024). Diagnostics of the fiberglass composite used for the manufacture of the body of a geophysical instrument based on inelasticity. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 224-228. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.028. EDN: <https://elibrary.ru/ALGZIK>.

### ВВЕДЕНИЕ

Учет возросших требований к качеству высокочастотного электромагнитного каротажа в области геофизических исследований скважин объясняет активное использование волокнистых композиционных материалов на основе высокопрочных волокон и полимерной матрицы. В процессе эксплуатации геофизический корпус подвергается воздействию окружающей агрессивной среды (температуры до  $150^{\circ}\text{C}$ , сероводорода до 0,1 %, соляной кислоты до 10 %, циклических динамических осевых нагрузок, изгибающего момента, высокого внешнего давления (до 100 Мпа), из-за чего в структуре материала появляются окружные и продольные растрескивания и трещины под углом  $45^{\circ}$  от внутренней поверхности материала. Это происходит из-за того, что значительную часть перепада давлений из-за проницаемости внешней части воспринимает внутренняя часть. В результате происходит разрушение материала из-за потери устойчивости КМ при сдвиге и прекращении работоспособности электронного блока внутри модуля.

Целью данной работы являлось исследование выносливости образцов ориентированного стеклопластика в зависимости от направления нагружения и формы петли неупругости.

### МЕТОДЫ

Предлагается методика определения выносливости образцов, которая позволит спрогнозировать ход разрушения композиционного материала, оценить степень поврежденности материала после внешних

воздействий и осуществить подбор уровней нагрузок, приводящих композит к разрушению от циклических испытаний.

Исследовали образцы корпуса, имеющие вид толстостенной трубы, изготовленной методом косослойно-продольно-поперечной намотки (КППН). Используются армирующие материалы на основе стекла алюмоборосиликатного и магнийалюмоборосиликатного составов. Стенка трубы имеет толщину 13 мм при наружном диаметре 75 мм, внутреннем – 49 мм, содержит 2 слоя, намотанные и полимеризованные двухстадийно. Вид установленного на испытательную машину образца приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Вид кольцевого образца, установленного в захватах испытательной машины BiSS UTM-100 kN

Figure 1 – View of the annular sample installed in the grips of the BiSS UTM-100 kN test machine

Для более точной регистрации перемещений на испытательную машину установлен датчик перемещений фирмы MTS с диапазоном хода  $\pm 4$  мм, дающий при оцифровке перемещений подвижного захвата машины погрешность  $\pm 1,5\text{--}2$  мкм. Образец нагружался начальной нагрузкой несколько десятков килограмм, чтобы выйти на участок с большей жесткостью образца. Затем осуществлялся переход в режим управления по перемещению и ступенчато задавались циклические приращения относительных перемещений от нуля до  $\Delta S_{\max}$ . Максимальные значения приращения перемещений  $\Delta S_{\max}$  составляли от  $-0,1$  до  $-0,6$  мм с шагом  $-0,1$  мм. Время нагружения или разгрузки равнялось десяти секундам при постоянной скорости перемещений  $dS/dt$ . На каждой ступени нагружения выполнялось по три цикла перемещений. Программа нагружения приведена на рисунке 2.

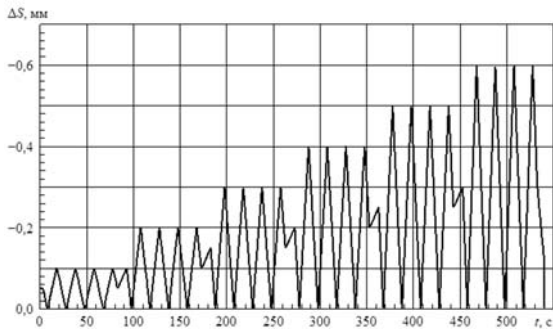


Рисунок 2 – Программа нагружения по относительному перемещению  $\Delta S$ , предназначенная для диагностики кольцевых образцов по неупругости

Figure 2 – The program of loading by relative displacement  $\Delta S$ , intended for the diagnosis of annular inelasticity

В зависимости от индивидуальных свойств и ориентировки образца усилие на кольцо составляло от  $-700$  до  $-900$  кгс при максимальном приращении перемещения  $0,6$  мм. Образец А.1 нагружали в трех направлениях, сдвинутых друг от друга на угол  $120^\circ$ . Таким образом, области максимальных напряжений были смещены относительно друг друга при смене направления нагружения на угол  $30^\circ$ . Это позволяло, с одной стороны, иметь статистику свойств материала одного образца в разных местах, с другой – влияние образующихся повреждений от нагружения в одном направлении на свойства материала, нагруженного в другом направлении.

Амплитудные зависимости раскрытия неупругости петли для образца А.1 приве-

дены на рис. 3 и 4. Обычно первый цикл нагружения имеет большее раскрытие петли неупругости. При небольших амплитудах нагружения этот эффект незначителен, но при больших – явно выражен.

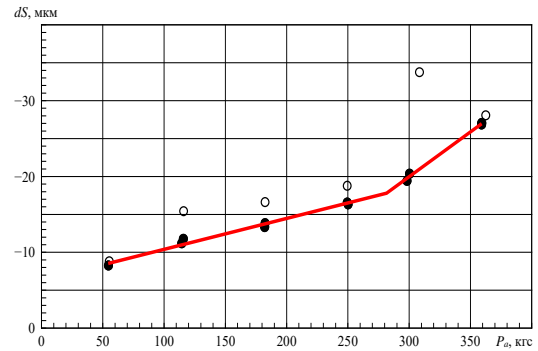


Рисунок 3 – Пример амплитудной зависимости максимума раскрытия петли неупругости при диагностировании образца А.1 (первое нагружение в условном направлении  $0^\circ$ ) по тестирующей программе

Figure 3 – Is an example of the amplitude dependence of the maximum opening of the inelasticity loop when diagnosing sample A.1 (first loading in the conditional direction  $0^\circ$ ) according to the testing program

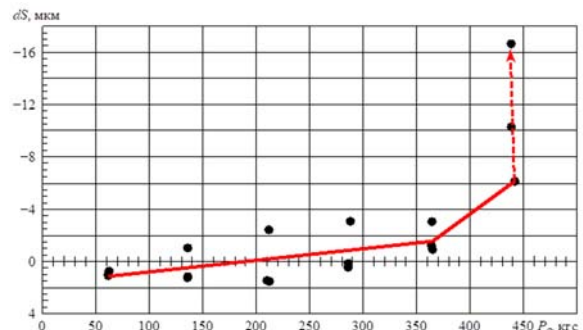


Рисунок 4 – Амплитудная зависимость максимума раскрытия петли неупругости образца А.1 (третье нагружение в условном направлении  $240^\circ$ )

Figure 4 – Amplitude dependence of the maximum opening of the inelasticity loop of the sample A.1 (third loading in the conditional direction  $240^\circ$ )

Образец А.2 диагностировался в двух направлениях –  $0^\circ$  и  $45^\circ$ . Это сдвигает максимумы сжимающих и растягивающих напряжений не на  $30^\circ$ , а на  $45^\circ$ , что уменьшает влияние направления нагружения на результаты диагностики. Результаты неупругого поведения образцов приведены на рисунках 5, 6.

## ДИАГНОСТИКА СТЕКЛОПЛАСТИКОВОГО КОМПОЗИТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРИБОРА ПО НЕУПРУГОСТИ

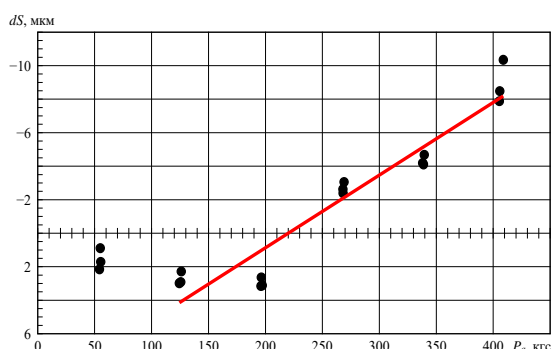


Рисунок 5 – Амплитудная зависимость максимума раскрытия петли неупругости образца А.2 (повторное нагружение в условном направлении 0°)

Figure 5 – Amplitude dependence of the maximum opening of the inelasticity loop of the sample A.2 (repeated loading in the conditional direction 0°)

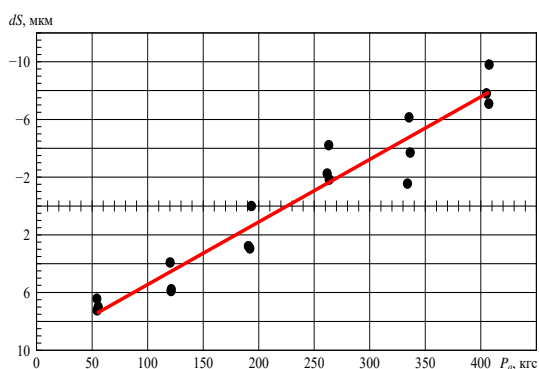


Рисунок 6 – Амплитудная зависимость максимума раскрытия петли неупругости образца А.2 (третье нагружение в условном направлении 45°)

Figure 6 – Amplitude dependence of the maximum opening of the inelasticity loop of the sample A.2 (third loading in the conditional direction 45°)

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости имеет характерный вид. Ее начальный участок линейно зависит от амплитуды нагружения и выходит из начала координат, что соответствует релаксационному типу неупругости (образец А1., запаздыванию деформации относительно приложенных напряжений), свойственному любому материалу. Разброс величины раскрытия петли между отдельными циклами нагружения на этом участке находится в пределах погрешностей регистрации перемещений. С увеличением амплитуды наблюдаются отклонения от этой зависимости, свидетельствующие об увеличении неупругих деформаций за счет появления локальных пла-

стических деформаций – неупругости гистерезисного типа. В металлах и сплавах это связывают с дислокационным механизмом рассеяния энергии. Однако аналогичное поведение свойственно и аморфным полимерам, и композитам. Для первого нагружения образца А.1. подобные отклонения в амплитудной зависимости неупругости появились при амплитуде нагружения больше 350 кгс. На последней ступени нагружения здесь появилось значительное увеличение раскрытия петли в первом цикле нагружения с его стабилизацией в последующих двух циклах. Это говорит о появлении процессов локального пластического деформирования и связанного с ними усталостного разрушения. Разрушение, по сути, есть релаксационный процесс, приводящий на первых его стадиях к снижению внутренних напряжений. Раскрытие петли уменьшилось с одновременным уменьшением амплитуды силы, поскольку с целью снижения погрешностей измерения деформаций нагружение осуществлялось по перемещению.

Для подбора уровня нагрузок, приводящих образцы к разрушению от циклического изменения напряжений, были проведены испытания образцов А.1, А.2 после диагностических измерений неупругости при нескольких значениях максимума силы. Минимальное значение нагрузки во всех опытах составляло –100 кгс. Образец А.1, наиболее разрушенный в ходе диагностики, испытывался сначала при нагрузке  $P_{max} = -800$  кгс и выдержал без видимых признаков разрушения 100000 циклов нагружения. При этом форма петли неупругости в начале испытаний и при последних циклах нагружения несколько изменилась, а ее раскрытие увеличилось. Этот же образец, получивший некоторые повреждения на малых нагрузках, был испытан при максимальном усилии  $P_{max} = -1200$  кгс, находящимся в середине диапазона монотонного нагружения, при котором жесткость образца начинает уменьшаться. Образец А.2 был испытан при меньших нагрузках. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Выносливость образцов при различных значениях максимальной нагрузки цикла (частота 1 Гц, 278 К, синусоидальный цикл при  $P_{min} = -100$  кгс)

Table 1 – Endurance of samples at various values of the maximum cycle load (frequency 1 Hz, 278 K, sinusoidal cycle at  $P_{min} = -100$  kgf)

Образцы	A.1	A.2
$P_{max}$ , кгс	-800	-1000
$N$ , цикл	100000*)	7362
Примечание: *) без признаков разрушения		

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены исследования влияния условий нагружения на деформационные и прочностные свойства ориентированного стеклопластика ( $0^\circ$ – $90^\circ$ ). Установлено, что первые циклы нагружения характеризуются большим раскрытием петли неупругости, чем последующие. Каждый образец при каждом направлении приложения сил ведет себя как индивидуальная конструкция. Это объясняется неизбежной неоднородностью материала, вызванной технологическими причинами.

## ВЫВОДЫ

Просматривается общая тенденция – повторные нагружения образцов по той же программе на малых амплитудах показывают обратный знак раскрытия петли неупругости. В этом случае композит в полной мере ведет себя как конструкция, упрочняясь по мере выравнивания распределения напряжений. Этот эффект был обнаружен при продольном изгибе стеклопластиковых стержней. Разрушение композита начинается с отслоения волокна от матрицы, причину которого следует искать в различии неупругих свойств фазовых материалов композиционного материала. Разрушение перегруженных волокон в конструкции стеклопластика и должно приводить к снижению неупругих деформаций и превращению его в материал, более близкий к идеально упругому. Пример «классического» поведения показал образец А.1 при первом нагружении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регель В.Р., Лексовский А.М., Кириенко О.Ф. К вопросу о температурно-силовой зависимости прочности адгезионных контактов металл–полимер // Механика полимеров. 1977. № 3. С. 544–547.
2. Регель В.Р., Габараева А.Д., Филиппов Н.Н., Лексовский А.М. Измерение методом инфракрасной спектроскопии напряжений на волокнах в нагруженных композиционных материалах // Механика полимеров. 1977. № 5. С. 832–837.
3. Петров М.Г. Анализ прочности и долго-

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 15 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.*

*The article was received by the editorial board on 15 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.*

вечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9, № 3. С. 376–397.

4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости : пер. с англ. М. : Наука, 1979. 560 с.

5. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. М. : Мир, 2002. 368 с., ил.

6. Корелина О.В. Результаты анализа разрушений стеклопластиковых оболочек / О.В. Корелина // Результаты из СибНИА. 2011. 6 с.

7. ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температуре: Введ. постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 22 октября 1982. № 4035.

8. АО НПП ГА «ЛУЧ» [Электронный ресурс]. (<http://www.looch.ru/>).

9. Еремин В.Н. Разработка аппаратуры электромагнитного каротажа в процессе бурения с корпусом из полимерного композиционного материала : дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.10: защищена 14.03.06. Новосибирск, 2006.

10. Степанов В.А. Прочность и релаксационные явления в твердых телах / В.А. Степанов, Н.Н. Песчанская, В.В. Шпейзман. Л. : Наука, 1984. 248 с.

## Информация об авторах

*И. А. Дудкевич – эксперт-аудитор Росавиации (инженерная специализация – металлические и неметаллические материалы, испытания материалов), ООО «Авиаэксперт».*

*Е. С. Ананьева – доцент кафедры современных специальных материалов, к.т.н., АлтГТУ им. И.И. Ползунова*

## Information about the authors

*I.A. Dudkevich - expert-auditor of the Federal Air Transport Agency (engineering specialization - metallic and non-metallic materials, materials testing), Aviaexpert LLC.*

*E.S. Anan'eva - Associate Professor of the Department of Modern Special Materials, Ph.D., Polzunov Altai State Technical University.*