

9. Агафонова Г. Л., Кожаева А. В. Опыт применения лакокрасочных материалов для противокоррозионной защиты нефтепромышленного оборудования ОАО АНК «Башнефть» //Территория Нефтегаз. – 2012. – №. 3. – С. 40-44.

10. Юдин П. Е., Александров Е. В., Иоффе А. В. Проблемы обеспечения стабильности качества и методы прогнозирования сроков эксплуатации внутренних антикоррозионных покрытий труб и фасонных изделий //Коррозия Территория Нефтегаз. – 2012. – №. 5. – С. 12-14.

11. N. Sangaj, V. Malshe, Progress in Organic Coatings, 50 (1), 28-39 (2004)

12. Юдин П. Е. Анализ причин разрушения внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2014. – №. 1 (41). – С. 85-92.

13. ГОСТ Р 58346-2019. Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования.

14. ГОСТ 9.407-2015. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида.

15. ГОСТ 32299-2013. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва, 2013.

D.A Vinogradov<sup>1,2</sup>, D.V. Lyashenko<sup>1,2</sup>, M.A. Kovalev<sup>1,2</sup>, Qian Jiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

<sup>2</sup>STC «New technologies and materials»,

Saint Petersburg, Russia. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Changchun University, Changchun, 6543, Satellite Road, China

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CYCLIC DECOMPRESSION ON METAL AND POLYMER COATINGS

### Abstract

The paper studied the effect of cyclic decompression on changes in the properties of duplex metal-polymer (ZiPLY97) and metal (FeZn) coatings intended for application to the inner surface of pipes in the oil and gas industry. According to the research results, cyclic decompression tests can be used as an alternative method to confirm the destruction of the coating.

*Keywords:* anticorrosive coatings, polymer coatings, autoclave tests, decompression

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-249

В.О. Токарев<sup>1,2</sup>, Д.А. Виноградов<sup>1,2</sup>, М.А. Ковалёв<sup>1,2</sup>, Pan Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

<sup>2</sup>НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## **Аннотация**

В работе рассмотрено влияние типовых дефектов, которые могут возникнуть у полимерных композиционных материалов (ПКМ) как в процессе производства, так и при их эксплуатации. Наличие дефектов может являться причиной снижения механических свойств материалов и внезапных отказов готовых конструкций. Создана база данных по изменению свойств полимерных материалов основных производителей после внесения на них искусственных дефектов.

*Ключевые слова:* полимерные композиционные материалы, механические свойства, дефекты

## **Введение**

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают преимуществами в сравнении с традиционными стальными [1-6] и могут выступать в качестве альтернативы во многих областях, включая нефтегазовую отрасль и строительство [7-10]. Однако ПКМ является относительно новым и менее изученным материалом, что является ограничивающим фактором для его широкого распространения.

Дефекты являются неотъемлемой частью любого изделия. Они могут быть образованы как на этапе проектирования, так и на этапах транспортировки, монтажа и ввода в эксплуатацию. ПКМ, являясь хрупким материалом, склонен к разрушению в участке концентратора напряжений. На рис.1 представлена схема возможных причин зарождения дефектов в ПКМ.

Прогнозная оценка влияния дефектов ПКМ на их эксплуатационные свойства является актуальной задачей, которая может решаться по двум направлениям: применением неразрушающих методов контроля и прогнозирование развития дефектов под воздействием различных факторов.

Производственные дефекты в общем виде могут быть описаны в нормативных документах на изделия. Среди полученных в ходе транспортировки, монтажа и эксплуатации дефектов можно выделить растрескивание матрицы из-за ударных воздействий, повреждения армирующих волокон вследствие сколов и порезов, формирование трещин при превышении усилия затяжки в зоне болтового соединения. Критичность такого рода дефектов зависит от усилия воздействия, степени повреждения и зоны, в которой расположен дефект. Степень повреждения оценивается через процентное сокращение эффективного сечения, а также по тому, привел ли первичный дефект к формированию вторичных. Например, ударный дефект приводит к формированию трещин в матрице ПКМ.

Целью работы являлось определение степени влияния дефектов на механические свойства ПКМ.

## **Методы и материалы**

Исследование влияния дефектов на материал проводилось как для материала в исходном состоянии, так и после механических и агрессивного климатического воздействий – ускоренные испытания на морозостойкость. Для исследований были отобраны изделия производителей пултрузионных стеклопластиков «Центр полимерных композитов», «Нанотехнологический центр композитов», «Татнефть-пресскомпозит», «Автопласт», «Армпласт».



Рисунок 1 – Схема возможных причин зарождения дефектов в полимерных композиционных материалах

Механические свойства материала определялись испытаниями на растяжение и сжатие с применением стандарта ГОСТ 32656–2017 [11] и использованием разрывной машины Zwick//Roell Z050 (Рис. 2). Для фиксации образцов использовались плоские гидравлические захваты. Получаемыми характеристиками являлись предел прочности при растяжении, а также график напряжения материала при нагрузке 50% и 80% от предела прочности в течение пяти минут.



Рисунок 2 – Разрывная машина Zwick//Roell Z050

Образцы изготавливались в форме лопаток типа 1В и плоских образцов, изготовленных в соответствии со стандартом при помощи программируемого фрезерного станка (Рис. 3, Табл. 1). Оценка свойств изделий, обладающих анизотропией свойств, проводилась как в продольном, так и поперечном сечении.

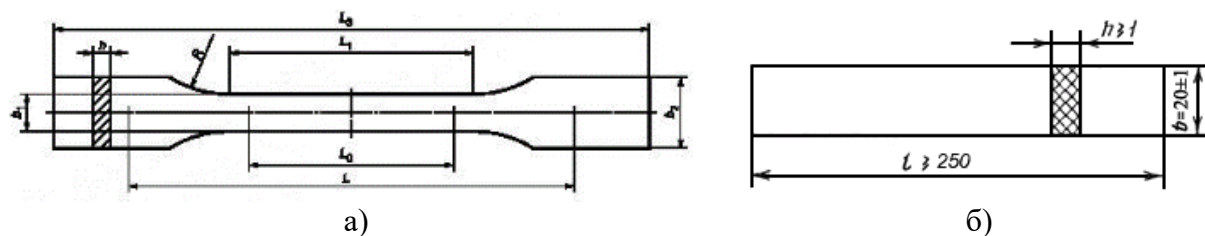


Рисунок 3 – Образцы для испытаний: а) образец типа 1В, б) плоский образец

Таблица 1 – Размеры образцов-лопаток 1В

Параметр	Значение, мм
Общая длина, $L_3$	$\geq 150$
Длина узкой параллельной части, $L_1$	$60 \pm 0,5$
Радиус, $R$	$\geq 60$
Ширина на концах, $b_2$	$20 \pm 0,2$
Ширина узкой части, $b_1$	$10 \pm 0,2$
Толщина, $h$	2-10
Измерительная база, $L_0$	$50 \pm 0,2$
Исходное расстояние между захватами, $L$	$115 \pm 1$

Определение предела прочности на смятие штифтом проводилось с использованием стандарта ГОСТ 33344-2015 [12] и специально подготовленной оснастки. Сущность метода заключалась в подвергании плоского образца двойному сдвигу при помощи плотно посаженного металлического штифта. Испытанию

подвергались образцы-свидетели с проделанным сквозным отверстием, образцы после предварительного затяга болта без шайбы и последующего снятия, образцы после предварительного затяга болта с шайбой и последующего снятия (Рис. 4).

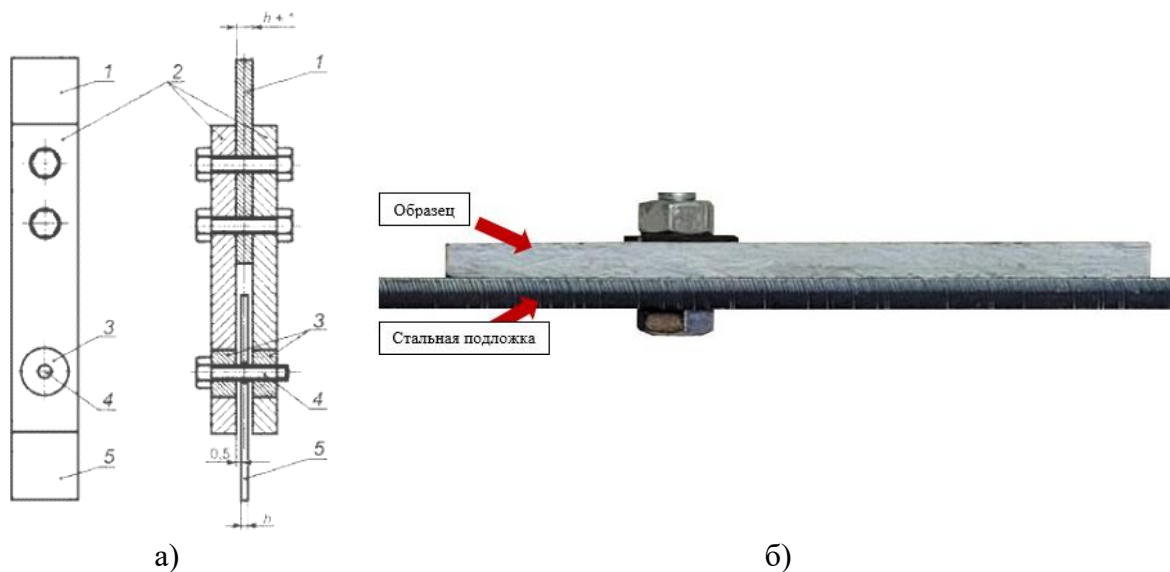


Рисунок 4 – Оснастка для определения предела прочности на смятие штифтом: а) чертёж оснастки 1 – распорная плита, 2 – боковая плита, 3 – втулки, 4 – гладкий штифт, 5 – образец б) принцип предварительной затяжки болтового соединения

За основу при проведении испытаний на морозостойкость был взят стандарт ГОСТ 10060-2012 [13]. Исследования представляли собой циклическую заморозку и разморозку образцов с постоянной выдержкой в среде 5% водного раствора хлористого натрия. Испытания проводились на образцах без предварительной изоляции. Условия испытаний представлены в Табл. 2.

Таблица 2 – Условия испытаний на морозостойкость

Среда насыщения	Среда, температура и время замораживания		Среда, температура и время оттаивания
5% раствор NaCl	5% раствор NaCl (-50±2) °C, 2,5 ч	5% раствор NaCl (-10±2) °C, 1,5 ч	5% раствор NaCl (+20±2) °C, 3 ч

Искусственные дефекты представляли собой типовые дефекты, которые могут проявляться на изделиях при производстве и эксплуатации и представляли собой удар, надрез, отверстие (Табл. 3). Их расположение было по центру рабочей зоны образца.

Таблица 3 – Описание искусственных дефектов

Искусственный дефект	Дефект по ГОСТ 33344	Особенности	Вспомогательная документация
Удар	Трещина Расслоение Излом	Нанесение ударного дефекта на поверхности.	ГОСТ 33496-2015
Надрез	Канавка	Нанесение несквозного поверхностного дефекта.	X
Отверстие	Пора Кратер Включение	Нанесение сквозного и несквозного дефекта на поверхности и по толщине.	ГОСТ 33375-2015

Нанесение ударного дефекта проводилось с учётом ГОСТ 33496-2015 [14]. Сущность метода заключалась в повреждении рабочей поверхности образца

свободно падающим грузом с наконечником полусферической формы. В качестве оснастки для нанесения дефекта применялась установка для оценки стойкости материалов к воздействию свободно падающим грузом, масса и диаметр бойка которой составляли 3 кг и 16 мм соответственно (Рис. 5).

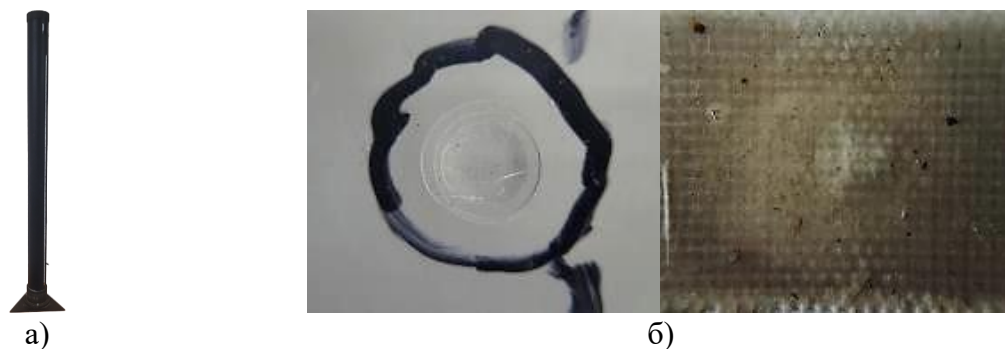


Рисунок 5 – а) оснастка для нанесения ударных дефектов б) пример получаемых дефектов на лицевой и обратной стороне образца соответственно

Дефект в виде надреза наносился путём снятия поверхностных слоёв при помощи ножа и сверла. Габаритные размеры дефекта приблизительно составляли  $1/3$  глубины и  $1/2$  ширины рабочей зоны образца. Дефект в виде отверстия наносился при помощи сверла, опираясь на требования ГОСТ 33375-2015 [15] (Рис. 6).

### Результаты и обсуждение

Ударные дефекты, надрезы и отверстия в целом снижали предел прочности ПКМ. Наиболее наглядно это проявлялось на листовом изделии производителя «Автопласт», где нанесение дефектов снижало прочность на растяжение до двух раз. Изделия от других производителей показали сравнительно меньшее падение механических свойств. На это могло повлиять как большая толщина изделий, из-за чего нанесение аналогичных дефектов приводило к меньшей деградации свойств, так и наличие поверхностных слоёв направления  $-45/+45^\circ$ .

Ударный дефект приводил к расслоению, снижая предел прочности. Дефекты в виде отверстий и надрезов снижали свойства в зависимости от глубины их проникновения за счёт повреждения основных несущих слоёв. Надрезы, не задевающие основные слои, оказывали незначительное влияние на предел прочности.

В Табл. 4 приведены результаты изменения механических свойств на растяжение образцов с нанесёнными дефектами.

При оценке влияния дефектов на предел прочности при смятии штифтом изделий производителя «Татнефть» было отмечено, что предварительная затяжка болтового соединения не приводила к снижению прочности (Рис. 7,а). При этом наличие трещины в кромке, обнаруженное на одном из образцов также не снижало прочностные свойства несмотря на то, что граница сдвигового разрушения являлась трещиной (Рис. 7,б).

Растягивающая нагрузка может приводить к дальнейшему развитию дефекта. Так, надрез на образце производителя «Татнефть» при нагружении постепенно разрывался в основании. При нанесении ударного дефекта в процессе нагрузки происходило расслаивание трещин. Разрушение приводило к росту водопоглощения и соответствующему увеличению деградации во время эксплуатации (Рис. 8).

Таблица 4 – Результаты испытаний образцов с дефектами на растяжение

Производитель	Изделие	Дефект		Толщина , мм	Дефект, %		Исходный предел прочности, МПа	Падение свойств
					Глубина	Площадь дефекта		
ЦПК	Лист (прод.)	Удар	300 мм	3,15	х	х	528	15%
			600 мм		100%	35%		15%
		Отверстие (3,5 мм)	сквозное					
	Лист (поп.)	Удар	600 мм	3,15	х	х	64	94%
	Профиль	Удар	600 мм	5	х	х	412	13%
	Уголок	Удар	300 мм	5	х	х	585	11%
НЦК	Швеллер	Отверстие (3,5 мм)	боковое	5	до 34%	24%	540	38%
		Надрез	горизонтальный		до 24%	6%		19%
Татнефть- пресс композит	Уголок	Удар	300 мм + 30 циклов заморозки-разморозки	5	х	х	570	6%
		Отверстие (5 мм)	несквозное		до 50%	9%		5%
		Надрез	горизонталь ный + 3 цикла заморозки-разморозки		до 30%	10%		6%
	Лоток	Надрез	под углом 45°	3,10	до 35%	13%	527	27%
Автопласт	Лист	Удар	150 мм	2,8	х	х	94	27%
			300 мм					49%
			400 мм					29%
		Отверстие (3,5 мм)	сквозное		100%	37%		27%
		Надрез	вертикальный		до 70%	20%		0%
			горизонталь ный		до 65%	32%		44%
	Профиль сложного сечения	Удар	300 мм	2,3	х	х	394	5%
Армпласт	Уголок	Надрез	вертикальный	5,3	до 26%	3%	550	0%
			горизонталь ный		до 22%	6%		13%

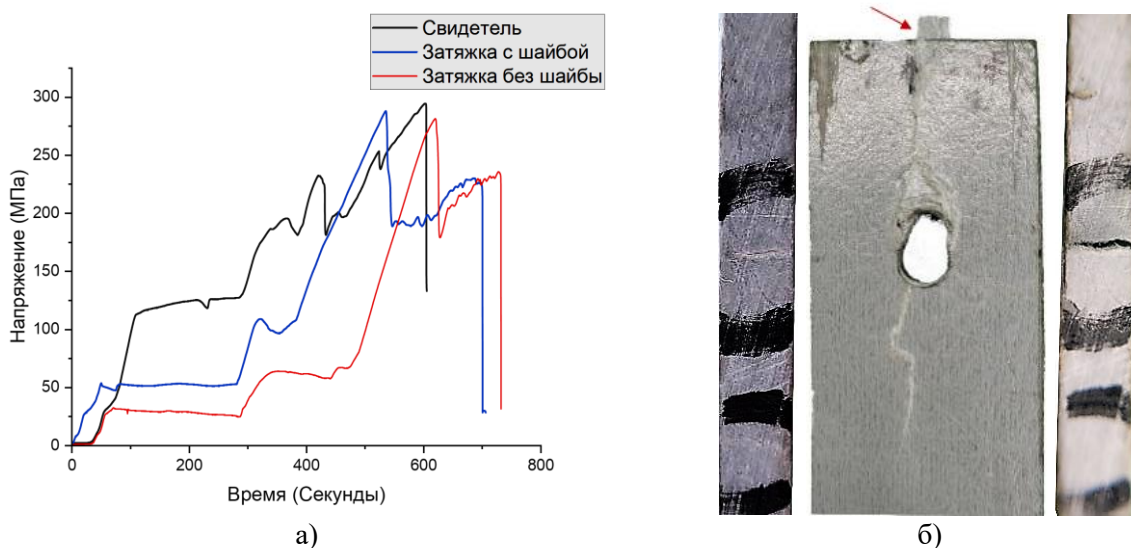


Рисунок 7 – а) кривые напряжений при смятии; б) трещина на кромке образца, являющаяся концентратором напряжений при сдвиговом разрушении

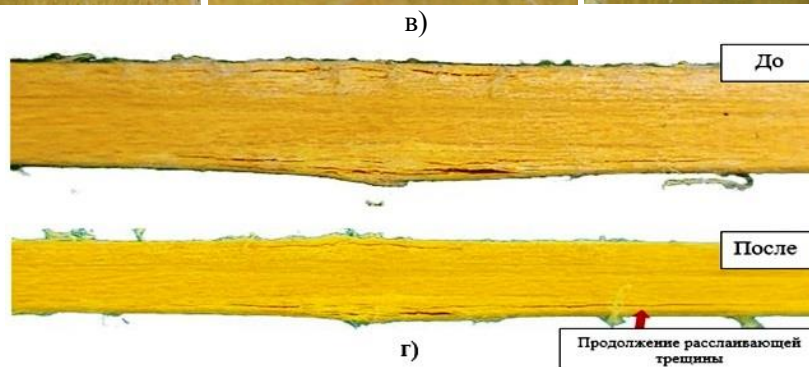
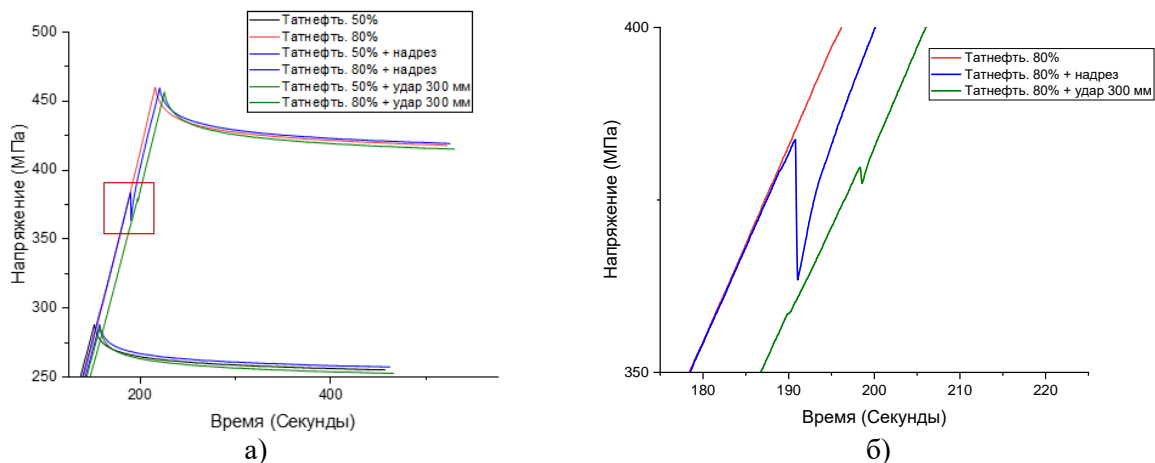


Рисунок 8 – Кривые напряжения после нагрузки на 50% и 80% от предела прочности  
 а) общий график б) участок вероятного появления расслаивающего разрушения  
 в) внешний вид дефекта-надреза в исходном состоянии, после нагрузки 50% и 80%, соответственно. г) внешний вид поперечного сечения в продольном направлении в исходном состоянии и после нагрузки 80%, соответственно



Рассматривая аналогичные испытания образцов из материала производителя «Центр полимерных композитов», нанесение аналогичных дефектов приводило к сравнимым результатам, однако снижение прочности после нанесения надреза снизило предел прочности на ~20%, что привело к разрушению материала вскоре после достижения нагрузки в 80% от предела прочности (Рис. 9).

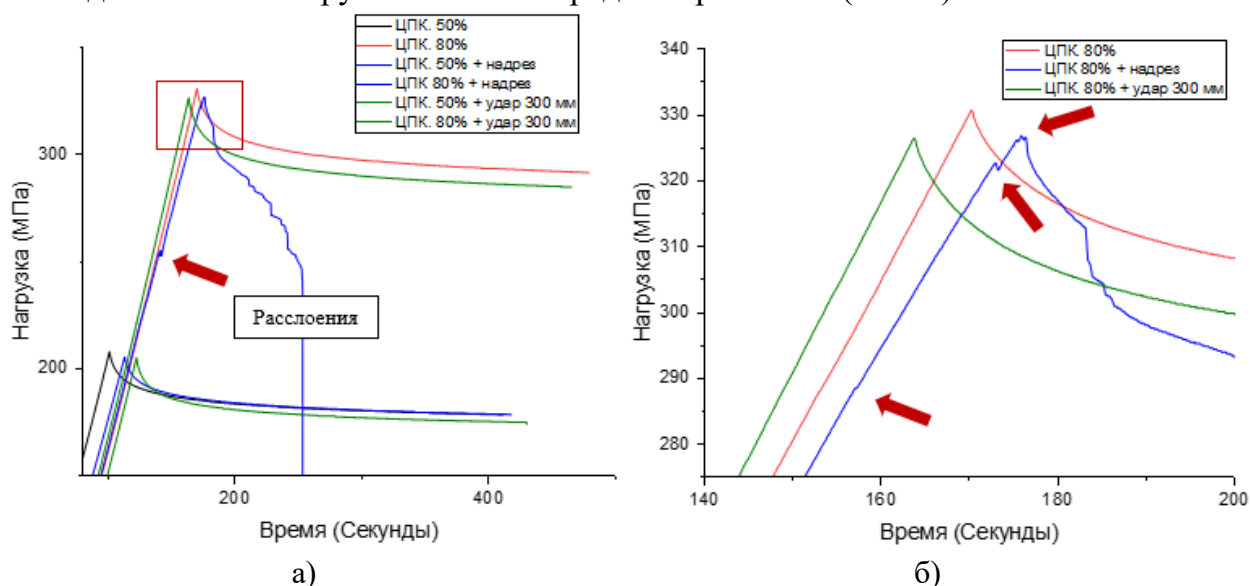


Рисунок 9 – Кривые напряжения после нагрузки на 50% и 80% от предела прочности а) общий график б) участки вероятных расслаивающих разрушений

### Заключение

Проведенные в рамках данной работы исследования позволили спрогнозировать вероятные дефекты и оценить их влияние на надежность эксплуатации конечного изделия.

В ходе лабораторных испытаний было показано, что удар приводит к формированию трещин по сечению профиля. Падение прочностных характеристик особенно заметно на образцах с поперечным расположением армирующих слоев и составляет до 94%. На образцах с продольным расположением падение механических характеристик может достигать 15%.

Внешние повреждения сквозные и несквозные оказывают разное воздействие на надежность конструкции. При оценке степени их влияния необходимо иметь данные по сокращению эффективного сечения и нагрузкам в зоне дефекта. Было показано, что наличие дефекта в виде несквозного повреждения вызывает формирование трещин при нагрузке до 80% от предела прочности.

Наличие продольных трещин по направлению армирования не влияет на предел прочности при испытаниях на смятие штифтом. Также на прочностные характеристики при смятии штифтом не повлияла предварительная нагрузка болтовым соединением в зоне отверстия.

По мере нахождения изделия в зоне эксплуатации агрессивные факторы среды могут комбинировать с производственными и полученными дефектами и вызывать их ускоренную деградацию. В ходе лабораторных испытаний развития искусственных дефектов под воздействием влаги и переходов через 0° не произошло, однако для построения прогнозных моделей необходимы более продолжительные испытания с увеличением выборки образцов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михаил Ю.А. Конструкционные полимерные материалы. 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 стр., ил.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с., ил.
3. K.K. Chawla, Composite materials: science and engineering, Springer Science & Business Media, 2012.
4. Современные полимерные материалы: учебное пособие / М. В. Шишонок. – Минск: Вышэйная школа, 2017. – 278 с.: ил., [4] л. цв. ил
5. Бобович Б. Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение) //М.: ФОРУМ. – 2014.
6. Яшнов А. Н., Пиняжин С. В. Некоторые направления развития мостостроения в условиях Крайнего Севера //Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. – 2021. – С. 499-502.
7. Власенко Ф. С., Раскутин А. Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях //Труды ВИАМ. – 2013. – №. 8. – С. 3.
8. Колосова А. С. и др. Современные полимерные композиционные материалы и их применение //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – №. 5-1. – С. 245-256.
9. Nkurunziza G. et al. Durability of GFRP bars: A critical review of the literature //Progress in structural engineering and materials. – 2005. – Т. 7. – №. 4. – С. 194-209.
10. Jabbar S. A. A., Farid S. B. H. Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures //Karbala international journal of modern science. – 2018. – Т. 4. – №. 2. – С. 216-227.
11. ГОСТ 32656-2017 Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение
12. ГОСТ 33344-2015 Профили пултрузионные конструкционные из полимерных композитов. Общие технические условия
13. ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости
14. ГОСТ 33496-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом
15. ГОСТ 33375-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием

V.O. Tokarev<sup>1,2</sup>, D.A. Vinogradov<sup>1,2</sup>, M.A. Kovalev<sup>1,2</sup>, Pan Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

<sup>2</sup>STC «New technologies and materials»,

Saint Petersburg, Russia. den895619@gmail.com

<sup>3</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## STUDY OF THE INFLUENCE OF DEFECTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

### Abstract

The paper considered the influence of typical defects that can occur in polymer composite materials both during their operation and during production. Their presence may cause a decrease in the mechanical properties of the material, which can lead to premature and sudden failures of manufactured structures. As a result of the work, a preliminary base of changes in the properties of materials of some manufacturers after the application of artificial defects on them was formed.