



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.15

УДК 539.4

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Бочкарева^{1,2}, Н.Ю. Гришаева^{1,2}, Б.А. Люкшин^{1,2,3}, П.А. Люкшин¹,
Н.Ю. Матолыгина¹, С.В. Панин^{1,4}, Ю.А. Реутов²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

³Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 24 июня 2018 г.

Принята: 23 ноября 2018 г.

Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

полимерный материал,
многослойные трубы, вероятность
безотказной работы.

АННОТАЦИЯ

Проблема надежности изделий является актуальной для изделий из полимерных материалов, это связано с такими их особенностями, как значительный разброс деформационно-прочностных характеристик материалов на стадии изготовления изделий, а также деградация свойств полимеров со временем. Кроме того, у изделий из полимерных материалов с ростом температуры резко ухудшаются их прочностные свойства. В работе использовался метод оценки вероятности безотказной работы с учетом перечисленных особенностей полимерных материалов применительно к однослойным и многослойным трубам.

Исходная информация в виде статистического материала по деформационно-прочностным и предельным свойствам полимерных материалов набрана в ходе эксперименталь-

© Бочкарева Светлана Алексеевна – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: svetlanab7@yandex.ru, [ID 0000-0003-4889-6128](https://orcid.org/0000-0003-4889-6128)

Гришаева Наталия Юрьевна – к.ф.-м.н., доц., e-mail: anohina@mail2000.ru, [ID 0000-0001-7781-4158](https://orcid.org/0000-0001-7781-4158)

Люкшин Борис Александрович – д.т.н., проф., зав. каф., e-mail: lba2008@yandex.ru, [ID 0000-0002-9388-4962](https://orcid.org/0000-0002-9388-4962)

Люкшин Петр Александрович – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: petrljuk@ispms.tsc.ru, [ID 0000-0001-6272-482X](https://orcid.org/0000-0001-6272-482X)

Матолыгина Наталья Юрьевна – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: ksa@ispms.tsc.ru, [ID 0000-000299784022](https://orcid.org/0000-000299784022)

Панин Сергей Викторович – д.т.н., проф., зав. лаб., e-mail: svp@ispms.tsc.ru, [ID 0000-0001-7623-7360](https://orcid.org/0000-0001-7623-7360)

Реутов Юрий Анатольевич – к.ф.-м.н., ст. преп., e-mail: yureutov@gmail.com, [ID 0000-0002-3638-9885](https://orcid.org/0000-0002-3638-9885)

Svetlana A. Bochkareva – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: svetlanab7@yandex.ru,

[ID 0000-0003-4889-6128](https://orcid.org/0000-0003-4889-6128)

Natalia Yu. Grishaeva – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,

e-mail: anohina@mail2000.ru, [ID 0000-0001-7781-4158](https://orcid.org/0000-0001-7781-4158)

Boris A. Lyukshin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: lba2008@yandex.ru,

[ID 0000-0002-9388-4962](https://orcid.org/0000-0002-9388-4962)

Petr A. Lyukshin – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher. e-mail: petrljuk@ispms.tsc.ru,

[ID 0000-0001-6272-482X](https://orcid.org/0000-0001-6272-482X)

Natalia Yu. Matolygina – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: ksa@ispms.tsc.ru,

[ID 0000-000299784022](https://orcid.org/0000-000299784022)

Sergej V. Panin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, e-mail: svp@ispms.tsc.ru,

[ID 0000-0001-7623-7360](https://orcid.org/0000-0001-7623-7360)

Yury A. Reutov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, e-mail: yureutov@gmail.com,

[ID 0000-0002-3638-9885](https://orcid.org/0000-0002-3638-9885)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ных исследований в лабораторных условиях стандартными методами испытаний. Испытаниям подвергались образцы материалов сразу после их изготовления, а также после экспозиции их в течение двух лет в различных климатических зонах на открытом пространстве. Далее эта информация используется для оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и количественных значений критериев разрушения. Поскольку экспериментальные данные имеют некоторый разброс, получаемые с их использованием параметры НДС изделия и критерии разрушения также носят вероятностный характер.

Предложенная и реализованная в работе концепция определения надежности изделий из полимерных материалов позволяет получать оценки их надежности, когда параметры внешних нагрузок также случайны и обладают известным разбросом. Более того, учет деградации свойств полимерной матрицы со временем (старение) позволяет оценивать изменение надежности конструкций во времени, т.е. их ресурс.

© ПНИПУ

RELIABILITY ASSESSMENT OF MULTILAYER PIPES FROM POLYMER MATERIALS

Bochkareva S.A.^{1,2}, Grishaeva N.Yu.^{1,2}, Lyukshin B.A.^{1,2,3}, Lsukshin P.A.¹,
Matolygina N.Yu.¹, Panin S.V.^{1,4}, Reutov Yu.A.²

¹Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

²Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, Tomsk, Russian Federation

³National Research Tomsk State University, Russian Federation

⁴National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 24 June 2018
Accepted: 23 November 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

polymer materials, multilayer pipes, the probability of failure.

ABSTRACT

Reliability is an important problem when it comes to products made from polymer materials, as polymer materials are characterized by a significant spread of deformation and strength at the manufacturing stage, as well as the strength decrease polymers over time. In addition, products made of polymer materials lose their strength properties, when temperature is increased dramatically. The paper uses the method assessing the probability of failure taking into account these features of polymer materials in relation to single-layer and multi-layer pipes.

We collect the initial information in the form of statistical data about deformation strength and limiting properties of polymer materials in the laboratory using standard test methods. Materials specimens were tested immediately after their production, as well as after their exposure for two years in different climatic zones in the open space. Further, this information is used to estimate the parameters of the stress-strain state (SSS) and the quantitative values of the fracture criteria. Since the experimental data have some variation, the parameters of the SSS product and the criteria of destruction are also probable.

The proposed and implemented concept of determining the reliability of polymer materials allows obtaining the product reliability estimates when the external load parameters are also random and have a known scattering. Moreover, by taking into account the degradation of polymer matrices over time (aging), we can assess the reliability of structures over time, i.e. their resource.

© PNRPU

Введение

Проблема надежности изделий из полимерных материалов особенно актуальна в связи с такими их особенностями, как разброс их физико-механических свойств, в том числе деформационно-прочностных, уже на стадии изготовления [1–4]. Большинство технологий изготовления – литье под давлением, свободное литье, экструзия, прессование и т.д. – не обеспечивает однородности давления, температуры, рецептурных параметров во всем объеме изделия. Следует заметить, что процессы изготовления материала и изделий из него обычно технологически совмещены. Большая чувствительность свойств полимерных материалов к параметрам технологического процесса обуславливает разброс свойств по объему изде-

лия уже на стадии изготовления. Кроме того, со временем происходит деградация свойств полимерной матрицы (старение), и это приводит к необходимости учитывать это явление при оценке надежности и ресурса изделий из полимерных материалов [1].

Компьютерное конструирование полимерных материалов на основе математического моделирования является предпочтительным по сравнению с традиционными способами разработки новых материалов, связанными со значительными финансовыми и временными затратами на проведение экспериментальных исследований разрабатываемых материалов [4–9]. В связи с этим прогнозирование эффективных характеристик полимерных материалов, а также анализ НДС изделий и конструкций с завершающей оценкой их надежности

являются актуальными и позволяют при необходимости дать рекомендации, направленные на повышение вероятности безотказной работы изделий, например, путем изменения свойств материала или геометрии конструкций, т.е. оптимизации конструкции. Поэтому современные работы связаны с математическим моделированием новых материалов и конструкций, прогнозированием их надежности на стадии моделирования, а также с разработкой новых моделей и методик оценки надежности [10–19].

Подходы к расчету прочностной надежности изделий на основе вероятностных методов предложены в работах [20–22]. В целом концепция оценки надежности изделий из полимерных материалов может быть сформулирована в следующем виде. Для конкретного материала накапливается статистически достоверный массив экспериментальных данных, характеризующих его свойства. В большинстве случаев принимается, что распределение свойств материала, носящих случайный характер, подчиняется законам распределения вероятностных характеристик, наиболее известным из которых является нормальное распределение. Используются такие вероятностные характеристики, как математическое ожидание, то есть средние наиболее вероятные значения параметров, определяющих деформационно-прочностные свойства материала, и средние квадратические отклонения, выражающие степень рассеяния этих значений. Эти данные получаются в лабораторных условиях на основе массового эксперимента.

Далее полученные свойства используются при анализе параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) конкретного изделия. Вероятностный характер заложенных в расчет свойств материала приводит к тому, что параметры НДС изделия носят также случайный характер. Для оценки надежности требуется ввести некоторый критерий, по которому можно судить о работоспособности изделия, например предельно до-

пустимое значение напряжений (далее предел текучести). Этот критерий сам по себе также носит случайный (вероятностный) характер. Возникает проблема оценки работоспособности конструкции, когда параметры НДС и критические (допустимые) значения этих параметров являются случайными величинами.

Если обозначить случайную величину y как разность между предельным и реальным значением напряжений, то вероятность безотказной работы (ВБР) $R(t)$ можно рассчитать по формуле

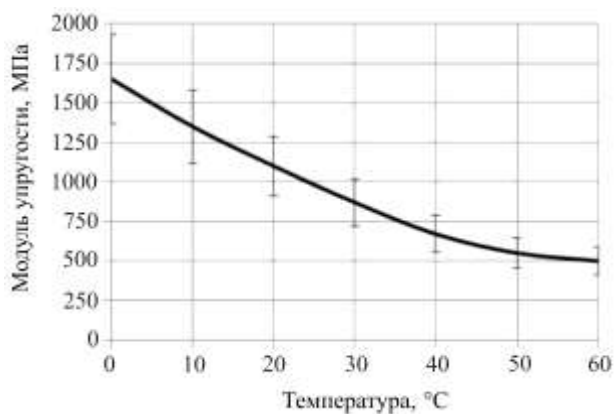
$$R(t) = P(y > 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{s_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - m_y}{s_y} \right)^2 \right] dy,$$

где случайная величина y характеризуется нормальным распределением с математическим ожиданием m_y и средним квадратическим отклонением S_y .

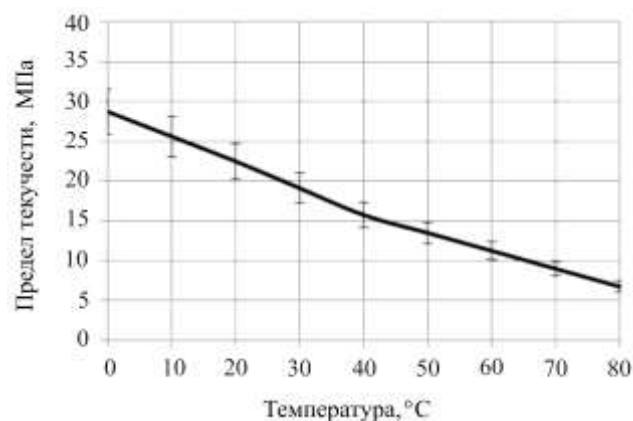
Этот метод оценки вероятности безотказной работы использовался при получении представленных ниже результатов применительно к трубопроводам из полимерных материалов.

Расчет вероятности безотказной работы с учетом температуры и разброса свойств. Используемые материалы и геометрия образцов

В случае однослойных труб напряжения в стенке трубы зависят только от величины приложенной нагрузки (давления). Задача является статически определимой, и рассеяние модуля упругости материала трубы – полиэтилена (ПЭ 100) (рис. 1, а) не влияет на напряжения. Эквивалентные напряжения будут принимать фиксированные значения в зависимости от приложенного давления.



а



б

Рис. 1. Зависимость модуля упругости (а) и предела текучести (б) полиэтилена (ПЭ 100) от температуры
 Fig. 1. Dependence of the modulus of elasticity (а) and yield strength (б) of polyethylene (PE 100) on the temperature

Из характеристик материала на результаты расчета будет влиять только случайный характер величины предельного напряжения, в нашем случае – предела текучести ПЭ 100 (рис. 1, б). Для задания значений пре-

дела текучести используются его математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение. Соответствующие данные при различной температуре были взяты из экспериментов работы [1]. На рис. 1 показаны

зависимости модуля упругости полиэтилена от температуры в виде средних значений (сплошные линии) и разброса (вертикальные интервалы).

С учетом случайного характера свойств материала (ПЭ 100) были проведены расчеты параметров НДС стенки трубы при различных уровнях давления, в итоге полученные результаты также носят случайный характер. Набранная в вычислительном эксперименте статистика позволяет далее обработать полученные массивы данных и построить зависимости вероятности безотказной работы трубы при разных давлениях. Графическое представление результатов отображено на рис. 2.

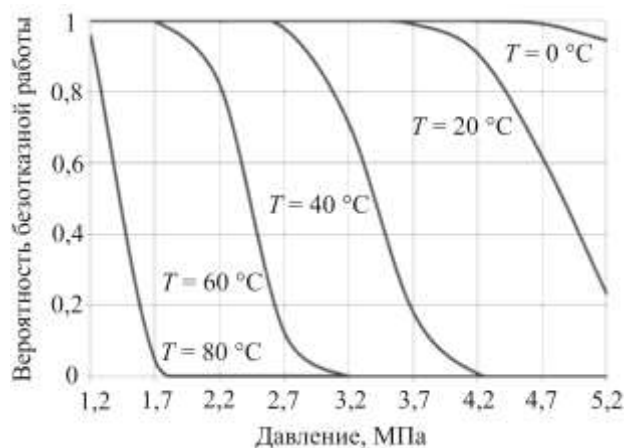


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы полиэтиленовой трубы от давления при разных значениях температуры

Fig. 2. Dependence of the probability of the failure-free operation of a polyethylene pipe on pressure at different temperatures

Надежность конструкций из полимерных материалов в значительной степени зависит от температурных условий. В приведенном примере при давлении 1,2 МПа вероятность безотказной работы равняется единице при любой температуре. Принималось, что стенка трубы прогревается равномерно по всей толщине. Кривые на рис. 2 иллюстрируют зависимость вероятности безотказной работы от номинального значения давления при разных температурах. При росте давления эта вероятность падает, причем тем быстрее, чем выше темпера-

тура трубы. Решение задачи теплопроводности и определения параметров напряженно-деформированного состояния осуществлялось методом конечных элементов [23] на основе ранее разработанных подходов и с учетом особенностей полимерных материалов [24–30].

Поэтому наращивание толщины стенки однослойной трубы менее выгодно, чем использование многослойных труб с упрочненными слоями.

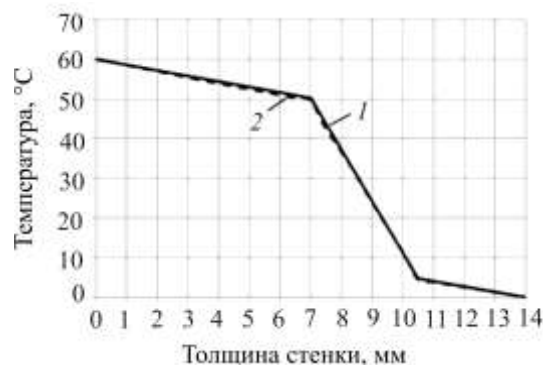
Одним из способов решения этой проблемы является использование комбинированных конструкций, когда в изделии одновременно используются различные материалы. В частности, при изготовлении трубопроводов применяются трехслойные трубы (рис. 3, а), обычно средний слой (армирующая арамидная лента) является несущим и воспринимает основную нагрузку, а наружный и внешний слой (например, полиэтилен, стойкий к ультрафиолетовому излучению) несут герметизирующие и защитные функции. При расчете надежности многослойных полимерных труб необходимо учитывать распределение температуры по слоям.

В работе представлен пример расчета надежности трехслойной трубы (см. рис. 3) с наружным диаметром – 128 мм и толщиной стенки трубы – 14 мм: внутренний слой – ПЭ 100 (7 мм), средний – арамид (3,5 мм) (в расчете принимался как однородный материал), внешний – ПЭ 100 (3,5 мм). На внутренней стенке задавалось давление 6,5 МПа, а внешняя поверхность свободна от напряжений. Перепад температуры задается от 60 °C на внутренней поверхности до 0 °C на внешней. На рис. 3, б приведено распределение температуры по толщине стенки трубы, причем слои обладают разной теплопроводностью. Так, теплопроводность материала среднего слоя (арамид) много ниже, чем полиэтилена, это отражается более резким наклоном участка 1 на рис. 3, б. Попутно можно отметить, что теплопроводность подавляющего большинства полимеров является очень низкой. Например, если для полиэтилена ПЭ-100 в рассмотренном примере коэффициент теплопроводности равен 0,38 Вт/(м·К), то для арамида это 0,04 Вт/(м·К). Для сравнения: у металлов этот коэффициент находится в пределах от 45 Вт/(м·К) (сталь) до 389 Вт/(м·К) (медь).



УФ-стойкий ПЭ 100

а



б

Рис. 3. Общий вид трубы (а) и распределение температуры в стенке трехслойной трубы (б)

Fig. 3. A general view of the tube (a) and temperature distribution in a three-layer pipe (b)

Расчет НДС трехслойной армированной трубы представлен расчетом максимальных (эквивалентных) напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ (рис. 4) с учетом зависимости модуля упругости ПЭ 100 от температуры (см. рис. 1).

В связи с незначительным влиянием температуры в рассматриваемых пределах ее изменения на деформационно-прочностные свойства арамида его модуль упругости и предельные напряжения приняты постоянными.

На рис. 4 отображена поверхность, характеризующая распределение эквивалентных напряжений при нагружении внутренним давлением при температуре 20 °С. Поскольку модуль упругости арамида (10 ГПа) практически на порядок больше модуля упругости полиэтилена (1,1 ГПа), в среднем армирующем слое, воспринимающем основную силовую нагрузку, возникает скачок напряжений.

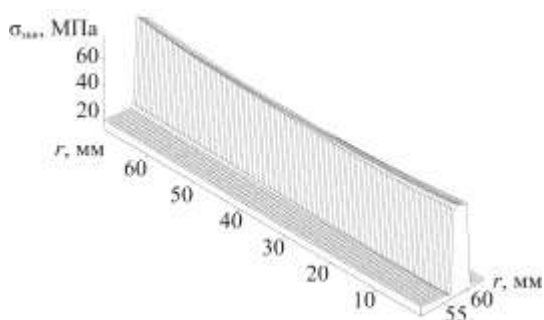
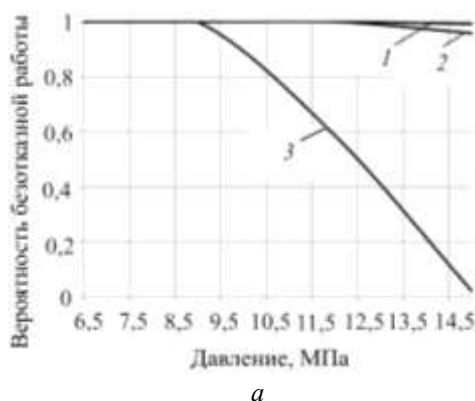


Рис. 4. Поверхность эквивалентных напряжений по толщине стенки трубы при давлении 6,5 МПа и температуре 20 °С
Fig. 4. Surface of equivalent stresses along the pipe wall thickness at a pressure of 6.5 MPa and a temperature of 20 °C

При воздействии повышенной температуры у внутренней стенки трубы модуль упругости внутреннего полиэтиленового слоя уменьшается. Напряжения, вызванные только температурным перепадом, незначительны.



Учет температурных воздействий приводит к росту перемещений на 10–15 %. Результаты расчета вероятности безотказной работы (ВБР) при постоянной температуре (рис. 5, а) показывают значительно меньшую надежность внутреннего полиэтиленового слоя по сравнению с остальными слоями.

Номинальному давлению в трубе, равному 6,5 МПа, отвечает стопроцентная надежность во всех трех слоях трубы. Однако при росте давления, начиная со значения 9 МПа, вероятность безотказной работы начинает резко снижаться для внутреннего слоя, и вероятность его безотказной работы 95 % соответствует уже давлению 9,5 МПа.

При наличии температурного перепада наименьшую вероятность безотказной работы показывает также внутренний слой (рис. 5, б), причем уменьшение надежности начинается при меньшем уровне давления. В связи с тем, что за счет контакта с нагретой средой внутренний слой теряет жесткость, его несущая способность падает. При этом в двух других слоях напряжения растут, что приводит к снижению вероятности их безотказной работы. Из рис. 5 следует, что вероятность безотказной работы, равная 95 %, обеспечивается при давлении 8,5 МПа.

Выводы

Можно заметить, что о надежности конструкции в целом нужно судить по наименее надежному элементу. Однако в приведенном примере даже при достижении внутренним слоем предельного состояния разрушения не произойдет, так как его деформирование сдерживается средним армирующим и внешним полиэтиленовым слоями. Поэтому оценка надежности всей конструкции в каждом случае требует индивидуального подхода.

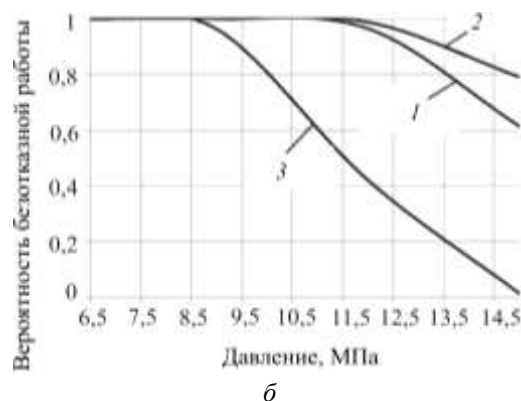


Рис. 5. Зависимость вероятности безотказной работы слоев трубы (1 – наружный ПЭ 100, 2 – арамид, 3 – внутренний ПЭ100) от давления при равномерном прогреве стенок трубы до температуры 20 °С (а) и при наличии температурного перепада в стенке 60°С (б)

Fig. 5. Dependence of failure-free operation of the pipe layers (1 – external PE 100, 2 – aramid, 3 – internal PE100) on pressure at uniform heating of the pipe walls to 20 °C (a); and during the temperature drop in the wall of 60 °C (b)

Полученные результаты говорят о том, что предложенная и реализованная в работе концепция определения надежности изделий из полимерных позволяет получать

оценки надежности изделий из материалов с деформационно-прочностными свойствами, имеющими случайный характер, когда параметры внешних нагрузок также слу-

чайны и обладают известным разбросом. Более того, деградация свойств полимерной матрицы со временем (старение) может быть отражена в исходных для расчетов данных (статистических массивах), что позволит оценивать изменение надежности конструкции во времени, т.е. ресурс конкретных технических устройств.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23 и

Библиографический список

1. Реутов А.И. Прогнозирование надежности строительных изделий из полимерных материалов. – М.: Стройматериалы, 2007. – 184 с.
2. Volkov S.S., Struzhanov V. V. Modeling of a complete deformation diagram for materials with properties of auxetics // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 2. – P. 40–52.
3. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука, 1997. – 288 с.
4. Zhang S.F., Zhang C.H., Chen X. Effect of statistical correlation between ply mechanical properties on reliability of fibre reinforced plastic composite structure // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2015. – Vol. 49. – No. 23. – P. 2935–2945. DOI: 10.1177/0731684416651499.
5. Моделирование технологических дефектов и оценка их влияния на статическую прочность композитных фланцев / А.Н.Аношкин, В.Ю. Зуйко, В.М. Осокин, А.А. Третьяков, П.В. Писарев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 2. – С. 5–21.
6. Димитриенко Ю.И., Дубровина А.Ю., Соколов А.П. Конечно-элементное моделирование усталостных характеристик композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2011. – Спец. вып. Математическое моделирование. – С. 34–50.
7. Ташкинов М.А. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе Пермского национального исследовательского политехнического университета: моногр. / под ред. В.Я. Модорского. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 314 с.
8. Аношкин А.Н., Поспелов А.Б., Якушевич Р.М. Особенности низкотемпературного деформирования и разрушения комбинированных полимерных труб // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 5–28.
9. Кучерявый В. И., Мильков С. Н. Надежность надземного нефтегазопровода при начальном искривлении // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 4. – С. 105–110.
10. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее // Методы менеджмента качества. – 2001. – № 5. – С. 21–25; № 6. – С. 28–32.
11. Методика диагностики и оценки остаточного ресурса трубопроводов из неметаллических материалов / А.Ф. Саль-

гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации [ИИ-5875.2018.8].

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of State Academies of Sciences for 2013–2020, line III.23, and the grant of the President of the Russian Federation for state support of the leading scientific schools of the Russian Federation [NS-5875.2018.8].

- ников, А.Н. Аношкин, А.Б. Поспелов, В.М. Осокин // Инженерная практика. – 2015. – № 11. – С. 18–20.
12. Mayda M. An Efficient Simulation-Based Search Method for Reliability-Based Robust Design. Optimization of Mechanical Components // Mechanika. – 2017. – Vol. 23. – No. 5. – С. 696–702.
13. Králik J. Reliability Analysis of Structures Using Stochastic Finite Element Method. – Bratislava: Ed. STU, 2009. – 143 p.
14. Krejsa M., Janas P., Cajka R. Using DOProC Method in Structural Reliability Assessment // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 300–301. – P 860–869.
15. Schuëller G.I., Jensen H.A. Computational methods in optimization considering uncertainties – an overview // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2008. – Vol. 198. – No. 1. – P. 2–13.
16. Beck A.T., Edison da Rosa. Structural reliability analysis using deterministic finite element Programs // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2006. – No. 3. – P. 197–222.
17. Zhao W., Liu W., Yang Q. Reliability analysis of ultimate compressive strength for stiffened composite panels // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2016. – Vol. 35. – No. 11. – P. 902–914. DOI: 10.1177/0731684416631838.
18. Exploiting the benefits of multi-scale analysis in reliability analysis for composite structures / X.-Y. Zhou, P.D. Gosling, Z. Ullah, L. Kaczmarczyk, C.J. Pearce // Composite Structures. – 2016. – No. 155. – P. 197–212. DOI: 10.1177/0731684416631838.
19. Effect of ply level thickness uncertainty on reliability of laminated composite panels / S. Zhang, L. Zhang, Y. Wang, J. Tao, X. Chen // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2016. – Vol. 35. – No. 19. – P. 1387–1400.
20. Гусев А.С. Вероятностные методы в механике машин и конструкций / под ред. В.А. Светлицкого. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 224 с.
21. Болотин В.В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
22. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
23. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. – Barselona: Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.
24. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия. 1974. – 264 с.
25. Определение эффективных теплофизических характеристик композиционного материала / П.А. Люкшин,

Б.А. Люкшин, Н.Ю. Матольгина, С.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 5. – С. 103–110.

26. Расчет теплопроводности стенки многослойной трубы из неоднородных материалов / Н.Ю. Гришаева, П.А. Люкшин, Б.А. Люкшин, Ю.А. Реутов, А.И. Реутов, С.А. Бочкарева // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 12–24.

27. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин, С.В.Шилько, С.В. Панин, Ю.К. Машков, Л.А. Корниенко, П.А. Люкшин, Ю.М. Плескачевский, О.В. Кропотин, С.А. Бочкарева, Н.Ю. Матольгина, Д.А. Черноус, Н.Ю. Гришаева, Ю.А. Реутов; под ред. А.В. Герасимова. – Новосибирск: Наука, 2017. – 311 с.

References

1. Reutov A.I. Prognozirovanie Nadezhnosti stroitelnykh izdelii iz polimernykh materialov [Building products reliability analysis of polymer materials]. Moscow, OOO RIF "Strojmaterialy", 2007, 184 p.

2. Volkov S.S., Struzhanov V.V. Modeling of a complete deformation diagram for materials with properties of auxetics. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 2, pp. 40-52.

3. Vildeman V.E., Sokolkin Yu.V., Tashkinov A.A. Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Mechanics of Non-Elastic Deformation and Fracture of Composite Materials]. Moscow, Nauka, 1997. 288 p.

4. Zhang S.F., Zhang C.H., Chen X., Effect of statistical correlation between ply mechanical properties on reliability of fibre reinforced plastic composite structures, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, vol. 49, no. 23, pp. 2935-2945. DOI: 10.1177/0731684416651499.

5. Anoshkin A.N., Suiko, Y.V., Osokin M.V., Tretyakov, A.A., Pisarev P.V. Modeling of technological defects and their influence on static strength of composite flanges. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 2, pp. 5-21.

6. Dimitrienko Yu.I., Dubrovina A.Yu., Sokolov A.P. Konechno-elementnoe modelirovanie ustalostnykh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Finite-element modeling of fatigue characteristics of composite materials]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki*, 2011, spec. iss. Matematicheskoe modelirovanie, pp. 34-50.

7. Tashkinov M.A. Reshenie inzhenernykh zadach na vysokoproizvoditelnom vychislitelnom komplekse permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta [Solution of engineering problems on the high-performance computing complex of the Perm national research Polytechnic University]. Perm, PNRPU, 2014, 314 p.

8. Anoshkin A.N., Pospelov A.B., Iakushev R.M. Features of low-temperature deformation and fracture of combined plastic pipes. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 5-28.

9. Kucheryavii V.I., Milkov S.N. Nadezhnost nadzemnogo neftegazoprovoda pri nachalnom iskrivlenii [Reliability of the above-ground oil and gas pipeline at the initial curvature]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2016, no. 4, pp. 105-110.

10. Ushakov I.A. Nadezhnost: proshloe nastoiashchee budushchee [Reliability: past, present, future]. *Metody mendenizhmenta kachestva*, 2001, no. 5, pp. 21-25, no. 6, pp. 28-32.

11. Salnikov A.F., Anoshkin A.N., Pospelov A.B., Osokin V.M. Metodika diagnostiki i otsenki ostatochnogo resursa truboprovodov iz nemetallicheskih materialov [Methods of diagnostics and evaluation of residual life of pipelines made of non-metallic materials]. *Inzhenernaia praktika*, 2015, no 11, pp. 18-20.

28. Thermal Properties Simulation of Multilayer Pipe / N.Y. Grishaeva, B.A. Ljukshin, P.A. Ljukshin, A.I. Reutov, Y.A. Reutov // International Conference on Physical Mesomechanics of Multilevel Systems 2014. Tomsk / AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 1623. – Н. 187–190. DOI: 10.1063/1.4898914.

29. Определение вероятности безотказной работы многослойной полимерной трубы с учетом температурных воздействий / С.А. Бочкарева, Б.А. Люкшин, А.И. Реутов, Ю.А. Реутов // Изв. вузов. Физика. Прикладные проблемы сплошных сред. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 140–142.

30. Расчет теплопроводности стенки многослойной трубы из неоднородных материалов / Н.Ю. Гришаева, П.А. Люкшин, Б.А. Люкшин, Ю.А. Реутов, А.И. Реутов, С.А. Бочкарева // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 12–24.

12. Mayda M., An Efficient Simulation-Based Search Method for Reliability-Based Robust Design. *Optimization of Mechanical Components, Mechanika*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 696-702.

13. Králik J. Reliability Analysis of Structures Using Stochastic Finite Element Method. Ed. *STU Bratislava*, 2009, 143 p.

14. Krejsa M., Janas P., Cajka R. Using DOProC Method in Structural Reliability Assessment. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 300-301, pp 860-869.

15. Schuëller G.I., Jensen H.A. Computational methods in optimization considering uncertainties – an overview. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 198, no. 1, pp. 2-13.

16. Beck A.T., Edison da Rosa. Structural reliability analysis using deterministic finite element Programs. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2006, no. 3, pp. 197-222.

17. Zhao W., Liu W. and Yang Q. Reliability analysis of ultimate compressive strength for stiffened composite panels, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, vol. no. 11, pp. 902-914. DOI: 10.1177/0731684416631838

18. Zhou X.-Y., Gosling P.D., Ullah Z., Kaczmarczyk Ł., Pearce C.J. Exploiting the benefits of multi-scale analysis in reliability analysis for composite structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 155, pp. 197-212. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.08.015.

19. Zhang S., Zhang L., Wang Y., Tao J. and Chen X., Effect of ply level thickness uncertainty on reliability of laminated composite panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, vol. 35, no. 19, pp. 1387-1400.

20. Gusev A. S. Veroiatnostnye metody v mekhanike mashin i konstruksii [Probabilistic methods in mechanics of machines and structures]. Moscow, MGTU im. N. Uh. Bauman, 2009, 224 p.

21. Bolotin V. V., Metody teorii veroiatnosti i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii. [Methods of probability theory and reliability theory in calculations of constructions]. Moscow, Stroyizdat, 1982, 351 p.

22. Kapoor K.C. and Lamberson L.R., Reliability in engineering design. *New York, Wiley*, 1977, 586 p.

23. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. *Butterworth-Heinemann*, 2013, 756 p.

24. Dul'nev G.N., Zarichnyak Y.P. Thermal Conductivity of mixtures and composite materials [Thermal Conductivity of mixtures and composite materials]. *Leningrad, Energiia*, 1974, 264 p.

25. Lyukshin P.A., Lyukshin B.A., Mamolygina N.Yu., Panin S.V. Opredelenie effektivnykh teplofizicheskikh kharakteristik kompozitsionnogo materiala [Determination of the Effective Thermal Characteristics of a Composite Material], *Fizicheskaya mekhanika*, 2008, vol. 11, no. 5, pp. 103-110.

26. Grishaeva N.Yu. Lyukshin P.A., Lyukshin B.A., Reutov Yu.A., Reutov A.I., Bochkareva S. A. Raschet teploprovodnosti stenki mnogoslainoi truby iz neodnorodnykh materialov [Calculation of heat conductivity of a wall of a multilayer pipe made of heterogeneous materials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktii*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 12-24.

27. Lyukshin B.A., Shilko S.V., Panin S.V., Mashkov Yu.K., Kornienko L.A., Lyukshin P.A., Pleskachevsky Yu.M., Kropotin O.V., Bochkareva S.A., Mamalygina N.Yu., Chernous D.A., Grishaeva N.Yu., Reutov, Yu.A. Dispersionapolnennye

polimernye kompozity tekhnicheskogo i meditsinskogo naznacheniia [Dispersed-filled polymeric composites for technical and medical applications], *Novosibirsk, Nauka*, 2017, 311 p.

28. Bochkareva S.A., Grishaeva N.Y., Lyukshin B.A., Lyukshin P.A., Reutov A.I., Reutov Y.A. Thermal Properties Simulation of Multilayer Pipe, *AIP Conference Proceedings*, 2014, vol. 1623, pp. 187-190.

29. Bochkareva S.A., Lyukshin B.A., Reutov A.I., Reutov Y.A. Opredelenie veroiatnosti bezotkaznoi raboty mnogoslainoi polimernoi truby s uchetom temperaturnykh vozdeistvii [Definition of the probability of multilayer polymer pipes taking into account temperature influence], *Izvestia vuzov, Fizika*. 2013, vol. 56, no. 7/3. pp. 140-142.

30. Grishaeva N.Yu. Lyukshin P.A., Lyukshin B.A., Reutov Yu.A., Reutov A.I., Bochkareva S.A. [Calculation of heat conductivity of a wall of a multilayer pipe made of heterogeneous materials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktii*, 2017, vol. 23, no 1, pp. 12-24.