

крытием, которому соответствует сингулярное ядро сдвиговой релаксации вида (6). Рассмотрен случай, когда упругим является первый (внутренний) слой, а также случай, когда внутренним слоем является вязкоупругое покрытие. Расчеты выполнены при различных геометрических и физико-механических исходных данных. Получены новые результаты, демонстрирующие эффекты, которые связаны как со слоистостью рассматриваемых сферических конструкций, так и с вязкостью материала покрытий.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М. В. Ломоносова.*

#### Список литературы

- 1 **Петров, А. Н.** Расчет методом граничных элементов динамики составных вязкоупругих тел // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Механика деформируемого твердого тела. – 2011. – № 4 (4). – С. 1694–1696.
- 2 **Hosseini-Hashemi, S.** Dynamic behavior of multi-layered viscoelastic nanobeam system embedded in a viscoelastic medium with a moving nanoparticle / S. Hosseini-Hashemi, H. Bakhshi Khaniki // J. Mech. – 2017. – Vol. 33, № 5. – P. 559–575.
- 3 **Hyung, Suk Lee.** Viscoelastic wave propagation of layered structures subjected to an impact load / Hyung Suk Lee // Int. J. Pavement Eng. – 2014. – Vol. 15, № 6. – P. 542–557.
- 4 Khudoynazarov K. Longitudinal-radial vibrations of a viscoelastic cylindrical three-layer structure // Facta universitatis. Series: Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 22, № 3. Spec. is. – P. 473–484.
- 5 **Alizadeh, V.** Overall dynamic properties of locally resonant viscoelastic layered media based on consistent field integration for oblique anti-plane shear waves / V. Alizadeh // Mech. Mater. – 2021. – Vol. 160. – 103981. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103981>.
- 6 **Borcherdt, R. D.** Viscoelastic Waves and Rays in Layered Media / R. D. Borcherdt. – Cambridge : Cambridge University Press, 2020. – 450 p.
- 7 **Пшеничников, С. Г.** Динамические задачи линейной вязкоупругости для кусочно-однородных тел / С. Г. Пшеничников // Известия РАН. МТТ. – 2016. – № 1. – С. 79–89.
- 8 **Пшеничников, С. Г.** Волны в неоднородном вязкоупругом полом шаре / С. Г. Пшеничников // Проблемы прочности и пластичности. – 2025. – Т. 87, № 1. – С. 103–112.

УДК 620.174.21

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛС И РСТ ПРИ СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ В ГАЗОТУРБОСТРОЕНИИ

*Л. Н. РАБИНСКИЙ, А. В. БАБАЙЦЕВ*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*Т. Т. ФОЗИЛОВ*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*Филиал АО «ОДК» «НИИД», г. Москва, Российская Федерация*

*МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация*

Во второй половине XX века активно развивались технологии создания неразъемных соединений деталей авиационных и ракетных двигателей. Технология электронно-лучевой сварки позволяет с высокой точностью и наиболее защищенно сваривать металлы, которые невозможно сваривать на открытом воздухе, например, титановые сплавы, т. к. титан начинает реагировать с воздушной атмосферой и отдельно водородом при относительно малых температурах. Однако со временем появились сплавы на основе того же титана, а далее никеля и некоторые стали, которые, как считается, невозможно сварить методами сварки с применением плавления. На данный момент существует некоторое количество способов твердофазной сварки, однако позволяет получать равнопрочное соединение без потери механических свойств материалов исключительно сварка трением [1].

В данном труде речь идет о конкретном ее подвиде – ротационной (инерционной) сварке трением. Ее основное преимущество – скорость выполнения операции, а также относительно невысокие требования к подготовке кромок деталей, поскольку при трении две соединяющиеся кромки истираются и посредством давления, при достижении 75–80 % от температуры плавления материалов, свариваются.

Однако многими учеными-исследователями отмечается, что при РСТ выполняется некоторая деградация физико-механических свойств, как и изначально микроструктуры в зонах сварного соединения, происходит это ввиду термомеханического воздействия самого процесса сварки, а также нередко неравномерного теплоотвода и быстрого остывания детали после процесса, что в свою очередь вызывает концентрацию всех типов остаточных напряжений.

Для решения подобного рода вопросов применяют локальную термическую обработку, как правило, индуктором, что способствует быстрому восстановлению промежуточных механических свойств (как правило, детали РСТ свариваются в закаленном состоянии, без старения) и микроструктуры.

Таким образом, слабо изученным является процесс ротационной сварки трением с последующей локальной термической обработкой сварного шва посредством расфокусировки электронного луча. Такой вид обработки, хоть и более затратный по времени процесса, является наиболее прецизионным ввиду выполнения его в вакуумной камере, а также наиболее точным ввиду управления габаритов светового пятна от пучка электронов. Данное решение позволяет получать равнопрочное сварное соединение посредством релаксации остаточных напряжений и деформаций, а также точно регулировать ширину обрабатываемой поверхности, чтобы не получить структурный пережог в переходной зоне между ЛТО и основным материалом.

#### Список литературы

1 Применение пантографической конструкции, полученной методом SLM-печати, и исследование влияния постобработки с нанесением демпфирующих покрытий / А. А. Зайцев, С. С. Лопатин, Т. Т. Фозилов, А. В. Бабайцев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 83–89.

УДК 539.4: 621.78: 691.175

### ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*А. П. САЗАНКОВ*

*Институт механики металлополимерных систем  
им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель*

В настоящей работе представлены результаты исследований, которые включают: экспериментально определенные механические характеристики конструкционных пластиков, применяемых при изготовлении напорных труб; данные о прочности композитной трубы горячего водоснабжения А-РЕ-Ха в виде таблицы со значениями внутреннего давления, температуры рабочей жидкости, и времени до разрушения; разработку программно-аппаратного комплекса для ускоренного определения долговечности напорных труб из полимерных материалов.

Обсуждается возможность создания программно-аппаратного комплекса для ускоренного определения срока службы напорных труб из конструкционных армированных пластиков по критерию термочности. Научная значимость результатов заключается в возможности экспресс-оценки срока службы напорных труб из конструкционных армированных пластиков по критерию термочности путем регистрации предвестников разрушения с привлечением регрессионных зависимостей времени разгерметизации трубы от температуры и гидростатического давления, что в совокупности позволяет экстраполировать результаты кратковременных испытаний (десятки и сотни часов) на период нормативной эксплуатации напорных трубопроводов 50 лет.

В настоящее время при изготовлении трубопроводов для горячего водоснабжения взамен стальных труб широко используют полимерные и полимерные армированные трубы на основе сшитых термопластов, к которым относится полиэтилен низкого давления [1–4]. Доля таких труб достигла 65 % и продолжает расти [5]. К числу недостатков ПАТ относится то, что со временем полимерное связующее теряет прочность и эластичность, становится хрупким и растрескивается. Из-за длительности и трудоемкости эксплуатационных испытаний возникает необходимость ускоренного определения долговечности указанных изделий в лабораторных условиях.

Цель исследования состоит в обеспечении безаварийной работы напорных трубопроводов для горячего водоснабжения путем прогнозирования их долговечности.

На предприятии ОАО «Изоком» (г. Дятлово, Гродненская область) используются блочные стенды, каждый из которых позволяет одновременно испытывать 25 образцов труб (рисунок 1), выпускаемых на этом предприятии.



Рисунок 1 – Образец трубы с теплоизоляцией, подготовленный для термобарических испытаний