

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.791.75

БОГДАНОВ
Сергей Викторович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОНТАЖНЫХ
СТЫКОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С НЕСУЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧЕЧНОЙ АРМАТУРОЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

Могилев 2013

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель

Кузменко Игорь Михайлович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сопротивление материалов» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев

Официальные оппоненты

Денисов Леонид Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Радченко Александр Адамович,
кандидат технических наук, заместитель директора ОХП ГНУ «Институт сварки и защитных покрытий», г. Минск

Оппонирующая организация

ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев

Защита состоится 10 января 2014 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.01 при ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т. Мира, 43, корп. 1, ауд 323, телефон ученого секретаря совета: +375 222 22 52 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.И. Борисов

ВВЕДЕНИЕ

Сварочные технологии широко применяются при изготовлении металлических конструкций и возведении сооружений различного назначения. Снижение стоимости этих конструкций возможно, в том числе на основе применения композитных структур за счет уменьшения металлоемкости без снижения их несущей способности и других эксплуатационных характеристик. Такой структурой является композитный несущий элемент строительных конструкций (КНЭСК), разработанный совместно специалистами Белорусско-Российского университета и Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС МИИТ) и запатентованный ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

КНЭСК имеет пространственно-развитую металлическую арматуру и по совокупности признаков является сварной оболочечной конструкцией, полости которой заполнены твердеющим материалом на основе бетонов и полимеров. Область применения КНЭСК не ограничивается строительством, поэтому в данной работе этот композитный элемент исследовался как сварная конструкция, а термин КНЭСК заменен более широким термином «композитный несущий элемент со сварной оболочечной арматурой (КНЭ)».

Положительный опыт использования КНЭ (КНЭСК) (далее по тексту КНЭ) в мостостроении Республики Беларусь показал их технико-экономическую эффективность и востребованность. Таким образом, актуальными являются исследования направленные на расширение областей применения, обеспечение индустриализации изготовления и монтажа этой перспективной отечественной разработки и создание на её основе нового типа сварных конструкций.

Настоящая работа посвящена: выявлению областей эффективного применения КНЭ; определению основных требований к сварным монтажным стыкам быстровозводимых объектов из КНЭ при их проектировании; поиску конструктивных и технологических решений для обеспечения прочности сварных соединений монтажного стыка; разработке системы базовых конструкций сварных монтажных стыков быстровозводимых объектов из КНЭ, монтируемых сваркой из секций заводского изготовления без применения «мокрых» технологий бетонирования; поиску способов и средств обеспечения неразрывности сцепления заполнителя и арматуры при сварке на монтаже; доказательству работоспособности сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ.

Результаты исследований и предложенные конструктивные и технологические решения позволят обеспечить работоспособность сварных монтажных стыков конструкций из КНЭ, перейти от монолитных к быстровозводимым технологиям ведения всесезонных монтажных работ сваркой и приведут к снижению сроков монтажа. Применение КНЭ для замены сварных оболочечных и металлоемких сталежелезобетонных конструкций обеспечит снижение их стоимости и повышение экономической эффективности от внедрения данных инновационных конструкций.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Научные исследования проводились в соответствии с перечнем приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований в Республике Беларусь на 2011–2015 гг., определенным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585 согласно пунктам: физическое и математическое моделирование, контроль и диагностика сварочных процессов, деформаций и напряжений в сварной конструкции (п. 8.9); физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук (п. 12.1). Часть научных исследований проводилась в рамках НИР «Разработка основ проектирования, расчета и оптимизации композитных несущих элементов строительных конструкций» (№ ГР. 20061425). По научному направлению «Машиностроение, металлургия, материалы и технологии» получен грант Министерства образования Республики Беларусь (НИР «Разработка конструкций монтажных стыков и их сварных соединений для быстровозводимых сооружений из КНЭСК» (№ ГР. 20111007)).

Цель и задачи исследования. Цель – поиск способов и средств обеспечения требуемого запаса несущей способности сварных соединений монтажных стыков быстровозводимых объектов из КНЭ и неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя при сварке на монтаже.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1) выявить и обосновать области перспективного применения объектов из КНЭ, как нового типа сварных конструкций;

2) разработать методики численного прогнозирования прочности сварных монтажных стыков конструкций из КНЭ и проверки неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя при сварке на монтаже;

3) определить способы обеспечения несущей способности сварных соединений монтажных стыков, разработать и систематизировать их базовые конструкции для объектов из КНЭ и определить условия достижения неразрывности сцепления арматуры и заполнителя при сварке на монтаже;

4) установить оптимальные конструкции сварных монтажных стыков, обеспечивающих работоспособность стенок вертикальных цилиндрических резервуаров и пролетов мостов из КНЭ.

Объект исследования – монтажные стыки быстровозводимых конструкций из КНЭ и их сварные соединения.

Предмет исследования – работоспособность монтажных стыков, их сварных соединений и пути ее обеспечения.

Положения, выносимые на защиту

1. Эффективность внедрения КНЭ по технико-экономическим показателям растет с увеличением удельной металлоемкости заменяемой с использованием КНЭ конструкции, наиболее перспективным является их применение для замены сварных оболочечных конструкций.

2. Требуемый запас несущей способности сварных соединений монтажных стыков быстровозводимых объектов из КНЭ обеспечивается предложенными конструктивными и технологическими решениями, обобщенными в систему базовых конструкций сварных монтажных стыков и направленными на перераспределение сил в монтажном стыке за счет его армирования закладными элементами, образования пазового соединения и достижения взаимного опирания монтируемых элементов.

3. Неразрывность сцепления металлической арматуры КНЭ из конструкционных сталей и заполнителя из бетонов с плотностью от 2200 до 2400 кг/м³ при выполнении сварных соединений монтажных стыков обеспечивается в диапазоне температур от 185 до 295 °С.

4. Геометрические параметры защитных элементов, обеспечивающих неразрывность сцепления металлической арматуры и заполнителя, обусловленные теплопередачей через металл, определяются по установленной их зависимости от режимов сварки, допустимой температуры и конструкции монтажного стыка. При этом установлены достаточные для обеспечения неразрывности сцепления, независимо от режимов сварки величины геометрических параметров находящиеся в диапазоне от 12,4 до 14,6 мм и обусловленные теплопередачей через воздушный зазор.

5. В сварных соединениях оптимального монтажного стыка быстровозводимых пролетов мостов из КНЭ от действия временной нормативной нагрузки НК-80 возникают максимальные эквивалентные напряжения 93,5 МПа, при этом оптимальный монтажный стык имеет 89% несущей способности от аналогичной монолитной конструкции без монтажного стыка. Максимальные эквивалентные напряжения в стенках вертикальных цилиндрических резервуаров (РВС-30000) из КНЭ при высоте разлива нефти в 17,3 м снижены на 34–36% относительно типовой стенки: с 137,6 МПа до 88 МПа – для монолитной и до 89,9 МПа – для быстровозводимой стенок.

Личный вклад соискателя. Результаты численных и экспериментальных исследований, выносимые на защиту, получены и обобщены автором лично. Основная идея, цели и задачи диссертационной работы сформулированы совместно с научным руководителем к.т.н. доц. И. М. Кузменко. В работах, опубликованных с соавторами (И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, В. М. Фридкин, Т. В. Цыкунова и др.), соискатель участвовал на всех этапах выполнения, осуществлял постановку задач, разрабатывал средства их реализации и выполнял анализ полученных результатов. Кроме этого, соискатель являлся ответственным исполнителем НИР, финансируемой в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований доложены и обсуждены на МНТК молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев 2007, 2008 гг., МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев 2009, 2010 гг., 42-й, и 43-й студенческой науч.-техн. конф., Могилев 2006, 2007гг., Белорусско-Российской научно-практической конференции по военно-техническому сотрудничеству, Минск 2012 г., Первом Форуме Союзного

государства вузов инженерно-технологического профиля, Минск 2012 г., VII Форуме Союзного государства, Москва 2012 г. Положения, выносимые на защиту, заслушаны и обсуждены при анализе результатов диссертационной работы совместно со специалистами: проектного отдела ОАО «Мостострой», г. Минск, 2012 г.; отдела главного сварщика ОАО «Самарский резервуарный завод», г. Самара, Россия, 2010 г. Методики исследования, реализованные численным методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, прошли практическую апробацию и верификацию на лицензионном программном обеспечении исследовательского стенда главного инженера в Федеральном космическом агентстве РФ (ОАО «Роскосмос»).

За разработку «Инновационная технология проектирования и изготовления конструкций различного назначения на базе композитных несущих элементов» в рамках конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» Петербургской технической ярмарки получен Диплом первой степени и Золотая медаль, Россия, 2013 г.

Опубликованность результатов диссертации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ: 8 статей, из них 6 в изданиях, соответствующих перечню ВАК (2 статьи без соавторов), 7 тезисов научно-технических конференций, 1 патент Республики Беларусь на изобретение. Основные результаты, исследований представленных в диссертации, включены в отчет по НИР (№ ГР. 20111007).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из: титульного листа; оглавления; введения; общей характеристики работы; основной части, включающей 5 глав; заключения; библиографического списка, включающего список использованных источников из 103 наименований, в том числе 9 иностранных и 94 отечественных источников и списка публикаций соискателя из 16 наименований, приложений. Общий объем работы – 190 страниц, содержащих 91 страницу текста, 73 иллюстраций, 15 таблиц, 7 приложений на 63 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность и востребованность научных исследований и разработок, выполненных в диссертационной работе, сформулированы цель и задачи исследований, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ нерешенных задач, определяющий цели исследования. Проанализирован объект исследования, описанный в работах И.М. Кузменко, С.Н. Маркова, А.В. Носарева, С.К. Павлюка, В.А. Попковского, В.М. Фридкина. Объекты из КНЭ представляют собой сварные металлические конструкции (рисунок 1), состоящие из формообразующего листа 1 с приваренными к нему листовыми упрочняющими элементами 2 и стержневой арматурой 3, твердеющего заполнителя 4, повышающего устойчивость к потере тонкостенными элементами несущей способности.

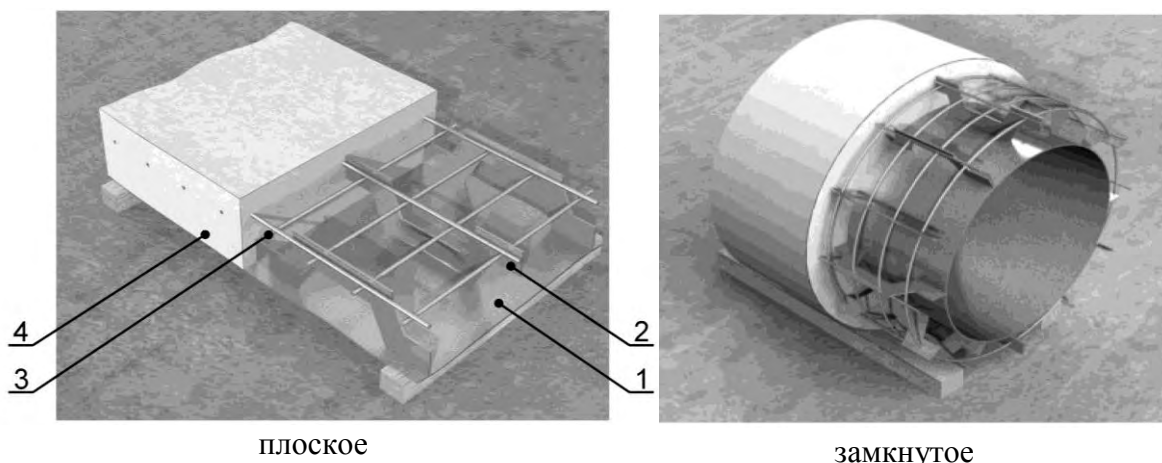


Рисунок 1 – Простейшие конструктивные исполнения КНЭ

Конструктивные особенности оболочечной арматуры обусловили преимущества КНЭ: монтаж сваркой; упрощенное получение сложных пространственных форм; малая потребность в опалубочных и подпорных системах; минимизация недостатков металлических, железобетонных и сталежелезобетонных конструкций; достижение высокого уровня индустриализации.

Проведено сравнение существующих конструкций из композитных элементов с внешним листовым армированием и конструкций из КНЭ. Выполнен таксономический анализ конструкций из КНЭ по признакам времени и пространства, представленный на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 – Классификация по признаку времени

Каждому типу конструкции соответствуют свои типы монтажных соединений. Как видно из классификации по признаку времени независимо от типа конструкций, наиболее широко применяются сварные соединения.

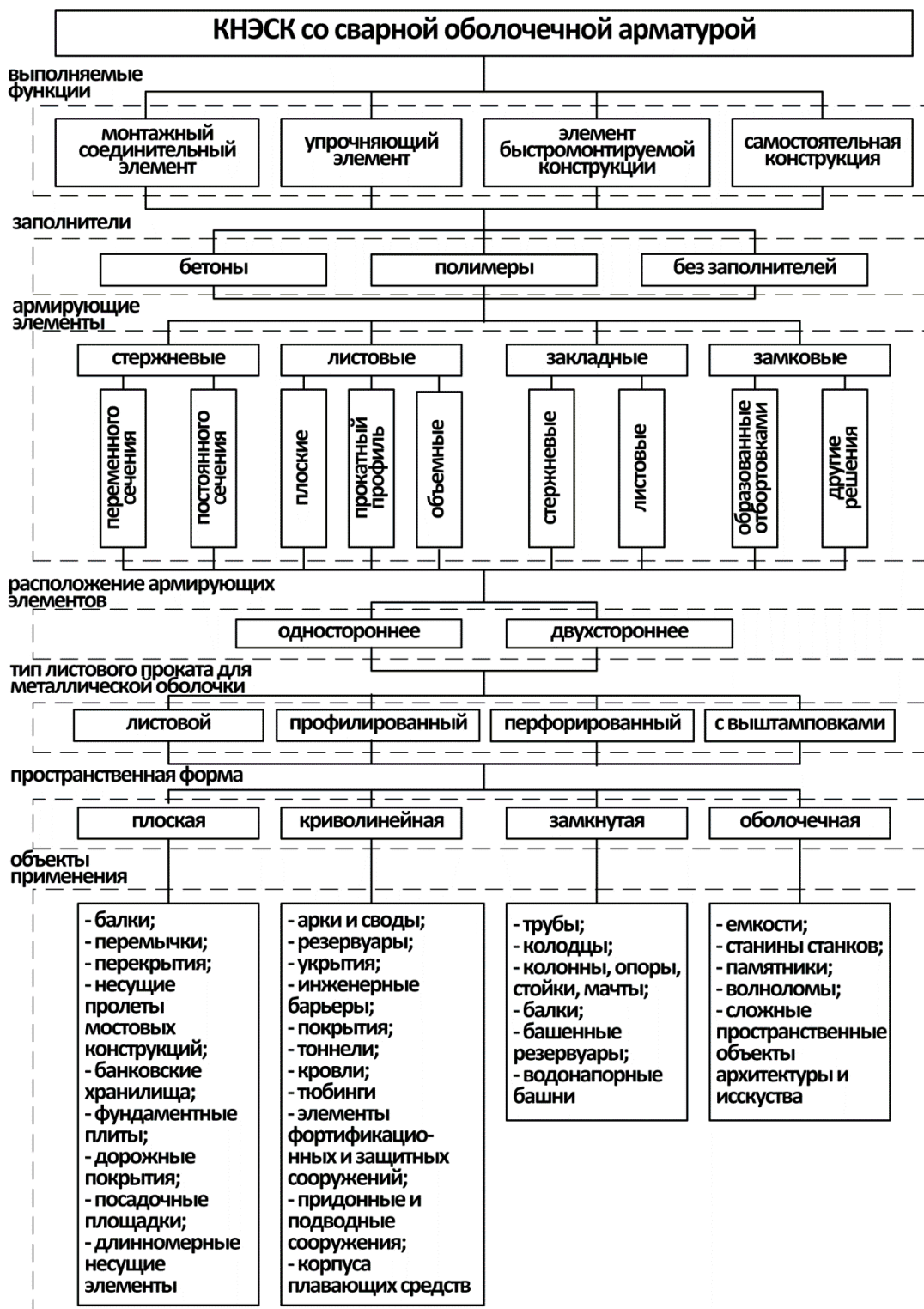


Рисунок 3 – Классификация по признаку пространства

Классификация по признаку пространства позволила обобщить возможные области перспективного применения и направление развития КНЭ в зависимости от пространственной формы, и включает алгоритм для проектирования сварной металлической арматуры КНЭ.

Проведенный таксономический анализ объектов из КНЭ и конструкций их металлической арматуры по признакам пространства, времени и силы, с учетом преимуществ и недостатков КНЭ и установленной тенденции изме-

нения эффективности их применения (глава 5) позволили выявить рациональные области применения КНЭ и определить перспективное направление развития КНЭ для использования в быстровозводимых конструкциях.

Во второй главе предложены методы решения поставленных в работе задач и разработаны методики прогнозирования распределений полей напряжений и деформаций в конструкциях из КНЭ и их сварных монтажных стыках, проверки неразрывности сцепления металлической арматуры и заполнителя при выполнении сварных соединений монтажных стыков. В основу методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния положена методика Калифорнийского и Орегонского университетов, реализуемая методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Адекватность этой методики достигается учетом нелинейного деформирования бетона и стали при сжатии и растяжении, условий растрескивания и раскрошивания бетона. Проверка точности методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния конструкций из КНЭ проведена сравнением ре-

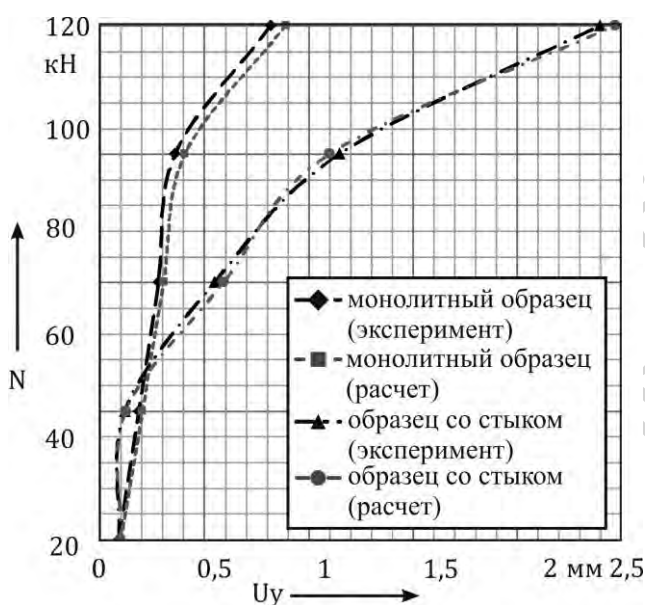


Рисунок 4 – Оценка точности методики прогнозирования прочности конструкций из КНЭ

Соблюдение условий неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя в процессе термического цикла монтажной сварки проверялось при помощи численных моделей, основанных на уравнениях теплопроводности, реализованных в пакете ANSYS. Ошибки расчета температуры при градиентах температур, характерных для сварки, в этой методике исключены благодаря принятому размеру конечных элементов сварного шва и зоны термического влияния, заданному меньше, чем минимальная длина сварочной ванны (при сварке листов толщиной от 4 до 10 мм) и равному 3,34 мм, при 150 шагах расчета на 500 мм сварного шва. Для задания динамически изменяющихся граничных условий, имитирующих движение сварочной дуги и появление металла сварного шва после прохождения дуги, написана подпрограмма на языке программирования ANSYS parametric design language.

результатов расчета железобетонной балки по методике, разработанной в диссертационной работе с численными и экспериментальными данными Калифорнийского и Орегонского университетов. Установлено, что максимальная погрешность разработанной методики по сравнению с экспериментальными данными этих университетов равна 6,6 %.

Экспериментальные исследования прогибов монолитного образца из КНЭ и образца из КНЭ с монтажным стыком показало, что максимальное расхождение между экспериментальными и рассчитанными по разработанной методике данными составляет 7,8 % (рисунок 4).

В третьей главе обобщены условия обеспечения работоспособности сварных монтажных стыков конструкций из КНЭ. Они заключаются в обеспечении требуемого сопротивления эксплуатационным нагрузкам, равномерности распределения силовых и деформационных полей, достаточной коррозионной стойкости, герметичности, неразрывности сцепления арматуры и заполнителя при сварке на монтаже, наложения сварных швов монтажных стыков в удобных пространственных положениях.

Показано, что требуемое сопротивление сварных монтажных стыков эксплуатационным нагрузкам достигается снижением нагрузок, действующих на сварные швы, и повышением их несущей способности, благодаря предложенным конструктивным и технологическим решениям (таблица 1).

Таблица 1 – Конструктивные и технологические решения обеспечения требуемого сопротивления эксплуатационным нагрузкам

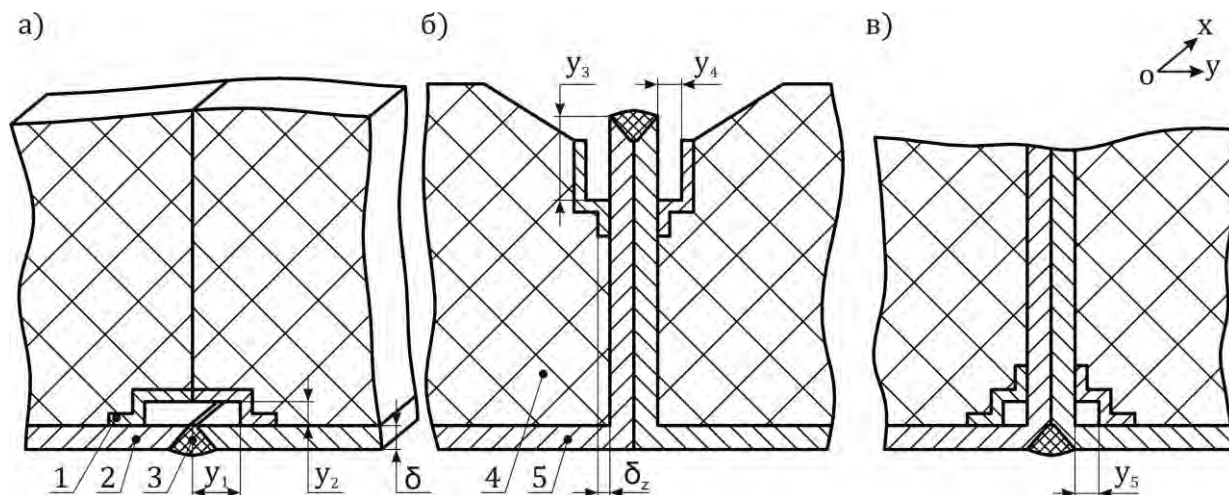
Повышение несущей способности монтажных сварных швов		Снижение доли сил, приходящихся на сварные швы			
Достигается					
увеличением поперечного сечения	повышением прочностных свойств	изменением поверхностей контактирования в монтажном стыке		армированием монтажного стыка	вынесением монтажных швов в менее нагруженные области
		отбортовок формообразующих листов	заполнителей		
конструктивные и технологические решения					
увеличение глубины проплавления в монтажных стыках с отбортовками формообразующих листов	легирование сварного шва	расположение контактной поверхности к формообразующему листу под углом, отличным от 90°	образование пазового соединения	закладными элементами	монтаж с промежуточными элементами
увеличение толщины формообразующего листа в области монтажного стыка	применение легированных сталей	образование пазового соединения, или взаимное опирание	–	замковыми элементами	измененная форма отбортовок формообразующего листа

Разработана уникальная система базовых конструкций сварных монтажных стыков для КНЭ. Монтажные стыки систематизированы и запатентованы в зависимости от 12-ти видов сечения формообразующих листов, уровня действующих нагрузок, способов достижения требуемого сопротивления эксплуатационным нагрузкам и монтажа. Формула изобретения (патент 15480 РБ Сварное стыковое соединение строительных блоков) изложена без разделения на ограничительную и отличительную части, поскольку в доступном уровне техники не выявлены изобретения, которые могли быть приняты в качестве аналога для данной разработки. Это свидетельствует об уникальности запатентованных сварных монтажных стыков.

Определено граничное условие неразрывности сцепления сварной оболочечной арматуры из конструкционных сталей и заполнителя из бетонов с плотностью от 2200 до 2400 кг/м³. В зависимости от сочетания их марок величина допустимой температуры лежит в пределах от 185 до 295 °С. Исключение нагрева заполнителя при сварке на монтаже выше допустимой темпе-

ратуры обеспечивается применением защитных элементов, перераспределяющих тепло в зоне термического влияния.

При расчете геометрических параметров защитных элементов все разработанные сварные монтажные стыки для быстровозводимых объектов из КНЭ могут быть сведены к одному из трех расчетных случаев (рисунок 5).



1 – защитный элемент; 2 – формообразующий лист; 3 – сварное соединение монтажного стыка; 4 – наполнитель; 5 – формообразующий лист с отбортовкой

Рисунок 5 – Расчетные случаи сварных монтажных стыков

На основе уравнений теории сварочных процессов выведено параметрическое уравнение для определения геометрических параметров защитных элементов y_1, y_3, y_5 с учетом теплоотдачи с поверхностей пластины:

$$y_i = \frac{q \cdot \sqrt{2/(\pi \cdot e)}}{2 \cdot c_p \cdot v \cdot \delta \cdot \Delta T} \cdot \left[\left[\left((A_i + B_i \cdot \Delta T) \cdot (\ln(1 + v \cdot 10))^{C_i + D_i \cdot \Delta T} - 1 \right) \cdot \ln(q) + \left(\frac{1}{E_i \cdot F_i \cdot \Delta T \cdot e^{\ln(1+v \cdot 10) \cdot (G_i + H_i \cdot \Delta T)}} \right) \right] - 1 \right], \quad (1)$$

где $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i, H_i$ – параметры, величина которых зависит от толщины формообразующих листов δ , номера расчетного случая i ;

c_p – коэффициент объемной теплоемкости принят неизменным и для конструкционных сталей равен $4,9 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{К})$;

v – скорость перемещения источника тепла, $\text{см}/\text{с}$;

q – мощность источника тепла, Вт;

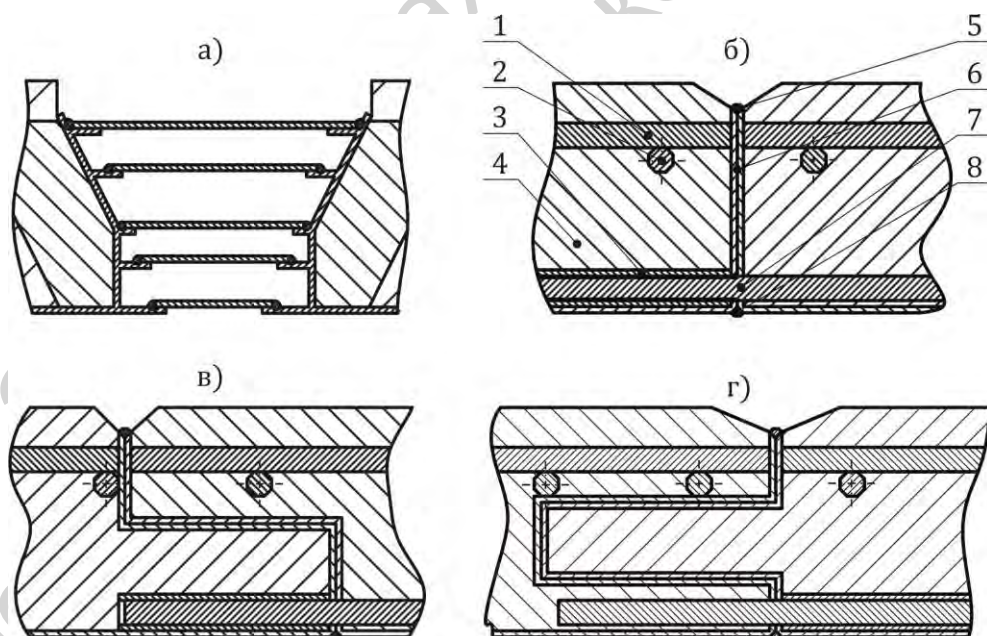
ΔT – приращение температуры, К.

Значения геометрических параметров y_2, y_4 , зависящих от теплопередачи через воздушный зазор, определены по зависимостям для расчета нестационарного теплообмена по числам подобия Био и Фурье ($y_2 = 1,24 \text{ см}$, $y_4 = 1,46 \text{ см}$) при наиболее неблагоприятных условиях: воздух в зазоре, равномерно нагрет до температуры плавления металла, $T_{\text{пл}} = 1530 \text{ }^\circ\text{C}$; время нахождения защитного элемента в нагретой среде максимально, исходя из предельной длины сварочной ванны и минимума скорости сварки.

Четвертая глава посвящена численным исследованиям работоспособности сварных монтажных стыков конструкций из КНЭ.

При анализе результатов расчета тепловых полей установлено, что во время сварки монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ с защитными элементами, геометрические параметры которых определены по выведенному параметрическому уравнению (1), поверхности формообразующих листов, контактирующие с заполнителем, нагреваются не более чем до 175 °С. Максимальное расхождение в меньшую сторону с допустимой температурой в 185 °С составляет 11,8 %. Расхождение значений температуры объясняется тем, что выведенное параметрическое уравнение не учитывает теплоотвод в заполнитель. Это подтверждает справедливость принятых допущений и применимость полученного параметрического уравнения для определения геометрических размеров защитных элементов при проектировании сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ.

Одними из перспективных объектов применения КНЭ в мостостроении являются быстровозводимые несущие основы пролетов мостов и путепроводов. Из разработанной системы базовых конструкций сварных монтажных стыков были выбраны четыре предпочтительных варианта для несущей основы проезжей части пролетов мостов: **а** – монтируемый с промежуточными пластинами; **б**, **в** и **г** – с закладными стержневыми армирующими элементами и различными исполнениями отбортовок формообразующих листов, обеспечивающими опирание и пазовое соединение (рисунок 6).



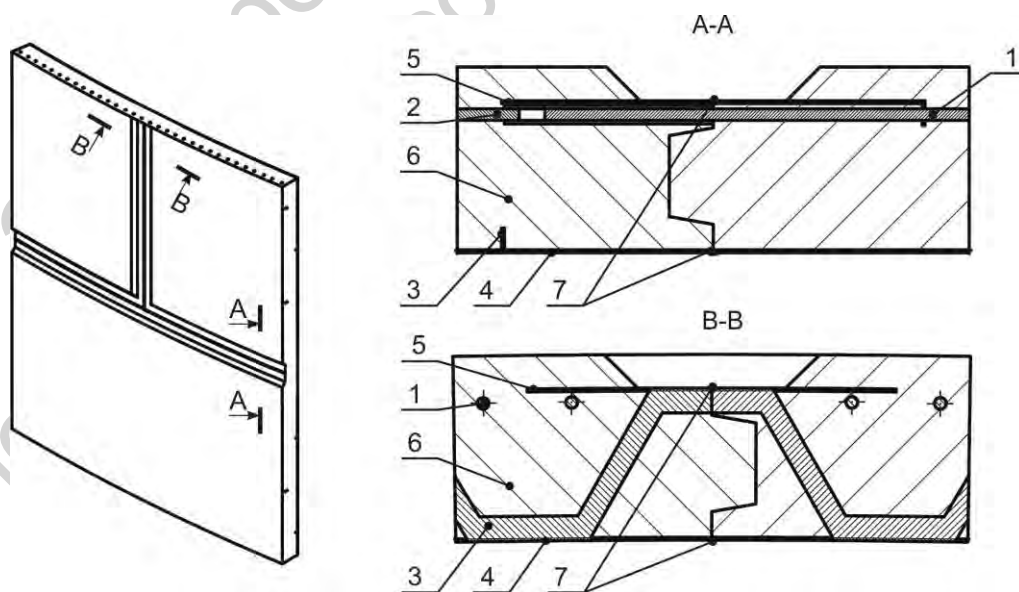
- 1, 2 – стержневые армирующие элементы; 3 – приемник закладного элемента;
 4 – бетон; 5, 8 – верхний, нижний монтажные швы;
 6 – формообразующий лист; 7 – закладной элемент

Рисунок 6 – Исследованные варианты сварных монтажных стыков пролетов мостов и путепроводов из КНЭ

Численным моделированием исследованы распределения силовых и деформационных полей в вышеперечисленных вариантах исполнения сварных

монтажных стыков пролетов мостов из КНЭ при воздействии временной нормативной расчетной нагрузки НК-80. Установлено, что коэффициенты запаса несущей способности по пределу текучести стали 09Г2С составляют для варианта: **а** – 1,17; **б** – 2,89; **в** – 3,23; **г** – 3,74. Показано, что варианты **б**, **в** применимы в неответственных конструкциях с малыми эксплуатационными нагрузками или для соединения сегментов на опорном элементе; вариант **г** обеспечивает уменьшение концентрации напряжений в сварных швах на 16 % относительно варианта **в** и сварные монтажные стыки такой конструкции пригодны к эксплуатации. Результаты исследования варианта **а** подтвердили, что монтажные стыки должны иметь максимально возможную сплошность заполнителя, т.к. он является элементом, обеспечивающим равномерность распределения силовых и деформационных полей в монтажном стыке. Максимальные эквивалентные напряжения на сварном монтажном шве варианта **г** составляют 93,5 МПа, причем для аналогичной монолитной конструкции они равны 83,2 МПа. Это свидетельствует о том, что монтажный стык варианта **г** обладает 89 % несущей способности от аналогичной монолитной конструкции без монтажного стыка.

Как было установлено, другим перспективным объектом применения КНЭ являются стенки вертикальных цилиндрических резервуаров. Исследование прочности стенок резервуаров из КНЭ и предложенных конструкций монтажных стыков проведено на примере вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефти номинальным объемом 30 тыс. м³. С учетом норм проектирования и действующих стандартов разработано два варианта стенок резервуара из КНЭ: монолитное и быстровозводимое. Для быстровозводимого исполнения предложены конструкции вертикальных и горизонтальных сварных монтажных стыков (рисунок 7).



1, 2 – закладные элементы с трубками и без трубок приемников; 3 – листовые элементы; 4, 5 – нижний и верхний формообразующие листы; 6 – заполнитель; 7 – монтажный шов

Рисунок 7 – Сварные монтажные стыки стенки резервуара из КНЭ

Расчетная схема стенки резервуара представлена на рисунке 8.

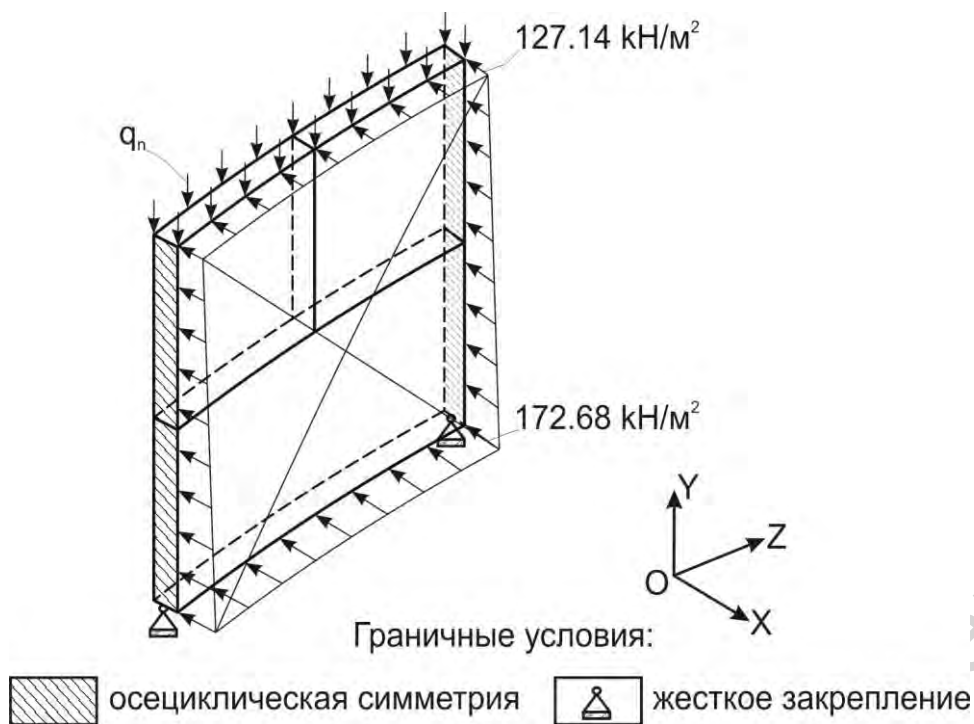


Рисунок 8 – Принципиальная расчетная схема стенки резервуара

Расчетная схема представляет собой сегмент с вертикальным и горизонтальным монтажными стыками, жестким закреплением на нижнем торце, распределенными нагрузками от веса хранимой жидкости и давления воздушно-паровой смеси, веса поясов стенки, кровли и комплектующих. Реальные условия закрепления на боковых торцах воспроизведены осециклической симметрией. По результатам реализации численных моделей проведен сравнительный анализ прочности разработанных конструкций стенок резервуара (быстровозводимой и монолитной) из КНЭ, их сварных монтажных стыков и типовой цельнометаллической стенки. Установлено, что сварная оболочечная арматура монолитной и быстровозводимой стенок резервуара обладает большим запасом прочности, чем типовая стенка (монолитная – на 36 %, быстровозводимая – на 34 %).

В пятой главе обобщены результаты внедрения. Проведена оценка технико-экономической эффективности применения КНЭ для замены типовых железобетонных конструкций и экономической эффективности применения монолитной и быстровозводимой стенок из КНЭ вертикального цилиндрического резервуара номинальным объемом 30 тыс. м³.

Для проверки возможности применения КНЭ в одной из перспективных областей был проведен анализ технико-экономических показателей при применении КНЭ для замены типовых железобетонных конструкций. В качестве базовых объектов приняты железобетонные изделия: многпустотная плита перекрытия ПК.57.12.4А 5680x1190x220 мм и перемычка типа ПБ марки 6ПБ 35-37 3500x250x290 мм. На первом этапе анализа разработаны конструкции аналогов базовых объектов с условием сохранения их стоимости и габаритных размеров. Для этого определены параметры варьирования по габаритным ограничениям базовых объектов, характеризующие геомет-

рию сварной оболочечной арматуры. После их определения единственной неустановленной величиной является объем бетонного заполнителя. Для его расчета, с учетом сохранения стоимостей базовых объектов, выведено уравнение с удельными коэффициентами:

$$\Delta y = C1/C2 \cdot \Delta x + C1m/C2 \cdot \Delta xm + a \cdot C3i/C2 + \sum_{j=1}^n b_j \cdot C4j/C2, \quad (2)$$

где Δy – изменение объема бетона, относительно базового объекта, m^3 ;
 Δx – изменение объема стержневой арматуры, m^3 ;
 Δxm – объем использованной листовой стали, m^3 ;
 a – длина резов, выполненных плазменной дугой, м;
 b – длина сварных швов, м;
 $C1/C2, C1m/C2, C3i/C2, C4j/C2$ – удельные коэффициенты, в которых: $C1$ – стоимость $1 m^3$ арматурной стали, (тыс. р.); $C1m$ – стоимость $1 m^3$ листовой стали; $C2$ – стоимость $1 m^3$ бетона; $C3i$ – цена 1 м плазменного реза конструкционной стали для толщин i , мм; $C4j$ – цена 1 м сварного соединения конструкционной стали.

Разработано и проанализировано 27 конструктивных исполнений аналогов – 16 для плит и 11 для перемычек. Установлено, что только 8 аналогов плит и 9 аналогов исполнений перемычек могут соответствовать стоимости базовых объектов. Сравнение несущей способности разработанных аналогов и базовых объектов по максимальным прогибам при одинаковых нагрузках выполнялось по предложенной в данной работе методике. При оценке полученных результатов было показано, что несущая способность аналогов для плит меньше, чем у базового объекта, а для перемычек примерно равна. Установлена тенденция – эффективность применения КНЭ по технико-экономическим показателям возрастает с увеличением удельной металлоемкости заменяемых конструкций. Данная тенденция будет справедливой и для других типов конструкций. Наиболее перспективным является применение КНЭ для замены сварных оболочечных конструкций, металлоемких железобетонных и сталежелезобетонных конструкций.

При исследовании технико-экономической эффективности применения КНЭ и их сварных монтажных стыков для стенок вертикальных цилиндрических резервуаров установлены основные параметры, которые ее определяют. Время монтажа быстровозводимой стенки резервуара из КНЭ и типовой стенки цельнометаллического резервуара приняты равными и не ограниченными сроком твердения бетона, т. к. бетонирование выполняется до монтажа в заводских условиях.

Стенки резервуаров из КНЭ, благодаря повышенной несущей способности, обеспеченной конструктивными особенностями сварной оболочечной арматуры, отличаются меньшей металлоемкостью, чем типовые цельнометаллические стенки. Бетонный заполнитель обеспечивает устойчивость тонкостенных элементов сварной оболочечной арматуры к потере несущей спо-

способности от нагрузок, вызванных весом вышерасположенных элементов стен, кровли и навесного оборудования.

Подтверждена экономическая эффективность применения КНЭ для возведения стенок резервуаров. В результате снижения металлоемкости стенок резервуара при их изготовлении из КНЭ и применения предложенных конструкций сварных монтажных стыков, достигается снижение стоимости стенки из КНЭ резервуара РВС-30000 на 21–25 % относительно стоимости типовой стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

Основные научные результаты диссертационной работы

1. Разработаны методики прогнозирования прочности сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из композитных несущих элементов (КНЭ) и проверки неразрывности сцепления заполнителя с металлической арматурой при выполнении сварных соединений на монтаже. Методика прогнозирования прочности обеспечивает учет нелинейного деформирования стали и бетона, условий растрескивания и раскрошивания бетона и отличается возможностью учета конструктивных особенностей металлической арматуры КНЭ. Установлено, что максимальная погрешность результатов, полученных по разработанной методике прогнозирования прочности по отношению к результатам экспериментальных испытаний образцов из КНЭ, составляет 7,8 %. Движение сварочной дуги и появление металла сварного шва в методике для проверки неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя смоделировано на основе разработанной для ANSYS подпрограммы. Ошибки расчета температуры при градиентах температур, характерных для сварки в этой методике, исключены благодаря размеру конечных элементов сварного шва и зоны термического влияния, заданным меньшим минимальной длины сварочной ванны при сварке листов толщиной от 4 до 10 мм и равному 3,34 мм [1, 9, 10, 11, 12, 15].

2. В результате обобщения условий обеспечения работоспособности сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ показано, что наиболее важными условиями являются обеспечение требуемого сопротивления эксплуатационным нагрузкам, достижение максимальной равномерности распределения силовых и деформационных полей, неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя при сварке на монтаже. Для достижения требуемого сопротивления сварных монтажных стыков эксплуатационным нагрузкам впервые предложены конструктивные и технологические решения, направленные на перераспределение сил в монтажном стыке, за счет применения закладных армирующих элементов, измененных поверхностей контактирования отбортовок формообразующих листов и заполнителя в монтажном стыке. При этом несущая способность быстровозводимого пролета моста из КНЭ составляет 89 % от несущей способности аналогичного монолитного пролета без монтажного стыка [4, 16].

3. Определено, что при сварке на монтаже значения допустимой температуры (граничного условия неразрывности сцепления) поверхностей металлической арматуры из конструкционных сталей, контактирующих с заполнителем из бетона с плотностью от 2200 до 2400 кг/м³ лежит в пределах от 185 до 295 °С. Выведено параметрическое уравнение для определения геометрических размеров предложенных защитных элементов, исключающих нагрев заполнителя при сварке на монтаже выше допустимой температуры с учетом теплообмена с окружающей средой, в зависимости от режимов сварки, конструкции монтажного стыка. [8].

4. Установлено, что температура на поверхностях арматуры КНЭ из стали 09Г2С, контактирующих с заполнителем, при выполнении сварных соединений монтажных стыков ($I = 145 - 430$ А, $U = 25 - 35$ В, $v = 3,4 - 4,6$ м/с) быстровозводимых конструкций из КНЭ с толщиной формообразующих листов от 4 до 10 мм, не превышает допустимой величины в 185 °С, при этом максимальное отклонение между расчетной и принятой допустимой температурами составляет 11,8 %, что подтверждает обоснованность применения выведенного параметрического уравнения для определения геометрических размеров защитных элементов и справедливость граничных условий, принятых при выведении этого уравнения [8].

5. При исследовании распределений полей деформаций и напряжений в быстровозводимых пролетах мостов и стенках резервуаров из КНЭ установлены минимальные коэффициенты запаса прочности предложенных сварных монтажных стыков: для оптимальной конструкции монтажного стыка быстровозводимых несущих элементов пролетов мостов и путепроводов из КНЭ при восприятии временной нормативной нагрузки НК-80 коэффициент запаса прочности составляет 3,74; для монолитной и быстровозводимой стенок вертикального цилиндрического резервуара РВС-30000 из КНЭ при высоте взлива нефти в 17,3 м – 3,89, 3,97 соответственно. При этом максимальные эквивалентные напряжения в стенке резервуара из КНЭ и ее сварных соединениях снижены на 34–36 % относительно типовой цельнометаллической стенки. Предложенные конструкции сварных монтажных стыков обеспечивают работоспособность стенок резервуаров и несущих элементов проезжей части мостовых конструкций из КНЭ [3, 4, 6, 7, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Впервые классифицирован новый тип сварных конструкций из КНЭ по признакам пространства, времени и силы. На основе анализа эффективности применения сварных конструкций из КНЭ по технико-экономическим показателям показано, что с увеличением удельной металлоемкости заменяемых железобетонных конструкций увеличивается технико-экономическая эффективность применения КНЭ. Основываясь на результатах таксономического анализа сварных конструкций из КНЭ и их монтажных стыков, принимая во внимание установленную тенденцию изменения эффективности их применения, определено, что перспективным является применение КНЭ для замены сварных оболочечных конструкций, металлоемких железобетонных и

сталежелезобетонных конструкций, а эффективным направлением индустриального развития КНЭ являются быстромонтируемые конструкции в мосто- и резервуаростроении [2, 5, 13].

2. Разработана и защищена патентом Республики Беларусь на изобретение система базовых конструкций сварных монтажных стыков (патент 15480 РБ) для быстровозводимых объектов из КНЭ, в зависимости от вида поперечного сечения формообразующих листов, минимального количества сварных соединений, способов снижения действующих напряжений за счет геометрических особенностей отбортовок формообразующих листов, дополнительного армирования и способов монтажа [16].

3. Разработанные численные методики прогнозирования прочности сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ и исследования неразрывности сцепления заполнителя с металлической арматурой при выполнении сварных соединений на монтаже прошли практическую апробацию и верификацию на лицензионном программном обеспечении исследовательского стенда главного инженера в Федеральном космическом агентстве Российской Федерации (ОАО «Роскосмос»). Методика прогнозирования прочности сварных монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭ внедрена в учебный процесс на кафедре «Сопротивление материалов» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» в дисциплине «Механика разрушения», что подтверждено справкой и актом внедрения.

4. Перспективность использования результатов диссертационной работы подтверждена документально актом внедрения от ОАО «Мостострой» г. Минска и справками о возможности использования результатов исследований от ОАО «Самарский резервуаростроительный завод», г. Самара и ООО «Поволжский центр нефтегазовых технологий», г. Самара (Российская Федерация). При оценке экономической эффективности применения сварных конструкций из КНЭ для стенок вертикального цилиндрического резервуара объемом 30 тыс. м³ для хранения нефтепродуктов, установлено, что стоимость стенки резервуара из КНЭ на 21–25 % меньше стоимости типовой цельнометаллической стенки [6].

5. Полученные результаты составляют научную базу для проектирования объектов на основе нового типа сварных конструкций с внешней металлической арматурой. Научная база содержит методику для прогнозирования прочности конструкций из КНЭ; обобщенный перечень требований к сварным монтажным стыкам; систему базовых конструкций сварных монтажных стыков с предложенными конструктивными и технологическими решениями для обеспечения требуемой прочности; параметрическое уравнение для определения геометрических параметров защитных элементов [2–4, 6, 8].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИЙ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Методика моделирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции с учетом остаточных сварочных напряжений / И. М. Кузменко, Т. В. Цыкунова, С. В. Богданов, М. Э. Подымако // Вестник Белорус.-Рос. ун-та, – 2007. – № 4. – С. 47–54.

2. Инновационные конструктивные решения пролетных строений проезжей части мостов / И. М. Кузменко, В. М. Фридкин, С. Н. Марков, М. Э. Подымако, О. В. Леоненко, В. Н. Медведев, С. В. Богданов // Автомобильные дороги и мосты. – 2008. – № 1. – С 37–40.

3. **Богданов, С. В.** Использование композитных несущих элементов для быстровозводимых строительных конструкций, монтируемых сваркой / С. В. Богданов, С. К. Павлюк, И. М. Кузменко // Вестник Белорус.-Рос. ун-та, – 2009. – № 4. – С. 68–75.

4. **Богданов, С. В.** Повышение уровня индустриализации технологии монтажа пролетных сооружений / С. В. Богданов // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. Прикл. науки. Промышленность. – 2010. – № 6. – С. 63–67.

5. **Богданов, С. В.** Области рационального применения композитных несущих элементов строительных конструкций по экономическим и прочностным показателям / С. В. Богданов, И. М. Кузменко // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 33–36.

6. **Богданов, С. В.** Особенности проектирования быстровозводимых сварных стен вертикальных цилиндрических резервуаров из композитных несущих элементов / С. В. Богданов // Вестник Белорус.-Рос. ун-та, – 2011. – № 3. – С. 6–16.

7. Композитный несущий элемент – основа создания новых конструктивных форм для сооружений различного назначения / И. М. Кузменко, В. М. Фридкин, С. Н. Марков, С. В. Богданов // Вестник Белорус.-Рос. ун-та, – 2011. – № 4. – С. 144–156.

8. **Богданов, С. В.** Обеспечение неразрывности сцепления заполнителя и металлической арматуры КНЭСК при выполнении сварных соединений монтажного стыка / С. В. Богданов, И. М. Кузменко // Вестник Белорус.-Рос. ун-та, – 2013. – № 3. – С. 13–22.

Материалы конференций:

9. **Богданов, С. В.** Расчет остаточных напряжений перемещений и деформаций при сварке в программном комплексе Ansys Multiphysics / С. В. Богданов, С. К. Павлюк, В. В. Воробьев // Материалы 42-й студенческой науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, – 2006. – С. 29.

10. **Богданов, С. В.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния металлической составляющей КНЭСК / С. В. Богданов, О. В. Леоненко, М. Э. Подымако // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – С. 45

11. **Богданов, С. В.** Моделирование процесса сварки металлической составляющей КНЭСК / С. В. Богданов, И. М. Кузменко // Материалы 43-й студенческой науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – С. 19–20.

12. **Богданов, С. В.** Цели и методы исследования напряженно-деформированного состояния металлической составляющей композитного несущего элемента от термомодеформационного цикла сварки / И. М. Кузменко, С. В. Богданов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – С. 8–13.

13. **Богданов, С. В.** Использование композитных несущих элементов для быстровозводимых сварных конструкций / С. В. Богданов, И. М. Кузменко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.: В 3 ч. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – Ч. 2. – С. 92.

14. **Богданов, С. В.** Сварные монтажные стыки КНЭСК для пролетных сооружений / С. В. Богданов, И. М. Кузменко, В. М. Фридкин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – С. 75.

15. **Богданов С.В.** Экспериментальная проверка точности численных моделей при исследовании деформационных полей в быстромонтируемых объектах из композитных несущих элементах / С. В. Богданов, Д. О. Кузменко, И. М. Кузменко, Т. В. Цыкунова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – С. 119.

Патенты:

16. **Пат. 15480 РБ, МПК В 23 К 1/00.** Сварное стыковое соединение строительных блоков / С. В. Богданов, С.К. Павлюк, И.М. Кузменко ; заявитель и патентообладатель ГУВПО «Белорусско-Российский университет» - № а20090951 ; заявл. 26.06.2009 ; опубл. 28.02.2012, Бюл. № 1. – 4 с.: ил.

РЭЗІЮМЭ

Багданаў Сяргей Віктаравіч

Забеспячэнне працаздольнасці мантажных стыкаў зварных канструкцый з кампазітных элементаў з трымальнай металічнай абалочачнай арматурай

Ключавыя словы: зварны мантажны стык, кампазітны трымальны элемент (КТЭ), працаздольнасць, непарыўнасць сувязі металічнай арматуры і запаўняльніка пры зварцы на мантажы, працаздольнасць .

Аб'ект даследавання: зварныя мантажныя стыкі хуткаўзведзеных канструкцый з металічнай арматурай, якая складаецца з танкасценнай абалонкі з прываранымі рэбрамі і стрыжневай арматурай паражніны якой запоўненыя цвярдзеючым матэрыялам на аснове бетонаў або палімераў.

Мэта працы: пошук спосабаў і сродкаў забеспячэння патрабаванага запасу апорнай здольнасці зварных злучэнняў мантажных стыкаў хуткаўзведзімых аб'ектаў з КТЭ і непарыўнасці сувязі абалочачнай арматуры і запаўняльніка пры зварцы на мантажы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню класіфікаваны КТЭ і іх мантажныя стыкі па прыкметах прасторы, часу і сілы; вызначаны і абгрунтаваны вобласці эфектыўнага па тэхніка - эканамічных паказчыках прымянення КНЭ; распрацаваны метадыкі даследавання непарыўнасці сувязі абалочачнай арматуры пры зварцы на мантажы і прагназавання размеркаванняў сілавых і дэфармацыйных палёў і аб'ектаў з КТЭ і іх мантажных стыках; прапанаваны канструктыўныя і тэхналагічныя рашэнні для забеспячэння патрабаванага супраціўлення эксплуатацыйным нагрузкам зварных злучэнняў мантажных стыкаў канструкцый з КТЭ; распрацавана сістэма базавых канструкцый зварных мантажных стыкаў, якія забяспечваюць мантаж аб'ектаў з КТЭ без прымянення «мокрых» тэхналогій бетанавання; выведзена параметрычнае раўнанне для вызначэння геаметрычных параметраў ахоўных элементаў, якія забяспечваюць непарыўнасць счаплення запаўняльніка і металічнай арматуры пры выкананні зварных злучэнняў мантажных стыкаў.

Распрацаваная метадыка прагназавання размеркаванняў сілавых і дэфармацыйных палёў правярана эксперыментальна.

Навізна і унікальнасць распрацаванай сістэмы канструкцый зварных мантажных стыкаў для хуткаўзведзеных аб'ектаў з КТЭ пацверджана патэнтам Рэспублікі Беларусь.

Вобласць прымянення: рэзервуарабудаванне ў нафта- і газахімічнай прамысловасці і мостабудаванні.

РЕЗЮМЕ

Богданов Сергей Викторович

Обеспечение работоспособности монтажных стыков сварных конструкций из композитных элементов с несущей металлической оболочечной арматурой

Ключевые слова: сварной монтажный стык, композитный несущий элемент (КНЭ), работоспособность, неразрывность сцепления металлической арматуры и заполнителя при сварке на монтаже, работоспособность.

Объект исследования: сварные монтажные стыки быстровозводимых конструкций из металлической арматуры, состоящей из тонкостенной оболочки с приваренными ребрами и стержневой арматурой, полости которой заполнены твердеющим материалом на основе бетонов или полимеров.

Цель работы: поиск способов и средств обеспечения требуемого запаса несущей способности сварных соединений монтажных стыков быстровозводимых объектов из КНЭ и неразрывности сцепления оболочечной арматуры и заполнителя при сварке на монтаже.

Полученные результаты и их новизна: впервые классифицированы КНЭ и их монтажные стыки по признакам пространства, времени и силы; определены и обоснованы области эффективного по технико-экономическим показателям применения КНЭ; разработаны методики исследования неразрывности сцепления оболочечной арматуры при сварке на монтаже и прогнозирования распределений силовых и деформационных полей в объектах из КНЭ и их монтажных стыках; предложены конструктивные и технологические решения для обеспечения требуемого сопротивления эксплуатационным нагрузкам сварных соединений монтажных стыков конструкций из КНЭ; разработана система базовых конструкций сварных монтажных стыков, обеспечивающих монтаж быстровозводимых объектов из КНЭ без применения «мокрых» технологий бетонирования; выведено параметрическое уравнение для определения геометрических параметров защитных элементов, обеспечивающих неразрывность сцепления заполнителя и металлической арматуры при выполнении сварных соединений монтажных стыков.

Разработанная методика прогнозирования распределений силовых и деформационных полей проверена экспериментально.

Новизна и уникальность разработанной системы конструкций сварных монтажных стыков для быстровозводимых объектов из КНЭ подтверждена патентом Республики Беларусь.

Область применения: резервуаростроение в нефте-, газохимической промышленности и мостостроении.

SUMMARY

Bogdanov Sergei Viktorovich

Operability Assurance of Field Joints of Welded Structures from Composite Elements with Loads-Bearing Metal Shell Reinforcement

Keywords: welded field joint, composite bearing element (CBE), operability, continuity of bond between the metal reinforcement and the aggregate in welding operations during assembly.

Object of the research: welded field joints of prefabricated structures from metal reinforcement consisting of a thin-walled shell with welded ribs and reinforcement rods, whose cavities are filled with a hardening material on the basis of concretes or polymers.

Objective of research: to find ways and facilities to ensure the required reserve of the bearing capacity of welds of field joints of prefabricated objects from CBEs and continuity of the bond between the shell reinforcement and the aggregate when performing welding operation during assembly.

Results obtained and their novelty: for the first time the CBE and their field joints are classified according to space, time, and force; the fields of CBEs effective use according to technical and economic parameters are determined and substantiated; research methodology of continuity of the bond between the shell reinforcement in welding operations during assembly and distribution of field and deformation fields in the objects from CBEs and their field joints was developed; design and technological solutions to provide the required resistance to working load of welds of field joints of structures from CBEs were proposed; a system of basic structures of welded field joints which ensure assembly of prefabricated objects from CBEs without the use of "wet" technologies of concreting was developed; parametric equation for determining the geometric parameters of the protective elements to ensure continuity of bond of the aggregate and the metal reinforcement when performing field joints welding.

The developed prediction technique of distributions of force and deformation fields was proved experimentally.

The novelty and originality of the developed system of structures of welded joints for prefabricated objects from CBEs were confirmed by a patent of the Republic of Belarus.

Scope: tank construction in the oil and gas chemical industry and bridge building.

БОГДАНОВ
Сергей Викторович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОНТАЖНЫХ
СТЫКОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ С НЕСУЩЕЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧЕЧНОЙ АРМАТУРОЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»

Подписано в печать 19.11.2013. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1.4. Уч.-изд. л. 1.5. Тираж 60 экз. Заказ № 820.

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ № 02330/0548519 от 16.06.2009.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.