УДК 621.791

С. В. Богданов, И. М. Кузменко

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ КНЭСК ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОНТАЖНОГО СТЫКА

UDC 621.791

S. V. Bogdanov, I. M. Kuzmenko

ENSURING THE CONTINUITY OF AGGREGATE AND METAL REINFORCEMENT COHESION IN COMPOSITE BEARING ELEMENTS (CBEBS) DURING MAKING WELDED ERECTION JOINTS

Аннотация

Рассмотрены средства обеспечения неразрывности сцепления металлической арматуры и заполнителя композитных несущих элементов (КНЭСК) при сварке на монтаже. Приведено параметрическое уравнение, выведенное для определения геометрических параметров защитных элементов, обеспечивающих неразрывность. Проведено численное исследование справедливости принятых при выведении этого уравнения допущений.

Ключевые слова:

сварной монтажный стык, композитный несущий элемент, неразрывность сцепления, монтажная сварка.

Abstract

The article deals with the means to adhesion continuity ensuring of metallic reinforcement and filler of composite bearing elements (KNESK) during welding of field joints. A parametric equation derived to determine the geometric parameters of the protective elements to ensure adhesion continuity is given. A numerical study to justify simplifications and assumptions adopted to derive this equation is held.

Key words:

welded joint assembly, composite bearing element, adhesion continuity, field joints.

Введение

Главным условием, положенным в основу при разработке КНЭСК, как и любого другого композитного несущего элемента, было взаимное исключение недостатков используемых компонентов [1]. На этапе эксплуатации это условие соблюдено полностью – сварная оболочечная арматура располагается для эффективного восприятия растягивающих усилий, твердеющие заполнители – для повышения ее устойчивости к потере несущей способности и восприятия сжимающих усилий. На этапе монтажа данное условие не выполняется – не используется основное преимущество сварной оболочечной арматуры – быстрый монтаж сваркой. Соблюдение этого условия и расширение областей эффективного применения КНЭСК [2, 3] обеспечивается повышением уровня индустриализации их монтажа за счет специальных монтажных стыков, выполняемых только сваркой без использования «мокрых» технологий бетонирования [4, 5].

© Богданов С. В., Кузменко И. М., 2013

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

КНЭСК и их монтажные стыки

Композитные несущие элементы и их монтажные стыки состоят из металлической сварной оболочечной арматуры, выполненной из конструкционных сталей, заполненной твердеющими материалами, в большинстве случаев на основе бетона. Для изготовления формообразующих листов и листовых упрочняющих элементов применяется конструкционная низкоуглеродистая или низколегированная сталь, в редких случаях могут использоваться высоколегированные стали. Стержневые армирующие элементы выполняются как из конструкционных, так и из высокопрочных сталей. Бетоны используют легкие и тяжелые со средней плотностью 2200…2400 кг/м^3. Высокотемпературному нагреву на монтаже подвергаются элементы, находящиеся в зоне термического влияния сварных соединений монтажного стыка – формообразующие листы, их отбортовки, листовые армирующие элементы и бетонный заполнитель, расположенный в этой зоне.

Для исключения нарушения сцепления заполнителя и сварной оболочечной арматуры во время сварки на монтаже, а следовательно, для защиты от раскрошивания бетона и потери сцепления между бетоном и металлом необходимо поддерживать температуру на поверхностях, контактирующих с бетоном, не выше определенного уровня, что не вызовет возникновения напряжений, превышающих силы сцепления бетона и металла [6]. Это ограничение обусловлено тем, что до определенной температуры металл и бетон имеют близкие значения коэффициентов температурного линейного расширения. Соответственно, оболочечная арматура и заполнитель при нагреве будут деформироваться одинаково, что не вызовет возникновения напряжений на границах раздела сред, превышающих силы их сцепления. Для построения сводной диаграммы коэффициентов линейного расширения в зависимости от температуры взяты максимальные и минимальные значения коэффициентов температурного линейного расширения как для бетона, так и для стали. Для конструкционных сталей максимумом этого коэффициента обладает сталь 08Г2С, а минимумом – сталь 16ГС [7]. У легких и тяжелых бетонов при 100 °С коэффициент температурного линейного расширения находится в пределах от $7\cdot10^{-6}$ до $10\cdot10^{-6}$ °С$^{-1}$ [6]. Аппроксимация коэффициента линейного теплового расширения затвердевшего бетона на другие температуры выполнена по зависимостям для расчета железобетонных конструкций [8]. Построена диаграмма зависимости максимумов и минимумов коэффициентов температурного линейного расширения бетона и стали от температуры (диаграмма термодеформационной совместимости стали и бетона) (рис. 1).

По сводной диаграмме коэффициентов линейного теплового расширения в зависимости от температуры определены температурные границы неразрывности сцепления, а также совместного деформирования сварной оболочечной арматуры из конструкционных сталей и бетонов, использованных в качестве заполнителей. Установлено, что допустимая температура гарантированной неразрывности сцепления $T_Д$ лежит в диапазоне от 185 до 295 °С в зависимости от сочетания марок стали и бетона. Исключение нагрева при сварке заполнителя выше допустимых температур обеспечивается подбором режимов сварки, применением защитных элементов, перераспределяющих тепло в зоне термического влияния. Эти элементы выполняются из листового проката (рис. 2). Геометрические параметры (размеры) защитных элементов определяются для каждой конкретной конструкции монтажного стыка исходя из материала сварной арматуры, допустимой температуры неразрывности сцепления $T_Д$, расположения сварного шва в монтаж-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ном стыке, способа и режимов сварки. Материал защитных элементов для упрощения приварки накладок принимается такой же, как и для формообразующих листов.

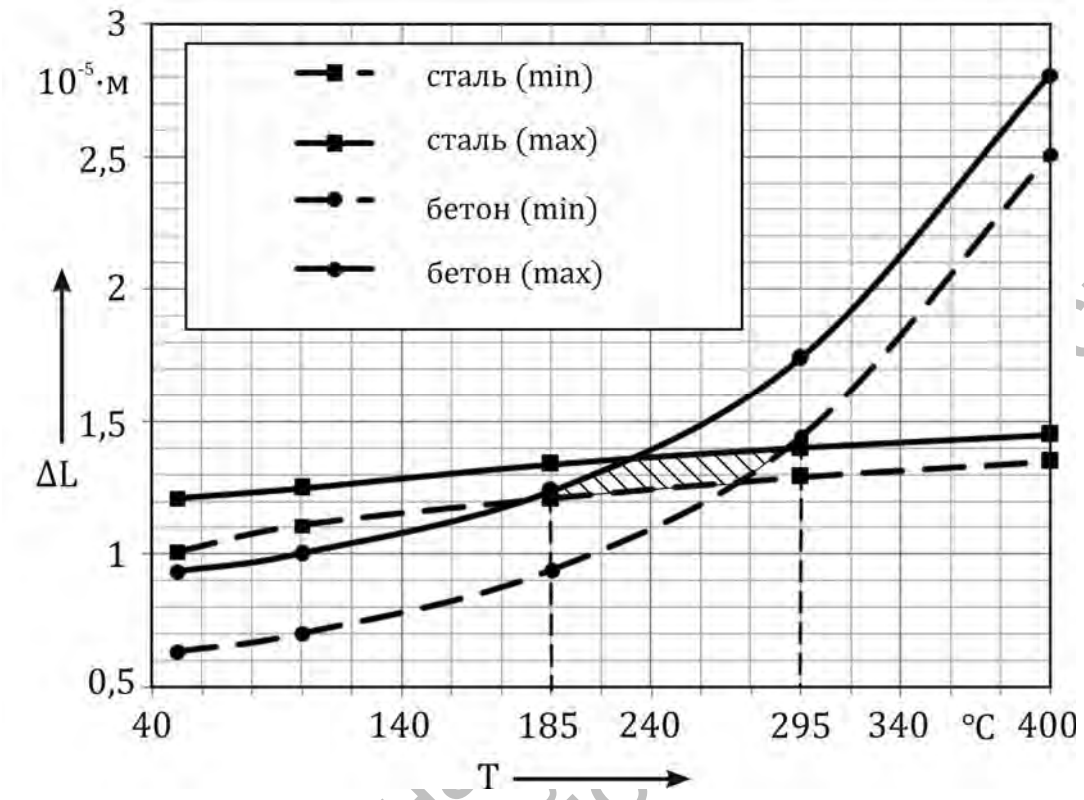

Рис. 1. Диаграмма термодеформационной совместимости стали и бетона

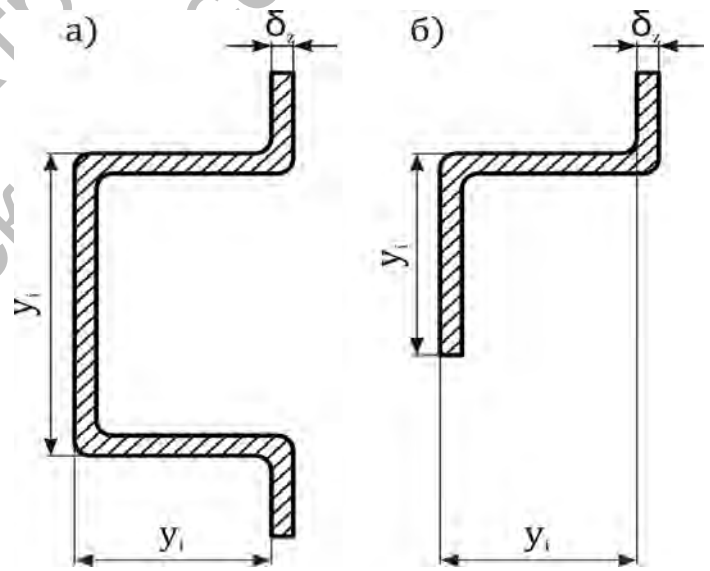

Рис. 2. Поперечные сечения защитных элементов

Электронный архив Белорусско-Российского университета

При расчете геометрических параметров защитных элементов разработанные сварные монтажные стыки для объектов из КНЭСК могут быть заменены одним из трех расчетных случаев монтажных стыков (рис. 3).

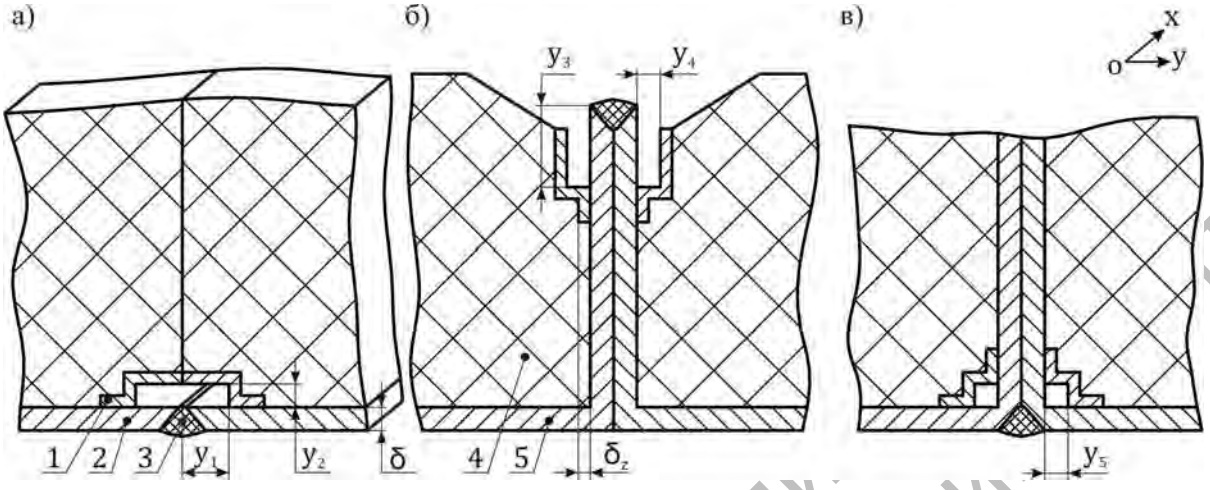

Рис. 3. Расчетные случаи сварных монтажных стыков: 1 – защитный элемент; 2 – формообразующий лист; 3 – сварное соединение монтажного стыка; 4 – заполнитель; 5 – формообразующий лист с отбортовкой

Теория сварочных процессов позволяет записать уравнение, по которому определяется ширина зоны нагрева без учета теплообмена с окружающей средой, и уравнение, описывающее предельное состояние процесса распространения теплоты при нагреве пластины мощным быстродвижущимся линейным источником тепла [9]. Аппроксимацией по методу наименьших квадратов данных, полученных по этим уравнениям, выведено параметрическое уравнение для определения геометрических параметров защитных элементов с учетом теплоотдачи с поверхностей пластины, режимов сварки, конструкции монтажного стыка, толщины свариваемых листов и допустимой температуры:

$$y_i = \frac{q \cdot \sqrt{2/(\pi \cdot e)}}{2 \cdot c\rho \cdot \upsilon \cdot \delta \cdot \Delta T} \times \left[\left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} (A_i + B_i \cdot \Delta T) \times \\ \times \left(\ln(1 + \upsilon \cdot 10) \right)^{C_i + D_i \cdot \Delta T} - 1 \end{array} \right) \times \\ \times \ln(q) + \dfrac{1}{E_i \cdot F_i \cdot \Delta T \cdot e^{\ln(1+\upsilon \cdot 10) \cdot (G_i + H_i \cdot \Delta T)}} \end{array} \right] - 1 \right],$$

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; $c\rho$ – коэффициент объемной теплоемкости. Принят неизменным и для конструкционных сталей равен 4,9 Дж/(см^3·К); δ – толщина свариваемых листов, см; υ – скорость перемещения источника тепла, см/с; q – мощность источника тепла, Вт; ΔT – приращение температуры, К.

Значения параметров уравнения представлены в табл. 1.

При этом были приняты следующие утверждения и граничные условия, обуславливающие применимость полученных зависимостей:

– влияние заполнителя на распределение температуры не учтено, рассматриваемая область заведомо ограничена защитным элементом и не контактирует с заполнителем;

– геометрические параметры защитных элементов определяются таким образом, чтобы величина температуры в области прилегания защитного элемента была равна допустимой температуре $T_Д$;

– толщина защитных элементов

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

не влияет на выполнение условия неразрывности сцепления металлической арматуры и заполнителя;

– величина допустимой температуры в выведенных зависимостях ограничена диапазоном от 85 до 435 ºС;

– толщина свариваемых листов δ принята от 0,4 до 1,0 см. В мостостроении применяют листы толщиной от 0,6 см, минимальная толщина листов, используемых в резервуаростроении, составляет 0,4 см;

– минимальная толщина защитного элемента δ_z составляет 0,2 см;

– скорость сварки υ листов встык толщиной от 0,4 до 1 см ручной дуговой и механизированной сваркой в среде защитных газов лежит в пределах от 7 до 25 м/ч (0,2…0,7 см/с). Выведенные зависимости справедливы в диапазоне от 0,2 до 0,7 см/с [9];

– мощность источника тепла q лежит в пределах от 2 до 12 кВт;

– значение коэффициента температуропроводности *a* для конструкционных сталей лежит в пределах от 0,075 до 0,09 см^2/с. Его величина нами принята неизменной и не зависящей от температуры и равна 0,08 см^2/с;

– значение коэффициента теплопроводности λ для конструкционных сталей лежит в пределах от 0,38 до 0,42 Вт/(см·К). Его величина принята неизменной и равна 0,4;

– коэффициент α принят равным $6\cdot10^{-3}$ Вт/(см^2·К);

– коэффициент объемной теплоемкости cρ принят неизменным 4,9 Дж/(см^3·К).

Табл. 1. Значения параметров уравнения

Параметры	Толщина свариваемых листов δ, см			
	0,4	0,6	0,8	1
1	2	3	4	5
Первый расчетный случай				
A_1	7,722 E–01	7,717 E–01	7,93 E–01	8,201 E–01
B_1	2,494 E–05	1,228 E–04	1,72 E–04	1,886 E–04
C_1	3,851 E–02	1,607 E–01	2,18 E–01	2,294 E–01
D_1	1,004	1,001	1	9,990 E–01
E_1	3,072 E–01	2,266 E–01	2,02 E–01	2,028 E–01
F_1	9,992 E–01	9,998 E–01	1	1,001
G_1	–5,528 E–02	1,922 E–01	3,31 E–01	3,861 E–01
H_1	6,883 E–04	4,170 E–04	9,35 E–05	–1,468 E–04
Второй расчетный случай				
A_3	7,200 E–01	7,572 E–01	8,155 E–01	8,656 E–01
B_3	1,423 E–04	2,540 E–04	2,489 E–04	2,071 E–04
C_3	2,220 E–01	2,882 E–01	2,518 E–01	1,996 E–01
D_3	1	9,989 E–01	9,981 E–01	9,976 E–01
E_3	2,054 E–01	1,787 E–01	2,003 E–01	2,374 E–01
F_3	9,998 E–01	1,001	1,001 E+00	1,001
G_3	2,091 E–01	3,867 E–01	3,940 E–01	3,469 E–01

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
H_3	4,070 E–04	–1,129 E–04	–3,669 E–04	–4,503 E–04
Третий расчетный случай				
A_5	8,873 E–01	9,073 E–01	9,292 E–01	9,545 E–01
B_5	6,850 E–05	9,316 E–05	8,737 E–05	2,407 E–05
C_5	7,881 E–02	1,055 E–01	1,025 E–01	1,278 E–01
D_5	1,001	9,993 E–01	9,983 E–01	9,951 E–01
E_5	3,632 E–01	3,433 E–01	3,666 E–01	4,0680 E–01
F_5	1	1,001	1,0007	1,001
G_5	1,719 E–01	2,804 E–01	2,920 E–01	2,962 E–01
H_5	2,479 E–04	–9,489 E–05	–3,188 E–04	–6,699 E–04

Величины геометрических параметров y_2 и y_4 не зависят от допустимой температуры ввиду низкой теплопроводности воздушной прослойки в данных условиях, свободного перемещения воздуха при нагреве и быстротечности процессов нагрева и охлаждения при сварке. Для доказательства этого утверждения проведен расчет температуры поверхности защитного элемента при наиболее неблагоприятных и недостижимых условиях: воздушная среда, окружающая защитный элемент, равномерно нагрета до температуры плавления металла ($T_{ПЛ}$ = 1530 ºС); время нахождения защитного элемента в нагретой среде максимально исходя из максимума длины сварочной ванны и минимума скорости сварки. По зависимостям для расчета нестационарного теплообмена через воздушную прослойку по числам подобия Фурье и Био [10] рассчитаны значения параметров y_2 и y_4. Они равны 1,24 и 1,46 см соответственно.

Была проведена численная проверка методом конечных элементов обеспечения температурного условия неразрывности сцепления металлической оболочечной арматуры и заполнителя при выполнении сварных соединений монтажного стыка с применением защитных элементов предложенной конструкции. Геометрические параметры защитных элементов определены по выведенному параметрическому уравнению. Эскизы параметрических моделей исследованных монтажных стыков для трех расчетных случаев представлены на рис. 4.

В табл. 2 приведены значения режимов сварки I, U, υ, площадь поперечных сечений сварных соединений Fш, длина сварочной ванны L, объемный тепловой поток q_v, геометрические параметры защитных элементов y_1, y_3, y_5, определенные исходя из $T_{ПЛ}$ = 185 ºС для трех расчетных случаев и толщины формообразующих листов от 4 до 10 мм. Линейный размер конечных элементов принят меньше длины сварочной ванны и равен 3,34 мм.

По результатам реализации математических моделей получены распределения во времени тепловых полей в монтажном стыке. Для оценки точности выведенных зависимостей для определения геометрических параметров защитных элементов построены графики изменения во времени температуры в контрольных точках 1, 2, 3. Графики представлены на рис. 5…7.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

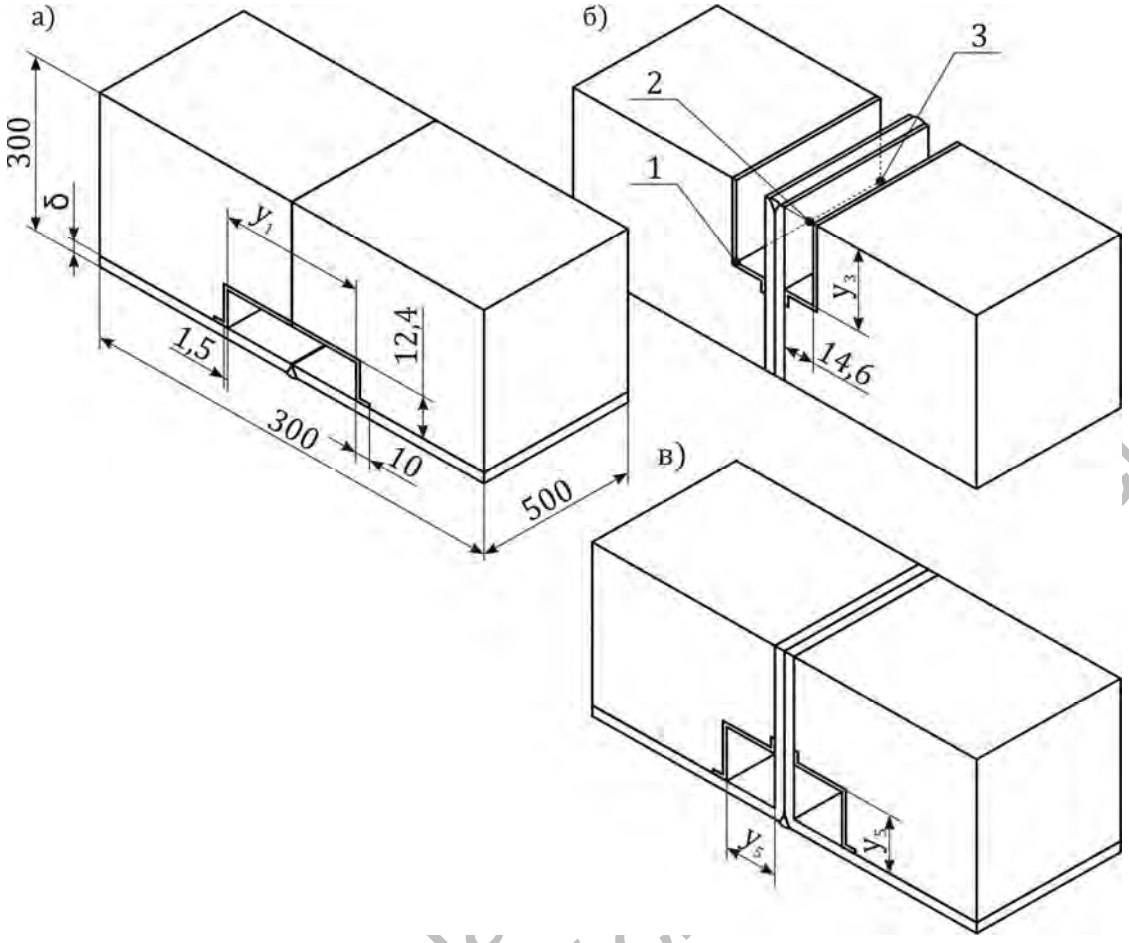

Рис. 4. Эскизы геометрических моделей монтажного стыка: а – первый расчетный случай; б – второй расчетный случай; в – третий расчетный случай; 1, 2, 3 – контрольные точки

Табл. 2. Значения основных параметров

δ, мм	I, A	U, B	Fш, 10^{-5}·м^2	υ, 10^{-3}·м/с	L, мм	q_v, 10^{10}·Вт/м^3	y_1, мм	y_3, мм	y_5, мм
4	143	25	1,54	4,6	7,4	5,4	30,97	34,62	19
6	238	27	3,20	3,7	13,9	4,9·	45	50,49	27,2
8	333	30	4,50	3,7	21,4	5,4	52,91	58,68	32
10	429	33	6,30	3,4	30,3	5,5	63,92	72,22	43,2

Согласно расчетным данным установлено, что поверхности формообразующих листов, контактирующие с бетонным заполнителем, нагреваются до температуры не более 180 ºС при сварке монтажных стыков быстровозводимых конструкций из КНЭСК с предложенными защитными элементами. Максимальное расхождение с допустимой температурой в 180 ºС составляет 9,4 % и приходится на третий расчетный случай при δ = 4 мм. Расхождение значений температуры, полученных методом конечных элементов и по параметрическим уравнениям, выведенным на основе эмпирических формул теории сварочных процессов, объясняется тем, что параметрические уравнения не учитывают теплоотвод в бетонный заполнитель. Во всех расчетных случаях темпе-

Электронный архив Белорусско-Российского университета

ратура в контрольных точках не превышает допустимые величины, что подтверждает справедливость допущений, принятых для выведения параметрического уравнения.

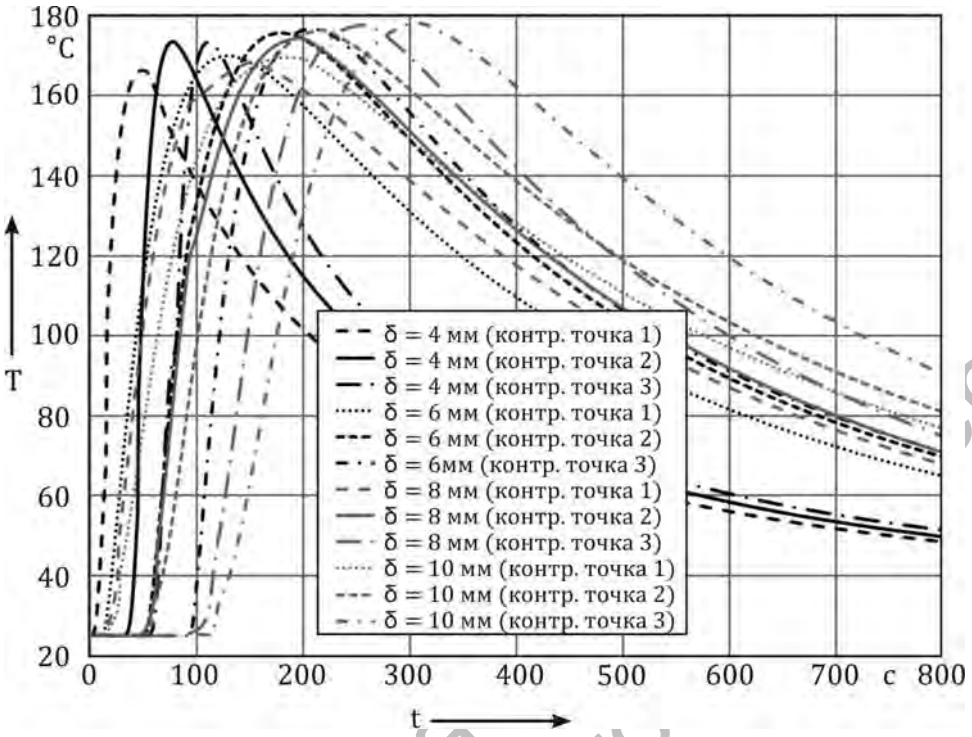

Рис. 5. Изменение температуры в первом расчетном случае

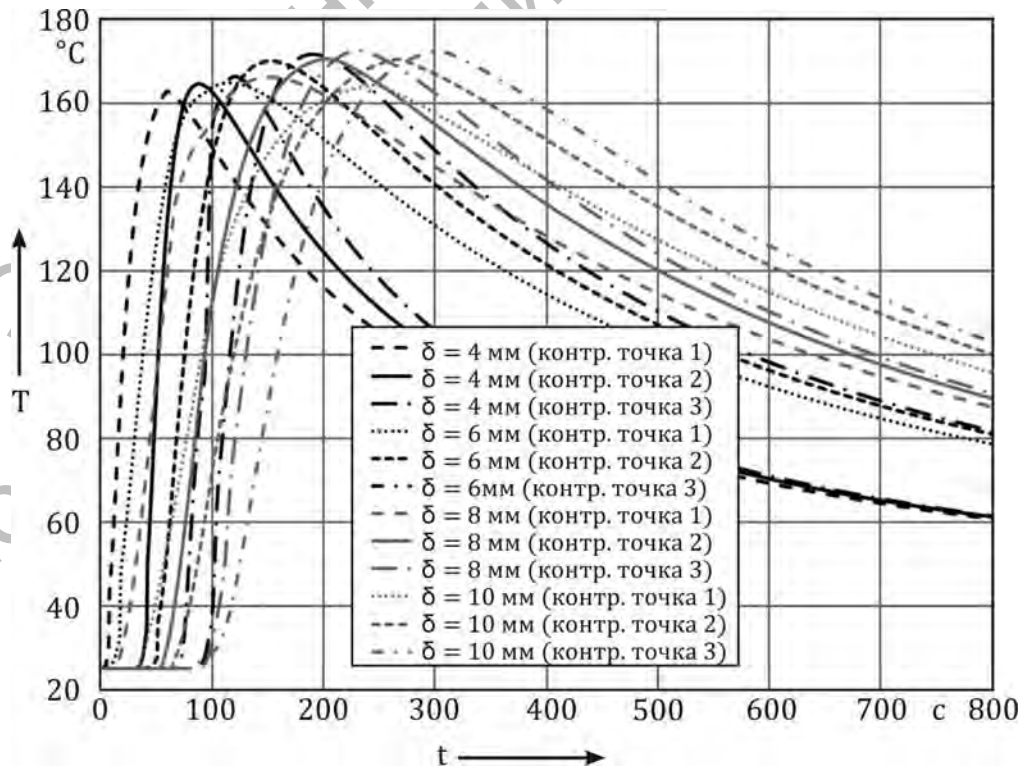

Рис. 6. Изменение температуры во втором расчетном случае

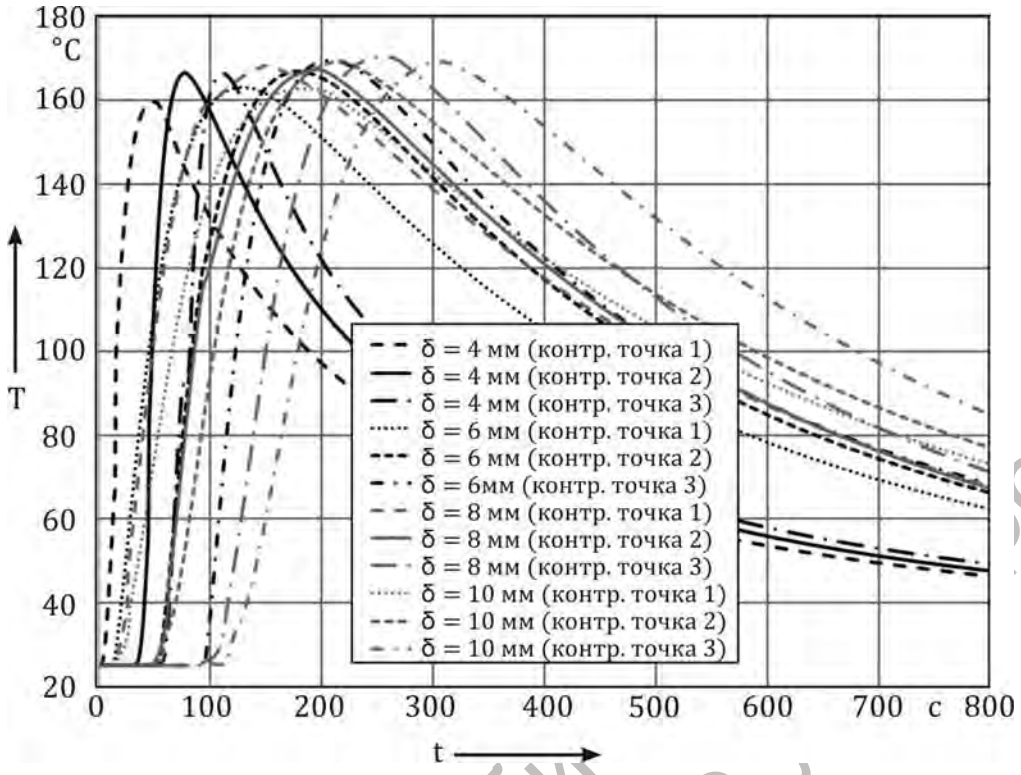

Рис. 7. Изменение температуры в третьем расчетном случае

Заключение

1. Определен диапазон допустимых температур неразрывности сцепления сварной оболочечной арматуры из конструкционных сталей и твердеющего заполнителя из легких и тяжелых бетонов в зависимости от сочетания марок стали и бетона. Верхнее значение диапазона температуры, согласно построенной диаграмме термодеформационной совместимости конструкционных сталей, легких и тяжелых бетонов в зависимости от температуры, лежит в пределах от 185 до 295 ºС. В этом диапазоне температур металл и бетон имеют близкие значения коэффициентов температурного линейного расширения, что исключает возможность возникновения при нагреве на границах раздела сред напряжений, превышающих силы сцепления бетона и металла.

2. Предложены защитные элементы, исключающие нагрев поверхностей металлической оболочечной арматуры, контактирующих с заполнителем, выше допустимой температуры при сварке на монтаже и, следовательно, обеспечивающие неразрывность их сцепления. Выведено параметрическое уравнение для определения геометрических параметров защитных элементов при различных режимах сварки, геометрических параметрах монтажного стыка с учетом поверхностного теплообмена. Определены минимально допустимые и достаточные для исключения нагрева выше допустимой температуры величины геометрических параметров y_2 и y_4, значение которых мало зависит от режимов сварки и может быть принято постоянным для всех монтажных стыков. Они равны 12,4 и 14,6 мм соответственно.

3. Проведенное численное исследование тепловых полей при выполнении сварных соединений монтажных стыков быстровозводимых конструкций из композитных несущих элементов свидетельствует о справедливости при-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

нятых допущений и утверждений при выведении параметрических уравнений для определения геометрических параметров защитных элементов. Максимальная погрешность между расчетной и допустимой температурами составляет 10,5 %. Это подтвердило практическую применимость выведенного параметрического уравнения для определения геометрических параметров защитных элементов, исключающих деструкцию заполнителя при термическом цикле сварки на монтаже для проектирования быстровозводимых конструкций из КНЭСК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фридкин, В. М.** Принципы формообразования в теории линейно-протяженных сооружений / В. М. Фридкин. – М. : Ладья, 2006. – 512 с.

2. **Кузменко, И. М.** Применение сварных несущих элементов в новых композитных строительных конструкциях / И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, В. М. Фридкин // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 16–19.

3. **Пат. 4082 РБ, МПК 7 Е 04 С 2/28.** Композитный несущий элемент строительных конструкций / В. М. Фридкин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Могилев. машиностр. ин-т. – № 970421 ; заявл. 29.07.97 ; опубл. 19.04.01, Бюл. № 3. – 3 с. : ил.

4. **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 Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20090951 ; заявл. 26.06.09 ; опубл. 28.02.12, Бюл. № 1. – 4 с. : ил.

5. Разработка эффективных конструкций типовых монтажных стыков и их сварных соединений для быстровозводимых сооружений из композитных несущих элементов строительных конструкций (КНЭСК) : отчет о НИР / Белорус.-Рос. ун-т ; рук. И. М. Кузменко. – Могилев, 2011. – 74 с. – № ГР 20111007.

6. **Пецольд, Т. М.** Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования / Т. М. Пецольд, В. В. Тур. – Брест : БГТУ, 2003. – 379 с. : ил.

7. **Сорокин, В. Г.** Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин ; под ред. В. Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с. : ил.

8. **Кричевский, А. П.** Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурное воздействие / А. П. Кричевский. – М. : Стройиздат, 1984. – 148 с.

9. **Волченко, В. Н.** Теория сварочных процессов : учебник для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров ; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высш. шк., 1988. – 559 с. : ил.

10. **Михеев, М. А.** Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с. : ил.

11. Методика моделирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции с учетом остаточных сварочных напряжений / И. М. Кузменко [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 4. – С. 47–54.

Статья сдана в редакцию 17 сентября 2013 года

Сергей Викторович Богданов, инженер, Белорусско-Российский университет.
Игорь Михайлович Кузменко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Sergey Viktorovich Bogdanov, Engineering, Belarusian-Russian University.
Igor Mikhailovich Kuzmenko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета