

pipe elements. Statistical processing of defects and damages was performed to collect data on the damageability of metal chimneys and load-bearing towers, performed on the basis of conclusions on the technical condition and industrial safety assessments. The data on the damageability of metal smoke and ventilation pipes, bearing towers in service for 30-50 years or more, and the values of the maximum permissible values of defects and damages have been determined. Analysis of defects

and damages of metal chimneys and bearing towers, determination of their maximum permissible values for each technical condition of the structures allows to estimate the residual life and durability of structures after a long service life.

Keywords: metal smoke and ventilation pipes, bearing towers, inspection, defects and damage, durability, residual life.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-129-135

УДК 624.012

Яровой С.Н

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская, 40, Харьков, 61000, Украина; e-mail: psp-nauka@yandex.ua)*

УЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УСИЛЕНИИ ДЫМОВЫХ ТРУБ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

Температурные воздействия и циклические нагрузки могут приводить к появлению трещин в металле и сварных швах металлических дымовых труб. При усилении ствола дымовой трубы посредством приварки накладки происходит процесс формирования системы сварочных напряжений. Необходимо проанализировать суммирование сварочных и внешних (активных) напряжений с учетом концентраторов напряжений от трещиноподобных повреждений. С помощью программно-вычислительного комплекса Selena-Results построена конечно элементная модель трубы с трещиной в сварном шве и определены напряжения с учетом концентратора напряжений (трещины). Была разработана методика учета суммирования сварочных и силовых напряжений в месте усиления трубы. В результате исследования получены формулы, учитывающие остаточные напряжения при приварке накладок на основании суммирования сварочных и внешних напряжений и учетом концентраторов напряжений. Полученные результаты позволяют более точно учитывать сварочные напряжения при усилении труб с трещинами и увеличивают надежность дымовых труб при эксплуатации.

Ключевые слова: металлические дымовые трубы, трещины в металле, усиление, сварочные и силовые напряжения.

Температурные воздействия и циклические нагрузки могут приводить к появлению трещин в металле и сварных швах элементов металлических дымовых труб и несущих башен. Коррозионное воздействие окружающей среды и дымовых газов значительно ускоряют скорость развития трещин.

До образования трещины напряжения по сечению трубы распределялись равномерно и траектории главных напряжений прямолинейны. После образования трещины в металле или сварном шве ствола трубы линии главных напряжений искривляются и сгущаются, что характеризует повышение напряжений в месте образования трещины, и приводит к появлению двух

главных напряжений σ_1 и σ_2 , т.е. возникновению плоского напряженного состояния [1, 3]. В местах образования трещин характер искривления линий главных напряжений аналогичен, как и при образовании отверстий. Но сгущение траекторий главных напряжений более ярко выражено, что приводит к образованию больших значений напряжений на краях трещин (рис. 1).

Радиус кривизны r на краю трещины очень маленький. Коэффициент концентрации напряжений α_σ зависит от радиуса кривизны r – чем меньше радиус кривизны, тем выше коэффициент концентрации. На краю трещины коэффициент концентрации напряжений достигает 6-9.

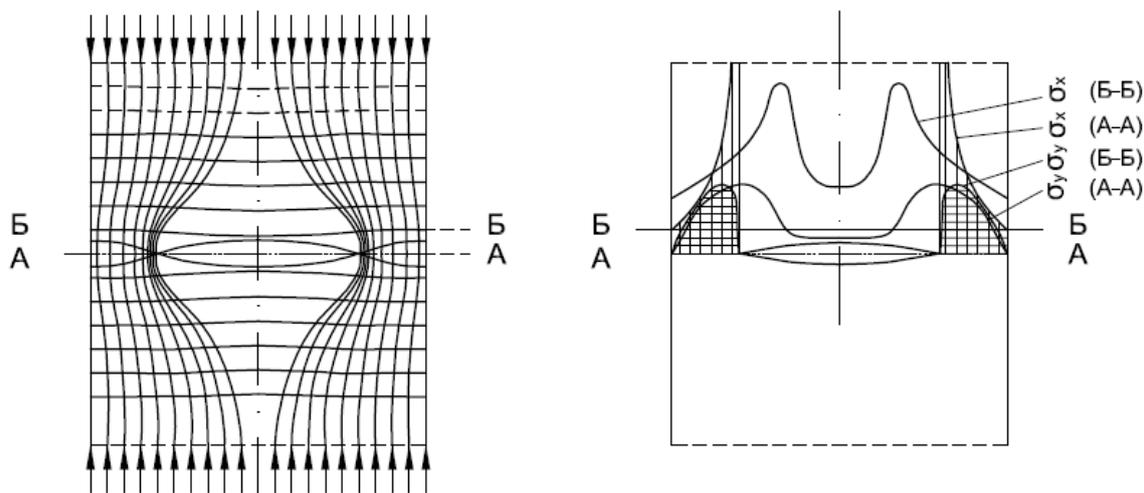


Рис. 1. Концентрация напряжения в месте образования трещины.

Теоретически радиус кривизны края трещины r стремится к бесконечности, и как следствие, к бесконечности стремится и коэффициент концентрации напряжений. Чем выше концентрация напряжений, тем меньше пластические деформации. Резкий перепад напряжений и однозначное поле растягивающих напряжений затрудняет развитие пластических деформаций. Менее напряженные соседние участки сдерживают их развитие. Разрушение носит хрупкий характер и происходит путем отрыва.

На практике рентгенографические снимки показывают, что даже при остром концентраторе напряжений в зоне отрыва имеются участки с ярко выраженным пластическим течением.

С помощью программно-вычислительного комплекса Selena-Results, построена конечно элементная модель с трещиной в сварном шве в основании трубы (рис. 2). Трещина длиной 150мм и шириной раскрытия 5мм в горизонтальном сварном шве между секциями трубы была выявлена при обследовании металлической вытяжной трубы высотой 100м, расположенной внутри несущей башни цеха по производству азотной кислоты химкомбината «Минудобрение» в г. Россошь [11, 12]. Вытяжная труба рассчитывалась с учетом действия собственного веса и ветровой нагрузки.

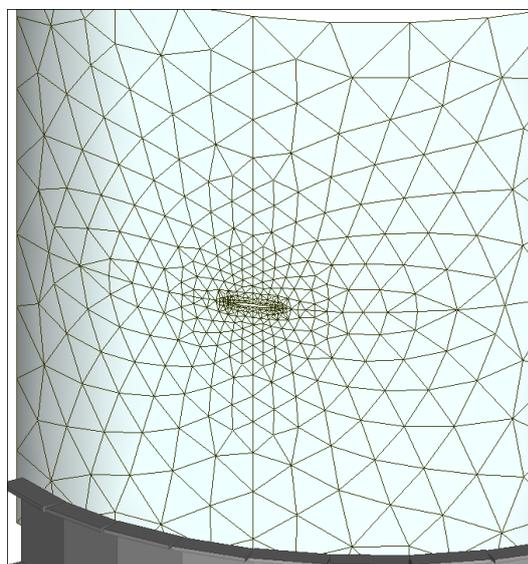


Рис. 2. Модель трещины в горизонтальном шве трубы.

Полученные результаты свидетельствуют, что после образования трещины в горизонтальном сварном шве ствола трубы линии главных напряжений искривляются и сгущаются, что приводит к появлению двух главных напряжений σ_1 и σ_2 .

В месте трещины возникает плоское напряженное состояние. По краям трещины, где коэффициент концентрации напряжений максимальный, в металле имеются участки с ярко выраженным пластическим течением (рис. 4).

Интенсивность напряжений в окрестности трещины показана на рис. 3.

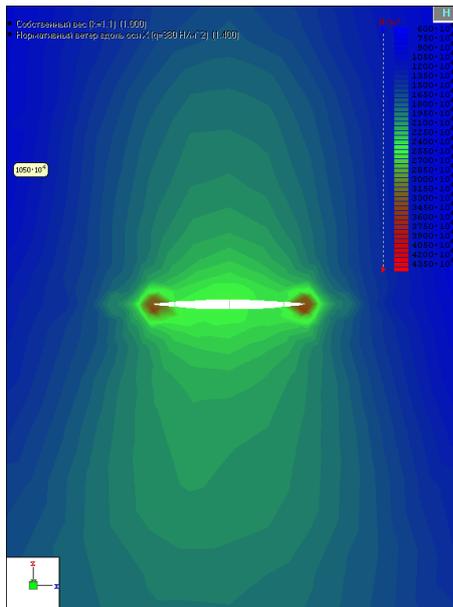


Рис. 3. Интенсивность напряжений в окрестности трещины.

При наличии концентраторов напряжений в виде трещин, динамические (ветровые) воздействия и резкое снижение температуры (температурные удары) оказывают крайне негативное влияние на прочность металлических вытяжных труб и элементов несущих вытяжных башен.

Неравномерность распределения напряжений характеризуется коэффициентом концентрации напряжений α_σ

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_n, \quad (1)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в месте концентрации; σ_n – номинальное напряжение в ослабленном сечении, равное $\sigma_n = N/A_{\text{осл}}$; $A_{\text{осл}}$ – площадь ослабленного сечения.

Существует закономерность снижения коэффициента концентрации напряжений α_σ от коэффициента усиления отверстия K_{yc} [6]. Коэффициент усиления отверстия K_{yc} определяется по формуле:

$$K_{yc} = \frac{A_{yc}}{A_{осл}}, \quad (2)$$

где A_{yc} и $A_{осл}$ – площади усиления и ослабления отверстия.

Зависимость коэффициента концентрации напряжений α_σ от коэффициента усиления отверстия K_{yc} показана рис. 4. Представленная зависимость хорошо описывается следующей формулой:

$$\alpha_\sigma = 3 - \frac{2}{K_{yc}^c} \quad (3)$$

где c – константа ($c \approx 0,5$).

При одинаковой толщине ствола трубы и накладке $K_{yc}=1,0$, $\alpha_\sigma=1,0$.

Представленная зависимость хорошо описывается следующей формулой:

$$\alpha_\sigma = 3 - \frac{2}{K_{yc}^c} \quad (4)$$

где c – константа ($c \approx 0,5$).

При одинаковой толщине ствола трубы и накладке $K_{yc}=1,0$, $\alpha_\sigma=1,0$.

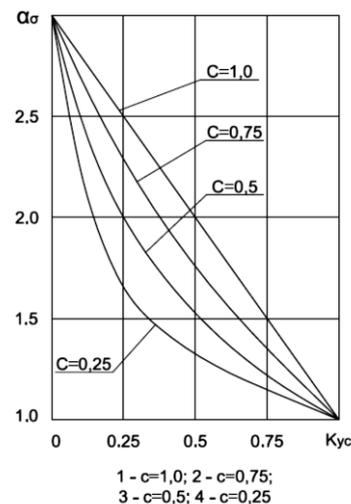


Рис. 4. Зависимость концентрации напряжений α_σ от коэффициента усиления отверстия K_{yc} .

При определении несущей способности металлических дымовых труб с накладками большую роль играют сварные угловые швы, работоспособность которых можно повышать рациональным выбором их свойств и размеров. Повышение работоспособности сварных швов достигается повышением значения коэффициента трещиностойкости K_c и оптимальным выбором параметров накладок. Трещиностойкость K_c улучшается выбором сварочных электродов, оптимальным режимом сварки, термической обработкой в процессе сварки или после сварки.

Как известно, работоспособность сварных элементов определяется остаточными сварочными напряжениями, вызванными особенностью термомодеформационного цикла сварки, и по величине они близки к пределу текучести [7].

Процесс формирования системы сварочных напряжений при усилении ствола дымовой трубы посредством приварки накладки (рис. 5).

Толщина накладки усиления t_{yc} в месте сквозного отверстия обычно соответствует толщине стенки трубы $t_{тр}$.

Сварочные напряжения при приварке в месте усиления накладки к дымовой трубе возникают вследствие локализованных процессов нагрева и охлаждения - структурных превращений металла.

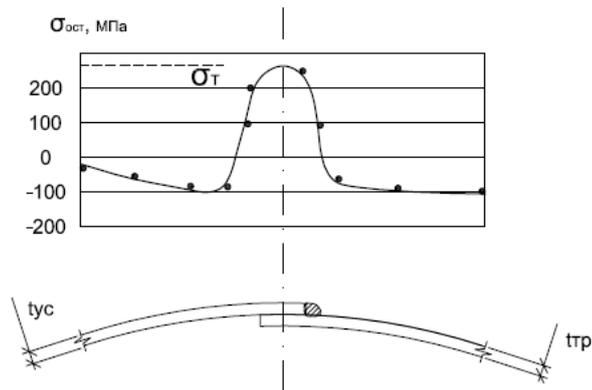


Рис. 5. Распределение напряжения при сварке накладных элементов.

При этом важнейшим условием является возникновение в отдельных зонах элементов конструкций упруго-пластических деформаций. При сварке элементов градиенты температурных полей таковы, что в них образуются сварочные остаточные напряжения. При этом, максимальные остаточные напряжения $\sigma_{ост}^{max}$ растяжения для хорошо свариваемых малоуглеродистых и низколегированных сталей реализуются в центре шва.

Максимальные остаточные напряжения $\sigma_{ост}^{max}$ примерно равны пределу текучести металла шва σ_m^m . В общем случае - $\sigma_{ост} = \gamma \sigma_m^m$. Область распространения остаточных напряжений ограничивается шириной «активной зоны», в которой происходят термопластические деформации. Такая закономерность распределения сварочных напряжений происходит тогда, когда свариваемый элемент находится в ненапряженном состоянии.

Устранение трещиноподобных повреждений в действующих дымовых трубах при помощи сварки работы выполняются в конструкциях под нагрузкой. Особенности термического цикла приварки накладных элементов заключаются в том, что максимальные остаточные напряжения реализуются в вдоль формирования сварного шва. Опыт ремонтных работ говорит о том, что наиболее опасными с точки зрения работоспособности являются кольцевые швы. Уровень начальной повреждаемости ремонтируемой дымовой трубы определяется величиной относительного напряжения - $\overline{\sigma}_0 = \sigma_0 / \sigma_T$, где σ_T - предел текучести металла.

В области концентраторов напряжений уровень начальной напряженности $\overline{\sigma}_{ок}$ быть больше в α_σ раза: $\overline{\sigma}_{ок} = \alpha_\sigma \cdot \overline{\sigma}_0$, где α_σ - коэффициент концентрации напряжений. Распределение сварочных напряжений, как правило, самоуравновешенных, где площади эпюры растягивающих и сжимающих напряжений должны быть одинаковыми, независимо от начальных напряжений.

Распределение сварочных напряжений в зоне кольцевых сварных соединений труб достаточно хорошо описываются функцией:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост}^{max} \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4}, \tag{5}$$

где $\xi = 2x/V$ - относительная координата, V - ширина активной зоны.

Экспериментальные данные практически соответствуют данным, полученным по формуле (4), и представлены на рис. 6.

В случае, когда предел текучести сварных швов (σ_T^m) отличается от предела текучести σ_T в формулу (4) целесообразно ввести коэффициент механической неоднородности $K_\sigma = \sigma_T^m / \sigma_T$. Следовательно, при обычной сварке (ненапряженных элементов конструкций) в зоне кольцевых швов труб значения остаточных напряжений, описывается следующим уравнением:

$$\sigma_{ост} = K_B \cdot \gamma \cdot \sigma_T \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4} \tag{6}$$



— по формуле (4); - - - экспериментальные данные.

Рис. 6. Распределение остаточных напряжений до испытаний ($\sigma_n=0$).

На основании данных исследования в работе [4] установлено, что в результате суммирования внутренних термомеханических и внешних напряжений от внутреннего давления при сварке напряженного металла остаточные напряжения оказываются меньше, чем при сварке ненапряженных элементов конструкций. Также установлено что, процесс уменьшения сварочных напряжений практически не зависит от того, когда (до или после) к элементу конструкций было приложено внешнее напряжение. Для оценки остаточных напряжений при приварке накладных элементов, на основании выполненного анализа суммирования внутренних и внешних (активных) напряжений получена следующая формула:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_g \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_0^g\right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)} \quad (7)$$

где g и γ - константы.

При отсутствии концентраторов напряжений остаточные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_g \cdot \sigma_T \left(1 - \bar{\sigma}_0^g\right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)} \quad (8)$$

Для однородного соединения по механическим свойствам ($K_B=1,0$):

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot \sigma_T \left(1 - \bar{\sigma}_0^g\right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)} \quad (9)$$

Во многих случаях [10] допускается, что максимальные остаточные напряжения в центре шва достигают предела текучести сварного соединения σ_T . Тогда при $\gamma=1,0$ формула (9) приобретает вид:

$$\sigma_{ост} = K_g \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_0^g\right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)} \quad (10)$$

При $g=1$ из формулы (10) получаем:

$$\sigma_{ост} = K_g \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_0\right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)} \quad (11)$$

Подставив в формулу (11) $\xi=1$ получим известную формулу Н.С. Окерблома [5].

Анализ значений остаточных напряжений в поле сварки $\sigma_{ост}$ с последующим увеличением внешней нагрузки показывает, что снижение остаточных напряжений от величины $\bar{\sigma}_0$ происходит не прямо пропорционально, как это вытекает из формулы (11). Более точно экспериментальным данным отвечает формула (10) при $g=2$.

Следовательно, установлена закономерность степени снижения остаточных напряжений $k = \sigma_{ост} / \sigma_{ост}^{max}$ от относительного напряжения $\bar{\sigma}_0$ при приварке накладных элементов на дымовые трубы

$$k = 1 - \bar{\sigma}_0^2 \quad (12)$$

Зависимость степени снижения остаточных напряжений показана $\sigma_{ост}$ от величины относительного напряжения $\bar{\sigma}_0$ показана на рис. 7.

В результате исследования получены формулы, учитывающие остаточные напряжения при приварке накладок на основании суммирования внутренних и внешних (активных) напряжений и учетом концентраторов напряжений.

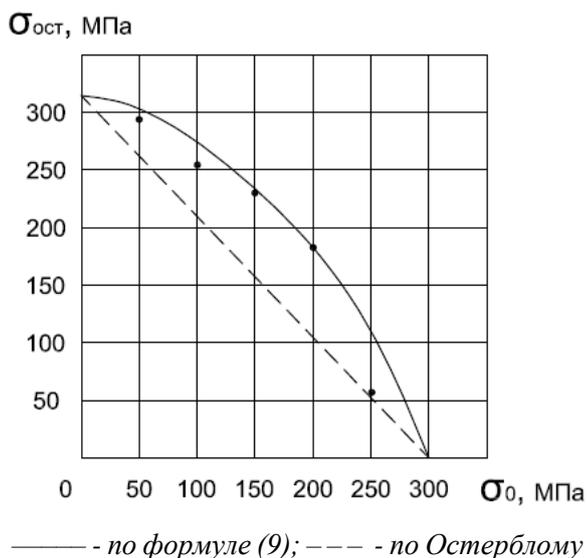


Рис. 7. Взаємозв'язок зниження остаточної напруженості $\sigma_{ост}$ від величини відносного напруження σ_0 .

ЛИТЕРАТУРА:

- Беленя Е.И. Металлические конструкции. Общий курс / Беленя Е.И., и др. – М.: Стройиздат, 1986. – 560с.
- Дымовые трубы. Теория, практика конструирования и сооружения / Под редакцией С.В. Сатьянова. М.: Стройиздат, 2001. – 150.
- Металлические конструкции / Г.С. Ведеников и коллектив авторов. - М.: Стройиздат, 1998. - 758с.
- Зайнулин Р.С. Расчеты ресурса оборудования трубопроводов с учетом фактора времени / Р.С. Зайнулин, А.Г. Вахитов, О.И. Тарабарин и др. - М.: Недра, 2003. – 50с.
- Оскерблом Н.О. Проектирование и технология изготовления стальных конструкций / Н.О. Оскерблом, В.П. Демянцевич, И.П. Байкова. - Л.: Стройиздат, 1963. – 602с.
- Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 302с.
- Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.В. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1982. - 272с.
- Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа. ДБН В.2.6-163:2010. – К.: Минрегионстрой Украины, 2011. – 127с.

- Стальные конструкции. Свод правил СП 16.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. - М.: Минрегионразв., РФ, 2011. – 172с.
- Шаханов С.Б. Дефекты сварных соединений и методы их устранения. – Л.: Стройиздат, 1980. – 80с.
- Яровой С.Н. Резервы несущей способности дымовых труб турбоагрегатов компрессорных станций «Заднепровская», «Кировоградская», «Южнобугская» магистрального газопровода «Кременчуг - Ананьев-Черновцы - Богородчань» / С.Н. Яровой, А.И.Горовый // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХНУБА, 2013. –Вып. 71. – С.225-230.
- Яровой С.М. Довговічність та залишковий ресурс металевих димових труб з урахуванням температурного та корозійного впливу // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. - Вип. 2 (88).– С.110-114.
- Gallagher J.P. The damage tolerant design handbook / J.P.Gallagher // Metals and ceramics information Centre, MCIC – NB – OIR, 1984.
- EN 1991-1-4. Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4. General actions. Wind action. / Brussels: CEN, 2002. –p.151.
- ISO 4354: 1997. Wind action on structures / Swizerland, 1997. –p.143.

Яровой С.М. ОБЛІК ЗАЛИШКОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУГ ПРИ ПОСИЛЕННІ ДИМАРІВ З ТРИЩИНОПОДІБНИМИ ДЕФЕКТАМИ. Температурні впливи та циклічні навантаження можуть привести до появи тріщини в металі і зварних швах металевих димових труб. При підсиленні стволу димової труби за допомогою приварки накладки здійснюється процес формування зварних напружень. Необхідно проаналізувати підсумування зварних напружень та зовнішніх з урахуванням концентраторів напруження від тріщиноподібних пошкоджень. За допомогою програмно-обчислювального комплексу Selena-Results побудована кінцево елементна модель труби з тріщиною в зварному шві та визначенні напруження з урахуванням концентратора напружень. (тріщини). Була розроблена методика урахування підсумування зварних та силових напружень на ділянці підсилення. В результаті дослідження одержані формули, що враховують залишкові напруження при приварці накладок на основі підсумування зварювальних

та зовнішніх напружень з урахуванням концентраторів напружень. Одержані результати дають можливість більш точно враховувати зварювальні напруження при підсиленні труб з тріщинами та підвищувати надійність димових труб під час експлуатації.

Ключові слова: металеві димові труби, тріщини в металі, підсилення, зварні та силові напруження.

Yarovyi S. RECOGNITION OF RESIDUAL WELDING STRESSES WITH STRENGTHENING SMOKE PIPES WITH CRACKED DEFECTS. Temperature influences and cyclic loads can lead to the appearance of cracks in the metal and welded seams of metal chimneys. With the strengthening of the chimney trunk by welding the lining, the process of forming a system of welding voltages occurs. It is necessary to analyze summation of welding and external (active) stresses taking into account stress concentrators from frac-

ture-like damages. With the help of the Selena-Results software complex, an elemental model of a pipe with a crack in the welded seam has been constructed and stresses have been determined taking into account the stress concentrator (cracks). A technique was developed for calculating the summation of welding and power stresses at the site of reinforcement of the pipe. As a result of the study, formulas were obtained that take into account residual stresses during welding of linings on the basis of summation of welding and external stresses and taking into account stress concentrators. As a result of the study, formulas were obtained that take into account residual stresses during welding of linings on the basis of summation of welding and external stresses and taking into account stress concentrators.

Keywords: metal chimneys, cracks in metal, reinforcement, welding and power stresses.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-135-140

УДК 624.012.1

Избаш М.Ю., Казимагомедов Ф.И., Иванова Н.В.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина; e-mail: inbud.1994@gmail.com; firaz1988@gmail.com; esipov1995@gmail.com)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ ДЕРЕВЯННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ОБОЙМОЙ ИЗ МАГНЕЗИАЛЬНОГО БЕТОНА

Проведен анализ современных исследований магнезиального бетона. Его применение в большинстве случаев ограничивается напольным покрытием. Высокие физико-механические свойства магнезиального бетона позволяют использовать его при реконструкции (усилении) исчерпавших свой ресурс деревянных перекрытий для усиления деревянных балок. Были проведены экспериментальные исследования прочностных и адгезионных показателей оптимального состава магнезиального бетона. Предложена концепция усиления эксплуатируемого деревянного перекрытия магнезиальным бетоном.

Ключевые слова: магнезиальный бетон, усиление деревянного перекрытия, прочность, адгезия, реконструкция.

Введение (постановка проблемы).

Наметилась тенденция к значительному ускорению темпов строительного производства при обеспечении высокого качества строящегося жилья и максимально возможного ресурсосбережения. В связи с этим строительная индустрия испытывает потребность в современных экологических материалах и конструкциях с высокими физико-механическими свойствами. Этим

требованиям отвечают конструкции на основе магнезиального вяжущего (магнезиальный бетон). Их основные преимущества: высокая адгезия, прочность, износостойчивость, негорючесть, стойкость к бактериям и грибкам.

Магнезиальное вяжущее - строительный материал XXI века. Современной строительной наукой описан своеобразный «портрет» идеального материала будущего: «Он должен быть универсальным: