

**И.К. РОДИОНОВ**  
**И.И. РОДИОНОВ**

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВАРКИ ПРИ УСИЛЕНИИ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF WELDING DURING THE REINFORCEMENT  
OF STEEL TRUSSES COVERING INDUSTRIAL BUILDINGS

*Представлены основные положения рациональных технологий усиления методом увеличения сечения сжатых и растянутых стержней из парных уголков стропильных ферм покрытия промышленных зданий. Дано обоснование технологий с позиции имеющегося в данном случае теплового влияния сварки. Приведены критерии безопасного проведения сварочных работ при любом уровне нагрузки. Теоретически обоснованы преимущества данной технологии над известными технологическими схемами. На конкретном примере рассмотрены вопросы существующей в данном случае взаимосвязи технических, экологических и экономических аспектов.*

**Ключевые слова:** покрытия промышленных зданий, растянутые и сжатые стержни, реконструкция, стальные фермы, сварочные технологии, технологические параметры сварки, усиление стержней методом увеличения сечений, экологические и экономические показатели, эксплуатация промышленных зданий

*The main provisions of rational reinforcement technologies are presented by the method of increasing the cross-section of compressed and stretched rods from pairs of rafter trusses covering industrial buildings. The justification of the technology is given from the position of the available thermal effect of welding in this case. Criteria are given for the safe conduct of welding operations at any level of load. Theoretically, the advantages of this technology over known technological schemes are substantiated. On a concrete example the issues of the present interrelation of technical, ecological and economic aspects are considered.*

**Keywords:** coatings of industrial buildings, stretched and compressed rods, re-construction, steel trusses, welding technologies, technological parameters of welding, strengthening of rods by increasing the cross-sections, environmental and economic losses, exploitation of industrial buildings

Проблемам усиления стальных конструкций, в том числе стропильных ферм, уделяется значительное внимание. Это связано и с недостаточностью знаний в этой области и далеко не единичными случаями аварий.

При эксплуатации промышленных зданий наиболее часто имеет место обрушение покрытий. Причиной может явиться перегрузка стропильных ферм, в частности пылевыми корками, снегом, и наличие различного вида дефектов. Для предотвращения аварий требуется проведение периодических обследований конструкций стальных ферм с целью определения их действительного напряженного состояния, необходимости проведения усиления.

Значительное большинство стальных ферм покрытий промышленных зданий – фермы со стержнями из парных уголков. Усиление их достигается часто и эффективно путем увеличения сечения стержней присоединением дополнительных стержневых элементов на сварке.

Сварка конструкций, находящихся под нагрузкой, – это непростой вопрос для эксплуатационников. Причиной является разноречивость известных

рекомендаций по усилению, предлагающих самые различные сварочные технологии (протяженность швов, порядок их наплавки...) и разные величины предельно допускаемых при усилении усилий в стержнях: от 0,4 [1, с. 50, 54] до 0,8 [2, с. 443], [3, с. 459] от расчетной несущей способности.

Такое положение объясняется, в целом, состоянием исследований в области усиления. Абсолютное большинство известных работ посвящено напряженному состоянию усиленных конструкций. Среди них можно отметить монографии [4, 5], Напряженное состояние в момент усиления, т. е. с позиции влияния сварки, комплексно не исследовалось. Известные исследования тепловых ослаблений, сварочных напряжений в области усиления чаще всего посвящались сварке ненапряженных элементов.

Отличительной особенностью работ, проводимых в Тольяттинском государственном университете (ТГУ), является исследование процесса усиления, в частности, влияния технологических параметров сварки на несущую способность усиливаемых ферм.

Все теоретические исследования базируются на математическом аппарате механики, теории

теплопроводности и теплообмена. Исследования тепловых ослаблений сечений проводились с использованием положений теории распространения тепла при сварке академика Н.Н. Рыкалина. В основу исследований сварочных напряжений, деформаций, развивающихся в сжатых усиленных стержнях, положен метод «фиктивных температур» профессора В.С. Игнатъевой. Для оценки экономической стороны вопроса принята методика оценки экономической целесообразности проведения усиления профессора Н.С. Стрелецкого.

Экспериментальные исследования и промышленная апробация теоретических положений работы осуществлялись на натурной конструкции стальной фермы и отдельных натуральных стержнях с применением стандартных и широко апробированных методик испытания и аппарата математической статистики.

Один из результатов исследований – разработка рациональных технологий сварки для случаев усиления стержней из парных уголков стальных ферм покрытий промышленных зданий [6].

В основе технологий был принят, впервые в области усиления, подход к сварочному процессу как регулируемому, варьированием параметров которого можно улучшить работу стержней ферм как в процессе усиления, так и усиленных. В частности, разработаны технологии, позволяющие производить усиление стержней стропильных уголковых ферм при полных расчетных нагрузках.

Технический результат заключается в повышении эффективности методов усиления стержней путем увеличения сечений: снижение массы наплавленного металла, уменьшение трудоемкости работ, выполняемых на высоте, возможность проведения усиления при любых эксплуатационных нагрузках, включая предельные расчетные.

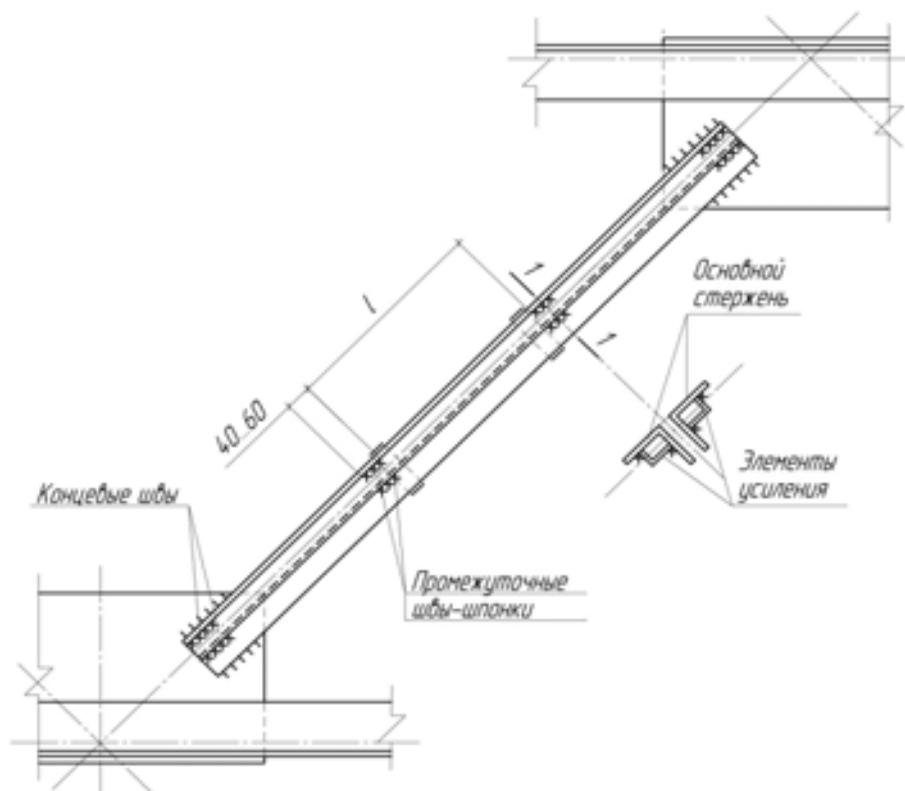


Рис. 1. К вопросу технологий усиления стержней

Этот результат достигается тем, что присоединение дополнительных стержней производят (после сборки на прихватках) швами-шпонками, наплавляемыми в нескольких сечениях (рис. 1): в двух по концам (концевые швы) и нескольких промежуточных (промежуточные). Первоначально – концевые швы в пределах фасонки с наплавкой от концов основных стержней к середине; затем наплавка про-

межуточных швов в перекрестном относительно центра тяжести сечения порядке.

Размеры концевых швов определяют из условия восприятия сдвигающего усилия, равного разности усилия после усиления (после увеличения нагрузки) и усилия в стержне в момент усиления.

Промежуточные швы определяют как минимальные связующие из условия обеспечения

совместности работы основных и усиливающих элементов после усиления. Длина каждого шва-шпонки (см. рис. 1) – 40 – 60 мм (свод правил СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*, п. 14.1.7, в); расстояние между швами  $l \leq 40i$  и  $l \leq 80i$  – соответственно для сжатых и растянутых стержней (свод правил СП 16.13330.2011, п. 7.2.6), где  $i$  – радиус инерции одного уголка усиления относительно оси, параллельной плоскости расположения прокладок.

Условие обеспечения несущей способности растянутого стержня при усилении будет определяться по сечению 1–1 (см. рис. 1) и иметь вид:

$$N \leq [N] + (A_y \sigma_m^y - A_y^{ce} \sigma_m^y - A_o^{ce} \sigma_m^o), \quad (1)$$

где  $N$  – усилие в момент усиления;  $[N]$  – несущая способность основного (растянутого) стержня;  $\sigma_m^o, \sigma_m^y$  – пределы текучести стали соответственно основного стержня и элемента усиления;  $A_y$  – площадь сечения элемента усиления;  $A_o^{ce}, A_y^{ce}$  – площадь теплового ослабления сечения соответственно основного и усиливающего элементов.

Можно заметить, что для проведения усиления при усилении в стержне, равном его несущей способности, необходимо выполнение условия

$$A_o^{ce} \sigma_m^o \leq (A_y - A_y^{ce}) \sigma_m^y, \quad (2)$$

т. е. ослабление сваркой основного стержня должно быть компенсировано по прочности частью сечения элемента усиления, не ослабленного сваркой.

Условие обеспечения несущей способности сжатого стержня при усилении будет определяться по сечению 1–1 (см. рис. 1) и иметь вид:

$$N \leq k [N_{yct}^o] + \varphi_{min}^1 (A_y - A_y^{ce}) \sigma_m^y, \quad (3)$$

где коэффициент теплового ослабления  $k < 1$  определяется как

$$k = \varphi_{min}^1 / \varphi_{min}^o (1 - A_o^{ce} / A_o). \quad (4)$$

В формулах (3), (4) приняты следующие обозначения:  $N$  – усилие в стержне в момент усиления;  $[N_{yct}^o]$  – несущая способность стержня до усиления;  $\varphi_{min}^o$  – минимальный коэффициент продольного изгиба основного стержня до усиления;  $\varphi_{min}^1$  – минимальный коэффициент продольного изгиба усиливаемого стержня в момент усиления.

Таким образом, как показывает неравенство (3), усиление сжатого стержня также возможно при усилении в нём, равном несущей способности. Для этого необходима компенсация по устойчивости потерь несущей способности усиливаемого стержня сечениями элементов усиления, не ослабленными сваркой.

Величина теплового ослабления стержней (усиливаемых и усиливающих) может быть определена площадью сечений, которая выключится в процессе

сварки из работы, т.е. потеряет способность сопротивляться развитию деформаций. Температура, при которой материал становится неспособным к сопротивлению, называется расчётной. Для низкоуглеродистой стали такой температурой считается  $T_p = 600$  °С.

Данные технологии усиления были подтверждены экспериментально: на 18 натуральных сжатых стержнях, 18 растянутых моделях, на стержнях в конструкции фермы. Некоторые результаты закреплены авторскими свидетельствами.

Цель данной статьи – показать на примере технологий усиления [6] существующую в данном случае взаимосвязь технических, экономических и экологических аспектов.

Какова же экономическая значимость предлагаемых технологий? Для ответа на этот вопрос в качестве базового можно принять методику оценки экономической целесообразности проведения усиления профессора Н.С. Стрелецкого. Приведём основные её положения, изложенные в [1, с. 10, 11].

Любое усиление связано с затратами металла  $\Delta G$ . Срок эксплуатации здания, сооружения возрастает на величину  $t_2 - t_1 = \Delta t$ , пока не будет достигнута его предельная продолжительность. Последняя определяется состоянием конструкции и экономическими требованиями в целом.

Количество и величину усилений можно получить из сравнения затрат:

$$C_y = \sum c_i \Delta G_i \psi_i, \quad (5)$$

где  $C_y$  – затраты на усиление;  $C_i$  – единичная стоимость работ и материалов при усилении;  $\Delta G_i$  – количество металла, необходимого для усиления;  $\psi_i$  – коэффициент возможной одновременности затрат (поскольку они производятся в разные сроки).

Если имеются убытки  $U_y$ , которые несёт предприятие от стесненных в результате производимого усиления условий, возможной остановки производства, то полные затраты на усиление составят:

$$C_y = \sum (c_i \Delta G_i + U_i) \psi_i. \quad (6)$$

Эти затраты погашаются стоимостью количества продукции  $\Pi_y$ , получаемой в результате продления срока эксплуатации. Баланс стоимости определяется по формуле

$$\sum (c_i \Delta G_i + U_i) \psi_i = \sum \Pi_\delta C_n, \quad (7)$$

где  $C_n$  – единичная стоимость продукции предприятия.

Следовательно, предельная стоимость усиления  $C_y^{np}$  будет выражаться как

$$C_y^{np} = \sum c_i \Delta G_i \psi_i \leq \sum \Pi_\delta C_n - \sum U_i \psi_i. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что если второй член правой части неравенства  $\sum U_i \psi_i$  приближается к нулю, усиление в подавляющем большинстве случаев будет экономически выгодно, так как  $\sum c_i \Delta G_i \psi_i$  чаще всего меньше  $\sum P_0 C_n$ .

Отсюда в [1] делается вывод, что «из способов усиления более экономичными оказываются те, применение которых предусматривает наименьшие потери в стоимости продукции предприятия из-за нарушения технологии или остановки производства во время строительно-монтажных работ по усилению».

Переходя от общих позиций, изложенных в [1], к проблеме усиления ферм покрытий промышленных зданий, следует отметить, что эксплуатация стропильных ферм имеет одну существенную отличительную особенность: фермы работают в условиях значительных постоянных нагрузок, доходящих с учетом загрязненности покрытий до величин, близких к полным расчетным. Подтверждением этого являются неоднократные аварии, связанные с потерей несущей способности стропильных ферм в результате перегрузок в зимнее время.

Ряд рекомендаций требует до 40–60 % разгрузки усиливаемых ферм. Таким образом, для усиления становится необходимой разборка довольно значительной части покрытия.

В этой связи неравенство (7) в случае усиления стальных ферм покрытия может быть записано в виде:

$$\sum (c_i \Delta G_i + U_i + C_p + C_3) \psi_i \leq \sum P_0 C_n, \quad (9)$$

где  $C_p$  – стоимость работ, вызываемых возможной разгрузкой усиливаемых конструкций;  $C_3$  – стои-

мость работ по восстановлению экологически чистой среды обитания, нарушенной в результате разгрузки конструкций, требовавших усиления.

Таким образом, общая стоимость работ, связанных с усилением, выполняемым по традиционным технологиям, определяется как

$$\sum (c_i \Delta G_i + C_p + C_3) \psi_i \leq \sum P_0 C_n - \sum U_i \psi_i. \quad (10)$$

Проанализируем, как изменится это неравенство в случае применения при усилении сварочных технологий, разработанных в ТГУ.

Применение технологий даёт следующее:

- уменьшается расход металла на 10–15 %, и, таким образом, имеет место уменьшение величины  $\sum c_i \Delta G_i$ ;
- исключается разгрузка усиливаемых конструкций –  $C_p = 0$ ;
- – исключаются связанные с разгрузкой нарушения экологии –  $C_3 = 0$ ;
- – исключается вызываемая разгрузкой ферм стесненность производства, частичная или, тем более, полная его остановка, т. е.  $\sum U_i \psi_i = 0$ .

Неравенство (10) примет в этой связи следующий вид:

$$\sum c_i \Delta G_i \psi_i \ll \sum P_0 C_n, \quad (11)$$

иными словами, очевидна экономическая целесообразность применения разработанных сварочных технологий для случаев усиления стальных ферм покрытий промышленных зданий.

Проиллюстрируем изложенное на конкретном примере (рис. 2): требуется усиление стальных угловых ферм покрытия промышленного здания; раз-

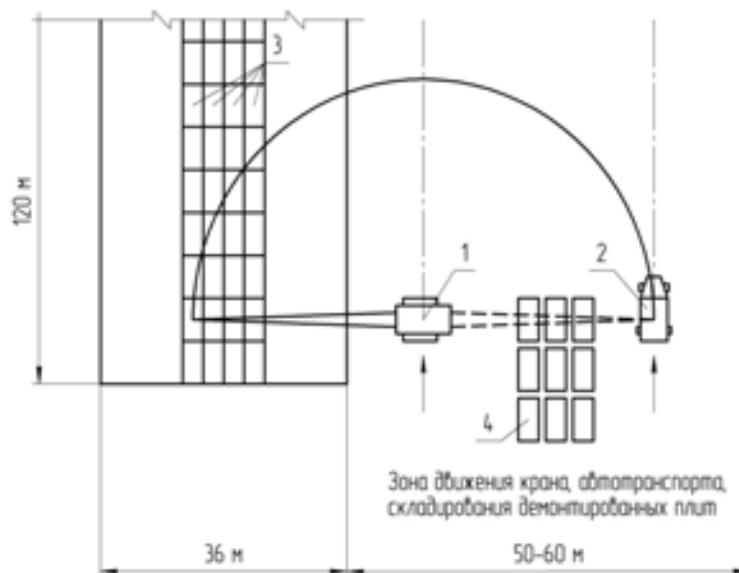


Рис. 2. К вопросу прямых экологических нарушений:

1 – гусеничный кран; 2 – грузовая автомашина;

3 – плиты покрытия, подлежащие демонтажу; 4 – складированные плиты

меры здания в плане 120×36 м; несущие конструкции ограждения – ребристые плиты 3×6 м; теплоизоляция – керамзитобетон толщиной 180 мм; кровля – трёхслойный, армированный гравием гидроизоляционный рулонный ковёр.

Для проведения усиления по традиционным технологиям необходима разгрузка ферм: разборка покрытия на площади порядка 1080 м<sup>2</sup>. Таким образом, появляется необходимость выполнения следующих работ: разборка кровли и теплоизоляции, демонтаж плит покрытия, укладка плит, устройство пароизоляции, теплоизоляции, стяжки, кровли, погрузка, перевозка и разгрузка строительного мусора, восстановление зелёных насаждений, газонов, тротуаров и т. п.

В соответствии с локальным ресурсным сметным расчетом стоимость этих работ только по одному, сравнительно небольшому, объекту составит около 6,5 млн. рублей в ценах на январь 2017 г. В случае применения разработанных технологий усиления разгрузку ферм можно избежать. Таким образом, вышеприведённая сумма будет сэкономлена для государства.

Экономия, полученная в результате исключения разгрузки усиливаемых ферм, является лишь малой частью от суммарного экономического эффекта. С учётом экономии металла, обеспечения непрерывности производства, добавочно выпущенной промышленной продукции, исключения затрат на экологические потери экономический эффект возрастает в десятки раз.

На вышеприведённом примере рассмотрим и экологическую значимость применения разработанных технологий усиления. В случае усиления по традиционным технологическим схемам необходима была бы разгрузка ферм от части покрытия и, следовательно, отчуждение полосы земли вдоль здания шириной до 50–60 м (см. рис. 2). Полоса включает в себя зоны движения крана, складирования плит, движения грузового автотранспорта.

Фактически, это есть не что иное, как полоса прямых экологических нарушений: уничтожения биомассы, заражения почвенного слоя земли, грунтовых и подземных вод. С учётом временных дорог общая площадь прямых нарушений среды составит около 1,5 га.

Далее, только в зоне демонтажа в результате работы крана, бульдозера, грузового транспорта будет иметь место загрязнение окружающего воздуха выхлопными газами в объёме более 200 тыс. м<sup>3</sup>: окисью и двуокисью углерода, окисью азота, углеводородами, альдегидами, сернистым газом, сажей, канцерогенами типа бензпирен, свинцом и его соединениями, фотохимическим смогом. Для затребованных машин по самым скромным подсчётам потребуется сжигание более 9 млн. л кислорода.

Все эти экономические затраты и экологические нарушения будут предотвращены при применении

разработанных технологий усиления. И это только на одном небольшом объекте промышленности. Таких же объектов, требующих реконструкции, в Российской Федерации десятки тысяч. И количество их отнюдь не уменьшается с течением времени.

Нельзя обойти и ещё одну чрезвычайно важную сторону экологической и экономической значимости результатов проведённых исследований. Речь пойдёт об опасности глобальной экологической катастрофы, вполне реально нависшей над миром. Эта опасность ставит перед человечеством жизненно важную задачу поиска путей, средств, методов защиты и сохранения окружающей среды. Она заставляет взглянуть на все процессы жизнедеятельности с совершенно других, критических точек зрения, позволяет увидеть порой значительный негатив в том, что при обыденном рассмотрении казалось абсолютно положительным.

В частности, огромные объёмы нового строительства, вчера ещё казавшиеся прорывом в будущее, при внимательном рассмотрении с позиции экологии открывают качественно новую картину.

Неизбежные при новом строительстве земляные работы, временные дороги, отвалы грунта, склады конструкций, стоки нефтепродуктов, выхлопные газы, токсичные вещества являются в действительности нарушением природного ландшафта, отравлением атмосферы, земли, грунтовых и подземных вод, уничтожением биомассы, т. е. оказываются ничем иным, как самым настоящим разрушением среды обитания человека.

Очевидная с позиции экологии необходимость сокращения нового строительства сталкивается, однако, с не менее очевидной необходимостью увеличения промышленного производства.

Выход из этого положения видится в более интенсивном использовании огромного парка существующих промышленных зданий и сооружений. Но здесь есть серьёзное препятствие: значительное число эксплуатируемых промышленных корпусов претерпело к настоящему времени моральный или, что более серьёзно, физический износ.

Таким образом, попыткам технического перевооружения промышленных зданий, связанного зачастую с увеличением нагрузок на каркасы, препятствует недостаточная несущая способность, а порой и откровенно аварийное состояние строительных конструкций. Следует особо отметить, что физический износ носит прогрессирующий характер, откуда прогрессирующая вероятность аварий, каждая из которых может привести к серьёзным и экологическим, и экономическим последствиям.

**Вывод.** Всё вышесказанное подтверждает важность самого серьёзного внимания, которое следует уделять вопросам реконструкции, включая разработку методик расчёта, способов и технологий работ по усилению элементов и частей промышленных зданий и сооружений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бельский М.Р., Лебедев А.И. Усиление металлических конструкций под нагрузкой. Киев: Будівельник, 1975. 120 с.

2. Металлические конструкции: в 3 т. Т. 2. Конструкции зданий / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый и др.; под ред. В.В. Горева. 2-е изд. испр. М.: Высш. шк., 2002. 443 с.

3. Металлические конструкции / Ю. И. Кудишин [и др.] ; под ред. Ю. И. Кудишина. 11-е изд., стер. М.: Академия, 2008. 681 с.: ил.

4. Демидов Н.Н. Усиление стальных конструкций [Электронный ресурс]. М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 85 с. (дата обращения: 22.02.2018).

5. Яковлева М.В. Строительные конструкции. Подготовка, усиление, защита от коррозии. М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 200 с.

6. Родионов И.К. Сварочные технологии регулирования напряженного состояния усиливаемых сжатых стержней стальных ферм покрытий: монография. Самара, 2006.

Об авторах:

### **РОДИОНОВ Игорь Константинович**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства и городского хозяйства  
Тольяттинский государственный университет  
Архитектурно-строительный институт  
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Ушакова, 59,  
тел. (917) 129-71-55  
E-mail: rikilt@mail.ru

### **RODIONOV Igor K.**

PhD in Engineering Science, Associate Professor  
of the Industrial and Civil Engineering  
and Urban Management Chair  
Togliatti State University  
Institute of Architecture and Civil Engineering  
tel. (917) 129-71-55  
E-mail: rikilt@mail.ru

### **РОДИОНОВ Игорь Игоревич**

менеджер отдела закупок ООО «ТСК».  
443011, Россия, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 160,  
тел. (927) 011-61-63  
E-mail: Inmylave@mail.ru

### **RODIONOV IGOR I.**

Manager of the purchasing department,  
LLC «TSK»  
tel. (927) 011-61-63  
E-mail: Inmylave@mail.ru

Для цитирования: Родионов И.К., Родионов И.И. Технологические параметры сварки при усилении стальных ферм покрытия промышленных зданий // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №1. С. 10-15. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.2.  
For citation: Rodionov I.K., Rodionov I.I. Technological parameters of welding during the reinforcement of steel trusses covering industrial buildings // Urban construction and architecture. 2018. V.8, 1. Pp. 10-15. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.2.