СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ДВУТАВРОВЫХ СТЕРЖНЯХ СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

В.П. Вершинин

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

Аннотация. Излагается методика расчета временных и остаточных напряжений при сварке двутавровых стержней с элементами большой толщины, т.е. при неравномерном распределении сварочных напряжений по толщине полок. Представленная методика основана на аналитическом решении температурной задачи. Решение задачи по определению полей временных и остаточных напряжений сводится к определению температуры и напряженно-деформированного состояния (НДС) в полке и стенке как отдельно существующих системах, а затем к решению задачи о совместности деформаций по линии их сопряжения. Отмечены факторы, оказывающие наибольшее влияние на величину остаточных сварочных напряжений (ОСН) в полках двутавров. На величину ОСН наиболее существенное влияние оказывают изменение толщины пояса t_f , прочность стали σ_T и погонная энергия сварки. Изменение ширины полки b_f в меньшей степени влияет на распределение ОСН. Составляющие ОСН имеют сложный характер распределения в направлении толщины. Продольная составляющая ОСН достигает значительной величины (предела текучести материала). Величина толщинной и поперечной составляющих ОСН при толщине полок двутавров не более 40 мм и соответствующих минимальных катетах швов оказывается незначительной.

Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, временные сварочные напряжения, плоская деформация, распределение температуры при сварке, распределение напряжений

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.150-156

WELDING STRESSES IN DOUBLE-TEE BARS OF BUILT-UP CROSS SECTION WITH ELEMENTS OF LARGE THICKNESS

Vershinin V.P.

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract. Procedure of calculation of temporary and residual stresses in welding of double-tee bars with elements of large thickness, i.e. at an uneven distribution of welding stresses as per a thickness of flanges, is set forth. This procedure is based on analytical solution of the temperature problem. Solution of the problem on determination of fields of temporary and residual stresses amounts to determination of temperature and stress-strain state (SSS) in the flange and in the wall as separately existing systems, and then to a solution of the problem of compatibility of deformations in the line of conjugation thereof. Factors making the most influence on the intensity of residual welding stresses (RWS) in the flanges of double-tees, are noted. The intensity of RWS is most significantly influenced by the chord thickness variation t_f , strength of steel σ_T , and heat input of welding. The flange width variation b_f influences the distribution of RWS to a lesser degree. Components of RWS have a complex pattern of distribution in the direction of thickness. Longitudinal component of RWS reaches a considerable value (yield strength of material). Value of thickness and transverse components of RWS with thickness of flanges of double-tees not more than 40 mm, and with respective minimal weld legs turns out to be insignificant. Growth of the yield strength of steel (as applied to low-carbon and low-alloy steels) leads to increase of level of RWS. Increase of thickness of the flange leads to a growth of unevenness of distribution of RWS in thickness and to increase of the thickness component of RWS. Welding heat input enhancement results in a more uniform heating of the flange in thickness and, therefore, a more uniform distribution of residual stresses in the flange thickness, hereat the stressed state in the flanges of double-tees comes close to uniaxial.

Key words: residual welding stresses, temporary welding stresses, plane deformation, welding temperature distribution, stress distribution

Одним из путей совершенствования методов расчета конструкций является учет всех факторов, влияющих на их работу, в т.ч. и остаточных сварочных напряжений (ОСН), которые неизбежно возникают при сварке. Для расчета ОСН на стадии проектирования необходимо знание характера их распределения в конструкциях. Этот вопрос экспериментально и теоретически рассматривался в ряде работ [1–12]. Предметом исследований [1, 8, 11, 12] являлось напряженно-деформированное состояние (НДС), развивающееся при многослойной сварке изделий большой толщины, там же изложена методика расчета, позволяющая определить уровень и характер развития временных и остаточных напряжений.

С помощью численного метода с использованием аппарата теории упругости и пластичности данная задача решена авторами [2–4, 7–9, 11, 12], причем в работе [4] использован метод конечных разностей, а в [2, 3, 8, 9, 11, 12] — метод конечных элементов.

Результаты исследований [1–4, 8, 11, 12] выявили объемный характер распределения ОСН с преобладанием продольной составляющей. Отмечен неравномерное распределение ОСН по толщине элементов. Результаты экспериментального исследования распределения температуры при сварке поясных швов в тавровых соединениях [13] показали, что спектр толщин листового проката в соответствии с характером распределения температуры при сварке по толщине элементов можно разделить на две группы: малые толщины при $t \leq 15 \dots 16$ мм и большие толщины при $t > 15 \dots 16$ мм.

В данной статье излагается методика расчета временных и остаточных напряжений в двутавровых стержнях с элементами большой толщины, т.е. когда ОСН распределены неравномерно по толщине полок ($t_f > 16$ мм), основанная на аналитическом методе решения температурной задачи [14].

Решение задачи по определению полей временных и остаточных напряжений сводится к расчету температуры и НДС в полке и стенке как в отдельно существующих системах, а затем к решению задачи о совместности деформаций по линии их сопряжения (рис. 1).

При такой расчетной схеме стенка является полосой с наплавленными на кромку валиками, а полка — полосой с валиком, наплавленным на поверхность. Для определения ОСН в стенке двутавра можно воспользоваться методикой расчета, изложенной в работе [15], для определения ОСН в элементах большой толщины

(в полках двутавров) — методикой, изложенной ниже.

Учитывая размеры полок двутавров ($1 \ll b_f \times t_f$), можно считать, что на участках, удаленных от концов стержня, НДС развивается в условиях плоской деформации. В соответствии с принятой гипотезой плоской деформации для решения поставленной задачи достаточно рассмотреть НДС, развившееся в плоскости zOy (см. рис. 1). Для этого из средней части (по длине) полки плоскостями, перпендикулярными оси шва, «вырезается» элемент толщиной dx и рассматривается его НДС в плоскости zOy .

Рис. 1. Расчетная схема для определения сварочных напряжений в стержнях с элементами большой толщины

Fig. 1. Design diagram for determination of welding stresses in bars with elements of large thickness

В соответствии с изложенным, вывод расчетных формул ведут по следующей схеме: в начале, предполагая неограниченность элемента $b_f \times t_f$ в направлениях осей z и y , определяют температуру, обусловленную мгновенно действующим линейным источником тепла, при этом представляя элемент как бесконечный слой толщиной $\delta = dx$; затем вычисляют температуру с учетом ограниченности пластины в направлениях осей z и y и граничных условий (рис. 2).

Граничные условия для температуры:

$$\begin{aligned} q_3/v_{св}(z) &= 0 \quad \text{при} \quad z=0, z=t_f; \\ q_3/v_{св}(y) &= 0 \quad \text{при} \quad y=\pm b_f/2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $q_3/v_{св}$ — погонная энергия сварки, Дж/см.

В декартовых координатах закон распределения температуры в пластине ограниченных размеров ($b_f \times t_f$) описывается следующим рядом [16]:

$$T = \frac{2Q}{4\pi\lambda\bar{t}} \left\{ e^{-\frac{\tilde{z}^2}{4at}} + \sum_{m=1}^k \left[e^{-\frac{f^2(m)}{4at}} + e^{-\frac{\theta^2(m)}{4at}} \right] \right\} \left\{ e^{-\frac{\tilde{y}^2}{4at}} + \sum_{m=1}^k \left[e^{-\frac{B^2(m)}{4at}} + e^{-\frac{C^2(m)}{4at}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $Q = q_0/v_{св}t_f$ — тепловложение, Дж/см², приходящееся на единицу длины полки; $\bar{t}$ — время действия источника тепла, с; t — время, соответствующее данному распределению температуры, начиная с момента окончания действия источника тепла, с; $\tilde{z} = z_0 - z$ и $\tilde{y} = y_0 - y$ — проекции отрезка, соединяющего точки (z, y) и (z_0, y_0) на оси координат; k — параметр, значения которого задаются в зависимости от условий задачи и требуемой точности решения

$\theta(m) = z_0 + (2mt_f - z_1)$; $B(m) = y_0 + (mb_f + y)$; $C(m) = y_0 + (mb_f - y)$; z_0 и y_0 — текущие координаты исследуемой точки температурного поля, см; z и y — текущие координаты источника тепла, см; z_1 — текущая координата фиктивного источника тепла, см; $f(m) = z_0 + (2mt_f - z_1)$.

Временные и остаточные напряжения определяются в той же последовательности, что и температура. В начале, предполагая неограниченность элемента в плоскости zOy , напряжения вычисляют в бесконечном слое толщиной dx . Далее рассматривают НДС в элементе с размерами $b_f \times t_f$ и толщиной dx . Корректировку временных и остаточных напряжений, полученных для случая бесконечной пластины, проводят с помощью дополнительных фиктивных напряжений, которыми загружаются кромки элемента (рис. 3), с учетом граничных условий и условий равновесия для составляющих напряжений:

Рис. 2. Схема отражения температуры $T(y, z)$ от источника $(0, y)$ при граничных плоскостях $z = 0$ и $z = t_f$. Распределение температуры в бесконечной пластине (a), в пластине с размерами $b_f \times t_f$ с учетом отражения от нижней ($z = 0$) (b) и верхней ($z = t_f$) (b') граничных плоскостей, где $\bullet$ — источник тепла $(0, y)$; $\times$ — фиктивный источник тепла ($z_i = y$)

Fig. 2. Diagram of reflection of temperature $T(y, z)$ from the source $(0, y)$ with boundary planes $z = 0$ and $z = t_f$. Distribution of temperature in the infinite plate (a), in the plate with dimensions $b_f \times t_f$ with respect to reflection from the lower ($z = 0$) (b) and upper ($z = t_f$) (b') boundary planes, where $\bullet$ — heat source $(0, y)$; $\times$ — fictitious heat source ($z_i = y$)

Рис. 3. Расчетная схема для определения поперечной составляющей сварочных напряжений $\sigma_y(z)$ в полосе шириной t_f . Распределение $\sigma_y(z)$ в бесконечном слое толщиной dx : 1 — от реально действующего источника тепла $(0, y)$; 2 — от первого фиктивного источника тепла ($z_1 = 0$); 3 — от второго фиктивного источника тепла (z_2); 4 — от третьего фиктивного источника тепла (z_3); 5 — распределение $\sigma_y(z)$ в полосе шириной t_f

Fig. 3. Design diagram for determination of the transverse component of welding stresses $\sigma_y(z)$ in the belt of width t_f . Distribution $\sigma_y(z)$ in the infinite slab of thickness dx : 1 — from the really active heat source $(0, y)$; 2 — from the first fictitious heat source ($z_1 = 0$); 3 — from the second fictitious heat source (z_2); 4 — from the third fictitious heat source (z_3); 5 — distribution $\sigma_y(z)$ in the belt of width t_f

$$\begin{aligned} \sigma_z(y, z) = 0, \tau_{yz}(y, z) = 0 & \text{ при } z = 0, z = \pm t_f; \\ \sigma_y(y, z) = 0 & \text{ при } y = \pm b_f/2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{t_f} \sigma_y(y, z) dz &= 0; \\ \int_{-b_f/2}^{b_f/2} \sigma_z(y, z) dy &= 0; \\ \int_0^{t_f} \sigma_y(y, z) z dz &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

В декартовой системе координат составляющие остаточного напряжения в пластине ограниченных размеров $(b_f \times t_f)$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_y(y) = 2c \left\{ \frac{\tilde{y}^2 - \tilde{z}^2}{(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2)^2} [1 - \exp(-k_t(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2))] + \right. \\ \left. + 2k_t \frac{\tilde{z}^2}{\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2} \exp(-k_t(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2)) + \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^k [\Psi(f(m), B(m), 1, 0) + \Psi(\theta(m), C(m), 1, 0)] \right\}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z(z) = 2c \left\{ \frac{\tilde{z}^2 - \tilde{y}^2}{(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2)^2} [1 - \exp(-k_t(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2))] + \right. \\ \left. + 2k_t \frac{\tilde{y}^2}{\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2} \exp(-k_t(\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2)) + \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^k [\Psi(f(m), B(m), 0, -1) + \Psi(\theta(m), C(m), 0, 1)] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi(f(m), B(m), P, q) = \frac{B^2(m) - f^2(m)}{(f^2(m) + B^2(m))^2} \\ \left[1 - \exp(-k_t(f^2(m) + B^2(m))) \right] + \\ + 2k_t \frac{f^2(m)P + B^2(m)q}{f^2(m) + B^2(m)} \times \\ \times \exp(-k_t(f^2(m) + B^2(m))); \end{aligned}$$

$\sigma_{i, \max}$ — максимальное значение пластической составляющей интенсивности напряжений; μ — коэффициент Пуассона; k_t — коэффициент, определяемый по формуле

$$k_t = \frac{1}{r^2} \ln \left(\frac{\sigma_{i, \max}}{\sigma_1} \right), \quad (7)$$

в которой $r_{\text{пл}}$ — радиус области развития пластических деформаций; σ_1 — заранее заданная малая величина σ_i на границе развития области пластических деформаций.

В направлении оси шва продольная составляющая остаточного напряжения $\sigma_x^{\text{ост}}$ определяется как функция поперечной и толщинной составляющих:

$$\sigma_x^{\text{ост}} = -\frac{1}{1 + \mu_1} \left[\mu_1 (\sigma_y^{\text{ост}} + \sigma_z^{\text{ост}}) - \alpha_{t1} E_1 T_{\text{факт}} \right], \quad (8)$$

где $\mu_1 = \mu/(1 - \mu)$; $\alpha_{t1} = \alpha_t(1 + \mu)$; $E_1 = E/(1 - \mu^2)$;

$$\alpha_{t1} E_1 T = \sigma_i - \sigma(T).$$

После определения продольной составляющей $\sigma_x^{\text{ост}}$ в полке и остаточных напряжений в стенке рассчитываются остаточные напряжения во всем сечении в целом. Для этого учитывается совместность деформаций полки и стенки по линии их контакта (поясному шву). Учет совместности деформаций полки и стенки производится в соответствии с уравнением совместности для условия плоской деформации [17]. Уравнение совместности деформаций при неравномерном нагреве тела, когда температура T является функцией координат y и z , будет иметь вид

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} + \alpha_t \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z} = 0, \quad (9)$$

где ε_y и ε_z — линейные деформации в направлении осей y и z ; ε_{yz} — сдвиговая деформация.

По разработанной методике были произведены расчеты ОСН в полках двутавров. На рис. 4 представлены результаты расчета составляющих ОСН по толщине полки двутавра ($t_f = 40$ мм, $q_3/v_{\text{св}} = 33\,600$ Дж/см).

Как показал анализ результатов расчета ОСН в полках двутавров при соотношениях размеров и погонной энергии сварки, находящих применение в строительных металлоконструкциях, на значение ОСН наиболее существенное влияние оказывает изменение толщины пояса t_f , прочность стали σ_T и погонная энергия сварки. Изменение ширины полки b_f в меньшей степени влияет на распределение ОСН.

Рис. 4. Распределение составляющих остаточного сварочного напряжения по толщине полки двутавра ($t_f = 40$ мм, $q_3/v_{\text{св}} = 33\,600$ Дж/см)

Fig. 4. Distribution of components of residual welding stress in thickness of the flange of double-tee ($t_f = 40$ mm, $q_3/v_{\text{св}} = 33\,600$ Joules/cm)

Составляющие ОСН имеют сложный характер распределения в направлении толщины (см. рис. 4). Продольная составляющая достигает большого значения (предела текучести материала). Значение толщинной и поперечной составляющих ОСН при толщине полок двутавров не более 40 мм и соответствующих минимальных катетах швов невелико.

Рост предела текучести стали (применительно к низкоуглеродистым и низколегированным

сталям) приводит к повышению уровня ОСН. Увеличение толщины полки приводит к росту неравномерности распределения ОСН по толщине и увеличению толщинной составляющей ОСН. Результатом повышения погонной энергии сварки становится более равномерный прогрев полки по толщине и, следовательно, более равномерное распределение остаточных напряжений по толщине полки, а напряженное состояние в полках двутавров при этом приближается к одноосному.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Игнатьева В.С., Деснянская Т.А.* Напряженное состояние элементов конструкций в области многослойного сварного шва // Развитие металлических конструкций: Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого / под. ред. В.В. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1987. С. 96–105.
2. *Винокуров В.А., Павлович А.А.* Применение метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния при электрошлаковой сварке плит. М., 1987. 10 с. Деп. во ВНИИТЭМР 01.07.87. № 295. МШ87.
3. *Гатовский К.М., Рыбин Ю.И., Лоскутов В.Н.* Анализ напряженного состояния при многослойной сварке толстых листов с использованием метода конечных элементов // Автоматическая сварка. 1980. № 8. С. 1–6.
4. *Махненко В.И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев: Наукова думка, 1976. 320 с.
5. *Михайленко Т.Г.* К определению размеров зоны пластичности при расчете остаточных сварочных напряжений // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 2. С. 33–35.
6. *Куркин А.С., Пономарева И.Н.* Применение метода эквивалентных начальных температур для учета остаточных напряжений в стыковых и тавровых соединениях при оценке ресурса сварных конструкций // Сварка и диагностика. 2013. № 1. С. 21–26.
7. *Феклистов С.И., Потапов Н.Н., Головизнин Б.Л., Масалков А.В.* Моделирование остаточных сварочных напряжений и деформаций при изготовлении цистерн // Сварка и диагностика. 2009. № 3. С. 28–31.
8. *Нургузин М.Р., Рейтаров О.В., Вершинский А.В.* Численное моделирование объемных сварочных напряжений и деформаций // Автоматика. Информатика. 2003. Т. 1–2. С. 74–75.
9. *Алферов В.И., Стешенкова Н.А.* Применение МКЭ для решения тепловой и деформационной задач расчета сварочных деформаций судостроительных корпусных конструкций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылов. 2010. № 56. С. 147–162.
10. *Стеклов О.И., Антонов А.А., Вышемирский Е.М., Ангелов А.М., Перов С.Л.* Определение остаточных сварочных напряжений в кольцевых швах толстостенных труб категории прочности К65 (Х80) // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 1. С. 84–87.
11. *Иванова Л.А., Ильин А.В., Леонов В.П., Мизецкий А.В., Сахаров И.Ю., Хатунцев А.Н.* Расчетная оценка уровня и распределения остаточных сварочных напряжений в соединениях из титанового сплава 5В больших толщин // Вопросы материаловедения. 2008. № 4. С. 37–53.
12. *Мощенко М.Г., Рубцов В.С.* Расчет остаточных напряжений в зоне сварного соединения трубопроводов DY 300 из аустенитной стали 08X18H10T // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 6. С. 9–14.
13. *Вершинин В.П.* Распределение температуры в элементах таврового соединения при сварке под флюсом. М., 1989. Деп. во ВНИИН-ПИ Госстроя СССР 05.04.1989. № 9893.
14. *Игнатьева В.С.* Метод «фиктивных температур» как основа исследования в области напряженно-деформированного состояния сварных соединений // Металлические конструкции в строительстве: сб. тр. МИСИ / под. ред. Е.И. Беленя. М., 1979. № 152. С. 71–88.
15. *Игнатьева В.С., Вершинин В.П., Барышев В.М.* Влияние остаточных сварочных напряжений на местную устойчивость стенки балки // Металлические конструкции: сб. тр. М.: МИСИ, 1984. С. 91–103.
16. *Рыкалин Н.Н.* Тепловые основы сварки. М.; Ленинград: АН СССР, 1947. Ч. 1: Процессы распространения тепла при дуговой сварке. 272 с.
17. *Папкович П.Ф.* Теория упругости. Ленинград; М.: Оборонгиз, 1939. 640 с.

Поступила в редакцию в августе 2016 г.

Об авторе: **Вершинин Владимир Петрович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, vlodya_91@mail.ru.

Для цитирования: *Вершинин В.П.* Сварочные напряжения в двутавровых стержнях составного сечения с элементами большой толщины // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 2 (101). С. 150–156. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.150-156

REFERENCES

1. Ignat'eva V.S., Desnyanskaya T.A. Napryazhennoe sostoyanie elementov konstruktsiy v oblasti mnogosloynnogo svarnogo shva [Stressed State of Structural Elements in the Multilayer weld Area]. *Razvitie metallicheskih konstruksiy : Raboty shkoly professora N.S. Streletskogo* [Development of Metal Structures : Works of Professor N.S. Streletskiy School]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, pp. 96–105. (In Russian)
2. Vinokurov V.A., Pavlovich A.A. *Primenenie metoda konechnykh elementov dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri elektroshlakovoy svarke plit* [Application of the Finite Element Method for Calculation of the Stress-Strain State During Electroslag Welding of Plates]. Moscow, 1987, 10 p., Dep. vo VNIITEMR 01.07.87., no. 295, MSh87. (In Russian)
3. Gatovskiy K.M., Rybin Yu.I., Loskutov V.N. Analiz napryazhennogo sostoyaniya pri mnogosloynnoy svarke tolstyykh listov s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [The Stressed State Analysis During Multilayer Welding of Thick Plates Using the Finite Element Method]. *Avtomaticheskaya svarka* [The Paton Welding Journal]. 1980, no. 8, pp. 1–6. (In Russian)
4. Makhnenko V.I. *Raschetnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh napryazheniy i deformatsiy* [Computational Methods of Research of the Kinetics of Welding Stresses and Strains]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1976, 320 p. (In Russian)
5. Mikhaylenko T.G. K opredeleniyu razmerov zony plastichnosti pri raschete ostatochnykh svarochnykh napryazheniy [To the Determination of Sizes of Plasticity Zone in Calculation of Residual Welding Stresses]. *Pro-myshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2014, no. 2, pp. 33–35. (In Russian)
6. Kurkin A.S., Ponomareva I.N. *Primenenie metoda ekvivalentnykh nachal'nykh temperatur dlya ucheta ostatochnykh napryazheniy v stykovykh i tavrovyykh soedineniyakh pri otsenke resursa svarnykh konstruksiy* [Application of the Equivalent Initial Temperature Method for Taking Into Account Residual Stresses in Butt and Tee Joints in Assessment of a Resource of Welded Structures]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2013, no. 1, pp. 21–26. (In Russian)
7. Feklistov S.I., Potapov N.N., Goloviznin B.L., Masalkov A.V. Modelirovanie ostatochnykh svarochnykh napryazheniy i deformatsiy pri izgotovlenii tsistern [Simulation of Residual Welding Stresses and Strains in Manufacture of Cisterns]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2009, no. 3, pp. 28–31. (In Russian)
8. Nurguzhin M.R., Reytarov O.V., Vershinskiy A.V. Chislennoe modelirovanie ob'emnykh svarochnykh napryazheniy i deformatsiy [Numerical Simulation of Volumetric Welding Stresses and Strains]. *Avtomatika. Informatika*. [Automatics Computer Science]. 2003, vol. 1–2, pp. 74–75. (In Russian)
9. Alferov V.I., Steshenkova N.A. *Primenenie MKE dlya resheniya teplovoy i deformatsionnoy zadachi rascheta svarochnykh deformatsiy sudovykh korpusnykh konstruksiy* [Application of the Finite Element Method for Solution of the Heat and Strain Problems of Calculation of Welding Strains of Ship Hull Structures]. *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova* [Proceedings of Krylov State Research Centre]. 2010, no. 56, pp. 147–162. (In Russian)
10. Steklov O.I., Antonov A.A., Vyshemirskiy E.M., Angelov A.M., Perov S.L. *Opreделение ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v kol'tsevykh shvakh tolstostennykh trub kategorii prochnosti K65 (H80)* [Determination of Residual Welding Stresses in Circumferential Welds of Thick-Walled Pipes of K65 (X80) Strength Grade]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti* [Science and Technology in the Gas Industry]. 2009, no. 1, pp. 84–87. (In Russian)
11. Ivanova L.A., Il'in A.V., Leonov V.P., Mizeckiy A.V., Sakharov I.Yu., Khatuntsev A.N. *Raschetnaya otsenka urovnya i raspredeleniya ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v soedineniyakh iz titanovogo splava 5V bol'shikh tolshchin* [Estimation of Level and Distribution of Residual Welding Stresses in Joints of Titanium Alloy 5B of Large Thicknesses]. *Voprosy materialovedeniya* [Problems of Materials Science]. 2008, no. 4, pp. 37–53. (In Russian)
12. Moshchenko M.G., Rubtsov V.S. *Raschet ostatochnykh napryazheniy v zone svarnogo soedineniya truboprovodov DY 300 iz austenitnoy stali 08H18N10T* [Calculation of Residual Stresses in the Weld Junction of DY 300 Pipelines of Austenitic Steel 08Kh18N10T]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Productions in Mechanical Engineering]. 2011, no. 6, pp. 9–14. (In Russian)
13. Vershinin V.P. *Raspredelenie temperatury v elementakh tavrovogo soedineniya pri svarke pod flyusom* [Temperature Distribution in Tee Joint Elements in Flux Welding]. Moscow, 1989, Dep. vo VNIINPI Gosstroya SSSR 05.04.1989, no. 9893. (In Russian)
14. Ignat'eva V.S. *Metod «fiktivnykh temperatur» kak osnova issledovaniya v oblasti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh soedineniy* [Method of "Fictitious Temperatures" as the Basis for Research in the Sphere of Stress-Strain State of Welded Joints]. *Metallicheskie konstruksii v stroitel'stve : sbornik trudov MISI* [Metal Structures in Construction : Proceedings of MISI]. Moscow, 1979, no. 152, pp. 71–88. (In Russian)

15. Ignat'eva V.S., Vershinin V.P., Baryshev V.M. Vliyaniye ostatochnykh svarochnykh napryazheniy na mestnuyu ustoychivost' stenki balki [Influence of Residual Welding Stresses on a Beam Wall Local Stability]. *Metallicheskie konstruktsii : sbornik trudov* [Metal Structures : Proceedings]. Moscow, MISI Publ., 1984, pp. 91–103. (In Russian)

16. Rykalin N.N. *Teplovye osnovy svarki. Ch. 1: Protssessy rasprostraneniya tepla pri dugovoy svarke* [Heat Fundamentals of Welding. Part 1 : Processes of Heat Propagation in Arc Welding]. Moscow, Saint Petersburg, AN SSSR Publ., 1947, 272 p. (In Russian)

17. Papkovich P.F. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Saint Petersburg, Moscow, Oborongiz Publ., 1939, 640 p. (In Russian)

Received in August, 2016.

About the author: **Vershinin Vladimir Petrovich** – Associate Professor, Department of Metal and Timber Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; vlodya_91@mail.ru.

For citation: Vershinin V.P. Svarochnye napryazheniya v dvutavrovnykh sterzhnyakh sostavnogo secheniya s elementami bol'shoy tolshchiny [Welding Stresses in Double-Tee Bars of Built-up Cross Section with Elements of Large Thickness]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 2 (101), pp. 150–156. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.150-156