

## Исследование напряженного состояния в зонах концентрации напряжений при растяжении стыкового сварного соединения с асимметричным усилением

А. В. Молтасов

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

moltasov@gmail.com

*Разработан аналитический метод описания напряженного состояния в зонах концентрации напряжений при растяжении стыкового сварного соединения с асимметричным усилением, учитывающий влияние усиления на лицевой стороне на распределение напряжений вблизи усиления на корневой стороне. В основу предложенного метода положена гипотеза ломаных сечений. Установлены математические зависимости, описывающие изменение первого главного напряжения в зонах концентрации как по контуру галтели усиления на корневой стороне, так и по глубине соединения. Получены формулы для определения коэффициента концентрации напряжений у подножия усиления на корневой стороне в зависимости от характеристик соответствующего ломаного сечения. На примере стыкового сварного соединения алюминиевого сплава 6061-T6, выполненного аргонодуговой сваркой плавящимся электродом на съемной подкладке, показано, что коэффициент концентрации напряжений на корневой стороне соединения может быть меньше соответствующей величины на лицевой стороне, что подтверждается результатами испытаний на усталость в многоцикловой области.*

**Ключевые слова:** стыковое сварное соединение, асимметричное усиление, напряженное состояние, концентрация напряжений, усиление на корневой стороне, гипотеза ломаных сечений.

**Введение.** Анализ внешнего вида стыковых сварных соединений по ГОСТ 14771-76, 8713-79, 14806-80 и 5264-80 показывает, что для некоторых из них размеры усиления на лицевой и корневой стороне сварного шва могут быть разными (рис. 1).

Приведенные в [1–3] данные свидетельствуют о том, что с 90 годов прошлого столетия и до настоящего времени для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН) на лицевой и корневой стороне стыкового сварного соединения с асимметричным усилением используются формулы Стаканова–Костылева–Рыбина (далее – по Стаканову) [4]

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\sin \theta \left( \frac{r}{\delta} + \frac{4}{g} + \frac{0,8}{h} \right)}}, \quad (1)$$

или Березовского–Бакши (далее – по Березовскому) [5]

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{1}{\sqrt[3]{\left( \frac{r}{h} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} + 4 \frac{r}{\delta} 5 \frac{r}{r+g} \right)^2}}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина свариваемого металла;  $g$  – ширина усиления;  $h$  – высота усиления;  $r$  – радиус галтели усиления;  $\theta$  – фланговый угол.



Рис. 1. Стыковое сварное соединение алюминиевого сплава 6061-Т6, выполненное аргонодуговой сваркой плавящимся электродом (АДСПЭ) на съемной подкладке.

Из анализа формул (1) и (2) следует, что с уменьшением радиуса сопряжения и увеличением флангового угла ККН возрастает. Таким образом, поскольку радиус на корневой стороне шва всегда меньше, а угол больше, чем на лицевой стороне, ККН на корневой стороне, рассчитанный по указанным формулам, всегда выше, чем на лицевой стороне [6–8]. Однако согласно данным работы [8] в результате испытаний образцов на усталость в многоциклового области установлено, что зачастую усталостная трещина зарождается у подножия выступа на лицевой стороне сварного шва (рис. 2). Предполагается, что это обусловлено возможностью наступления стадии пластической деформации металла в зонах с высокими значениями ККН при напряжениях, близких к пределу выносливости соединений, а пластическое деформирование металла возле острых концентраторов приводит к некоторому увеличению радиуса кривизны. При этом в работе [1] отмечалось, что даже в малоциклового области существенного увеличения радиуса кривизны, которое могло бы заметно изменить уровень концентрации напряжений, не наблюдалось. Поэтому исследования, посвященные объяснению упомянутого выше экспериментально установленного факта, в настоящее время остаются актуальными.

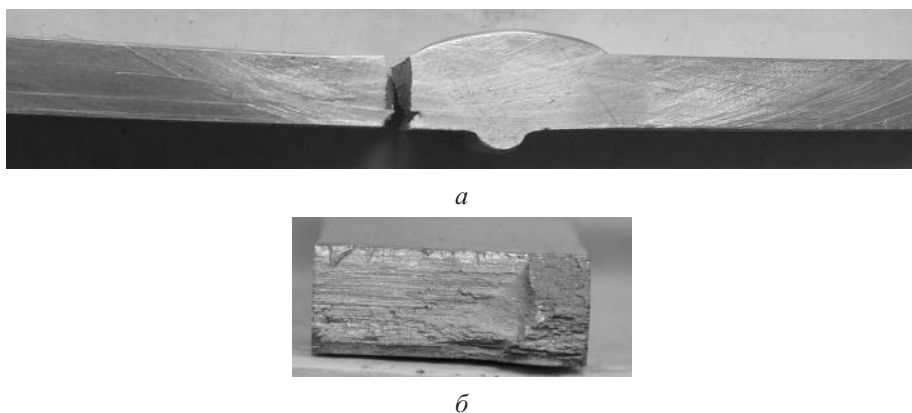


Рис. 2. Усталостное разрушение стыкового сварного соединения алюминиевого сплава 6061-Т6 с асимметричным усилением: *а* – внешний вид разрушенного образца; *б* – излом.

Заметим, что формула (1) применяется для расчета симметричного усиления (рис. 3) и не может использоваться для определения ККН в соединении с асимметричным усилением, а формула (2) – при одностороннем усилении (рис. 4) и может использоваться для расчета ККН только на лицевой стороне соединения.

В то же время формула (2) не может быть использована для расчета ККН в корневой части соединения, так как поперечное сечение соединения вблизи галтелей усиления на корневой стороне больше за счет усиления на лицевой стороне, например сечение  $m-t$  (рис. 5). Поэтому цель настоящей работы заключается в разработке аналитического метода, позволяющего учитывать влияние усиления на лицевой

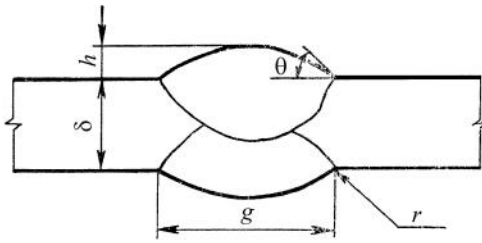


Рис. 3

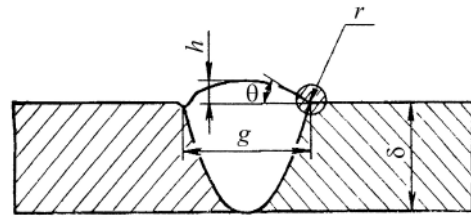


Рис. 4

Рис. 3. Схема стыкового сварного соединения с двусторонним симметричным усилением [4].  
 Рис. 4. Схема стыкового сварного соединения с односторонним усилением [9].

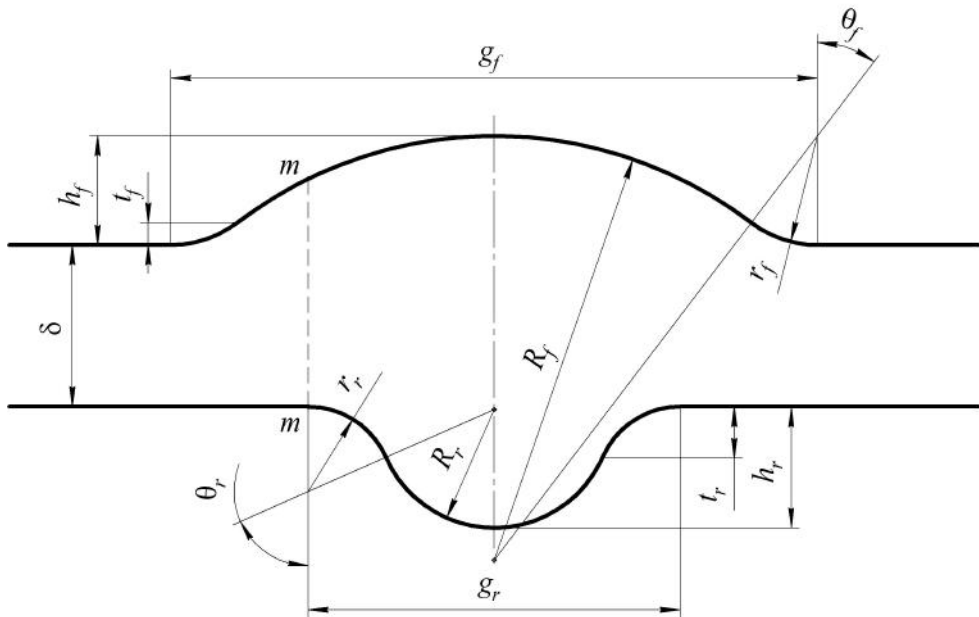


Рис. 5. Геометрические параметры идеализированной модели стыкового сварного соединения с асимметричным усилением.

стороне сварного шва на напряженное состояние вблизи усиления на корневой стороне.

**Описание предлагаемого метода.** При разработке аналитического метода описания напряженного состояния любой детали или элемента конструкции определяющим является их геометрическая форма. Поскольку реальную геометрическую форму стыкового соединения, выполненного сваркой плавящимся электродом, сложно описать непрерывной или кусочно-непрерывной функцией, принято использовать разнообразные идеализированные модели [10–13]. Однако согласно одним моделям [10, 12] не учитывается геометрия выпуклой части усиления, согласно другим [11, 13] предполагается замена радиуса галтели усиления точкой. Поэтому в данной работе предлагается описывать кривые, образованные выпуклой частью и галтелями усиления, в виде дуг соприкасающихся окружностей (рис. 5).

Через точку  $A_1$  (рис. 6), находящуюся на контуре галтели усиления на корневой стороне, построим ломаное сечение  $ABC$ , при этом участок  $AB$  проводится нормально к контуру на глубину  $b_0$ , участок  $BC$  – перпендикулярно линии действия нагрузки (рис. 6). Величина  $b_0$  характеризует глубину действия концентратора,

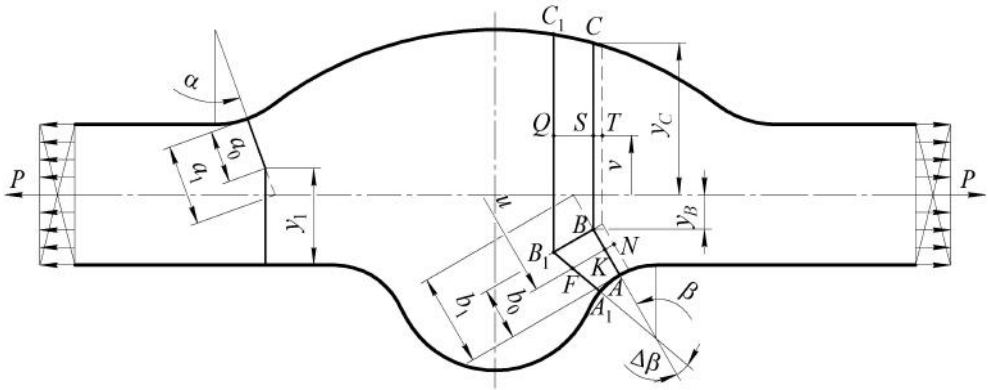


Рис. 6. Построение ломаных сечений в зонах концентратора на корневой стороне стыкового сварного соединения.

и для полосы с галтелями, которая, по сути, является стыковым сварным соединением, определяется по формуле [14]

$$b_0 = 2\sqrt{r_r t_r}, \tag{3}$$

где  $r_r$ ,  $t_r$  – радиус и высота галтели соответственно на корневой стороне усиления.

Согласно принятой геометрической модели (рис. 5) высота галтели  $t_r$  вычисляется так:

$$t_r = r_r (1 - \cos \theta_r), \tag{4}$$

где  $\theta_r$  – фланговый угол на корневой стороне сварного шва,

$$\theta_r = \arcsin \frac{4g_r h_r}{g_r^2 + 4h_r^2}. \tag{5}$$

Подставляя (4) в (3) с учетом (5), окончательно получаем

$$b_0 = 4\sqrt{2} \frac{r_r h_r}{\sqrt{g_r^2 + 4h_r^2}}. \tag{6}$$

Через точку  $A_1$  (рис. 6), следуя тому же правилу, проведем ломаное сечение  $A_1 B_1 C_1$  таким образом, чтобы продолжения отрезков  $AB$  и  $A_1 B_1$  образовали бесконечно малый угол  $\Delta\beta$ .

Предположим, что вследствие деформации сечение  $A_1 B_1 C_1$  осталось неподвижным, а сечение  $ABC$  заняло положение, которое на рис. 6 отмечено штриховой линией, при этом волокно  $KF$ , находящееся на расстоянии  $u$  от линии действия нагрузки, получит удлинение  $KN$ , в результате чего в нем возникнет нормальное напряжение

$$\sigma_u = \frac{(KN)E}{(r_r + b_1 - u)\Delta\beta}, \tag{7}$$

так как согласно построениям (рис. 6) имеем

$$KF = (r_r + b_1 - u) \operatorname{tg} \Delta\beta,$$

а для бесконечно малых углов справедливо равенство  $\operatorname{tg} \Delta\beta \approx \Delta\beta$ .

В то же время волокно  $QS$  (рис. 6), находящееся на расстоянии  $v$  от линии действия нагрузки, получит удлинение  $ST$ , в результате чего в нем возникнет нормальное напряжение

$$\sigma_v = \frac{ST}{QS} = \frac{(KN)E \cos \beta}{(r_r + b_0) \cos \beta \operatorname{tg} \Delta\beta} = \frac{(KN)E}{(r_r + b_0) \Delta\beta}. \quad (8)$$

Условие равновесия для соединения единичной толщины имеет вид

$$P = \int_{b_1 - b_0}^{b_1} \sigma_u du \cos \beta + \int_{-y_B}^{y_C} \sigma_v dv. \quad (9)$$

Здесь

$$y_B = \frac{\delta}{2} + r_r (1 - \cos \beta) - b_0 \cos \beta; \quad (10)$$

$$y_C = \frac{\delta}{2} + h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - \left[ (r_r + b_0) \sin \beta - \frac{g_r}{2} \right]^2}, \quad (11)$$

причем согласно построениям (рис. 5) имеем

$$R_f = \frac{g_f^2 + 4h_f^2}{8h_f} - r_f, \quad (12)$$

где  $r_f$ ,  $R_f$  и  $h_f$ ,  $g_f$  – радиус галтели и выпуклой части, высота и ширина усиления на лицевой стороне соответственно.

Подставляя выражения (7) и (8) в условие равновесия (9), после интегрирования получаем

$$\frac{P}{T_0} = \frac{(KN)E}{\Delta\beta}, \quad (13)$$

где  $T_0$  – геометрическая характеристика ломаного сечения при растяжении,

$$T_0 = \cos \beta \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{y_C + y_B}{r_r + b_0}. \quad (14)$$

Подставив тождество (13) в формулы (7) и (8), установим связь между растягивающим усилием  $P$  и напряжением на участках  $AB$  и  $BC$  соответственно:

$$\sigma_u = \frac{P}{(r_r + b_1 - u)T_0}; \quad (15)$$

$$\sigma_v = \frac{P}{(r_r + b_0)T_0}. \quad (16)$$

Анализ выражений (15) и (16) показывает, что на участке  $BC$  (рис. 6) напряжение постоянное по толщине и изменяется только от сечения к сечению, а на участке  $AB$  оно изменяется по гиперболическому закону и достигает максимума на поверхности галтели усиления на корневой стороне в точке  $A$ . Тогда ККН в точках контура определяется по формуле

$$\alpha_{\sigma}^r = \frac{\delta \sigma_u|_{u=b_1}}{P} = \frac{\delta}{r_r T_0}. \quad (17)$$

Подставляя (14) с учетом (10) и (11) в (17) при  $\beta = 0$ , получаем формулу для определения ККН у подножия усиления на корневой стороне:

$$\alpha_{\sigma}^r|_{\beta=0} = \frac{\delta}{r_r \left( \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{\delta + h_f - R_f - b_0 + \sqrt{R_f^2 - \frac{g_r^2}{4}}}{r_r + b_0} \right)}. \quad (18)$$

Полученные выше формулы справедливы для случая  $b_0 \leq b_1$ , что соответствует изменению  $\beta$  в интервале  $\beta_t \dots \theta_r$ , причем  $\beta_t$  согласно [15] определяется так:

$$\beta_t = \arccos \frac{\delta + 2r_r}{2(r_r + b_0)}, \quad (19)$$

поскольку

$$b_1 = \frac{\delta + 2r_r (1 - \cos \beta)}{2 \cos \beta}. \quad (20)$$

Если  $\beta$  изменяется в интервале  $0 \dots \beta_t$ , то в формулах (8)–(11) постоянный параметр  $b_0$  следует заменить переменной  $b_1$ . Тогда, подставив (20) в (10), установим, что  $u_B$  обращается в нуль, и при определении ККН в (17)  $T_0$  следует заменить параметром

$$T_1 = \cos \beta \left( \ln \frac{\delta + 2r_r}{2r_r \cos \beta} + \frac{2y_C}{\delta + 2r_r} \right). \quad (21)$$

В этом случае ККН у подножия усиления на корневой стороне будет определяться по формуле

$$\alpha_{\sigma}^r|_{\beta=0} = \frac{\delta}{r_r \left( \ln \frac{\delta + 2r_r}{2r_r} + \frac{\delta + 2h_f - 2R_f + 2\sqrt{R_f^2 - \frac{g_r^2}{4}}}{\delta + 2r_r} \right)}. \quad (22)$$

Определим ККН у подножия усиления на лицевой и корневой стороне стыкового сварного соединения с определенными геометрическими размерами выпук-

**Расчет коэффициентов концентрации напряжений в стыковом сварном соединении  
алюминиевого сплава 6061-Т6, выполненного АДСПЭ, толщиной  $\delta = 2$  мм**

Сторона сварного соединения	Радиус галтели $r$ , мм	Высота выступа $h$ , мм	Ширина выступа $g$ , мм	Фланговый угол $\theta$ , град	ККН по		
					Стаканову	Березовскому	ГЛС
Лицевая ( $f$ )	1,35	1,35	8,00	37,30	1,46	1,29	1,51
Корневая ( $r$ )	1,05	1,50	4,60	66,22	1,60	1,39	1,22

лостей [8] (таблица). Поскольку для данного соединения  $b_0 > b_1$  при  $\beta = 0$ , ККН на корневой стороне будем вычислять по формуле (22)

Напряженное состояние в зонах концентрации напряжений на лицевой стороне сварного шва определено ранее [16] методом, основанным на гипотезе ломаных сечений (ГЛС).

Согласно полученным данным изменение ККН на поверхности галтели усиления на лицевой стороне описывается выражением

$$\alpha_{\sigma}^f = \frac{\delta}{r_f \left( \cos \alpha \ln \frac{r_f + a_0}{r_f} + \frac{y_1}{r_f + a_0} \right)}, \quad (23)$$

где  $a_0$  – параметр, который характеризует глубину действия концентратора в лицевой части шва и по аналогии с  $b_0$  определяется по формуле

$$a_0 = 4\sqrt{2} \frac{r_f h_f}{\sqrt{g_f^2 + 4h_f^2}}, \quad (24)$$

а  $y_1$  в соответствии с построениями (рис. 6) – по зависимости

$$y_1 = (a_1 - a_0) \cos \alpha + \frac{\delta}{2}, \quad (25)$$

причем по аналогии с  $b_1$  имеем

$$a_1 = \frac{\delta + 2r_f(1 - \cos \alpha)}{2 \cos \alpha}. \quad (26)$$

Поскольку для данного соединения (таблица)  $a_0 > a_1$  при  $\alpha = 0$ , в выражении (23) следует положить  $a_0 = a_1$ , тогда формула для определения ККН у подножия усиления на лицевой стороне примет вид

$$\alpha_{\sigma}^f \Big|_{\alpha=0} = \frac{\delta}{r_f \left( \ln \frac{\delta + 2r_f}{2r_f} + \frac{\delta}{\delta + 2r_f} \right)}. \quad (27)$$

Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что только расчет ККН методами, основанными на ГЛС, подтверждает экспериментально установленный

факт (рис. 2), поскольку значение ККН на лицевой стороне сварного соединения, рассчитанное по формуле (27), выше такового на корневой стороне, полученного по формуле (22).

## Выводы

1. Предложена идеализированная модель описания геометрических размеров усиленный стыкового соединения, выполненного сваркой плавящимся электродом, в виде дуг соприкасающихся окружностей. Использование модели позволяет оценить влияние изменения формы усиления на лицевой стороне на напряженное состояние в зоне концентрации напряжений на корневой стороне сварного шва.

2. Впервые разработан аналитический метод описания напряженного состояния в зонах концентрации напряжений при растяжении стыкового сварного соединения с асимметричным усилением, учитывающий влияние усиления на лицевой стороне на распределение напряжений вблизи усиления на корневой стороне.

3. Результаты расчетов предложенным методом показывают, что увеличение поперечного сечения вблизи усиления на корневой стороне за счет усиления на лицевой стороне может привести к тому, что, несмотря на меньший радиус кривизны галтели усиления на корневой стороне, коэффициент концентрации напряжений у подножия усиления на лицевой стороне будет больше.

## Резюме

Розроблено аналітичний метод опису напруженого стану в зонах концентрації напружень при розтяганні стикового зварного з'єднання з асиметричним підсиленням, який враховує вплив підсилення на лицьовій стороні на розподіл напружень в околі підсилення на кореневій стороні. В основу запропонованого методу покладено гіпотезу ламаних перерізів. Установлено математичні залежності, які описують зміну першого головного напруження в зонах концентрації як по контуру галтелі підсилення на кореневій стороні, так і по глибині з'єднання. Одержано формули для визначення коефіцієнта концентрації напружень біля підніжжя підсилення на кореневій стороні в залежності від характеристик відповідного ламаного перерізу. На прикладі стикового зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 6061-Т6, виконаного аргонодуговим зварюванням плавким електродом на знімній підкладці, показано, що коефіцієнт концентрації напружень на кореневій стороні з'єднання може бути меншим за відповідну величину на лицьовій стороні, що підтверджується результатами випробувань на утому в багатоцикловій області.

1. Шонин В. А., Якубовский В. В., Игнатьев В. Г. Сопротивление малоциклового усталости сварных соединений панелей из сплава 1915Т // Автомат. сварка. – 1991. – № 1. – С. 22–25.
2. Кир'ян В. І., Шонін В. А., Клочков І. М. та ін. Довговічність стикових з'єднань тонколистових сплавів АМг6 і Д16, виконаних зварюванням плавким електродом (MIG Pulse) // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. – 2009. – Вип. 8. – С. 189–203.
3. Кныш В. В., Клочков И. Н., Пашуля М. П., Мотрунич С. И. Повышение сопротивления усталости тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой // Автомат. сварка. – 2014. – № 5. – С. 22–29.
4. Стаканов В. И., Костылев В. И., Рыбин Ю. И. О расчете коэффициента концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях // Там же. – 1987. – № 11. – С. 19–23.



5. *Березовский Б. М., Бакиш О. А.* Коэффициент концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях: Тр. Челяб. политехн. ин-та. – 1981. – № 226. – С. 31–40.
6. *Шонин В. А., Гуца О. И., Машин В. С. и др.* Влияние размеров образца сварного соединения алюминиевого сплава на остаточную напряженность и сопротивление усталости // Автомат. сварка. – 2005. – № 2. – С. 21–31.
7. *Исследовать* сопротивление усталости сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных современными способами сварки: (Заключительный отчет) / Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. – № ГР 0107U004035. – Киев, 2011. – 139 с.
8. *Клочков И. Н.* Повышение долговечности тонколистовых сварных соединений алюминиевых сплавов высокочастотной проковкой: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2013. – 143 с.
9. *Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка. – 1985. – № 8. – С. 7–12.
10. *Sanders W. W., Jr., Derecho A. T., and Munse W. H.* Effect of external geometry on the fatigue behavior of welded joints // Weld. J. – 1965. – No. 2 (44). – P. 49–55.
11. *Kaufmann P.* Ermüdungsverhalten von Stumpfnähen // Schweißtechnik. – 1970. – 20, No. 1. – S. 38–41.
12. *Навроцкий Д. И.* Расчет сварных конструкций с учетом концентрации напряжений. – Л.: Машиностроение, 1968. – 170 с.
13. *Ермолаев Г. В., Мартыненко В. А., Марунич И. В.* Влияние размеров выпуклости шва на напряженное состояние стыкового соединения при растяжении // Автомат. сварка. – 2014. – № 8. – С. 28–34.
14. *Верховский А. В., Андронов В. П., Ионов В. А. и др.* Определение напряжений в опасных сечениях деталей сложной формы. Метод неплоских сечений. – М.: Машгиз, 1958. – 147 с.
15. *Молтасов А. В.* Разработка методов расчета силовых параметров контактной стыковой сварки кольцевых изделий: Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2015. – 132 с.
16. *Молтасов А. В.* Применение метода неплоских сечений к определению напряжений в зонах концентрации, вызванной усилением стыкового сварного соединения // Пробл. прочности. – 2013. – № 1. – С. 159–167.

Поступила 10. 11. 2016