



МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139

УДК 678.606.55

Научная статья

Разработка методики расчета круговых прерывистых сварных швов на кручение

Ю.В. Белоусов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

И.А. Клеймюк

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

С.В. Страшнов

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 12 марта 2019

Доработана: 20 мая 2019

Принята к публикации: 28 мая 2019

Ключевые слова:

сварные швы; наибольшие касательные напряжения; полярный момент сопротивления; повернутое опасное сечение

Основным критерием работоспособности швов сварных соединений является прочность. Наименее прочными являются угловые швы, используемые для выполнения различных видов сварных соединений. В литературе достаточно подробно рассмотрены методы расчета на прочность сварных соединений сплошными швами. Методы расчета соединений прерывистыми швами отсутствуют. При этом наибольшие трудности представляет расчет соединений с помощью круговых прерывистых швов, которые довольно часто выполняются в сварных барабанах и шкивах. Они работают на кручение. Поэтому разработка методики расчета круговых прерывистых швов на кручение имеет достаточно важное значение. Касательные напряжения в сварных угловых швах от крутящего момента определялись в зависимости от величины полярного момента сопротивления его опасного сечения. При определении полярного момента сопротивления опасного сечения кругового прерывистого шва оно представлялось совокупностью участков в виде сектора кругового кольца. Разработана методика расчета полярного момента сопротивления повернутого опасного сечения кругового прерывистого сварного шва, которая учитывает относительную длину участков шва и их количество, а также методика точного и приближенного расчета касательных напряжений в данном сварном шве.

Введение

Сварные соединения являются наиболее распространенным видом неразъемных соединений. Их широко применяют в строительстве и машиностроении. Достаточно подробно разработана ме-

тодика расчета на прочность стыковых сварных швов, которые являются наиболее рациональными, так как максимально приближают составные детали по форме и прочности к целому изделию [1; 2]. Они образуются при полной проварке стыка торцов соединяемых деталей с помощью дуговой или контактной электросварки, а также при сварке трением. Однако большое количество сварных соединений образуется с помощью угловых швов. Угловые швы образуются при сваривании деталей нахлесточных, тавровых и угловых соединений, кромки деталей которых не имеют скосов. Это упрощает их изготовление [3].

Белоусов Юрий Вениаминович – доцент кафедры основ конструирования машин МГТУ имени Н.Э. Баумана, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; belou.80@mail.ru

Клеймюк Иван Александрович – студент механико-технологического факультета МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Страшнов Станислав Викторович – старший преподаватель департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук.

© Белоусов Ю.В., Клеймюк И.А., Страшнов С.В., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Наиболее часто применяют нормальные угловые швы, имеющие в поперечном сечении прямоугольный треугольник с соотношением катетов 1:1, как более простые в изготовлении. Разрушение углового шва происходит по наименьшему сечению по плоскости, проходящей через биссектрису прямого угла. Размер шва в этом сечении βk , где k – катет шва. Второй размер – длина шва $l_{ш}$. При многопроходной автоматической и полуавтоматической сварке, а также при ручной сварке принимают $\beta = 0,7$, считая шов равнобедренным прямоугольным треугольником.

Расчет угловых швов условно проводят по касательным напряжениям, распределенным по опасному сечению. Поверхность разрушения швов поворачивают на плоскость стыка соединяемых деталей. Суммарное касательное напряжение в опасном сечении определяют геометрическим сложением составляющих напряжений.

1. Определение полярного момента сопротивления опасного сечения кругового прерывистого сварного шва

В самом общем случае сварное соединение может работать на изгиб, сдвиг и кручение. Наибольшие касательные напряжения от изгибающего момента M

$$\tau_{M_{\max}} = M/W,$$

где W – момент сопротивления повернутого опасного сечения относительно оси изгиба.

Наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T

$$\tau_{T_{\max}} = \frac{T}{W_{\rho}}, \quad (1)$$

где W_{ρ} – полярный момент сопротивления повернутого опасного сечения.

Таким образом, касательные напряжения углового шва от изгибающего и крутящего моментов определяются величинами соответственно осевого и полярного моментов сопротивления повернутого опасного сечения.

Осейвой W , а также полярный W_{ρ} моменты сопротивления опасного сечения сплошного шва могут быть достаточно просто определены по известным формулам сопротивления материалов для сечения шва в форме круглого и прямоугольного кольца и двух прямоугольников [4; 5]. Осевой W , а также полярный W_{ρ} моменты сопротивления опасного сечения прерывистого шва по известным

формулам сопротивления материалов могут быть определены только для сечения шва в форме прямоугольного кольца и двух прямоугольников [6]. Касательные напряжения от изгибающего момента и поперечной силы в круговом прерывистом шве достаточно подробно исследованы в работе [6]. Расчетные зависимости для определения касательных напряжений в опасном сечении прерывистого кругового шва от крутящего момента в литературе отсутствуют.

Круговые прерывистые швы довольно часто выполняются в сварных барабанах и шкивах. Они работают в основном на кручение. Поэтому расчет круговых прерывистых швов на кручение имеет достаточно важное значение, что в итоге позволит сформулировать необходимые требования к размерам и качеству данных швов.

Для определения полярного момента сопротивления опасного сечения шва поверхность его разрушения, проходящую через биссектрису прямого угла, повернем на плоскость стыка соединяемых деталей. Рассмотрим участок шва в виде сектора кругового кольца (рис. 1).

Для него [7]

$$y_1 = \frac{d-\delta}{2} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right) + \frac{\delta \cos \alpha}{2}, \quad (2)$$

$$J_x = \frac{\delta(d-\delta)^3}{8} \left[\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2\sin^2 \alpha}{\alpha} \right], \quad (3)$$

$$J_y = \frac{\delta(d-\delta)^3}{8} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right), \quad (4)$$

где J_x и J_y – осевые моменты инерции сечения относительно его главных осей x и y .

Тогда полярный момент инерции данного элемента относительно полюса – точки O

$$J_{\rho} = J_x + J_y + d\delta \left(\frac{d}{2} - y_1 \right)^2. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражения (2), (3) и (4), а также учитывая, что d много больше δ и y_1 , получим

$$J_{\rho} = \frac{\delta d^3}{4} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (6)$$

Полярный момент инерции всего прерывистого шва, содержащего n участков:

$$J_{\rho\Sigma} = \frac{\delta d^3 n}{4} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (7)$$

Полярный момент сопротивления такого шва:

$$W_{\rho\Sigma} = \frac{J_{\rho\Sigma}}{\frac{d}{2}} = \frac{\delta d^2 n}{2} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (8)$$

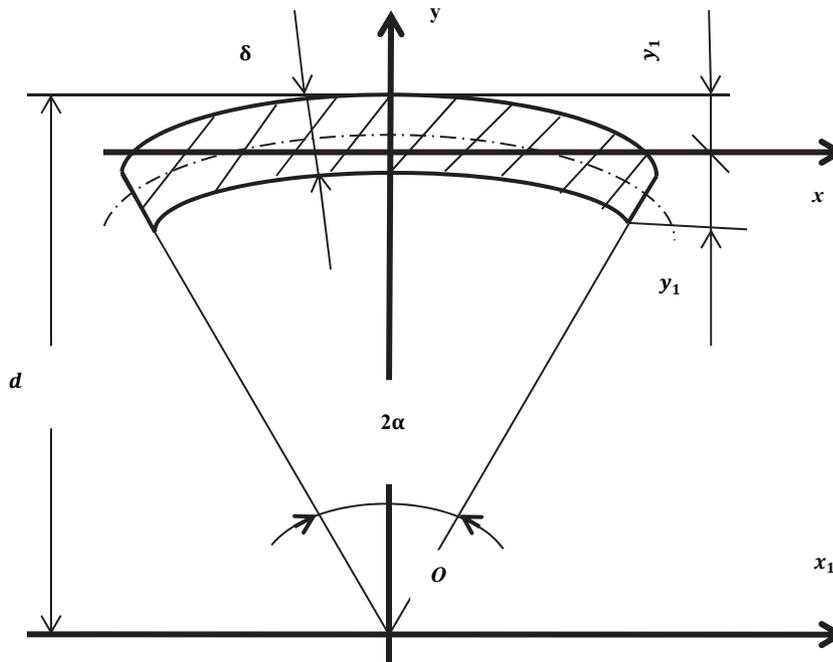


Рис. 1. Участок прерывистого сварного шва
[Figure 1. Intermittent weld area]

Обозначим $k = l_{ш}/l_{пр}$ – относительная длина участка шва. Здесь $l_{ш}$ – длина участка шва, $l_{пр}$ – длина промежутка между участками шва. Тогда

$$\alpha = \frac{\pi k}{n(k+1)},$$

а

$$W_{\rho\Sigma} = \frac{\delta d^2 n}{2} \left\{ \frac{2\pi k}{n(k+1)} - \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\}. \quad (9)$$

2. Определение касательных напряжений в круговом прерывистом сварном шве

Зная количество участков прерывистого кругового шва n , длину каждого участка, расстояние между ними, по формуле (9) можно определить полярный момент сопротивления повернутого опасного сечения шва, а по формуле (1) – наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T .

Сравним наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T в опасном сечении прерывистого и сплошного круговых швов. В работе [8] указывается, что сплошные швы таврового сварного соединения при одинаковой площади разрушения имеют меньшую ресурсоемкость и более

высокую несущую способность по сравнению с цепными прерывистыми швами, однако точные количественные оценки не были получены.

Полярный момент сопротивления сплошного кругового кольца

$$W_{\rho} = \frac{\pi \delta d^2}{2}. \quad (10)$$

Отношение наибольших касательных напряжений в опасном сечении прерывистого шва $\tau_{пр}$ и сплошного шва $\tau_{спл}$ будет равно обратному отношению их полярных моментов сопротивления:

$$\frac{\tau_{пр}}{\tau_{спл}} = \frac{W_{\rho}}{W_{\rho\Sigma}} = \frac{\pi}{n \left\{ \frac{2\pi k}{n(k+1)} - \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\}}. \quad (11)$$

Подставив в формулу (11) величины n и k , можно получить соотношение касательных напряжений для любого случая.

При достаточно большом n второе слагаемое в знаменателе формулы (11) имеет неопределенность $0/0$. Поэтому рассмотрим предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \sin\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right] \frac{\sin\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\} = \frac{\pi k}{n(k+1)}. \quad (12)$$

Тогда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\tau_{пр}}{\tau_{спл}} = \frac{k+1}{k} = 1 + \frac{1}{k}. \quad (13)$$

Если предположить, что касательные напряжения в пределах каждого участка шва распределяются равномерно, то внешний крутящий момент уравновешивается моментами от сил сопротивления каждого из участков шва, то есть

$$d\delta\alpha\tau_{\text{пр}}^{\perp} \frac{d}{2} n = T, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{пр}}^{\perp}$ – касательные напряжения в опасном сечении прерывистого шва.

Из формулы (14) получим

$$\tau_{\text{пр}}^{\perp} = \frac{2T}{\pi d^2 \delta} \frac{k+1}{k}. \quad (15)$$

Касательные напряжения в опасном сечении сплошного шва

$$\tau_{\text{спл}} = \frac{2T}{\pi d^2 \delta}. \quad (16)$$

Тогда отношение наибольших касательных напряжений в опасных сечениях прерывистого шва $\tau_{\text{пр}}^{\perp}$ и сплошного шва $\tau_{\text{спл}}$ будет

$$m = \frac{\tau_{\text{пр}}^{\perp}}{\tau_{\text{спл}}} = \frac{k+1}{k}. \quad (17)$$

В итоге получили результат формулы (13) для предельного случая, когда количество участков шва достаточно велико. То есть формула (17) также является приближением точного решения (11), а наибольшие касательные напряжения от крутящего момента в опасном сечении прерывистого

шва приближенно могут быть определены через аналогичные для сплошного шва:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{спл}} \frac{k+1}{k} = \tau_{\text{спл}} + \frac{\tau_{\text{спл}}}{k}. \quad (18)$$

Формулу (18) можно использовать для ориентировочной оценки величины максимальных касательных напряжений в прерывистом шве. Зависимости (13) и (17), на основе которых она получена, представлены графически на рис. 2.

Как видно из графика на рис. 2 и формулы (18), при $k = 1$ максимальные касательные напряжения в прерывистом круговом шве в два раза превышают аналогичные в сплошном. При увеличении k соотношение (13) стремится к единице, что вполне естественно, так как прерывистый шов становится сплошным. При уменьшении k соотношение (13) увеличивается, а для малых k – значительно, то есть максимальные касательные напряжения прерывистого шва сильно возрастают. Поэтому следует избегать слишком коротких швов. Их применение может быть оправдано лишь для предварительной ориентации деталей будущего соединения, при его последующей обработке и выполнении основных сварных швов [2; 9; 10].

По условию прочности полученные значения максимальных касательных напряжений не должны превышать допускаемые $[\tau^{\perp}]$, то есть

$$\tau_{\text{пр}} \leq [\tau^{\perp}],$$

где $[\tau^{\perp}]$ – допускаемое касательное напряжение для угловых швов.

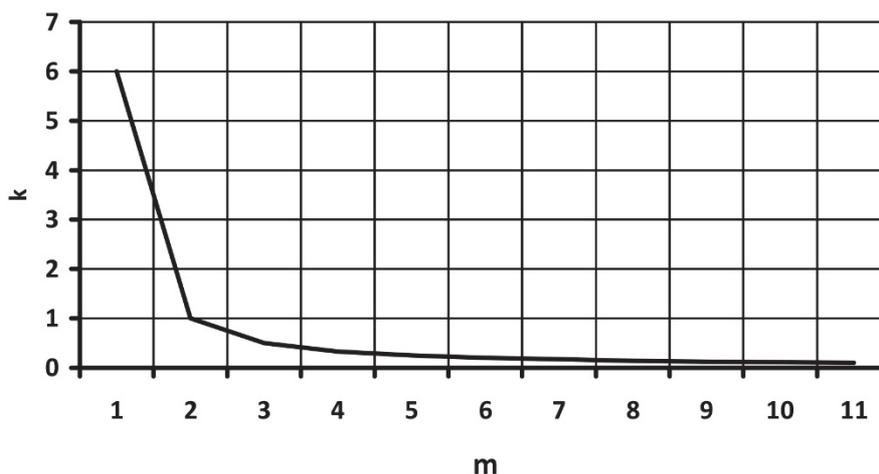


Рис. 2. Зависимость соотношения наибольших касательных напряжений прерывистого и сплошного швов от относительной длины участков прерывистого шва

[Figure 2. Dependence of the ratio of the greatest shear stresses of discontinuous and continuous seams on the relative length of the discontinuous seam sections]

Выводы

Разработана методика расчета полярного момента сопротивления повернутого опасного сечения кругового прерывистого сварного шва, которая учитывает относительную длину участков шва и их количество, а также методика точного и приближенного расчета касательных напряжений в данном сварном шве.

Сравнительный анализ наибольших касательных напряжений от крутящего момента в опасном сечении прерывистого и сплошного швов показал, что их предельное соотношение зависит лишь от относительной длины каждого участка шва по сравнению с длиной промежутка между участками.

При увеличении относительной длины каждого участка шва разница между напряжениями в прерывистом и сплошном швах уменьшается и становится равной нулю при очень большом количестве участков. При уменьшении относительной длины участков шва касательные напряжения в прерывистом шве сильно возрастают. Поэтому следует избегать слишком коротких швов. Они могут использоваться лишь для предварительной ориентации деталей будущего соединения, при его последующей обработке и выполнении основных сварных швов.

Получены расчетная и графическая зависимости для ориентировочной оценки величины максимальных касательных напряжений в круговом прерывистом шве в зависимости от относительной длины участков шва.

Список литературы

1. *Herrera H.H., Eras J.J.C., Morejion M.B., Espinosa R.G.* Stress in butt welded joints of open profiles under torsion // *Ingeniare*. 2015. Vol. 23. No. 4. Pp. 638–646. doi: 10.4067/S0718-33052015000400014

2. *Belousov Y.V., Rekach F.V., Shambina S.L.* Modeling of the Tools' Power Interaction during Mechanical Machining by Cutting // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2018. Vol. 7. Pp. 132–134.

3. *Vogwell J., Mingués J.M.* Predicting failure in non-continuous welds stamps when used in joints under torsion loading // *Engineering Failure Analysis*. 1997. Vol. 4. No. 4. Pp. 227–236.

4. *Андрюченко Л.А., Байков Б.А., Захаров М.Н. и др.* Детали машин: учебник для вузов / под ред. О.А. Ряховского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.

5. *Иванов М.Н., Финогенов В.А.* Детали машин: учебник для машиностроительных спец. вузов. 11-е изд., перераб. М.: Высшая школа. 2007. 408 с.

6. *Белусов Ю.В.* Анализ напряженного состояния кругового прерывистого сварного шва тавровых соединений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 3. С. 54–57.

7. *Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчет на прочность деталей машин: справочник. 4-е изд., перер. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

8. *Цумарев Ю.А.* Технико-экономическая эффективность применения прерывистых сварных швов // *Сварочное производство*. 2013. № 2. С. 58–60.

9. *Белусов Ю.В.* Расчет погрешности закрепления при установке заготовок на опоры приспособления // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19. № 1. С. 38–45.

10. *Shambina S.L., Rekach F.V., Belousov Y.V.* On new modification of some strength criteria for anisotropic materials // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 724. Pp. 53–57.

Для цитирования

Белусов Ю.В., Клеймук И.А., Страшинов С.В. Разработка методики расчета круговых прерывистых сварных швов на кручение // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 134–139. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139>

Development of methodology for calculation of discontinuous circular welds in torsion

Yury V. Belousov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),

5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Peoples, Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Ivan A. Kleymuk

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),

5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Stanislav V. Strashnov

Peoples, Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: March 12, 2019

Revised: May 20, 2019

Accepted: May 28, 2019

Keywords:

welds; the highest shear stresses; polar moment of resistance; turned a dangerous cross-section

The main criterion for the performance of welds is the strength. The least durable are the corner joints used to perform various types of welded joints. In the literature, the methods of calculating the strength of welded joints with solid seams are considered in sufficient detail. Methods of calculation of connection interrupted sutures absent. In this case, the greatest difficulty is the calculation of connections using circular intermittent seams, which are often performed in welded drums and pulleys. They work on torsion. Therefore, the development of methods for calculating circular intermittent seams for torsion is quite important. Shear stresses in welds from torque are determined depending on the value of the polar moment of resistance of its dangerous section. When determining the polar moment of resistance of the dangerous section of a circular discontinuous seam, it was represented by a set of sections in the form of a sector of a circular ring. The method of calculation of the polar moment of resistance of the rotated dangerous section of a circular discontinuous weld, which takes into account the relative length of the weld areas and their number, is proposed, as well as the method of accurate and approximate calculation of shear stresses in the weld.

References

1. Herrera HH, Eras JJC, Morejion MB, Espinosa RG. Stress in butt welded joints of open profiles under torsion. *Ingeniare*. 2015;23(4): 638–646. Available from: doi:10.4067/S0718-33052015000400014

2. Belousov YV, Rekach FV, Shambina SL. Modeling of the Tools' Power Interaction during Mechanical Machining by Cutting. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2018;7: 132–134.

3. Vogwell J, Mingues JM. Predicting Failure in non-continuous welds stamps when used in joints under torsion loading. *Engineering Failure Analysis*. 1997;4(4): 227–236.

4. Andrienko LA, Baykov BA, Zakharov MN, et al. *Detali mashin: uchebnik dlya vuzov [Parts of machines: textbook for universities]*. Moscow: MG TU imeni N.Uh. Bauman Publ.; 2014. (In Russ.)

5. Ivanov MN, Finogenov VA. *Detali mashin: uchebnik dlya mashinostroyitel'nykh spec. vuzov. 11-e izd. [Parts of machines: textbook for machine-building special machine parts. 11th ed.]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ; 2007. (In Russ.)

6. Belousov YuV. Analiz napryazhennogo sostoyaniya krugovogo preryvistogo svarnogo shva tav-

rovnyh soedinenij [Analysis of the tension state of the circumferential intermittent weld of the t-joining]. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2015;(3): 54–57. (In Russ.)

7. Birger IA, Shorr BF, Iosilevich GB. *Raschet na prochnost' detalej mashin: spravochnik. 4-e izd. [Strength calculation of machine parts: handbook. 4th ed.]*. Moscow: Mashinostroenie Publ; 1993. (In Russ.)

8. Zumarev YA. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya preryvistykh svarnykh shvov [Technical and economic effectiveness of intermittent welds]. *Welding production*. 2013;(2): 58–60. (In Russ.)

9. Belousov VV. Raschet pogreshnosti zakrepleniya pri ustanovke zagotovok na opory prispособleniya [Calculation of clamping error when mounting a workpiece on fixture supports]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(1): 38–45. (In Russ.)

10. Shambina SL, Rekach FV, Belousov YV. On new modification of some strength criteria for anisotropic materials. *Key Engineering Materials*. 2016;724: 53–57.

For citation

Belousov YuV, Kleymuk IA, Strashnov SV. Development of methodology for calculation of discontinuous circular welds in torsion. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 134–139. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139>. (In Russ.)

Yury V. Belousov – Associate Professor of Department of Basis of Machine Construction of Bauman MSTU, Associate Professor of Department of Construction of the Academy of Engineering of RUDN University, PhD (Technical Sciences); belou.80@mail.ru

Ivan A. Kleymuk – student of the Mechanical-Technological Department of Bauman MSTU.

Stanislav V. Strashnov – senior lecturer of Department of Construction of the Academy of Engineering of RUDN University, PhD (Technical Sciences).