

ПРОЧНОСТЬ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ОСЛАБЛЕННЫХ МЯГКОЙ ПРОСЛОЙКОЙ, ПРИ ДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Статья посвящена проблеме механической неоднородности стыковых сварных соединений, а именно влиянию параметров мягкой прослойки на напряженно-деформированное состояние соединений, нагруженных изгибом. Известно, что сознательное регулирование геометрических размеров и механических свойств мягкой прослойки позволяет повысить механические свойства всего сварного соединения за счет контактного упрочнения и даже обеспечить его равнопрочность. Цель настоящей работы заключалась в определении диапазонов варьирования параметров мягкой прослойки, обеспечивающих получение равнопрочных стыковых сварных соединений при статическом изгибе. При этом решались следующие задачи: 1) определение параметров мягкой прослойки для получения равнопрочных сварных соединений без дефектов; 2) оценка возможности получения равнопрочных механически неоднородных соединений с дефектом типа непровар. Исследования выполнены с применением метода конечных элементов, базирующегося на теории пластического течения, и метода линий скольжения. В работе рассмотрены наиболее характерные напряженные состояния прослоек с дефектом и без него, выполнена проверка полученных математических решений и были уточнены граничные условия их применения. В частности, установлено, что в реальных условиях получить значительный эффект от реализации контактного упрочнения возможно только на толстостенных деталях. Причем требования к толщине деталей, работающих при изгибе, в полтора раза выше, чем при растяжении. Несколько снизить эти требования можно за счет применения специальных методов сварки. Также установлена возможность получения равнопрочных сварных соединений при наличии в мягкой прослойке центрального дефекта типа непровар. Результаты данных исследований могут быть использованы в машиностроении при производстве конструкций для химической и нефтехимической промышленности, энергетического оборудования, а также конструкций для аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: стыковые сварные соединения, механическая неоднородность, мягкая прослойка, изгиб, прочность, контактное упрочнение, непровар.

В процессе производства сварных конструкций часто приходится сталкиваться с механической неоднородностью в сварных соединениях. Природа ее появления может быть различна. Это могут быть разупрочненные участки в соединениях при сварке термоупрочненных сталей и высокопрочных материалов в процессе изготовления химической и нефтехимической аппаратуры или аналогичные явления при сварке термообработанных алюминиевых сплавов, а также нагартованных высокопрочных материалов. Это может быть зона термического влияния при диффузионной сварке вследствие диффузии углерода в сварной шов. В ряде случаев применение высокопрочных сталей и сплавов для изготовления узлов и деталей сварных конструкций ставит вопрос об их свариваемости. Одним из распространенных решений этой проблемы является преднамеренное выполнение сварных швов из более пластичного, но менее прочного металла.

Подобные «мягкие прослойки» являются локализаторами деформаций и чаще всего лимитируют несущую способность всего соединения. Их появление зачастую остро ставит вопрос о прочности получаемых узлов и деталей. Ведь в ряде случаев отсутствие равнопрочности в соединениях может поставить под сомнение целесообразность исполь-

зования высокопрочных материалов для изготовления конструкции.

В результате многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, которые ведутся уже не одно десятилетие, установлено, что сознательное регулирование геометрических размеров и механических свойств мягкой прослойки позволяет повысить механические свойства всего сварного соединения и даже обеспечить его равнопрочность с основным металлом. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен для случая нагружения соединений растяжением (сжатием) [1, 2]. Повышение прочности сварного соединения при этом объясняется эффектом контактного упрочнения мягкой прослойки, заключающимся в возникновении в ней объемного напряженного состояния вследствие сдерживания пластических деформаций в прослойке соседними, более прочными участками сварного соединения.

Цель настоящей работы заключалась в определении диапазонов варьирования параметров мягкой прослойки, обеспечивающих получение равнопрочных стыковых сварных соединений при статическом изгибе. При этом решались следующие задачи:

1) определение параметров мягкой прослойки для получения равнопрочных сварных соединений без дефектов;

2) оценка возможности получения равнопрочных механически неоднородных соединений с дефектом типа непровар.

При решении первой задачи рассматривалась схема стыкового двухстороннего сварного соединения с «мягкими» швами (рис. 1, а). Для сравнения, помимо чистого изгиба, соединения также отдельно нагружали растяжением. Соответствующие расчетные модели, нагруженные изгибом и растяжением, представлены ниже на рис. 1, б, в. В качестве метода теоретического исследования применяли метод конечных элементов (МКЭ), базирующийся на теории пластического течения. Все вычисления производились в программном комплексе ANSYS. Для построения конечно-элементных сеток использовали прямоугольные четырехузловые элементы со сторонами, изменяющимися в пределах от 0,1 В (вдали от контактных границ прослойки) до 0,01 В (в области сварного шва). При анализе принимали, что наплавленный (мягкий – М) и основной (твердый – Т) материалы являются идеально упруго-пластическими. За уровни напряжений, отвечающих участку идеальной пластичности, принимали значения временных сопротивлений материалов (σ_B^M и σ_B^T).

Модели, представленные на рис. 1, б, в, нагружали до околопредельного состояния в условиях плоской деформации. При этом варьировали основные параметры прослойки: $K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M = 1 \dots 5$ (степень механической неоднородности) и $\chi = h/B = 0,05 \dots 0,9$ (относительная толщина прослойки). В ходе вычислений для каждого сочетания вышеуказанных параметров фиксировались значения предельных нагрузок P и $M_{изг}$, а также строились поля пластических деформаций. Для сравнения предельными нагрузками также нагружали аналогичные модели, состоящие из однородного твердого металла. Для чистоты эксперимента во избежание погрешностей вычислений, связанных с искажениями формы конечных элементов, пользовались идентичными сетками. Геометрия и

свойства прослойки регулировалась атрибутами элементов.

Дополнительно выполнялась проверка ранее полученных математических решений для механически неоднородных соединений, а именно:

– условие, обеспечивающее получение равнопрочных соединений при статическом изгибе:

$$\chi_p = 1 / (8K_B); \quad (1)$$

– условие, обеспечивающее получение равнопрочных соединений при статическом растяжении [3]:

$$\chi_p = (2K_B + 1) - \sqrt{(2K_B + 1)^2 - 1} \quad (2)$$

Подробное описание напряженно-деформированного состояния рассматриваемых расчетных моделей и механизма контактного упрочнения было представлено в предыдущей работе [4]. Поэтому далее представлены основные выводы по теме настоящей работы. В результате сравнительного анализа данных численного эксперимента и расчетных вычислений по ранее полученным математическим зависимостям установлено:

1. Существуют три варианта развития пластических деформаций в соединениях с мягкой прослойкой:

– пластическая деформация развивается внутри прослойки как в однородной пластине из мягкого металла (при растяжении $\chi \geq 0,8$, при изгибе $\chi \geq 0,5$) – рис. 2, а;

– пластическая деформация прослойки ограничивается соседними участками твердого металла (при растяжении $\chi < 0,8$, $K_B \geq 3$, при изгибе $\chi < 0,5$, $K_B \geq 3$) – рис. 2, б;

– пластическая деформация происходит в мягкой прослойке с вовлечением более прочного металла – неполная реализация контактного упрочнения (при растяжении $\chi < 0,8$, $K_B < 3$, при изгибе $\chi < 0,5$, $K_B < 3$) – рис. 2, в.

2. Получение равнопрочных механически неоднородных сварных соединений возможно при

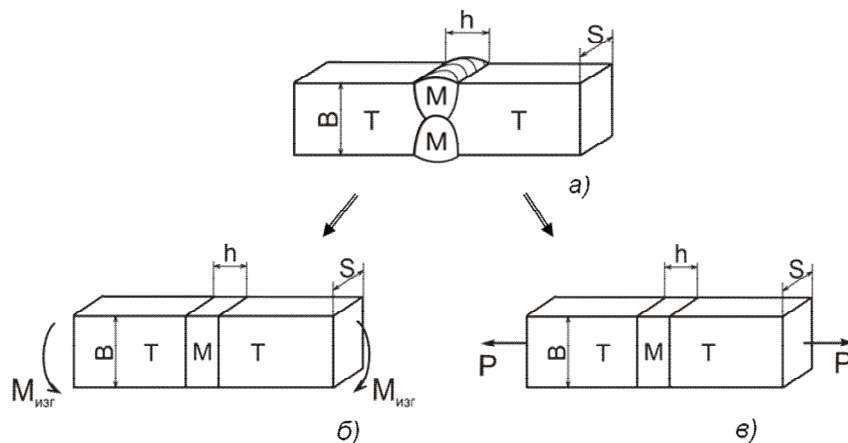


Рис. 1. Схема стыкового сварного соединения с «мягкими» швами (а) и соответствующие расчетные модели, нагруженные изгибом (б) и растяжением (в)

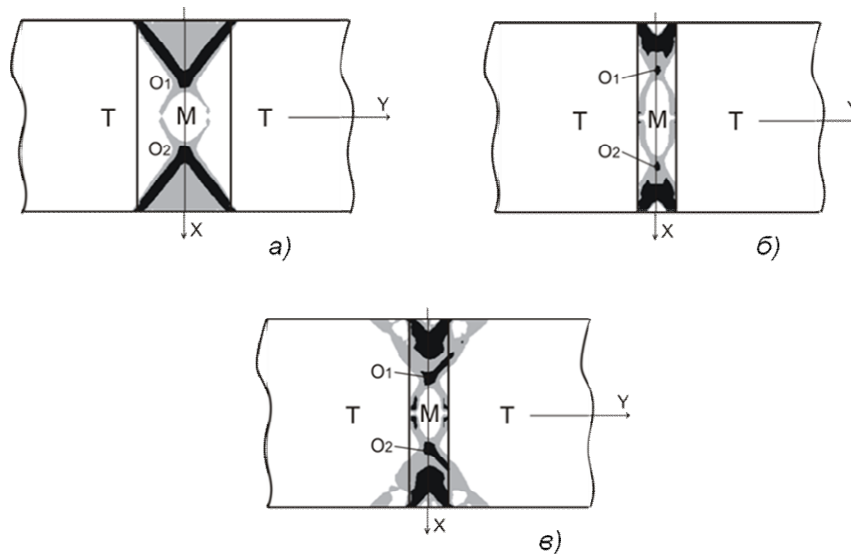


Рис. 2. Поля пластических перемещений соединений с мягкой прослойкой, нагруженных изгибом: а – $\chi \geq 0,5$; б – $K_b \geq 3$ и $\chi < 0,5$; в – $K_b < 3$ и $\chi < 0,5$

значениях относительной толщины прослоек χ_p не более 0,1.

3. Диапазон толщин соединяемых пластин, для которых в реальных условиях можно получить равнопрочные соединения за счет эффекта контактного упрочнения, составляет от 50 мм и более для растяжения и от 80 мм и более для изгиба. Эти диапазоны могут быть расширены за счет применения специальных методов сварки, позволяющих получить меньшую ширину шва при значительной глубине проплавления (электронно-лучевая сварка).

4. Расчетные зависимости (1) и (2) для определения χ_p равнопрочных соединений, обеспечивают достаточную точность решений. При этом они обеспечивают незначительно большую консервативность полученных результатов по сравнению с данными МКЭ.

Для решения второй задачи рассматривались схемы стыковых соединений с краевым дефектом типа непровар (односторонняя сварка в узкий зазор с неполным проплавлением) и центральным дефектом (двухсторонняя сварка в узкий зазор с неполным проплавлением). В ходе исследований установлено, что краевой дефект с относительными размерами $l/B \geq 0,1$, расположенный в растя-

нутой зоне мягкой прослойки, в значительной степени снижает работоспособность соединения и с этой точки зрения представляет меньший интерес, чем центральный непровар. Схема последнего представлена на рис. 3.

В качестве расчетных использовали те же самые модели, что и при рассмотрении первой задачи, добавив в них центральную несплошность в форме непровара с относительными размерами $l/B = 0,06 \dots 0,5$. В рамках исследования фиксировали влияние изменения размеров дефекта (l/B) на поле пластических перемещений и распределение напряжений (τ_{xy} , σ_y , σ_x) в зоне мягкой прослойки при деформировании моделей до предельного пластического состояния. Изучение кинетики изменений НДС с ростом относительных размеров l/B непровара позволило дополнительно выявить граничные условия, при которых существуют характерные напряженные состояния соединений. В частности, для $K_b < 4$ и $\chi \ll 0,3$ (наиболее сложное напряженное состояние с неполной реализацией контактного упрочнения) было установлено, что появление в прослойке подобного дефек-

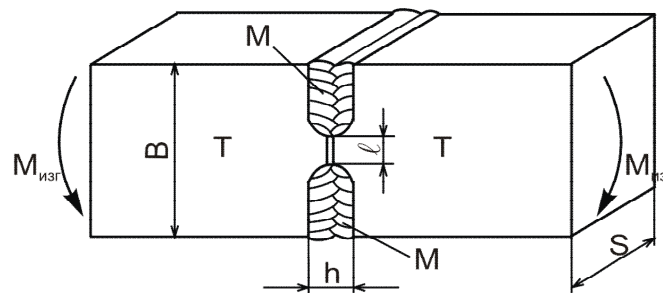


Рис. 3. Схема сварного соединения, выполненного по щелевой разделке, с непроваром в центральной части мягкой шва

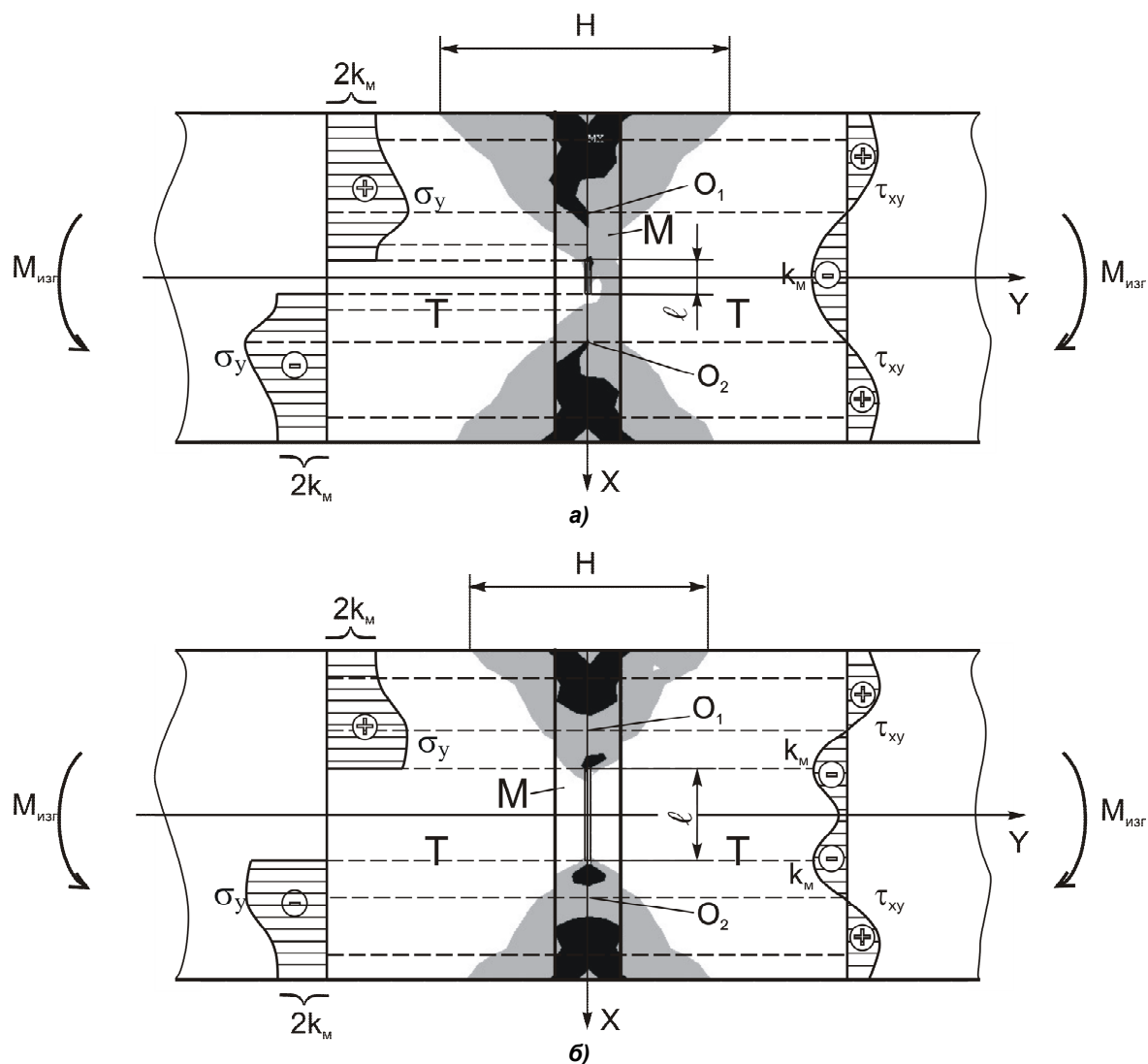


Рис. 4. Поля пластических перемещений стыковых сварных соединений с дефектом в центральной части мягкой прослойки ($K_B = 1,45$), нагруженных изгибом, полученные МКЭ: а – $l/B < \chi$; б – $l/B \geq \chi$

та малых размеров ($l/B < \chi$) приводит к незначительному изменению распределения внутренних напряжений на участке в области нейтральной оси Y (между характерными точками O_1 и O_2 на рис. 4). При этом по концам концентратора возникают области «пластического застоя» (участки равномерного напряженного состояния), протяженность которых уменьшается с ростом параметра l/B до значений $\approx \chi$ (рис. 4, а). Распределение касательных напряжений τ_{xy} в указанной области вблизи контактных границ практически идентично бездефектному соединению. Участки, прилегающие к свободным поверхностям соединения, не претерпевают каких-либо заметных изменений. Таким образом, в указанном диапазоне $l/B < \chi$ влияние дефекта ограничивается изменением контактного упрочнения на участке возле нейтральной оси Y соединения и фактически принимает свои минимальные значения. Увеличение размера концен-

тратора до значений $l/B \geq \chi$ ведет к исчерпанию характерных пластических зон по концам дефекта, исчезновению «пластического шарнира» и увеличению размера участка O_1O_2 (рис. 4, б). Последнее ведет к снижению эффекта контактного упрочнения по всему сечению прослойки.

Таким образом, установлено, что даже при наличии в мягкой прослойке центрального дефекта типа непровар возможно получение равнопрочных соединений. Математически условия получения равнопрочных соединений можно описать следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{l}{B} < \chi; \chi_p^l &= \frac{1}{4 \left\{ (2K_B - 1) \left[1 - (l/B)^2 \right] + 1 \right\}}; \\ \frac{l}{B} \geq \chi; \chi_p^l &= \frac{1 - l/B}{4(2K_B - 1) + \frac{1 - l/B}{1 + l/B} + 2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Однако в реальных условиях получить равнопрочное соединение с относительным размером дефекта $l/B \geq 0,25$ проблематично. Поэтому условие (3) с практической точки зрения требует корректировки. В остальных диапазонах варьирования размера центрального дефекта результаты численного эксперимента хорошо согласуются с расчетными данными. Следует также отметить, что при развитых пластических деформациях в зоне сжатия может иметь место «захлапывание» берегов дефекта. При этом происходит перераспределение нормальных σ_x , σ_y и касательных τ_{xy} напряжений по объему прослойки, а следовательно, и рост величины предельной нагрузки. Неучет данного обстоятельства при оценке несущей способности сварных соединений с дефектом в центре шва идет в запас прочности.

Литература

1. Бакиш, О.А. Влияние степени механической неоднородности на вязкую прочность сварных соединений при растяжении / О.А. Бакиш, Т.В. Кульневич // Физика и химия обработки материалов. – 1973. – № 1. – С. 23–27.
2. Козут, Н.С. Несущая способность сварных соединений / Н.С. Козут, М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев. – Львов: Свит, 1991. – 184 с.
3. Шахматов, М.В. Прочность механически неоднородных сварных соединений / Д.М. Шахматов. – Челябинск, ООО «Абрис-Принт», 2008. – 223 с.
4. Айметов, С.Ф. Оценка влияния параметров мягкой прослойки на прочность стыковых сварных соединений, нагруженных изгибом / С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й науч. конф. Секции техн. наук. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ. – 2009. – Т. 2. – С. 86–89.

Айметов Сергей Фаритович, канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; latin_control@mail.ru.

Айметов Фарит Григорьевич, старший преподаватель кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; latin_control@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 января 2015 г.

THE STRENGTH OF BUTT JOINTS WEAKENED BY SOFT INTERLAYER UNDER BENDING LOAD

S.F. Aymetov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, latin_control@mail.ru,
F.G. Aymetov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, latin_control@mail.ru

The problem of mechanical heterogeneity of butt joints, that is, the influence of the soft interlayer parameters on the stress-strain state of the joints under bending load was studied. It is known, that the regulation of the geometrical dimensions and mechanical properties of the soft interlayer can improve mechanical properties of a joint by local strengthening. It can even provide the joints of uniform strength. The purpose of this work was to determine the ranges of parameters of the soft interlayer, providing butt joints of uniform strength under static bending. The following tasks had to be solved: 1) to determine the parameters of the soft interlayer in order to get joints of uniform strength without defects; 2) to assess the possibility of obtaining joints of uniform strength that are mechanically heterogeneous with lack of fusion. The research was performed using the finite element analysis based on the theory of plastic flow and the glide lines method. This paper describes the most characteristic interlayer stress states with defect and without it. The mathematical solutions were verified and boundary conditions of their application were refined. In particular, it was found that in reality it is possible to obtain a significant effect of local strengthening only on thick parts with the requirements for the thickness of the parts under bending load being one and a half times higher than for tension. It is possible to reduce these requirements with the help of special welding methods. There is also a possibility to get joints of uniform strength if there is a central defect in soft interlayer of a lack of fusion type. The results of this research can be used in mechanical engineering in the production of designs for the chemical and petrochemical industry, power equipment, and structures for the aerospace industry.

Keywords: butt joints, mechanical heterogeneity, soft interlayer, bending, strength, local strengthening, lack of fusion.

References

1. Bakshi O.A., Kul'nevich T.V. Influence of the Degree of Mechanical Heterogeneity on the Ductile Strength of Welded Joints Under Tension]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1973, no. 1, pp. 23–27. (in Russ.)
2. Kogut N.S., Shakhmatov M.V., Erofeev V.V. *Nesushchaya sposobnost' svarnykh soedineniy* [Load-Carrying Capacity of Welded Joints]. Lvov, Svit Publ., 1991. 184 p.
3. Shakhmatov M.V., Shakhmatov D.M. *Prochnost' mekhanicheskii neodnorodnykh svarnykh soedineniy* [The Strength of Mechanically Heterogeneous Welded Joints]. Chelyabinsk, Abris-Print Publ., 2008. 223 p.
4. Aymetov S.F., Aymetov F.G. *Otsenka vliyaniya parametrov myagkoy prosloyki na prochnost' stykovykh svarnykh soedineniy, nagruzhennykh izgibom* [Evaluation of the Influence of the Parameters of the Soft Layer on the Strength of Butt-Welded Joints Loaded by Bending]. *Nauka YuUrGU: Materialy 61-y nauchnoy konferentsii. Sektsii tekhnicheskikh nauk* [Science in the South Ural State University: Materials of the 63th Scientific Conference. Sections of Engineering]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2009, pp. 86–89. (in Russ.)

Received 14 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Айметов, С.Ф. Прочность стыковых сварных соединений, ослабленных мягкой прослойкой, при действии изгибающей нагрузки / С.Ф. Айметов, Ф.Г. Айметов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 107–112.

REFERENCE TO ARTICLE

Aymetov S.F., Aymetov F.G. The Strength of Butt Joints Weakened by Soft Interlayer under Bending Load. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 107–112. (in Russ.)