

УДК 539.3; 621.7

## УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ, ПОЛУЧЕННОГО ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ, ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

С. Сидхартх, Т. Сентхилкумар

Инженерный колледж Университета Анны, 620024 Тиручираппалли, Индия  
E-mails: sksmsiddharth1@yahoo.in, kmtsenthil@gmail.com

Исследуется долговечность соединения алюминия марки Al5052 и меди марки C10100, полученного точечной сваркой трением с перемешиванием при различных значениях технологических параметров процесса: скорости вращения инструмента, времени задержки инструмента и глубины его погружения. Предложена модель центрального позиционного планирования, предназначенная для определения эмпирических соотношений между параметрами процесса и усталостной долговечностью соединения (числом циклов нагружения соединения, необходимых для его разрушения). Для верификации предложенной модели проведен дисперсионный анализ. Для определения технологических параметров, обеспечивающих максимальное значение усталостной прочности, использован метод поверхности отклика. Проведено сравнение результатов, полученных с использованием предложенной модели, и экспериментальных данных. Показано, что при определении усталостной прочности погрешность не превышает 4 %.

**Ключевые слова:** точечная сварка трением с перемешиванием, алюминий, медь, усталость, оптимизация.

DOI: 10.15372/PMTF20180216

**Введение.** Метод точечной сварки трением с перемешиванием (ТСТП), разработанный и запатентованный Лондонским институтом сварки (Великобритания), является модификацией метода точечной сварки [1]. Алюминий и алюминиевые сплавы широко используются в автомобильной промышленности, поскольку позволяют создавать легкие высокопрочные детали [2]. Точечная сварка трением включает три этапа. На первом этапе вращающийся с большой скоростью инструмент, изготовленный из тугоплавкого материала, погружается в наложенные друг на друга свариваемые заготовки и прокалывает (прошивает) их. На втором этапе инструмент в течение определенного промежутка времени удерживается в погруженном состоянии для увеличения сцепления трением. На третьем этапе инструмент удаляется из зоны сварки [3].

Проведены многочисленные исследования свойств соединений как однородных, так и разнородных материалов, полученных методом ТСТП. В работе [4] изложены результаты экспериментальных исследований ТСТП алюминиевых (Al6061) и стальных листов. В экспериментах использовался скошенный пуансон. Исследовались моды разрушения и моды распространения трещины при действии усталостных нагрузок различного типа.

В [5] выполнено сравнение усталостных свойств соединений алюминиевого сплава Al2204 из двух партий, полученных с помощью заклепок и ТСТП. В соединениях, полученных методом ТСТП, трещина распространялась в направлении, перпендикулярном направлению действия нагрузки. В соединениях, полученных с помощью заклепок, имела место фреттинг-коррозия. В работе [6] исследовались усталостные свойства соединений Al–Mg–Si, полученных методом ТСТП, а также механизмы распространения усталостных трещин и изменения, происходящие в ядре зоны сварки. В работе [7] изучалось распространение усталостных трещин вследствие микроструктурных изменений в соединениях алюминиевых сплавов шести марок типа Al6061. Усталостная долговечность оценивалась с использованием закона Париса. В работе [8] исследовалась усталостная прочность соединений листов стали марок B1500HS и M90, полученных методом ТСТП. Установлено, что соединения листов стали марки B1500HS имеют большую усталостную прочность вследствие образования ферритов в нагретой области. Во многих работах для получения требуемых свойств соединений применялись методы оптимизации. В работе [9] для оптимизации параметров процесса диффузионной сварки алюминиевых и магниевых материалов использовался метод поверхности отклика. В [10] этот метод применялся для определения оптимальных параметров процесса нагрева.

В настоящей работе определяются оптимальные параметры процесса ТСТП разнородных материалов (алюминия и меди).

**Используемые материалы и методика экспериментов.** При проведении исследований использовались листы прокатанного алюминиевого сплава Al5052–H32 и листы прокатанной меди марки C10100 толщиной 1,5 мм. Из листов вырезались образцы длиной 100 мм и шириной 30 мм и тщательно очищались от любых примесей. Материалы образцов имели следующий химический состав: сплав Al5052–H32: Mg — 2,3 %, Si — 0,2 %, Mn — 0,1 %, Fe — 0,33 %, Zn — 0,1 %, Cr — 0,26 %, Cu — 0,1 %, Al — 96,61 %; медь марки C10100: Pb — 0,003 %, Sn — 0,002 %, S — 0,004 %, Fe — 0,004 %, Zn — 0,003 %, O — 0,002 %, P — 0,002 %, As — 0,002 %, Cu — 99,978 %. Механические характеристики материалов имели следующие значения: сплав Al5052–H32: температура плавления  $T_{пл} = 605$  °C, плотность  $\rho = 2,68$  г/см<sup>3</sup>, временное сопротивление  $\sigma_B = 228$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 193$  МПа, относительное удлинение  $\varepsilon_B = 18$  %, твердость HV = 68; медь марки C10100:  $T_{пл} = 1083$  °C,  $\rho = 8,94$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_B = 320$  МПа,  $\sigma_T = 285$  МПа,  $\varepsilon_B = 20$  %, HV = 82.

Эксперименты по точечной сварке трением с перемешиванием проводились на вертикальном фрезерном станке с числовым программным управлением. Для точечной сварки трением с перемешиванием алюминиевых и медных образцов использовался инструмент из тугоплавкой стали марки H13, состоящий из опорного цилиндра диаметром 16 мм и цилиндрического пуансона диаметром 6 мм и высотой 1,5 мм (рис. 1).

В данной работе исследовалось влияние скорости вращения инструмента  $\omega$ , времени задержки (проковки) инструмента  $t_{dp}$  и глубины погружения пуансона  $h_{pd}$  на качество соединения [11]. Сила, действующая на шпиндель и позволяющая проколоть (прошить) соединенные внахлест образцы, во всех экспериментах была постоянной и равной 1000 Н. Для того чтобы предотвратить удар шпинделя по образцам, он перемещался в осевом направлении со скоростью, равной 15 мм/мин. Выбранные технологические параметры процесса обеспечивали приемлемое качество сварки и достаточную прочность соединения на растяжение.

Эксперименты на усталость образцов проводились на электрогидравлической машине в соответствии со стандартом ASTM D3479M. К образцам прикладывалась синусоидальная нагрузка с частотой 10 Гц. Отношение минимальной нагрузки к максимальной равно  $R = 0,1$ . В захватах машины образцы крепились таким образом, чтобы исключить их из-

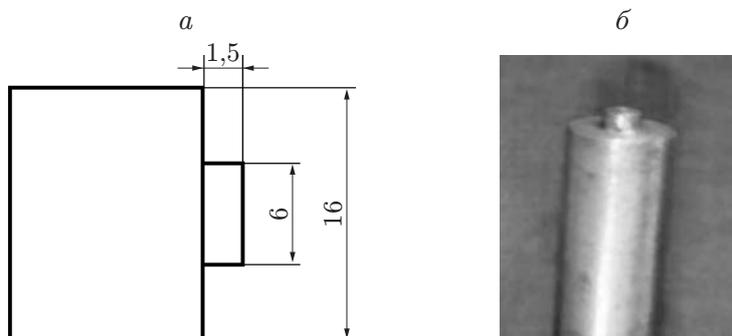


Рис. 1. Размеры (а) и общий вид (б) инструмента, используемого в экспериментах по точечной сварке трением с перемешиванием

Таблица 1

Диапазоны значений технологических параметров ТСТП соединений разнородных материалов Al5052 и С10100			
Уровень	$\omega$ , об/мин	$t_{dt}$ , с	$h_{pd}$ , мм
-1,68	730	8	1,5
-1,00	871	9	1,7
0	1080	11	2,0
1,00	1288	12	2,3
1,68	1430	14	2,5

гиб. Число циклов нагружения в экспериментах составляло  $2 \cdot 10^7$ , максимальная нагрузка выбиралась таким образом, чтобы обеспечить живучесть образца в течение по крайней мере  $10^4$  циклов нагружения. В предварительных экспериментах максимальная нагрузка составляла 800 Н. Используемые в экспериментах диапазоны значений технологических параметров ТСТП приведены в табл. 1. Эти диапазоны были выбраны с учетом данных, приведенных в литературе, и результатов предварительных экспериментов.

При использовании центральной композиционной матрицы планирования число различных комбинаций факторов должно быть максимально возможным. В данной работе используются 20 закодированных условий и пятиуровневая центральная композиционная модель планирования с восьмью точками, шестью звездными точками и шестью центральными точками. Число 1,682 было закодировано в качестве максимального положительного значения фактора, число  $-1,682$  — в качестве минимального отрицательного значения фактора. Промежуточные значения вычислялись с использованием соотношения, предложенного в [12]:

$$H_i = 1,682[2H - (H_{\max} + H_{\min})]/(H_{\max} - H_{\min}).$$

Здесь  $H_i$  — закодированное значение реальной величины  $H$ , принадлежащее отрезку  $[H_{\min}, H_{\max}]$ . В табл. 2 приведена центральная композиционная матрица с 20 наборами закодированных факторов. В соответствии с приведенным в табл. 2 набором закодированных факторов было изготовлено 20 образцов алюминиевых и медных соединений. Образцы для испытаний на усталость были изготовлены в соответствии со стандартом ASTM (American Society for Testing Materials (Американское общество по испытанию материалов)). В последней графе табл. 2 указано число циклов нагружения  $N_f$ , необходимых для разрушения соединения, выполненного в соответствии со значениями факторов  $\omega$ ,  $t_{dt}$ ,  $h_{pd}$ .

**Результаты исследования и их обсуждение.** Данные, приведенные в табл. 2, были использованы при построении корреляционной зависимости числа циклов нагруже-

Таблица 2

Центральная композиционная матрица планирования и результаты эксперимента

Номер эксперимента	Значение кодированного фактора			Значение реального фактора			$N_f \cdot 10^{-6}$
	$\omega$ , об/мин	$t_{dt}$ , с	$h_{pd}$ , мм	$\omega$ , об/мин	$t_{dt}$ , с	$h_{pd}$ , мм	
1	1	-1	-1	1288	9	1,7	1,762
2	0	0	0	1080	11	2,0	2,403
3	1	1	1	1288	12	2,3	1,950
4	1	1	-1	1288	12	1,7	1,903
5	-1	1	1	871	12	2,3	2,168
6	-1,68	0	0	730	11	2,0	1,918
7	0	0	-1,68	1080	11	1,5	1,606
8	0	0	0	1080	11	2,0	2,325
9	0	1,68	0	1080	14	2,0	2,215
10	0	0	0	1080	11	2,0	2,418
11	0	0	0	1080	11	2,0	2,371
12	1,68	0	0	1430	11	2,0	2,278
13	-1	-1	-1	871	9	1,7	1,153
14	0	0	0	1080	11	2,0	2,434
15	0	0	1,68	1080	11	2,5	2,309
16	-1	1	-1	871	12	1,7	2,262
17	0	0	0	1080	11	2,0	2,387
18	-1	-1	1	871	9	2,3	1,887
19	0	-1,68	0	1080	8	2,0	1,809
20	1	-1	1	1288	9	2,3	2,715

ния до разрушения  $N_f$  (функции отклика) соединений разнородных материалов Al5086–С10100, полученных методом ТСТП, от технологических параметров процесса (факторов): скорости вращения инструмента  $\omega$ , глубины погружения инструмента  $h_{pd}$  и времени задержки инструмента  $t_{dt}$ .

Уравнение поверхности отклика  $N_f$  как функция факторов записывается в виде [12, 13]

$$N_f = a_0 + a_1\omega + a_2t_{dt} + a_3h_{pd} + a_{12}\omega t_{dt} + a_{13}\omega h_{pd} + a_{23}t_{dt}h_{pd} + a_{11}\omega^2 + a_{22}t_{dt}^2 + a_{33}h_{pd}^2,$$

где  $a_0$  — среднее значение отклика;  $a_1, a_2, \dots$  — коэффициенты при линейных и квадратичных членах.

С использованием математических методов стратегического планирования построены корреляционные зависимости между основными параметрами ТСТП и усталостными свойствами соединения (числом циклов нагружения до разрушения). Значимые и незначимые коэффициенты в корреляционной зависимости были определены на основе  $t$ -критерия Стьюдента. Все вычисления выполнены с использованием пакета ANOVA. В результате получена следующая эмпирическая зависимость:

$$N_f = 2,39 \cdot 10^6 + 1,07 \cdot 10^5\omega + 1,06 \cdot 10^5t_{dt} + 2,06 \cdot 10^5h_{pd} - 2,52 \cdot 10^5\omega t_{dt} + 4,49 \cdot 10^4\omega h_{pd} - 2,316 \cdot 10^5t_{dt}h_{pd} - 1,08 \cdot 10^5\omega^2 - 1,35 \cdot 10^5t_{dt}^2 - 1,58 \cdot 10^5h_{pd}^2.$$

На рис. 2 приведена диаграмма рассеяния, свидетельствующая о хорошей корреляции между реальным числом циклов нагружения до разрушения соединения  $N_f^r$  и его предсказанным значением  $N_f^p$ .

Для определения оптимальных значений трех технологических параметров, обеспечивающих максимальное число циклов нагружения до разрушения, использовался метод, основанный на понятии поверхности отклика, а также методы статистического анализа.

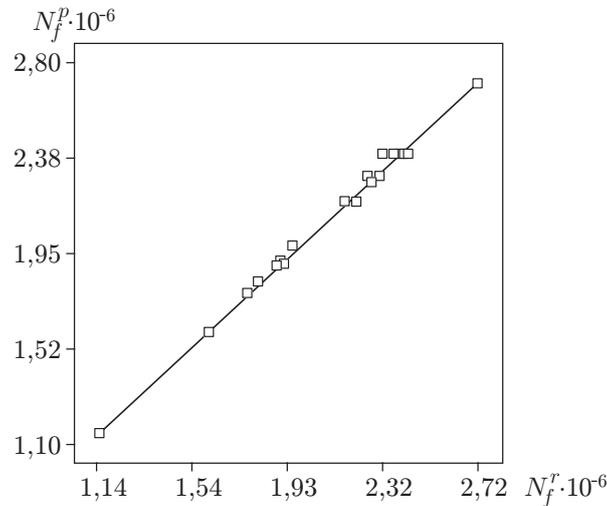


Рис. 2. Корреляционная зависимость между реальным  $N_f^r$  и предсказанным  $N_f^p$  числом циклов нагружения до разрушения

Таблица 3

Верификация предложенной модели ( $\omega = 1265$  об/мин,  $h_{pd} = 2,35$  мм,  $t_{dt} = 8,5$  с)

Номер эксперимента	$N_f^p$	$N_f^r$
1		2 719 157
2	2 720 000	2 716 704
3		25 721 610

По форме изолиний можно определить характер стационарной точки, а именно: является ли она точкой минимума, точкой максимума или седловой точкой. Построение изолиний было выполнено с помощью программного обеспечения. На рис. 3 приведены изолинии поверхности отклика в плоскости двух факторов при среднем значении третьего фактора и соответствующие поверхности отклика. Определив форму изолиний, можно вычислить с достаточной точностью оптимальные значения искомых параметров. Круговая форма изолиний свидетельствует о независимости параметров, эллиптическая форма — об их взаимосвязи [14].

В результате анализа построенных изолиний и поверхностей определено число циклов нагружения до разрушения соединения Al5052–С10100. При максимальной амплитуде нагрузки, равной 800 Н, число циклов равно 2 725 425. Соответствующие оптимальные параметры процесса следующие:  $\omega = 1265$  об/мин,  $t_{dt} = 8,5$  с,  $h_{pd} = 2,35$  мм. Для проверки результатов, полученных с использованием предложенной модели, проведены три эксперимента по определению долговечности соединений с оптимальными значениями технологических параметров. Результаты сравнения числа циклов нагружения, полученных в эксперименте, с числом циклов, определенных с использованием предложенной модели, приведены в табл. 3. Поскольку погрешность не превышает 4 %, можно утверждать, что предложенная модель позволяет с большой точностью определять оптимальные значения технологических параметров.

**Заключение.** В результате проведенного исследования получены следующие результаты. С использованием центральной композиционной модели планирования эксперимента определена зависимость числа циклов нагружения, необходимого для разрушения соединения разнородных материалов Al5052 и С10100, полученного точечной сваркой трением

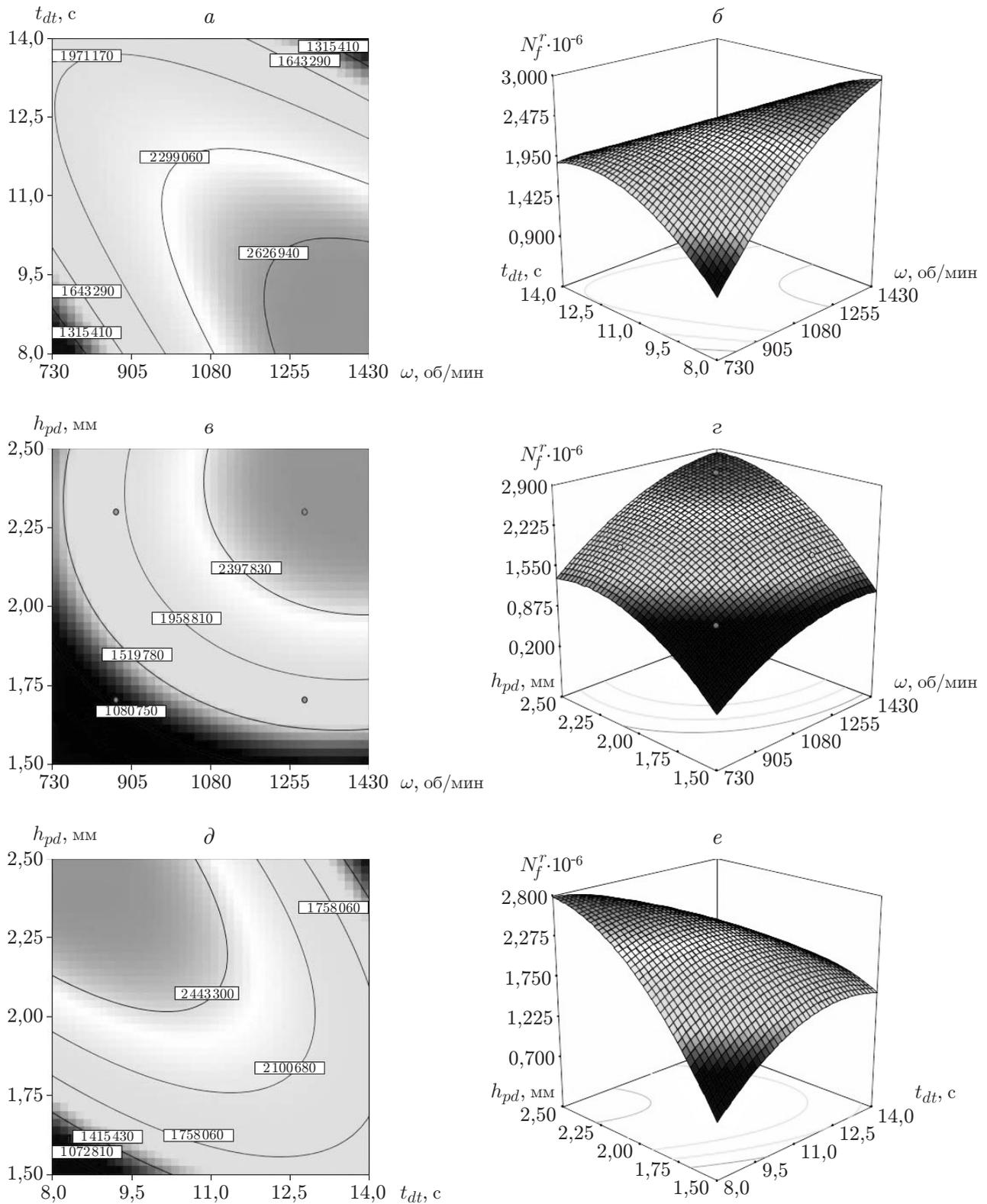


Рис. 3. Изолинии (а, в, д) и поверхности отклика (б, г, е) числа циклов нагружения до разрушения:

а — изолинии в плоскости  $(\omega, t_{dt})$ , б — поверхность отклика над плоскостью  $(\omega, t_{dt})$ ,  
 в — изолинии в плоскости  $(\omega, h_{pd})$ , г — поверхность отклика над плоскостью  $(\omega, h_{pd})$ ,  
 д — изолинии в плоскости  $(t_{dt}, h_{pd})$ , е — поверхность отклика над плоскостью  $(t_{dt}, h_{pd})$

с перемешиванием, от скорости вращения инструмента, времени его задержки и глубины погружения.

Установлено, что при скорости вращения инструмента  $\omega = 1265$  об/мин, времени его задержки  $t_{dt} = 8,5$  с и глубине погружения  $h_{pd} = 2,35$  мм достигается максимальная долговечность соединения. При этом число циклов нагружения, необходимое для разрушения соединения, равно  $2,72 \cdot 10^6$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Pat. US 5460317.** Friction welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith, C. J. Dawes. L.: Welding Inst., 1995.
2. **Matsugi K., Wang Y., Hatayama T., et al.** Application of electric discharge process in joining aluminum and stainless steel sheets // J. Materials Proc. Technol. 2003. V. 135. P. 75–82.
3. **Badarinarayan H.** Fundamentals of friction stir spot welding: PhD Thesis. S. l.: Missouri Univ., 2009.
4. **Uematsu Y., Tokaji K., Tozaki Y., Nakashima Y.** Fatigue behaviour of dissimilar friction stir spot weld between A6061 and SPCC welded by a scrolled groove shoulder tool // Procedia Engng. 2010. V. 2. P. 193–201.
5. **Malafaia A. M., Milan M. T., Oliveira M. F., Spinelli D.** Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy // Procedia Engng. 2010. V. 2. P. 1815–1821.
6. **Uematsu Y., Tokaji K., Murata S., et al.** Fatigue behaviour of friction stir spot welded Al–Mg–Si alloy // J. Soc. Materials Sci. 2007. V. 56, N 6. P. 537–543.
7. **Wang D. A., Chen C. H.** Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets // J. Materials Proc. Technol. 2009. V. 209, N 1. P. 367–375.
8. **Wang B., Duan Q. Q., Yao G., et al.** Fatigue fracture behaviour of spot welded B1500HS steel under tensile shear load // Fatigue Fracture Engng Materials Structures. 2015. V. 1, N 1. P. 1–8.
9. **Balasubramanian V., Joseph Fernandus M., Senthilkumar T.** Development of processing windows for diffusion bonding of aluminium/magnesium dissimilar materials // Weld World. 2013. V. 57. P. 526–539.
10. **Grum J., Slabe J. M.** The use of factorial design and response surface methodology for fast determination of optimal heat treatment conditions of different Ni–Co–Mo surfaced layers // J. Materials Proc. Tech. 2004. V. 155. P. 2026–2032.
11. **Lakshminarayanan A. K., Annamalai V. E., Elangovan K.** Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints // J. Materials Res. Technol. 2015. V. 4, N 3. P. 262–272.
12. **Montgomery D. C.** Design and analysis of experiments. N. Y.: John Wiley and Sons, 2001.
13. **Paventhana R., Lakshminarayanan P. R., Balasubramanian V.** Prediction and optimization of friction welding parameters for joining aluminium alloy and stainless steel // Trans. Nonferrous Metals Soc. China. 2011. V. 21. P. 1480–1485.
14. **Miller J. E. F.** Probability and statistics for engineers / J. E. F. Miller, R. Johnson. New Delhi: Prentice Hall, 1996.

*Поступила в редакцию 24/V 2017 г.,  
в окончательном варианте — 30/V 2017 г.*