

УДК 621.791.763.1/2

**ВЫБОР РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ**

*д-р техн. наук, проф. В.П. БЕРЕЗИЕНКО, канд. техн. наук С.М. ФУРМАНОВ,
канд. техн. наук, доц. С.В. БОЛОТОВ, Т.И. БЕНДИК
(Белорусско-Российский университет, Могилёв)*

Проведена оценка адекватности предложенных математических моделей контактной точечной и рельефной сварки. В результате выполненных расчётов обоснован выбор основных параметров режима Т-образной рельефной сварки стержней с листовыми деталями. Исследования образования вмятин от токоподводящих электродов позволили предложить способ контактной точечной сварки для уменьшения деформаций лицевых поверхностей изделий, предусматривающий использование кольцевого пуансона для обжатия периферийной зоны соединения. Определены параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей разной толщины с обжатием периферийной зоны, обеспечивающие снижение глубины вмятины.

Данная статья посвящена анализу результатов теоретических исследований, проведенных на основе разработанных математических моделей контактной точечной и рельефной сварки, а также оценке их адекватности.

Основная часть. При рассмотрении кинетики образования соединения при Т-образной рельефной сварке наибольший интерес представляет изменение плотности тока в зоне контакта деталь – деталь, связанное с процессом деформации рельефа и динамичным изменением размеров контактной поверхности.

В качестве примера приведем результаты моделирования рельефной сварки стержня диаметром 16 мм с листовой деталью толщиной 3 мм при следующих параметрах режима: угол рельефа $\alpha = 150^\circ$; сварочный ток $I_{св} = 22$ кА; время протекания сварочного тока $\tau_{св} = 0,6$ с; время модуляции сварочного тока $\tau_{мод} = 0,08$ с; усилие сжатия электродов $F_{св} = 14$ кН.

Из результатов моделирования видно, что в момент включения сварочного тока (рис. 1, $\tau = 0,16$ с) наблюдается значительная концентрация сварочного тока из-за малой начальной площади контакта. Как показали проведенные нами вычислительные эксперименты, начальная площадь контакта составляет не более 5...10 % от общей площади сварки, т.е. в среднем диаметр холодного контакта деталь – деталь не превышает 0,5...1 мм. Следовательно, при выборе величины сварочного тока необходимо исходить из условия обеспечения допустимой плотности тока в зоне упомянутого контакта. Стабильность процесса сварки на данном этапе зависит от соблюдения следующих условий [1, 2]:

- наличие обязательной модуляции сварочного тока, компенсирующей малый диаметр контакта деталь – деталь $d_k^{до}$ в момент включения сварочного тока;

- нарастание величины сварочного тока должно соответствовать изменению диаметра контакта $d_k^{до}$ при деформации рельефа.

Следует отметить, что результаты протекания сварки на данной стадии формирования сварного соединения находятся в непосредственной зависимости от формы и размеров применяемых рельефов [3, 4].

При дальнейшем нагреве металла рельефа до температур разупрочнения и переходе его в пластическое состояние происходит соответствующий рост контактной поверхности деталь – деталь, что приводит к перераспределению и снижению плотности тока (рис. 1, $\tau = 0,4$ с). В конце процесса сварки плотность тока распределена практически равномерно по сечению свариваемых деталей (см. рис. 1, $\tau = 0,5$ с).

Величина и характер распределения плотности тока оказывают определяющее влияние на температурное поле в зоне сварного соединения. При нормальном ходе процесса сварки наблюдается процесс глубинного разогрева, значительной пластической деформации рельефа и осадки на всю его высоту, в то время как в листовой детали имеет место лишь эффект деформации контактной поверхности. При этом наблюдается несимметричность температурного поля в деталях относительно зоны сварного соединения (рис. 2). Это отличие вызвано разными условиями теплоотвода по обе стороны от поверхности контакта: листовая деталь имеет больший диаметр контакта с электродом и зона сварки расположена ближе к охлаждаемым поверхностям.

Оценку адекватности и значимости разработанной математической модели проводили с помощью регрессионного анализа. В качестве входной управляемой переменной выступало время протекания сварочного тока $\tau_{св}$. Геометрические параметры сварного соединения, а также форма и размеры применяемого рельефа, величина сварочного тока $I_{св}$, усилие сжатия электродов $F_{св}$ сохранялись постоянными. Выходной переменной для оценки значимости и адекватности математической модели являлся диаметр

контакта деталь – деталь $d_k^{\text{до}}$, величина которого с достаточной степенью точности определяется по макрошлифам соединений на различных стадиях сварки. Для нахождения теоретической зависимости изменения $d_k^{\text{до}}$ в процессе сварки использовалась выходная программная опция CONTACT STATUS, позволяющая идентифицировать узлы математической модели, которые пришли в контакт на данном временном шаге расчета.

Для проведения металлографических исследований при строгом соблюдении параметров режима была осуществлена сварка образцов из низкоуглеродистой стали Ст3. Для подготовки образцов и их травления использовалась общепринятая методика [5]. Размеры образцов выбирались с учетом необходимости охвата всех участков сварного соединения (литого ядра, зоны термического влияния и основного металла, не подвергавшегося термическому влиянию сварки), а также удобства выполнения последующих рабочих операций.

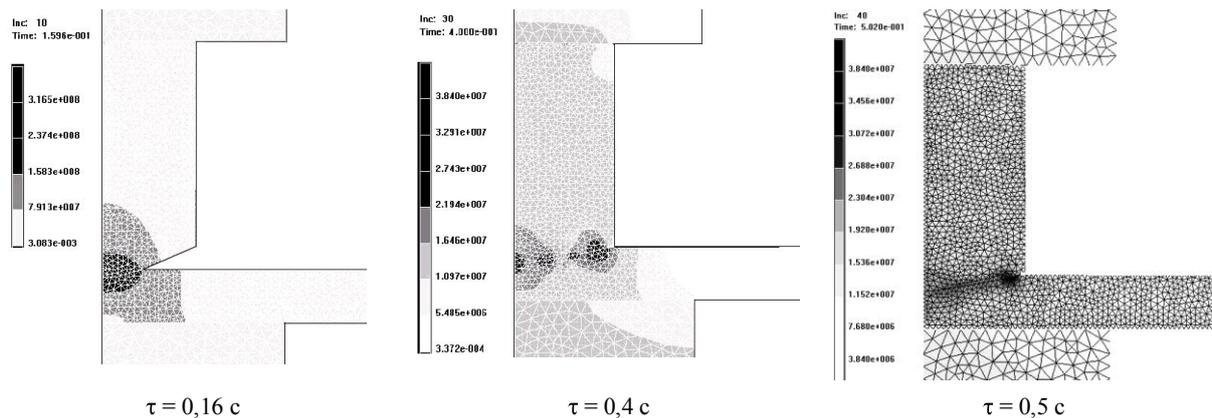


Рис. 1. Распределение плотности тока в процессе сварки

На рисунке 2 в показано сравнение экспериментальных и расчетных данных при сварке стержня диаметром 16 мм с пластиной из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм. Расхождение в расчетных и экспериментальных данных объясняется рядом допущений, принятых при разработке математической модели, а также погрешностью измерений. Причина количественных отклонений в значениях диаметра и высоты зоны проплавления ($\epsilon = 8...10\%$) заключается в недостатке данных о реальных характеристиках материалов свариваемых материалов при температурах, близких к температуре плавления и выше.

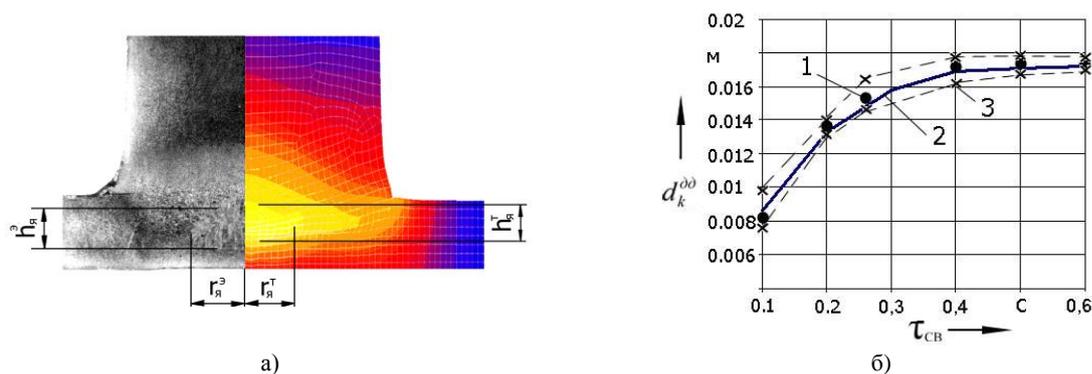


Рис. 2. Оценка адекватности математической модели:

а – макрошлиф сварного соединения и результаты математического моделирования;

б – зависимость диаметра контакта деталь – деталь $d_k^{\text{до}}$ от времени протекания сварочного тока;

1 – среднее значение диаметра контакта в эксперименте; 2 – расчетные значения, полученные по модели;

3 – доверительный интервал оценки в эксперименте: $r_{я}^э$, $r_{я}^т$ – полученный экспериментально и теоретически радиус зоны проплавления; $h_{я}^э$, $h_{я}^т$ – полученная экспериментально и теоретически высота зоны проплавления

Разработанная математическая модель позволила детально изучить механизм образования сварного соединения и теоретически обосновать выбор параметров режима, формы и размеров рельефов при Т-образной сварке стержней с листовой деталью.

В ходе расчётов рассматривались три различные формы рельефа, применяемые на практике: конический, сферический и рельеф в виде усеченного конуса. На основании критерия максимальной пластической деформации в зоне сварного соединения сделан вывод, что при применении рельефов сферической формы и в виде усеченного конуса существенно снижается интенсивность пластической деформации, затруднено удаление оксидов из зоны сварки.

С точки зрения обеспечения прочностных показателей сварного соединения и технологичности изготовления рельефа предпочтение следует отдавать конической форме. При использовании данной формы рельефа единственной геометрической характеристикой рельефа является угол рельефа α .

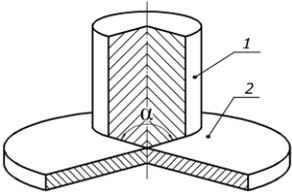
Оптимизация угла рельефа проводилась нами, исходя из необходимости соблюдения следующих условий:

- обеспечение необходимой степени пластической деформации металла рельефа в процессе сварки для удаления или разрушения оксидных пленок на контактных поверхностях;
- ограничение минимальной величины угла с соблюдением допустимой плотности тока и отсутствием начальных выплесков металла;
- ограничение максимальной величины угла с отсутствием преждевременного смятия рельефа и быстрого роста диаметра контакта, снижающего интенсивность тепловыделения в зоне сварки.

На основании ряда модификаций предложенной математической модели, изменяя угол рельефа в пределах от 90 до 170° (обзор литературы по данному вопросу позволил ограничить задачу данными значениями), установлено, что достижение требуемых параметров сварного соединения обеспечивается при углах рельефа 120... 170°, находящихся в следующей функциональной зависимости от диаметра стержня $d_{ст}$ (табл. 1). Данная зависимость позволяет поддерживать оптимальный объем металла рельефа, нагреваемого и деформируемого в процессе сварки [1, 2].

Таблица 1

Рекомендации по выбору угла рельефа в зависимости от диаметра привариваемого стержня

Вид соединения	Диаметр стержня $d_{ст}$, мм	Угол рельефа α , °	Функциональная зависимость
 <p>1 – стержень; 2 – лист</p>	4	130	$\alpha = 105,26 + 12,29 \cdot d_{ст}^{0,5}$
	8	140	
	12	145	
	16	150	
	20	155	
	24	160	
	28	170	

Выбор величины сварочного тока и параметров его модуляции осуществлялся исходя из расчетного значения диаметра контакта деталь – деталь, полученного на основе данных математического моделирования и допустимой плотности тока, равной 250...300 А/мм².

Показано, что при малых значениях $F_{св}$ наблюдаются выплески в начале процесса сварки и решение задачи прекращается. Выплески являются результатом расплавления металла на внутренних поверхностях деталей до формирования литой зоны из-за чрезмерно высокой плотности тока при малой площади контакта d_k^{00} . При значительном увеличении усилия сжатия электродов происходит преждевременное смятие рельефа и интенсивный рост диаметра контакта. Это приводит к снижению плотности тока и величины теплогенерации в зоне образования сварного соединения и, как следствие, уменьшению диаметра зоны проплавления.

Систематизация проведенных теоретических исследований представлена в таблице 2 как рекомендации по выбору основных параметров режима сварки низкоуглеродистых сталей.

В качестве прикладной области для изучения процесса контактной точечной сварки на основе математического моделирования в нашем случае выступает образование вмятин от электродов на лицевых поверхностях свариваемых деталей, которые ухудшают товарный вид выпускаемой продукции, способствуют снижению статической прочности соединений в связи с увеличением зазоров между деталями и эксцентриситета при нагружении. Уменьшение вмятин позволяет избежать дополнительных производственных затрат времени и материалов на заделку и шлифовку лицевых поверхностей изделий [6 – 8].

Анализ графиков изменения температур в контакте деталь – деталь, полученных на основе математической модели, показывает, что в момент выключения сварочного тока температура в центре ядра

достигает 1700...1730 °С. При этом в области пластического пояска температура составляет около 1050...1100 °С, что соответствует состоянию пластического течения металла этой зоны. Максимальная температура в центре контакта электрод – деталь достигает 700...750 °С. При такой температуре заметно снижается предел текучести материала контактирующих поверхностей деталей и электродов, что ведет к образованию глубоких вмятин и износу электродов [9].

Таблица 2

Рекомендуемые параметры режима Т-образной сварки стержня с листовой деталью из низкоуглеродистых сталей

Диаметр стержня, $d_{ст}$, мм	Сварочный ток, $I_{св}$, кА	Усилие сжатия электродов, $F_{св}$, кН	Время протекания сварочного тока, $\tau_{св}$, с	Время модуляции, $\tau_{мод}$, с
6	9	5	0,3	0,04
8	12	6	0,4	0,04
10	15	8	0,5	0,06
12	17	11	0,5	0,06
14	20	12	0,6	0,08
16	22	14	0,6	0,08
18	25	15	0,7	0,08

Для оценки адекватности модели использованы экспериментальные данные о росте размеров литого ядра, полученные по макрошлифам образцов. Эти данные хорошо соответствуют характеру роста литого ядра при моделировании процесса (рис. 3). В качестве примера рассмотрен процесс контактной точечной сварки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм при следующих параметрах режима: сварочный ток $I_{св} = 11,93$ кА; время протекания тока $\tau_{св} = 0,38$ с; диаметр контактной поверхности электрода $d_3 = 8$ мм; усилие сжатия электродов $F_{св} = 7120$ Н.

Общая ошибка, вносимая неточностью исходных данных при задании режима, по величине проплавления составляет 6...8 % (0,1 мм), а по диаметру литого ядра – примерно 7...9 % (0,4 мм).

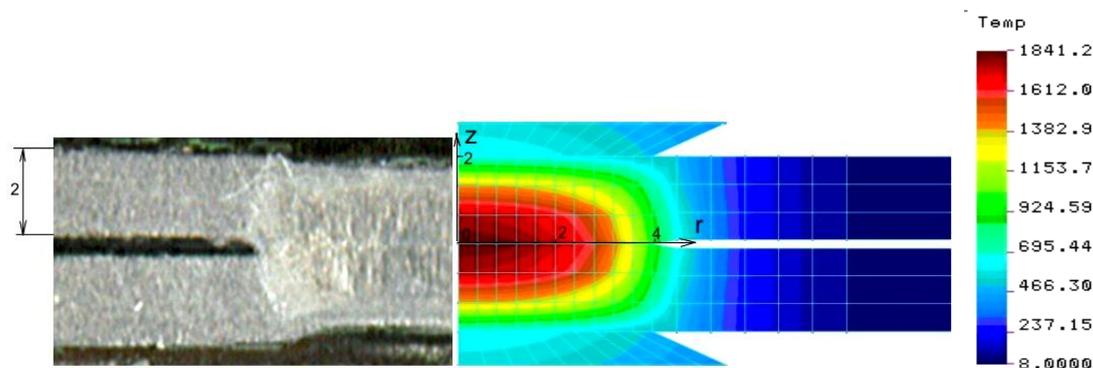


Рис. 3. Сравнение размеров литой зоны на макрошлифе сварного соединения из низкоуглеродистой стали толщиной 2 мм с результатами расчета по модели

Оценку погрешности результатов измерений глубины вмятины многооборотным индикатором производили при помощи эталонной вмятины. Среднее отклонение измеренных значений глубины вмятины от эталона составляло 0,002...0,003 мм, максимальное отклонение 0,0035...0,004 мм.

На рисунке 4 в качестве примера показано сравнение экспериментальных и расчетных значений глубины вмятины $g_{вм}$ в радиальном направлении при сварке пластин из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 1 мм на следующем режиме: $I_{св} = 10,8$ кА; $\tau_{св} = 0,16$ с; $d_3 = 5$ мм; $F_{св} = 3,9$ кН.

Большое рассеяние случайной величины объясняется тем, что даже при стабилизации параметров режима сварки не всегда удается учесть все факторы, влияющие на процесс сварки: наличие оксидной пленки, состояние контактной поверхности электродов, наличие начальных зазоров между деталями и т.д. Расхождение в расчетных и экспериментальных данных объясняется рядом допущений, принятых при разработке математической модели, а также погрешностью измерений.

Стандартное отклонение значений глубины вмятин от её среднего значения в эксперименте составляло 10...12 %. Расхождение расчетных и экспериментальных данных – 8...10 %.

Наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных данных наблюдается на границе контакта электрод – деталь. Это связано с тем, что в процессе сварки большого числа точек края электрода скругляются и его форма постепенно приближается к сферической. В математической же модели при исследовании сварки одной точки это обстоятельство не учитывалось.

Результаты расчетов показывают, что с увеличением жесткости режима сварки заметно уменьшается внедрение подвижного электрода в деталь, что соответственно снижает и конечную глубину вмятин. Так, при наиболее жестком режиме сварки ($I_{св} = 10,5$ кА; $\tau_{св} = 0,16$ с) перемещение электрода составило 0,15 мм; при среднем по жесткости ($I_{св} = 9,5$ кА; $\tau_{св} = 0,2$ с) – 0,19 мм; при мягком режиме ($I_{св} = 7,5$ кА; $\tau_{св} = 0,4$ с) – 0,27 мм.

Таким образом, увеличение жесткости режима является одним из путей уменьшения деформаций, однако приводит к увеличению вероятности появления начальных выплесков.

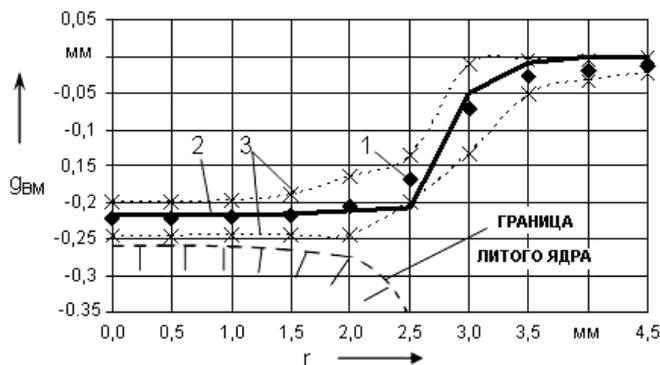


Рис. 4. Размеры вмятины после остывания соединения при сварке деталей из стали Ст3 толщиной 1 мм:

- 1 – среднее значение глубины вмятин в эксперименте; 2 – значения, полученные в модели;
3 – доверительный интервал оценки глубины вмятины в эксперименте

Значительное влияние на характер упругопластического деформирования деталей и образования вмятин при точечной сварке оказывает величина усилия сжатия электродов $F_{св}$. При увеличении $F_{св}$, особенно при применении повышенных усилий проковки, глубина вмятин растет. Одновременно увеличение $F_{св}$ препятствует образованию внутренних выплесков.

На рисунке 5 представлены расчетные графики перемещения верхнего электрода U_z при приложении различных усилий $F_{св}$ во время образования литой зоны и ее остывания, свидетельствующие о значительном росте вмятины при увеличении $F_{св}$. Если при приложении к электродам $F_{св} = 2500$ Н электрод внедрился в деталь на глубину 0,15 мм, то при $F_{св} = 3900$ Н – на 0,25 мм, а при $F_{св} = 5300$ Н – на 0,33 мм. Следовательно, для уменьшения глубины вмятины нужно обеспечить максимально возможное снижение усилия $F_{св}$ без потери равновесия силовой системы электрод – деталь – электрод. Снижение усилия сжатия при этом будет ограничено возникновением начальных выплесков, подгоранием и залипанием электродов в связи с повышением сопротивлений и температуры в зоне контактов электрод – деталь.

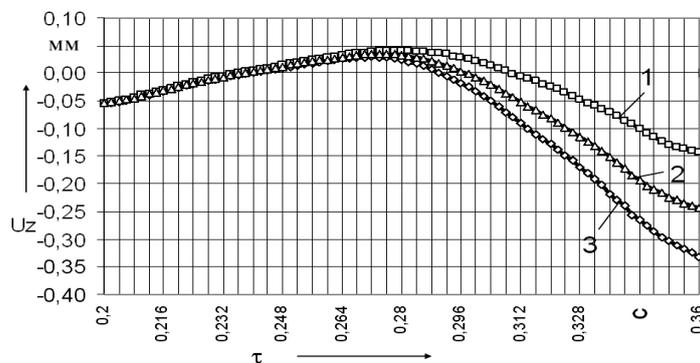


Рис. 5. Перемещения верхнего электрода в зависимости от величины усилия сжатия, прикладываемого к электродам:

- 1 – $F_{св} = 2500$ Н; 2 – усилие $F_{св} = 3900$ Н; 3 – $F_{св} = 5300$ Н

Проведенные исследования процесса образования вмятин позволили предложить способ контактной точечной сварки для уменьшения деформаций лицевых поверхностей изделий, предусматривающий использование кольцевого пуансона для обжатия периферийной зоны соединения и проковки без сило-

вого воздействия со стороны токоподводящего электрода. Циклограмма данного процесса представлена на рисунке 6 [10]. Определены параметры рекомендуемых жестких режимов точечной сварки листов низкоуглеродистых сталей разных толщин с обжатием периферийной зоны соединения по приведенной циклограмме процесса. Реализация данной циклограммы позволяет уменьшить зависимость деформаций лицевых поверхностей изделий до 0,5...2 % от толщины свариваемых материалов.

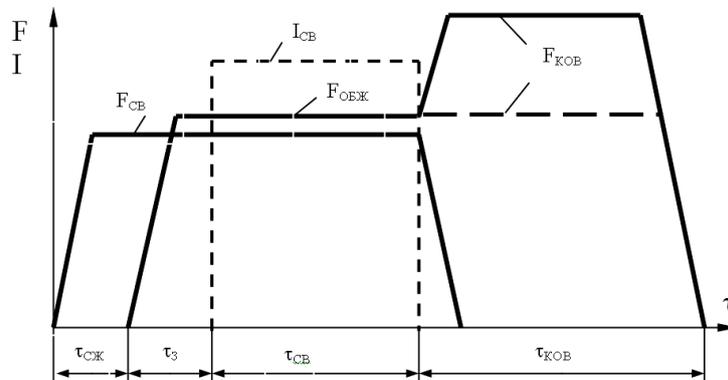


Рис. 6. Циклограмма процесса контактной точечной сварки с проковкой периферийной зоны сварного соединения кольцевым пуансоном

Заключение. В результате проведенных при помощи математических моделей расчетов обоснован выбор основных параметров режима Т-образной рельефной сварки стержней с листовыми деталями, исследован процесс образования вмятин от токоподводящих электродов при контактной точечной сварке. Предложен способ контактной точечной сварки для уменьшения деформаций лицевых поверхностей изделий, предусматривающий использование кольцевого пуансона для обжатия периферийной зоны соединения. Определены параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей разных толщин с обжатием периферийной зоны, обеспечивающие снижение глубины вмятины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березиенко, В.П. Перспективы использования математического моделирования для выбора технологических параметров процесса Т-образной рельефной сварки / В.П. Березиенко, С.М. Фурманов, Т.И. Бендик // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы четв. междунар. науч.-техн. семинара, Санкт-Петербург, 23 – 25 окт. 2007 г.; Ин-т сварки России. – СПб.: ООО «Агентство «ВиТ-Принт»», 2008. – С. 54 – 59.
2. Бендик, Т.И. Особенности математического моделирования процесса Т-образной рельефной сварки / Т.И. Бендик // Сварка и родственные технологии: респ. межведомств. сб. науч. тр., 2006. – Вып. № 8. – С. 9 – 13.
3. Смирнов, В.В. Оборудование для контактной сварки: справ. пособие В.В. Смирнов. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 848 с.
4. Гилевич, В.А. Технология и оборудование рельефной сварки / В.А. Гилевич. – Л.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
5. Грабин, В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. – Киев: Наук. думка, 1978. – 276 с.
6. Гуляев, А.И. Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве / А.И. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с.
7. Кочергин, К.А. Контактная сварка / К.А. Кочергин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
8. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. для машиностр. вузов / под общ. ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
9. Berezienko, V.P. Reducing the depth of indentation from electrodes in resistance spot welding / V.P. Berezienko, S.M. Furmanov // Welding International. – 2004. – 18(2). – С. 139 – 144.
10. Способ контактной точечной сварки: пат. 6959 Респ. Беларусь, МПК 7 G 01 N3/00/ С.М. Фурманов, В.П. Березиенко; заявитель Могилев. гос. техн. ун-т. – заявл. 29.10.2001; опубл. 30.03.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 1. – С. 125.

Поступила 10.06.2008