

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВАРА ТОЧКИ,  
НАПЛАВЛЕННОЙ НЕПОДВИЖНОЙ ДУГОЙ**

© 2018

**В.П. Сидоров**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»  
**А.В. Мельзитдинова**, магистр,  
старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

*Ключевые слова:* наплавка; провар; диаметр точки; сварочная дуга.

*Аннотация:* Современные программные комплексы, моделирующие процесс сварки, не охватывают всей ее специфики. Например, они слишком громоздки для применения при автоматическом регулировании провара по математической модели. Для этой цели предлагается использовать математическую модель распространения тепла в деталях от нормально-кругового источника тепла, действующего на поверхности плоского слоя. Коэффициенты такой модели должны определяться по экспериментам, приближенным к условиям решаемой задачи (метод приведения). Представлены результаты наплавки точек на пластине из высоколегированной стали 12X18H10T толщиной 4 мм на весу. Для записи во времени тока сварочной дуги в среде аргона с неплавящимися электродами использовали регистратор. Относительные отклонения диаметров точек от среднего значения проверяли на соответствие закону нормального распределения. Установлено, что отклонения формы точек от окружности не отвечают этому закону. По средним диаметрам полученных точек проводили прогнозирования глубины провара, которую определяли по макрошлифам с увеличением 20. При этом использовали несколько значений осевого теплового потока источника тепла: 2800, 3500 и 4200 Вт/см<sup>2</sup>. Значение коэффициента температуропроводности принималось по литературным данным усредненным  $a=0,04$  см<sup>2</sup>/с. По диаметрам точек рассчитывали эффективную мощность сварочной дуги и удельную эффективную мощность на 1 А сварочного тока. По средней удельной мощности рассчитывали глубину проплавления точек. Наилучшая сходимости расчетных и опытных данных получена при осевом тепловом потоке 2800 Вт/см<sup>2</sup> и составляет в среднем около 5 % по абсолютной величине. Аналогичные результаты получены при прогнозирования диаметров точек по глубине провара. Таким образом, разработана методика определения трех коэффициентов модели для использования их при автоматическом регулировании процесса сварки.

**ВВЕДЕНИЕ**

Вопросы повышения точности расчетов температур при сварке по-прежнему привлекают к себе внимание. Для научных исследований все чаще используется метод конечных элементов с помощью специальных пакетов прикладных программ [1–3]. Тем не менее условия выполнения сварки настолько многообразны, что зачастую имеет место неопределенность некоторых граничных условий. Кроме того, остается нерешенной проблема учета гидродинамических процессов в сварочной ванне [4]. Все это существенно затрудняет объективное выполнение расчетов.

Необходимо учитывать, что сложность математической модели должна соответствовать требованиям к точности ее решения для конкретной задачи. Достаточно большой разброс экспериментальных данных по ширине шва при сварке тонколистовой высоколегированной стали [5; 6] обуславливает и соответствующие требования к точности ее расчета. Разброс экспериментальных данных всегда обусловлен несоблюдением стабильности каких-либо факторов в процессе экспериментов. Еще более сложно учесть такие факторы при создании математической модели процесса. В связи с этим представляется, что возможности классических аналитических моделей используются далеко не в полной мере и вполне могут обеспечить решение инженерных задач. Например, это можно отнести к расчетной схеме нормально-кругового источника тепла (НКИ), действующего на поверхности плоского слоя (пластины) [7]. Такая расчетная схема подходит для процессов сварки пла-

влением стыковых соединений без разделки свариваемых кромок. В частности, она использована при исследовании и разработке способа одновременной двухсторонней сварки стыковых соединений без разделки кромок [8], а также может применяться для определения требований к точности параметров сварки и автоматического регулирования процесса по математической модели [9; 10].

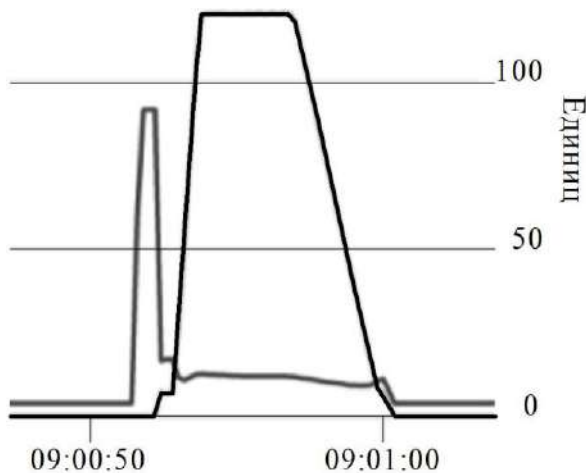
Предлагаемый подход заключается в определении коэффициентов такой математической модели на основе экспериментов, которые проводятся в условиях, приближенных к условиям решаемой задачи. Такой метод можно назвать методом приведения математической модели к условиям эксперимента [8], так как влияние факторов, которые не учитываются математической моделью, и неопределенность граничных условий компенсируются получением коэффициентов модели из опытов, обеспечивающих хорошую сходимости расчетных и опытных данных в достаточно широкой области параметров процесса. Данный метод ранее использовался для решения некоторых практических задач [11–13].

Метод приведения используется практически для любой математической модели, в том числе и при решении задач методом конечных элементов, когда производят подбор таких начальных и граничных условий, которые обеспечивают приемлемую сходимости между расчетными и опытными данными. Цель работы – апробация методики отыскания приведенных параметров НКИ по размерам точек, наплавленных сварочной дугой с неплавящимся электродом в среде аргона.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Расплавляли точки на пластине из высоколегированной стали 12X18H10T размером 100×100×4 мм. Наплавку целесообразно проводить при таких условиях тепловода в оснастку, при которых в последующем будет выполняться сварка. В данных опытах наплавка велась на весу. В этом случае схема распространения тепла в пластине близка к схеме его распространения в плоском слое. Поэтому сходимость расчетных и опытных данных при использовании схемы НКИ на поверхности пластины будет показывать эффективность метода приведения в этой ситуации.

Для наплавки использовали сварочную горелку AUT-TIG 400W фирмы Abicor Binzel с жидкостным охлаждением. Наплавка велась вольфрамовым электродом диаметром 2,0 мм, заточенным под углом 30° без притупления конуса. В качестве источника питания использовался аппарат ФОРСАЖ-160АД. Длина дуги при сварке  $L_d=3,0$  мм задавалась с помощью универсального шаблона сварщика. Дугу зажигали с помощью графитового стержня, замыкая конец электрода и рабочую пластину. Ток и напряжение дуги по приборам составляли  $I_d=85-105$  А и  $U_d \approx 13-14$  В и фиксировались (рис. 1) аппаратно-программным комплексом для регистрации процессов дуговой сварки при аттестации в сварочном производстве (РПДС АСП) [14]. Для защиты сварочной ванны использовали аргон высшего сорта (ТУ 2114-006-05761815-99). Расход аргона 7 л/мин контролировали по расходомеру редуктора АР-40-КР1-м-Р1. Измерения диаметров точек производили с помощью электронного штангенциркуля КАЛИБРОН ШЦЦ-1 0-150 с погрешностью  $\pm 0,03$  мм.



**Рис. 1.** Регистрограмма наплавки точки № 3:  
по оси ординат – время (час, мин, с);  
по оси абсцисс единицы соответствуют току в А

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Были наплавлены три точки при одинаковой установке тока. Ни на одной из них не наблюдалось полного провара пластины, поэтому вначале измеряли наружный диаметр точки  $D_1$ . По регистрограммам интегрированием определяли средние значения тока  $I_C$  и напряжения дуги  $U_C$  (таблица 1).

**Таблица 1.** Параметры наплавки точек

№ точки	$t, c$	$U_C, B$	$I_C, A$	$D_1, мм$
1	4,4	14,2	91,0	6,48
2	5,8	13,2	97,0	7,23
3	7,7	13,8	104,0	7,78

Небольшой прирост среднего тока обусловлен увеличением длительности времени горения дуги. В этом случае меньше сказывается влияние начальных участков роста и спада тока. Диаметр каждой точки измеряли с интервалом 45°, получая четыре значения. Отклонение диаметров точек от среднего значения проверяли на соответствие закону нормального распределения по методикам, приведенным в [15]. Поскольку сравнение по абсолютным значениям диаметров невозможно, оценивали данные по относительным отклонениям диаметров (таблица 2).

**Таблица 2.** Статистическая обработка относительных отклонений диаметров точек

Параметр	Значение
Среднее относительное $X_C, \%$	1,9425
Дисперсия $S^2$	4,611
Несмещенная дисперсия $S^2$	5,03
Среднеквадратичное отклонение $S, \%$	2,147
Размах варьирования $R, \%$	3,35
Коэффициент вариации $v=S/X_C$	1,105

Проверка нормальности распределения выполнялась по двум критериям – среднему абсолютному отклонению (САО) и на основе размаха варьирования. В каждом из случаев установлено, что данные не соответствуют нормальному распределению. Это свидетельствует о том, что отклонения диаметра носят неслучайный характер. Подобные исследования, если их стандартизировать, могут служить оценкой изучения стабильности сварочной дуги при различных внешних воздействиях.

Фотографии макрошлифов точек приведены на рис. 2–4. Теплофизические коэффициенты принимались усредненными по данным [7]:  $a=0,05$  см<sup>2</sup>/с,  $c_p=4$  Дж/(см<sup>3</sup>·°С). Затем по полученным значениям эффективной мощности рассчитывали диаметры точек (таблица 3). В таблице также приведены значения удельной эффективной мощности  $q_u$ , приходящейся на 1 А тока дуги. Кроме того, определялось относительное отклонение расчетного диаметра от опытного в  $\Delta, \%$ .

По макрошлифам с помощью программы Universal Desktop Ruler измеряли глубину проплавления (провар) точек:  $H_1=1,7$  мм,  $H_2=2,25$  мм и  $H_3=3,1$  мм. По этим проварам с помощью разработанной авторами компьютерной программы для расчета глубины проплавления, составленной по формуле НКИ [8], были рассчитаны значения приведенной эффективной мощности  $q_i$  при трех значениях осевого теплового потока  $q_0$ . Наилучшую сходимость расчетных диаметров с опытными (в среднем 2,4 % по абсолютной величине) обеспечивает тепловой поток 2800 Вт/см<sup>2</sup>. Среднее значение



*Рис. 2. Макрошлиф точки № 1, увеличение  $\times 20$*



*Рис. 3. Макрошлиф точки № 2,  $\times 20$*



*Рис. 4. Макрошлиф точки № 3,  $\times 20$*

Таблица 3. Расчетные диаметры точек  $D_{P1}$  и относительные отклонения от опытных значений  $\Delta$ 

№ точки	1	2	3
$q_0=4200 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	560	608	645
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,15	6,27	6,20
$D_{P1}, \text{ мм}$	5,48	6,23	6,54
$\Delta, \%$	-15,4	-13,8	-15,9
$q_0=3500 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	595	644	670
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,54	6,64	6,44
$D_{P1}, \text{ мм}$	5,73	6,57	7,35
$\Delta, \%$	-12,4	-9,1	-5,5
$q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$			
$q_{И}, \text{ Вт}$	670	700	710
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	6,91	7,22	6,83
$D_{P1}, \text{ мм}$	6,23	7,01	7,76
$\Delta, \%$	-3,9	-3,0	-0,3

удельной эффективной мощности  $q_{У}$  в этом случае 6,99 Вт/А, а среднее алгебраическое отклонение от этой величины составляет 2,2 % при среднем изменении тока дуги на 7 %. Близкие данные по значениям  $q_{У}$  приводятся в работе [16]. Поэтому среднее значение  $q_{У}$  может в последующем использоваться для расчета эффективной мощности по току дуги. В этом случае отпадает необходимость измерения напряжения дуги и расчета эффективной мощности с помощью эффективного КПД.

Была оценена также точность прогнозирования глубины провара для трех точек по результатам замеров диаметров точек. Проводили расчеты только для  $q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$  (таблица 4). Методика расчетов была аналогичной анализу по глубине проплавления. В таблице 4 приведены расчетные значения условного диа-

метра пятна нагрева  $D_{Н}$  и коэффициента сосредоточенности теплового потока  $k$ .

Среднее относительное отклонение  $\Delta$  расчетных проваров от опытных составляет +5,5 %. Это показывает, что вполне возможно определение приведенных осевого теплового потока и эффективной мощности и по линейным диаметрам точек, несмотря на некоторую нестабильность их диаметров. В этом случае среднее значение удельной эффективной мощности несколько выше  $q_{У}=7,25 \text{ Вт/А}$ .

Было выполнено определение усредненного значения  $q_{У}$  по шести значениям проваров и диаметров точек для  $q_0=2800 \text{ Вт/см}^2$  из таблиц 3–4 и получено  $q_{У}=7,12 \text{ Вт/А}$ , со средним отклонением по абсолютной величине 4,4 %. По данному  $q_{У}$  были рассчитаны приведенные эффективные мощности опытов и затем диаметры точек и провары (таблица 5).

Таблица 4. Оценка глубины проплавления  $H_{P1}$  по диаметрам точек из опыта

№ точки	1	2	3
$q_{И}, \text{ Вт}$	705	725	715
$q_{У}, \text{ Вт/А}$	7,75	7,32	6,88
$D_{Н}, \text{ см}$	0,98	0,99	0,99
$k, \text{ см}^{-2}$	12,5	12,1	12,2
$H_{P1}, \text{ мм}$	1,82	2,39	3,17
$\Delta, \%$	+7,0	+6,2	+2,3

Таблица 5. Сравнение расчетных и опытных данных по среднему  $q_{У}$ 

№ точки	1	2	3
$q_{И}, \text{ Вт}$	651	694	744
$\eta_{И}, \%$	50	54	52
$H_{Р}, \text{ мм}$	1,64	2,23	3,57
$H_{О}, \text{ мм}$	1,7	2,15	3,1
$\Delta, \%$	3,5	0,9	15,2
$D_{Р}, \text{ мм}$	6,1	6,98	8,04
$D_{О}, \text{ мм}$	6,48	7,23	7,78
$\Delta, \%$	5,9	3,5	3,3

Среднее отклонение расчетных от опытных по всем 6 размерам точек 5,4 %. Это значительно более высокая точность, чем разброс значений для ширины шва при сварке тонколистовой высоколегированной стали. Повышение точности можно объяснить уменьшением влияния случайных факторов при действии неподвижной дуги. Сравнительно высокое отклонение имеет место для провара последней точки. Это связано с тем, что эффективная мощность получилась существенно выше расчетной по провару, и, поскольку расчет велся для самой чувствительной области пластины, это привело к повышению относительного отклонения.

В связи с этим для определения коэффициентов математической модели можно рекомендовать вести наплавку точек, провар которых не выходит за 60 % толщины пластины. Выполнение таких точек позволяет получить сходимость расчетных и опытных данных примерно в 5–6 %. Значения эффективного КПД, полученные по данным приведенной эффективной мощности, хорошо согласуются с данными работы [17].

Расчетные и опытные профили провара точек сравнивали при параметрах из таблицы 5 при  $q_0=2800$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 5–7).

Наибольший интерес представляет совпадение опытных и расчетных проваров по площадям поперечных сечений. Несмотря на искажение формы экспериментальных точек, совпадение площадей является удовлетворительным.

Данная методика совместного определения теплофизических коэффициентов и приведенных параметров теплового потока по размерам наплавленной точки может использоваться для автоматического регулирования провара при сварке пластин без разделки кромок [19–21].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При наплавке точек на пластину из высоколегированных сталей может иметь место существенная асимметрия формы их поперечного сечения. Причинами такой асимметрии, возможно, являются асимметрия токоподвода к пластине и блуждание анодного пятна сварочной дуги.

2. При выборе рекомендуемых усредненных теплофизических коэффициентов для математической модели нормально-кругового источника тепла можно рассчитать значения осевого теплового потока и эффективной мощности, которые хорошо описывают значения диаметров и проваров точек. Вместо обычно используемого эффективного КПД дуги при расчетах целесообразно использовать понятие удельной эффективной мощности, которая имеет небольшой разброс значений.

3. Осевого теплового потока приведенного источника тепла незначительно влияет на размеры точек, что позволяет применять гипотезу о постоянстве осевого теплового потока источника для анализа влияния параметров сварки на размеры сварочной ванны.

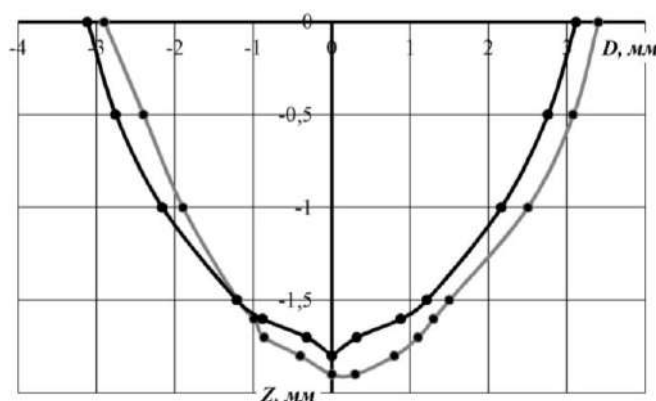


Рис. 5. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 1

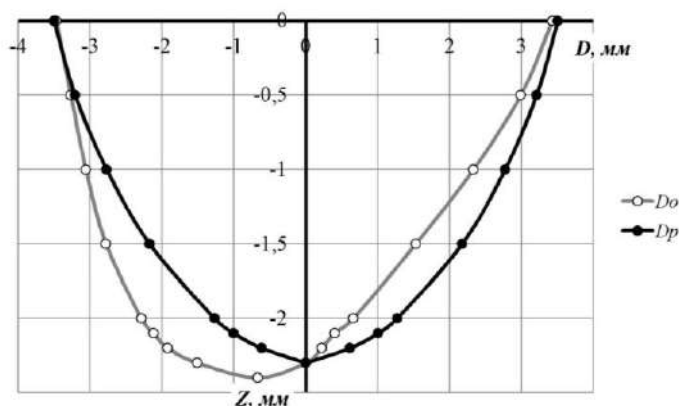


Рис. 6. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 2

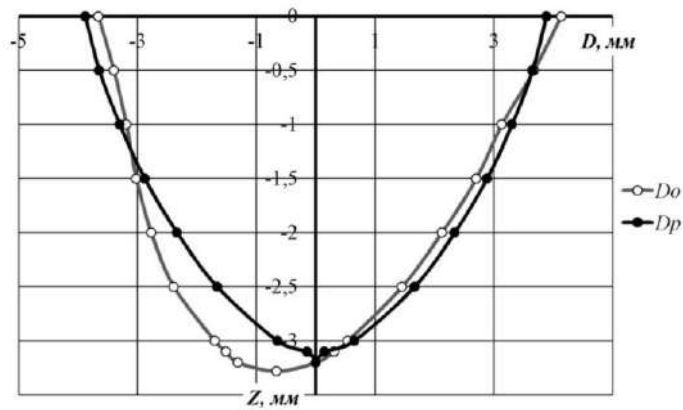


Рис. 7. Сравнение расчетного и опытного профиля для точки № 3

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ghosh A., Chattopadhyay H. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process // *International journal of advanced manufacturing technology*. 2013. Vol. 69. № 9-12. P. 2691–2701.
- Bychkov V.M., Nikiforov R.V. Computer modeling of localised heat treatment of girth welds // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2015. Vol. 8. № 6. P. 54–56.
- Olshanskaya T.V., Salomatova E.S., Trushnikov D.N. Simulation of thermal processes at electron-beam welding with beam splitting // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12. № 4. P. 3525–3534.
- Мелюков В.В., Козлов В.А., Тарабукин Д.А., Чернов А.М. Определение параметров режима сварки методом обратной задачи // *Сварка и диагностика*. 2014. № 3. С. 29–31.
- Киселев А.С., Гордынец А.С. Влияние параметров режима на пространственную устойчивость дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона // *Вестник науки Сибири*. 2013. № 4. С. 61–66.
- Петров П.Ю. Установление зависимости формы выпуклости сварного шва от параметров режима сварки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2018. Т. 16. № 1. С. 58–66.
- Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. СПб.: Политехн. ун-т, 2015. 572 с.
- Сидоров В.П., Хурин С.А. Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне. Тольятти: ТГУ, 2015. 191 с.
- Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Допустимые отклонения параметров дуговой односторонней сварки // *Сварка и диагностика*. 2016. № 3. С. 49–52.
- Sidorov V.P., Melsitdinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions // *Welding International*. 2016. Vol. 31. № 3. P. 221–224.
- Цвелев Р.В. Оценка погрешностей воспроизведения температурного поля при сварке под флюсом на основе эквивалентного источника теплоты // *Сварочное производство*. 2013. № 6. С. 11–15.
- Шахматов М.В., Яковлев Д.С. Моделирование тепловых процессов при многодуговой сварке // *Сварка и диагностика*. 2015. № 2. С. 49–53.
- Казаков Ю.В., Потехин В.П., Кувшинова Н.Н. Температурное поле при экзотермической заварке дефектов литья // *Сварка и диагностика*. 2016. № 1. С. 31–33.
- ССДЦ.683152.001РЭ. Руководство по эксплуатации аппаратно-программного комплекса для регистрации процессов дуговой сварки при аттестации в сварочном производстве. Тольятти: СССЦ Дельта, 2016. 78 с.
- Захаров Ю.В. Математическое моделирование технологических систем. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. 84 с.
- Савинов А.В., Полесский О.А., Лапин И.Е., Лысак В.И., Чудин А.А., Красиков П.П. Проплавляющая способность дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2016. № 2. С. 135–141.
- Паршин С.Г. Наноструктурированные и активирующие материалы для дуговой сварки. СПб.: Политехн. ун-т, 2013. 624 с.
- Мелюков В.В., Максимов А.Е. Управление тепловым процессом кристаллизации в сварочной ванне // *Сварка и контроль – 2018: сборник трудов Международной научно-технической конференции*. Пермь: ПНИПУ, 2018. С. 207–215.
- Гладков Э.А., Бродягин В.Н., Перковский Р.А. Автоматизация сварочных процессов. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. 421 с.
- Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке: патент РФ № 2613255, 2017.
- Смирнов И.В. Пространственно-параметрическое управление тепловложением при дуговой сварке // *Сварка и диагностика*. 2013. № 4. С. 10–13.

### REFERENCES

- Ghosh A., Chattopadhyay H. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2013, vol. 69, no. 9-12, pp. 2691–2701.
- Bychkov V.M., Nikiforov R.V. Computer modeling of localised heat treatment of girth welds. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 54–56.



3. Olshanskaya T.V., Salomatova E.S., Trushnikov D.N. Simulation of thermal processes at electron-beam welding with beam splitting. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3525–3534.
4. Melyukov V.V., Kozlov V.A., Tarabukin D.A., Chernov A.M. Determination of welding parameters by the inverse problem method. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 29–31.
5. Kiselev A.S., Gordynets A.S. The influence of mode parameters on the spatial stability of arc when welding aluminum alloys with a non-consumable electrode in argon medium. *Vestnik nauki Sibiri*, 2013, no. 4, pp. 61–66.
6. Petrov P.Yu. The Identification of Dependence of Weld Convexity Form on Parameters of Welding Conditions. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 58–66.
7. Karkhin V.A. *Teplovye protsessy pri svarke* [Thermal processes during welding]. Sankt Petersburg, Politekhn. un-t Publ., 2015. 572 p.
8. Sidorov V.P., Khurin S.A. *Dvukhdugovaya dvustoronnyaya svarka neplavyashchimisya elektrodami v argone* [Two-arc two-sided welding with non-consumable electrodes in argon]. Togliatti, TItSU Publ., 2015. 191 p.
9. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. The admissible deviations of parameters of arc indirect welding. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 3, pp. 49–52.
10. Sidorov V.P., Melsitdinova A.V. Determination of permissible deviations of the two-sided arc welding conditions. *Welding International*, 2016, vol. 31, no. 3, pp. 221–224.
11. Tsvelev R.V. The evaluation of accuracy of temperature field simulation at the submerged welding based on equivalent heat source. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 6, pp. 11–15.
12. Shakhmatov M.V., Yakovlev D.S. Simulation of thermal processes during the multiarc welding. *Svarka i diagnostika*, 2015, no. 2, pp. 49–53.
13. Kazakov Yu.V., Potekhin V.P., Kuvshinova N.N. Temperature field at exothermic welding of casting defects. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 1, pp. 31–33.
14. SSSTs.683152.001RE. *Rukovodstvo po ekspluatatsii apparatno-programmnogo kompleksa dlya registratsii protsessov dugovoy svarki pri attestatsii v svarochnom proizvodstve* [User manual for hardware and software complex for registration of the arc welding processes during standardization in welding engineering]. Togliatti, SSSTs Delta Publ., 2016. 78 p.
15. Zakharov Yu.V. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technological systems]. Yoshkar-Ola, PGU Publ., 2015. 84 p.
16. Savinov A.V., Poleskiy O.A., Lapin I.E., Lysak V.I., Chudin A.A., Krasikov P.P. Penetrating power of alternating current arc with a rectangular pulse shape. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 135–141.
17. Parshin S.G. *Nanostrukturirovannyye i aktiviruyushchie materialy dlya dugovoy svarki* [Nanostructured and activating materials for arc welding]. Sankt Petersburg, Politekhn. un-t Publ., 2013. 624 p.
18. Melyukov V.V., Maksimov A.E. The control of thermal process of crystallization in welding pool. *Svarka i kontrol – 2018: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Perm, PNIPU Publ., 2018, pp. 207–215.
19. Gladkov E.A., Brodyagin V.N., Perkovskiy R.A. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2014. 421 p.
20. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. *Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya glubiny proplavleniya pri avtomaticheskoy dugovoy svarke* [The method of automatic control of penetration during automatic arc welding], patent RF no. 2613255, 2017.
21. Smirnov I.V. Spatial-parametric control of heat input during arc welding. *Svarka i diagnostika*, 2013, no. 4, pp. 10–13.

**THE CALCULATION-EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PENETRATION  
OF A SPOT WELDED BY A FIXED ARC**

© 2018

*V.P. Sidorov*, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,  
professor of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”  
*A.V. Melzidinova*, master,  
senior lecturer of Chair “Welding, Metal Forming and Associated Processes”  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* surfacing; penetration; spot diameter; welding arc.

*Abstract:* The modern software systems simulating the welding process do not cover all its specific features. For example, they are too cumbersome to be applied in the penetration automatic regulation according to the mathematical model. For this purpose, the authors proposed using a mathematical model of heat distribution within the parts from a normal circular heat source acting on the flat layer surface. The coefficients of such a model should be determined by the experiments close to the data of a problem to be solved (the reduction method). The paper presents the results of hanging surfacing of spots on the 12H18N10T high-alloy steel plate of 4 mm thick. To record in time the welding arc current in argon medium with the non-consumable electrodes, the authors used the recorder. The relative deviations of the spots' diameters from the average value were checked for the compliance with the normal distribution law. It is determined that the deviations of the spots' shape from the circle do not meet this law. The average diameters of the obtained spots were used to predict the penetration depth, which was determined by macrosections with the 20 amplification. In this case, the authors used several values of axial heat flux of the heat source: 2800, 3500 and 4200 W/cm<sup>2</sup>. The values of thermal diffusivity were taken from literature data averaged  $a=0.04$  cm<sup>2</sup>/s. Using the diameters of spots, the effective power of the welding arc and the specific effective power per 1A of welding current were calculated. The penetration of the spots was calculated using the average power density. The best convergence of calculated and experimental data was obtained at the axial heat flux of 2800 W/cm<sup>2</sup>; it averages about 5 % in absolute value. Similar results were obtained when predicting the diameters of spots using penetration depth. Thus, the authors developed the technique for determining three coefficients of the model to apply them for the welding process automatic control.