

УДК 621.791

З.Х. Муртазина<sup>1</sup>, e-mail: zulphiya.murtazina@gmail.com; А.В. Коновалов<sup>1</sup>, e-mail: avk270760@mail.ru<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (Москва, Россия).

## Влияние сварочного термического цикла на рост зерна аустенита

В статье рассмотрена методика решения проблемы свариваемости современных трубных сталей в трубной промышленности. Погонная энергия многодуговой сварки, применяемой для сварки продольного шва труб магистральных газопроводов, очень велика (примерно 100 кДж/см), что приводит к образованию сварочной ванны длиной в десятки сантиметров. При этом время пребывания металла околошовной зоны при температурах выше 1000 °С исчисляется десятками секунд. В таких условиях карбидные частицы растворяются и перестают сдерживать рост аустенитного зерна. Не встречая препятствий в виде карбидов и сульфидов, границы зерен быстро мигрируют, и зерно аустенита вырастает до таких размеров (более 100 мкм), что его можно увидеть невооруженным глазом. Вязкие свойства такой стали значительно ухудшаются, что становится особенно заметно по мере увеличения толщины стенки трубы – на фоне роста погонной энергии сварки, т. е. тепловложения. В ряде случаев ударная вязкость околошовной зоны продольного шва трубы не соответствует требованиям, предъявляемым к трубам для магистральных газопроводов. В статье представлены сравнительные расчеты сварочных термических циклов и температурных полей при автоматической четырехдуговой сварке и трехдуговой сварке с дополнительной горячей присадкой продольного шва трубы с точки зрения анализа роста зерна аустенита. Выбраны расчетные схемы изделия и источников теплоты на основании базовых положений классической теории распространения теплоты в сварке. Проведен расчет размера зерна при сварке. На основе полученных данных сделан прогноз ударной вязкости и размеров зерна околошовной зоны при применении модернизированной технологии.

**Ключевые слова:** сварочный термический цикл, дополнительная горячая присадка, ударная вязкость, рост зерна аустенита, продольный шов трубы, магистральный трубопровод.

.....

Z.Kh. Murtazina<sup>1</sup>, e-mail: zulphiya.murtazina@gmail.com; A.V. Konovalov<sup>1</sup>, e-mail: avk270760@mail.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia).

## Influence of Welding Thermic Cycle on Growth of Austenite Grain

The paper analyses the problem solving technique related to welding characteristics of modern pipe steels in the pipe producing industry. Heat input of multiarc welding used for longitudinal joint welding of gas main pipes is increasingly high (about 100 kJ/cm) resulting in the welding bath formation of hundreds centimeters length. Besides, the residence time of a heat-affected zone metal in the temperature range of over 1000 °C equals dozens of seconds. Under such conditions carbide elements dissolve and stop checking an austenite grain growth. Meeting no obstacles in form of carbides and sulfides grain boundaries migrate rapidly while austenite grain reaches the sizes big enough to be seen with the naked eye (over 100 μm). Ductile properties of such steel experience significant deterioration most obvious as pipe walls become thicker – against a background of heat input growth of welding, i. e. heat input. In a number of cases the heat-effected zone impact strength of the pipe longitudinal joint does not meet the requirements set for the gas main pipes. The paper presents the comparative designs of welding heat cycles and temperature fields in automatic four-arc welding and three-arc welding with an extra hot addition agent for the longitudinal pipe joint in view of the austenite grain growth analysis. Chosen were the design diagrams of the product and heat sources based on the classical theory fundamentals for heat conduction in welding. The grain size calculation has been performed. The data obtained have served as the basis for the prediction of impact strength and heat-effected zone grain sizes on application of the advanced technology.

**Keywords:** welding thermal cycle, additional hot wire, toughness, austenite grain growth, longitudinal pipe seam, main pipeline.

Высокие показатели механических свойств современных трубных сталей достигаются микролегированием титаном Ti и ниобием Nb. Эти добавки задерживают рекристаллизацию, а частицы второй фазы (мелкодисперсные карбонитриды) после рекристаллизации препятствуют росту зерна [1, 2]. Однако при длительном пребывании металла в интервале температур более 1000 °С эти частицы растворяются и более не могут сдерживать рост аустенитного зерна, негативно влияющий на показатель ударной вязкости. Недостаточная вязкость стали, в свою очередь, может приводить к развитию протяженных трещин в осевом направлении трубопровода и являться причиной его разрушения [3].

### ВЫБОР СХЕМЫ НАГРЕВАЕМОГО ТЕЛА

Расчетная схема – подвижный точечный источник в плоском слое (с учетом отражений тепловых потоков от наружной и внутренней поверхностей кромок трубы), поскольку сварка осуществляется в два прохода с проплавлением половины толщины стенки [4].

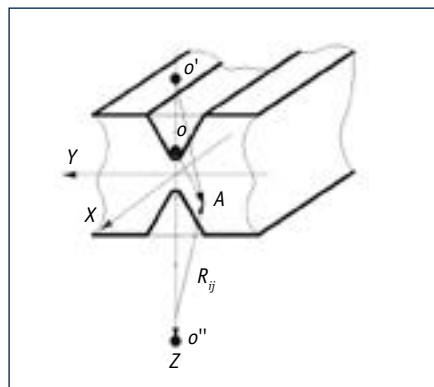


Рис. 1. Схема ввода теплоты:

$X, Y, Z$  – оси декартовой системы координат;  $o$  – источник теплоты;  $o', o''$  – фиктивные источники теплоты при отражении источника от границы;  $A$  – расчетная точка;  $R_{ij}$  – радиус-вектор

Fig. 1. The heat injection system:

$X, Y, Z$  – Cartesian coordinate system;  $o$  – heat source;  $o', o''$  – dummy heat sources in reflecting the source from the border;  $A$  – design point;  $R_{ij}$  – radius-vector

Для цитирования (for citation):

Муртазина З.Х., Коновалов А.В. Влияние сварочного термического цикла на рост зерна аустенита // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 10. С. 50–53. Murtazina Z.Kh., Kononov A.V. Influence of Welding Thermic Cycle on Growth of Austenite Grain. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 10, P. 50–53. (In Russ.)

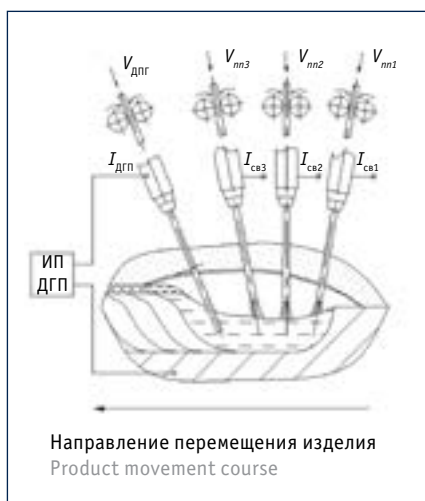


Рис. 2. Схема процесса сварки:

ИП ДГП – источник питания для дополнительной горячей присадки;  $V_{\text{ДГП}}, V_{\text{мн}1}, V_{\text{мн}2}, V_{\text{мн}3}$  – скорости подачи ДГП и проволоки, соответственно, м/с;  $I_{\text{ДГП}}, I_{\text{св}1}, I_{\text{св}2}, I_{\text{св}3}$  – ток ДГП и проволоки, соответственно, А

Fig. 2. The welding process layout:

ИП ДГП – power supply for an extra hot addition agent;  $V_{\text{ДГП}}, V_{\text{мн}1}, V_{\text{мн}2}, V_{\text{мн}3}$  – supply rates of an extra hot addition agent and wires, respectively, m/s;  $I_{\text{ДГП}}, I_{\text{св}1}, I_{\text{св}2}, I_{\text{св}3}$  – current of an extra hot addition agent and wires, respectively, А

### ВЫБОР СХЕМЫ ВВОДА ТЕПЛОТЫ

В качестве модели сварочных источников теплоты (рис. 1) выберем точечные подвижные источники постоянной мощности с отражением от границы, движущиеся прямолинейно и равномерно внутри плоского слоя.

Совместное действие нескольких источников теплоты учитывается путем суперпозиции температурных полей от каждого из источников.

### ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Приращения температур от каждого источника теплоты (рис. 2) рассчитываются по формуле для температурного поля предельного состояния [1]:

$$T(R, x) = T_H + \frac{q}{4\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v}{2a}(R+x)\right], \quad (1)$$

где  $T_H$  – начальная температура, °С;  $q$  – тепловой поток, Вт;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(см·К);

$R$  – длина радиус-вектора анализируемой точки тела в подвижной системе координат, м;  $x$  – абсцисса анализируемой точки тела в подвижной системе координат, м;  $v$  – скорость движения источника теплоты, м/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с. Расчет приращений температур для всех источников теплоты осуществляется по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^4 \frac{k_j \cdot q_j}{4\pi\lambda R_{ij}} \cdot e^{-\frac{v}{2a}(R_{ij} + x_j)} = \\ &= \sum_{j=1}^4 \frac{k_j \cdot q_j}{4\pi\lambda} \cdot e^{-\frac{v}{2a} \cdot x_j} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{R_{ij}} \cdot e^{-\frac{v}{2a} \cdot R_{ij}}, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $R = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2}$  – длина радиус-вектора анализируемой точки тела в подвижной системе координат;  $x, y, z$  – координаты точки, где проводится расчет  $\Delta T$ , см;  $x_j, y_j, z_j$  – координаты  $j$ -ого источника  $q_j$ , см;  $k_j$  – коэффициент, учитывающий закругление источника и разделку кромок:

$$k_j = \left(1 - \frac{180}{180 - \alpha}\right) \cdot \frac{z_j}{\delta} + \frac{180}{180 - \alpha}$$

где  $\alpha$  – угол разделки кромок, °;  $\delta$  – толщина стенки трубы, мм.

Мощность источника  $q_j$  в случае четырех дуг рассчитывается как:

$$q_j = \eta \cdot I \cdot U, \quad (3)$$

при  $j = 1 \dots 4$ , где  $\eta$  – коэффициент полезного действия процесса;  $I$  – сварочный ток, А;  $U$  – напряжение на дуге, В.

При применении дополнительной горячей присадки (ДГП)  $j = 1 \dots 3$ .

При сварке с ДГП подогретая электрическим током до температуры  $T_{\text{нн}}$ , °С, проволока сечением  $F_s$ , мм, подается в хвост сварочной ванны со скоростью  $V_{\text{нн}}$ , м/с, где нагревается до температуры плавления и доплавляется за счет теплоты сварочной ванны, имеющей температуру  $T_b$ , °С. Таким образом, ДГП является одновременно и источником, и стоком теплоты:

$$q_j = F_s \cdot V_{\text{нн}} [c_p \cdot T_{\text{нн}} - c_p (T_b - T_{\text{нн}}) - \rho \cdot L_{\text{нн}}], \quad (4)$$

Сварочный ток  $I = 1000$  A  
 Welding current  $I = 1000$  A  
 Напряжение дуги  $U = 44$  V  
 Arc voltage  $U = 44$  V  
 Скорость сварки  $V_s = 61,2$  м/ч  
 Welding rate  $V_s = 61.2$  m/h  
 Расстояние между горелками – 20,0 мм  
 Inter-torches spacing – 20.0 mm

Без дополнительной горячей присадки (ДГП) длина сварочной ванны  $Y_{\text{ОШЗ}} = 17,9$  мм  
 Without an extra hot addition agent the welding bath length  $Y_{\text{ОШЗ}} = 17.9$  mm  
 С ДГП длина сварочной ванны  $Y_{\text{ОШЗ}} = 15,6$  мм  
 With an extra hot addition agent the welding bath length  $Y_{\text{ОШЗ}} = 15.6$  mm



Введение ДГП позволяет уменьшить время пребывания металла околошовной зоны в интервале температур выше 1000 °С, в течение которого происходят интенсивный рост зерна и гомогенизация аустенита  
 Input of an extra hot addition agent makes it possible to reduce the residence time of a heat-affected zone metal in the temperature range of over 1000 °C, during which there occurs an intensive grain growth and homogenization of austenite

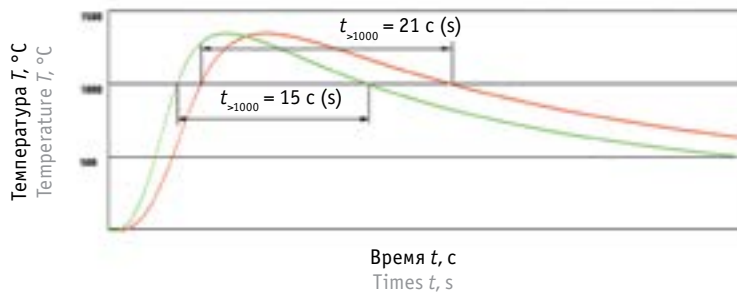


Рис. 3. Результаты расчета сварочных термических циклов  
 Fig. 3. Design data of welding heat cycles

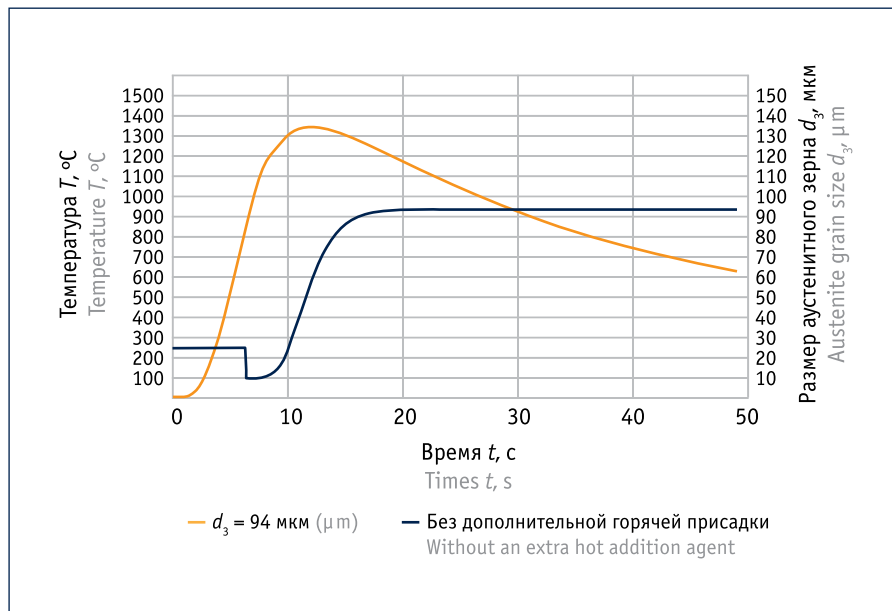


Рис. 4. Моделирование роста зерна при сварке четырьмя дугами  
 Fig. 4. Grain growth modeling in four-arc welding

где  $q_j$  – тепловая мощность ДГП, Дж/с;  $c_p$  – объемная теплоемкость проволоки, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\rho$  – плотность материала

проволоки, кг/м<sup>3</sup>;  $L_{\text{пл}}$  – скрытая теплота плавления материала проволоки, Дж/г.

При построении сварочного термического цикла (СТЦ) расчет должен проводиться для точек, у которых максимальная температура составляла 1350 °С (околошовная зона (ОШЗ) с наибольшим размером зерна). В целях упрощения расчета будем рассматривать линию ОШЗ на поверхности изделия ( $z = 0$ ), положение которой по оси  $Y$  определялось заранее путем численного решения трансцендентного уравнения:

$$T_{\text{max}(y)} - 1350 = 0. \quad (5)$$

Чтобы получить одинаковое сечение шва при использовании ДГП, скорость подачи присадочной проволоки прием равной скорости подачи основной проволоки:

$$V_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I_{\text{СВ}}}{3600 \cdot \rho \cdot F_3} \quad (6)$$

где  $I_{\text{СВ}}$  – величина тока сварки, А;  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент наплавки, г/А·ч.

Расчет и графическое представление результатов были проведены с помощью компьютерной программы DGP. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Проведенные расчеты демонстрируют, что применение ДГП значительно меняет тепловую обстановку в ОШЗ сварного соединения. Время пребывания металла в интервале температур интенсивного роста зерна, а также гомогенизации аустенита уменьшается с 21 до 15 с. Кроме того, существенно уменьшается длина самой сварочной ванны. Построенные СТЦ позволяют моделировать процесс роста аустенитного зерна в околошовной зоне.

#### РАСЧЕТ РАЗМЕРА ЗЕРНА ПРИ СВАРКЕ

Для анализа кинетики роста аустенитного зерна воспользуемся фундаментальным соотношением для собирательной рекристаллизации:

$$r_3^2(t) = r_0^2 + 2A \cdot \int_{t_0}^t \exp\left(-\frac{Q}{kT(t)}\right) dt, \quad (7)$$

где  $r_3(t)$  – текущее значение радиуса зерна, мкм;  $r_0$  – исходный радиус зерна, мкм;  $A$  – константа значения поверхностной энергии, см<sup>2</sup>/с;  $Q$  – энергия активации диффузионного перемещения

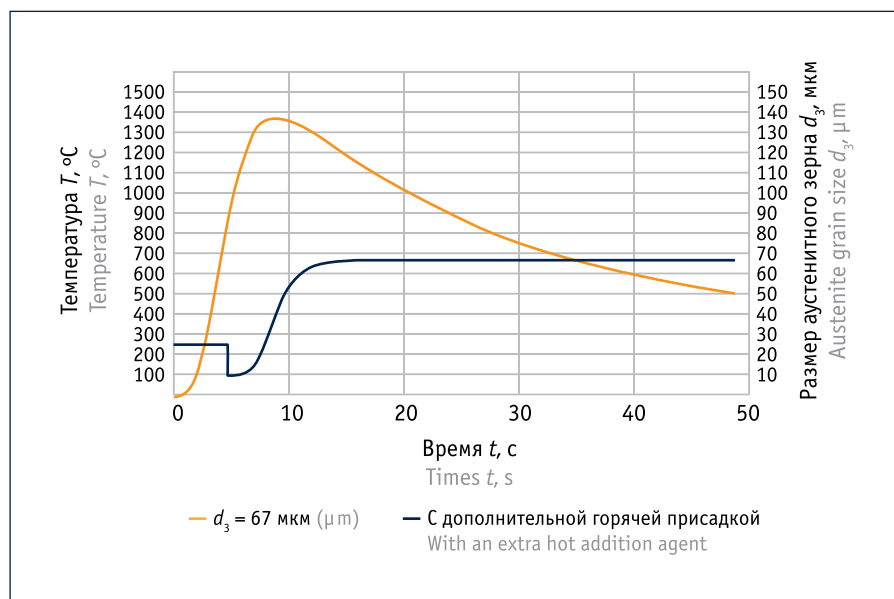


Рис. 5. Моделирование роста зерна при сварке тремя дугами с дополнительной горячей присадкой

Fig. 5. Grain growth modeling in three-arc welding with an extra hot addition agent

границ, Дж;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $t_0$  – время, соответствующее началу процесса роста зерна, с;  $t$  – текущее время, с;  $T(t)$  – температура на стадии теплонасыщения, °С. Значения величин  $A$ ,  $Q$  и  $r_0$  определяются химическим составом стали по регрессионным моделям [2]:

$$A = 0,2243 \cdot 1017 \cdot \exp\left[-254,4 \cdot \left(\frac{S}{C}\right)\right], \quad (8)$$

см<sup>2</sup>/с,

$$Q = \left\{0,1088 - 0,4987 \left(\frac{S}{C}\right)\right\}, \text{ Дж}, \quad (9)$$

$$D_0 = 2r_0 = 1,4313 \cdot 10^{-5} + 6,0822 \cdot 10^{-3} \cdot C, \text{ см}, \quad (10)$$

где  $S$  и  $C$  – содержание серы и углерода в стали, соответственно, %. Максимально возможный размер зерна аустенита, см, определяется соотношением:

$$D_{\max} = 5,5168 \cdot 10^{-2} - 0,18518 \left(\frac{S}{C}\right). \quad (11)$$

Для анализа кинетики роста зерна аустенита использовалась компьютер-

ная программа для анализа сварочных термических циклов WTC.EXE, разработанная на кафедре «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана [5]. Результаты расчетов представлены на рис. 4 и 5.

### ПРОГНОЗ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ KCV

Оценим повышение показателя ударной вязкости KCV при использовании сварки с ДГП по сравнению с показателем KCV при использовании сварки без ДГП:

$$\frac{KCV_2}{KCV_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{-0,29788} = 1,24, \quad (12)$$

где  $KCV_1$ ,  $KCV_2$  – ударная вязкость при многодуговой сварке без ДГП и с ДГП, соответственно, Дж/см<sup>2</sup>;  $d_1$ ,  $d_2$  – размер аустенитного зерна при многодуговой сварке без ДГП и с ДГП, соответственно, мкм.

Таким образом, введение при сварке ДГА вместо одной из дуг способствует увеличению показателя ударной вязкости на 24 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, расчеты показывают, что ДГП позволяет уменьшить размер зерна аустенита в околошовной зоне в 1,4 раза (с 94 до 67 мкм), что, по прогнозу авторов статьи, должно хорошо отразиться на показателе ударной вязкости по линии сплавления.

#### Литература:

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
2. Сварка и свариваемые материалы: Справочник. В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
3. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
4. Коновалов А.В., Куркин А.С., Неровный В.М. и др. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / Под ред. В.М. Неровного. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 704 с.
5. Макаров Э.Л., Коновалов А.В. Система компьютерного анализа свариваемости и технологии сварки конструкционных легированных сталей // Сварочное производство. 1995. № 3. С. 6–9.

#### References:

1. Makarov E.L., Yakushin B.F. Theory of Weldability of Steels and Alloys. Ed. by E.L. Makarov. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2014, 487 p. (In Russian)
2. Welding and Weldable Materials – Handbook in 3 Vol. Vol. 1. Weldability of Materials. Ed. E.L. Makarov. Moscow, Metallurgiya [Metallurgy], 1991, 528 p. (In Russian)
3. Makarov E.L. Cold Cracks when Welding Alloy Steels. Moscow, Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1981, 248 p. (In Russian)
4. Kononov A.V., Kurkin A.S., Nerovny V.M., et al. Theory of Welding Processes. A textbook for universities. Ed. V.M. Nerovni. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2016, 704 p. (In Russian)
5. Makarov E.L., Kononov A.V. System of Computer Analysis of Weldability and Welding Technology of Structural Alloyed Steels. Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production, 1995, No. 3, P. 6–9. (In Russian)