

Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М. Выбор основных критериев термического цикла для методов прогнозирования структуры сварных швов при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 73–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09

Olshanskaya T.V., Fedoseeva E.M. Selection of the main criteria of the thermal cycle for the predicting methods of the structure of welds at electron-beam welding // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 73–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 2, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09
УДК 621.791.011

Т.В. Ольшанская, Е.М. Федосеева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ВЫБОР ОСНОВНЫХ КРИТЕРИЕВ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ДЛЯ МЕТОДОВ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

Прогнозирование структуры сварных швов, в том числе при электронно-лучевой сварке, является важным моментом в определении качества соединения в целом. Для прогнозирования количественного состава образующихся структурных составляющих при электронно-лучевой сварке необходимо построение структурных диаграмм распада аустенита, учитывающих особенности высокоскоростного нагрева и охлаждения. Основой для построения структурных диаграмм могут стать как физические модели построения изотермических и термокинетических диаграмм, так и регрессионные уравнения, при условии их адаптации к термическому циклу электронно-лучевой сварки. На основании анализа современных методов исследования кинетики превращения аустенита при охлаждении и прогнозирования микроструктуры выделены основные направления для выбора методики прогнозирования структуры сварных соединений применительно к электронно-лучевой сварке. Исследования работы основаны на проведении анализа термических циклов для различных участков сварного соединения и выявлении возможных критериев для дальнейшего прогнозирования формирующейся структуры. Полученные результаты показали следующее: традиционно принятые время и скорость охлаждения в интервале значений температуры ниже 800 °С не отражают особенности высокоскоростного охлаждения при электронно-лучевой сварке, отличающегося и по глубине и по ширине сварного соединения. В данном случае для полной характеристики термического цикла критерии должны отражать всю предысторию охлаждения начиная с максимально достигаемой температуры при нагреве, а не только в интервале значений температуры структурно-фазовых превращений. Такими критериями могут стать максимальная температура нагрева для данного термического цикла и максимально достигнутая в нем мгновенная скорость охлаждения.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, термический цикл, скорость охлаждения, сварной шов, структура металла, термокинетическая диаграмма, фазовый состав, мгновенные скорости изменения температуры, ЗТВ, кривые охлаждения.

T.V. Olshanskaya, E.M. Fedoseeva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**SELECTION OF THE MAIN CRITERIA OF THE THERMAL CYCLE FOR THE PREDICTING
METHODS OF THE STRUCTURE OF WELDS AT ELECTRON-BEAM WELDING**

Predicting the structure of welds, including electron-beam welding, is an important part of the overall weld quality. To predict the quantitative composition of the resulting structural components at electron-beam welding it is necessary to construct structural diagrams of austenite decomposition, taking into account the features of high-speed heating and cooling. Structural diagrams can be based on both physical models of isothermal and thermokinetic diagrams and regression equations, provided that they are adapted to the thermal cycle of electron-beam welding. On the basis of the analysis of modern methods of research of kinetics of austenite transformation at cooling and forecasting of microstructure, the basic directions for a choice of a technique of forecasting of structure of welded joints with reference to electron-beam welding are allocated. The research of the work is based on the analysis of thermal cycles for different parts of the welded joint and possible criteria for further forecasting of the forming structure. The received results have shown the following: traditionally accepted time and speed of cooling in the interval of temperatures below 800 °C do not reflect features of high-speed cooling at the electron-beam welding which differs also on depth and width of the welded joint. In this case, for the complete characterization of the thermal cycle, the criteria should reflect the entire history of cooling, starting with the maximum temperature reached during heating, and not only in the temperature range of structural-phase transformations. These criteria may be the maximum heating temperature for a given thermal cycle and the maximum instantaneous cooling rate achieved in it.

Keywords: electron-beam welding, thermal cycle, cooling rate, welded seam, metal structure, thermokinetic diagram, phase composition, instantaneous temperature change rates, heat dissipation factor, cooling curves.

В сварном шве при кристаллизации происходят сложные металлургические процессы. После завершения процесса кристаллизации при последующем охлаждении в металле шва и зоне термического влияния происходят структурно-фазовые превращения. Вид и характер превращений зависят в первую очередь от свариваемого материала (химического состава, наличия полиморфных и структурных превращений) и его исходного состояния, а также от термического цикла процесса. Строение зоны термического влияния определяется по температурным интервалам, в пределах которых происходит нагрев основного металла при сварке. Границами температурных интервалов являются критические точки структурно-фазовых превращений в соответствии с диаграммой состояния для этого материала.

Для широкого класса сталей (низко- и среднелегированных с низким и средним содержанием углерода) наиболее «опасным» считается участок основного металла, прилегающий к сварному шву и нагреваемый выше температуры конца фазового перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ (температуры A_{c3}), так как на этом участке в процессе охлаждения возможно образование структур закалочного типа. Наложение фазовых напряжений на сварочные может значительно «ослабить» металл и привести к его разрушению и появлению холодных трещин. Вид сформировавшейся микроструктуры на этом участке зависит от скорости охлаждения, так как скорость охлаждения определяет кинетику трансформации аустенита.

В теории металловедения и термической обработки материалов большое внимание уделяется прогнозированию кинетики распада аустенита при охлаждении и разработке физических и регрессионных моделей процесса или его основных характеристик.

Пранализировав современные методы исследования кинетики превращения аустенита при охлаждении и прогнозирования микроструктуры [1–10], можно выделить следующие основные направления для выбора методики прогнозирования структуры сварных соединений применительно к электронно-лучевой сварке.

Качественный (экспресс) анализ образующихся структурных составляющих в металле сварного шва и зоны термического влияния можно проводить путем нанесения кривых охлаждения, соответствующих термическому циклу заданного участка, на изотермическую или термокинетическую диаграмму распада аустенита. При этом диаграмма может быть как экспериментальной, так и расчетной.

Для прогнозирования количественного состава образующихся структурных составляющих при электронно-лучевой сварке необходимо построение структурных диаграмм распада аустенита,

учитывающих особенности высокоскоростного нагрева и охлаждения. Основой для построения структурных диаграмм могут стать как физические модели построения изотермических и термокинетических диаграмм, так и регрессионные уравнения, при условии их адаптации к термическому циклу электронно-лучевой сварки.

Для прогнозирования микроструктуры металла шва и зоны термического влияния необходимо следующее:

- знать изменение температуры во времени (термический цикл) для заданного участка сварного соединения;

- определиться с основными критериями, соответствующими термическому циклу, с помощью которых будет оцениваться вероятность и процентное соотношение образования структурных составляющих.

Основным критерием при определении микроструктуры в сварных соединениях является скорость охлаждения. В частности, для низко- и среднелегированных сталей ориентируются по скорости охлаждения в интервале значений температуры наименьшей устойчивости аустенита 600–500 °C ($w_{6/5}$) [11, 12]. Также широко используется в качестве критерия время охлаждения в интервале значений температуры 800–500 ($t_{8/5}$) и 800–200 °C ($t_{8/2}$) [13–15]. Скорость $w_{6/5}$ и температуру $t_{8/5}$ охлаждения можно рассчитать из термического цикла. Однако скорости нагрева и охлаждения в процессе сварки изменяются во времени, поэтому точнее будет использовать мгновенные скорости процесса. Используя термический цикл сварки, также можно оценить и мгновенную скорость охлаждения [16–19]. Поскольку электронно-лучевая сварка отличается от других видов сварки более высокими скоростями нагрева и охлаждения, а также применяется для сварки средне- и высоколегированных сталей, имеющих более низкий температурный интервал наименьшей устойчивости аустенита, возникает необходимость выбора других критериев для определения процентного соотношения структурных составляющих. Таким критерием может стать мгновенная скорость охлаждения.

В работе проведен анализ термических циклов при электронно-лучевой сварке для различных участков сварного соединения по ширине и глубине, для того чтобы определиться с выбором основного критерия, который будет использоваться в методах прогнозирования образующихся структурных составляющих.

Температурно-временной цикл для заданной точки сварного соединения, полученного электронно-лучевой сваркой, можно построить, используя одно из уравнений тепловых моделей [20]. Вид

уравнения выбирается в зависимости от вида траектории перемещения электронного луча при сварке.

Для построения термического цикла в уравнениях задаются координаты y и z рассматриваемой точки сварного соединения, координата x является переменной и изменяется от положительного до отрицательного значения. При положительных значениях координаты x происходит нагрев, при $x = 0$ температура имеет максимальное значение, а при отрицательных значениях x происходит процесс охлаждения.

Проведем расчет термических циклов для различных участков сварного соединения и их анализ на примере стали 20Х3МВФ (ЭИ415-Ш). Сварка проводилась по серийной заводской технологии: кольцевой шов, соединение «в замок» при значениях толщины свариваемых элементов 11 и 15 мм. Режимы сварки: ускоряющее напряжение $U = 30$ кВ, скорость сварки $V_{св} = 10$ м/ч, ток электронного луча $I_{л} = 100$ мА. При сварке применялась осцилляция электронного луча по эллиптической траектории, амплитуда по координате $x - 0,5$ мм, по координате $y -$ на 10 % меньше (0,45 мм). Макроструктура в поперечном сечении полученного сварного соединения представлена на рис. 1, а.

Уравнения для определения мгновенных скоростей нагрева и охлаждения выводятся из уравнений решения тепловых задач [20]:

$$W(x, y, z, \tau) = \frac{dT(x, y, z, \tau)}{dt} \text{ при } dt = \frac{dx}{V};$$

$$W(x, y, z, \tau) = \frac{dT(x, y, z, \tau)}{dt} V.$$

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 1, 2. В частности, на рис. 1, б показана расчетная форма шва, на рис. 1, в, д – изменение температуры мгновенных скоростей нагрева и на рис. 1, з, е – охлаждения во времени. Для построения термических циклов и мгновенных скоростей были выбраны следующие участки сварочного соединения: металл шва – точки 1, 4; зона перегрева, температура 1350 °С – точки 2, 5; зона полной перекристаллизации, температура 1000 °С – точки 3, 6. Также при расчете учитывалась разная глубина этих участков: точки 1–3 – на глубине 1,5 мм, точки 4, 5, 6 – на глубине 6 мм.

На графиках термических циклов для верхней части шва видно, что в процессе охлаждения при температуре ниже 500 °С наблюдается практически одинаковое изменение температуры во времени (см. рис. 1, в, точки 1–3). В нижней части шва начиная с температуры 800 °С кривые охлаждения для различных точек сварного соединения практически совпадают (см. рис. 1, д, точки 4–6).

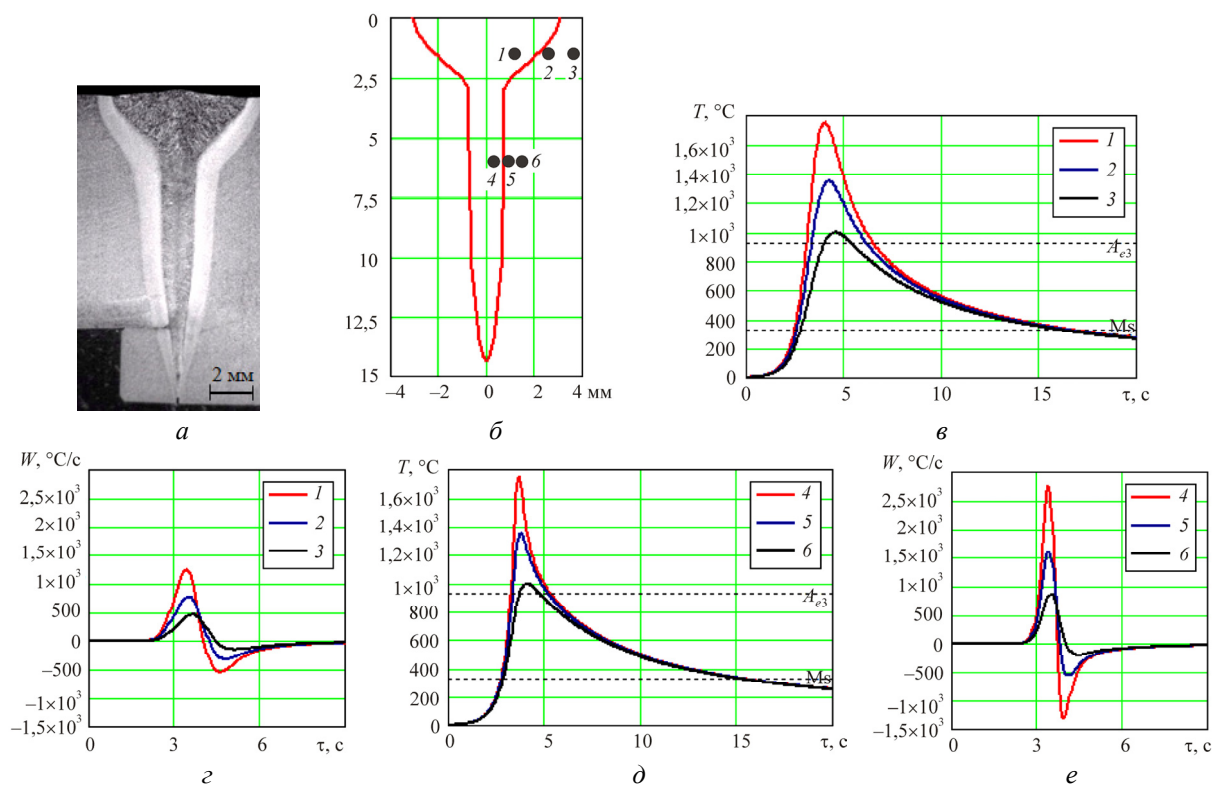


Рис. 1. Макроструктура сварного соединения (а), расчетная форма шва (б), термические циклы (в, д) и мгновенные скорости изменения температуры (з, е), сталь 20Х3МВФ: точки 1–3 при $h = 1,5$ мм; точки 4, 5, 6 при $h = 6$ мм, 1, 4 – металл шва; 2, 5 – зона перегрева; 3, 6 – зона полной перекристаллизации

Максимально достигаемые значения скорости нагрева и охлаждения в нижней части шва значительно превосходят максимальные значения, достигаемые в верхней части (см. рис. 1, з, е). Чтобы определить мгновенную скорость охлаждения в заданном интервале значений температуры, нагляднее будет представить изменение скоростей нагрева и охлаждения в зависимости не от времени, а от температуры (рис. 2). Во всех случаях в процессе нагрева мгновенная скорость достигает максимального значения при значениях температуры ниже наибольшей температуры нагрева в данной точке, затем скорость падает (см. рис. 2, а, б). При этом скорость нагрева в металле шва в нижней части увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с верхней частью шва (точки 1 и 4). В зоне термического влияния скорости нагрева в межкритической области ($A_{c1}-A_{c3}$) превышают $500\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, а время пребывания металла выше A_{c3} составляет не более 3 с (см. рис. 1, д). При таких скоростях нагрева подавляются и диффузионные процессы, и процессы, связанные с миграцией границ. Соответственно, на данном участке существенный рост зерна наблюдаться не будет, а образовавшийся аустенит будет обладать значительной химической неоднородностью.

В процессе охлаждения сначала идет резкое увеличение мгновенной скорости (см. рис. 2, в, з), достигается максимальное значение, скорость охлаждения снижается. Чем дальше от источника нагрева находится рассматриваемая точка, тем меньше интервал значений температуры, в котором происходит резкое увеличение скорости охлаждения. При охлаждении ниже равновесной температуры начала фазового превращения A_{e3} существенные отличия в характере изменения скорости охлаждения не наблюдаются и скорость охлаждения принимает практически одинаковые значения. Именно при этих значениях температуры в сварном соединении должны происходить структурно-фазовые превращения. Чтобы судить, в одинаковых ли условиях происходит охлаждение разных участков сварного соединения, определим значения скорости охлаждения в интервале значений температуры наименьшей устойчивости аустенита $600-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($w_{6/5}$) и время охлаждения в интервале значений температуры $800-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($t_{8/2}$). Полученные данные представлены в таблице и на рис. 3. В таблице также указаны значения максимальной мгновенной скорости охлаждения данного термического цикла ($\max W_{\text{охл}}$). Для металла шва взята мгновенная скорость охлаждения при температуре ниже конца кристаллизации, соответствующей твердому состоянию, – $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

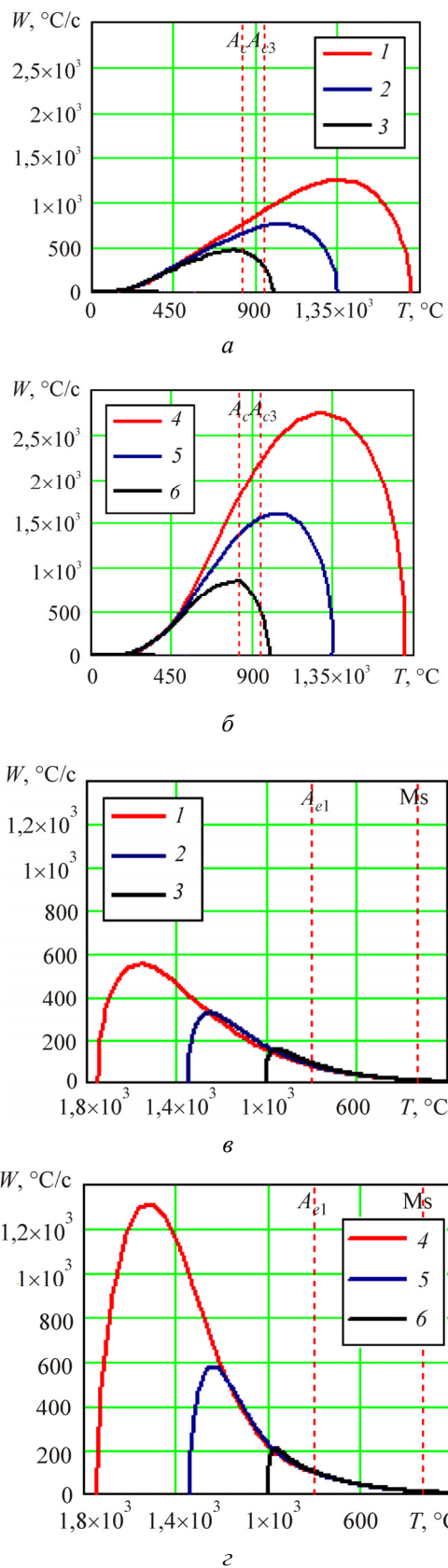


Рис. 2. Рассчитанные мгновенные скорости нагрева (а, б) и охлаждения (в, з): точки 1–3 при $h = 1,5\text{ мм}$; точки 4–6 при $h = 6\text{ мм}$, 1, 4 – металл шва; 2, 5 – зона перегрева; 3, 6 – зона полной перекристаллизации

Параметры процесса охлаждения для сварного соединения сталь 20Х3МВФ

Параметр охлаждения	Анализируемые участки сварного соединения					
	Металл шва		Зона перегрева, $T_H = 1350\text{ }^\circ\text{C}$		Зона полной перекристаллизации, $T_H = 1000\text{ }^\circ\text{C}$	
	$h = 1,5\text{ мм}$	$h = 6\text{ мм}$	$h = 1,5\text{ мм}$	$h = 6\text{ мм}$	$h = 1,5\text{ мм}$	$h = 6\text{ мм}$
$t_{8/2}, \text{ с}$	20,2	19,7	20	19,7	20,3	19,8
$w_{5/6}, \text{ }^\circ\text{C/c}$	26	30	28,5	30,4	29	31
$\max W_{\text{охл}}, \text{ }^\circ\text{C/c}$	414	1000	321	564	153	202

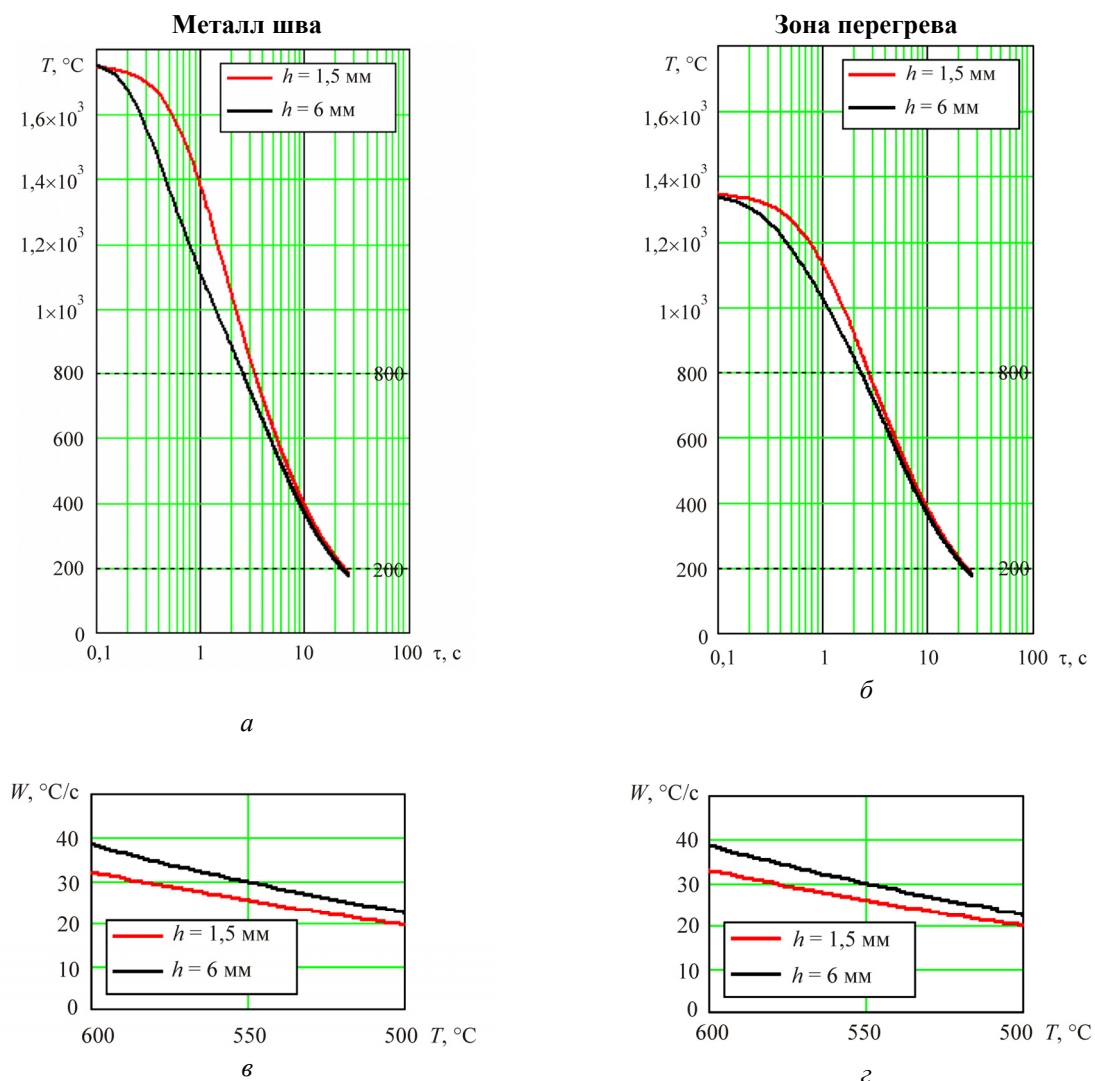


Рис. 3. Изменение температуры (а, б) и мгновенная скорость охлаждения (в, г) для металла шва (а, в) и зоны перегрева (б, г)

Сравнительный анализ данных термических циклов ($t_{8/2}$, $w_{6/5}$, $\max W_{\text{охл}}$), полученных расчетным путем для различных участков сварного соединения, показал следующее. Для зон сварного соединения, имеющих одну температуру и находящихся на разной глубине, время охлаждения в интервале значений температуры 800–200 °C ($t_{8/2}$) отличается на десятые доли секунды, скорость охлаждения

при температуре 550 °C ($w_{5/6}$) изменяется в пределах до 3 °C/c (см. таблицу). В то же время максимальные значения мгновенной скорости охлаждения ($\max W_{\text{охл}}$) значительно возрастают по глубине: для металла шва больше чем в 2 раза, в зоне перегрева более чем в 1,7 раз, а в зоне полной перекристаллизации в 1,5 раза. При сравнении данных $t_{8/2}$, $w_{6/5}$, $\max W_{\text{охл}}$ для металла шва, зон перегрева и

полной перекристаллизации, находящихся на одной глубине сварного соединения, также наблюдаются незначительные изменения времени охлаждения в интервале значений температуры 800–200 °С и скорости охлаждения при температуре 550 °С. Максимальные значения мгновенной скорости охлаждения ($\max W_{\text{охл}}$) по ширине сварного соединения уменьшаются.

В соответствии с данными по времени $t_{8/2}$ и скорости $w_{6/5}$ процесс охлаждения сварного соединения ниже температуры фазового превращения A_{e3} происходит в одинаковых условиях. Соответственно, структура в металле шва и зоне термического влияния по всей глубине сварного соединения

должна быть одинаковой. Однако, как показал металлографический анализ, в металле шва по глубине сформировалась разная микроструктура (рис. 4, 5). Металлографические исследования металла шва проводились после травления реактивом Круппа (соляная кислота – 100 мл, азотная кислота – 10 мл, дистиллированная вода – 100 мл) на оптическом микроскопе МИМ-10 и сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira 3 LM. В нижней части сварного шва образуется практически мартенситная структура с небольшими выделениями бейнита, в верхней части шва количество бейнита больше и он выделяется в основном по границам первичных дендритных зерен.

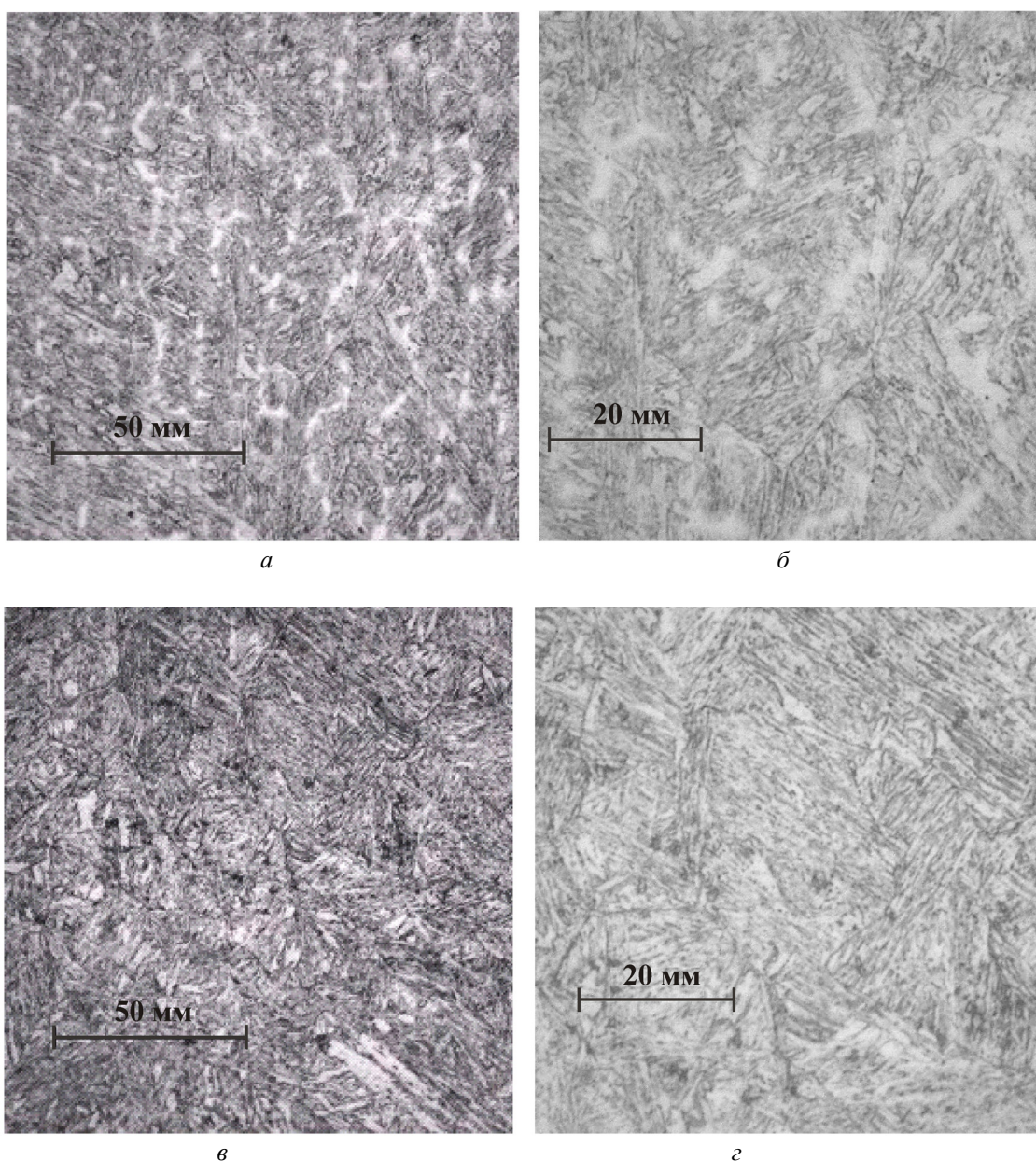
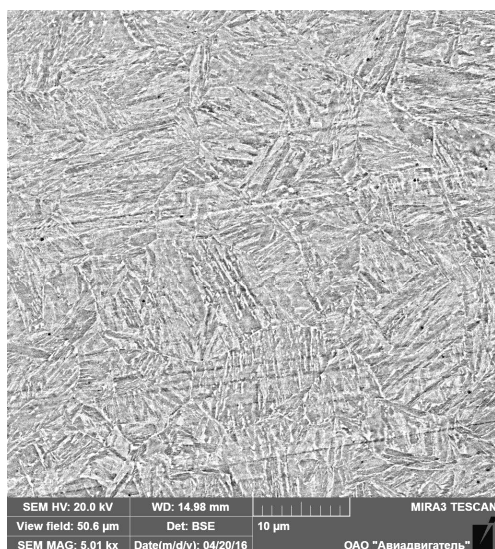
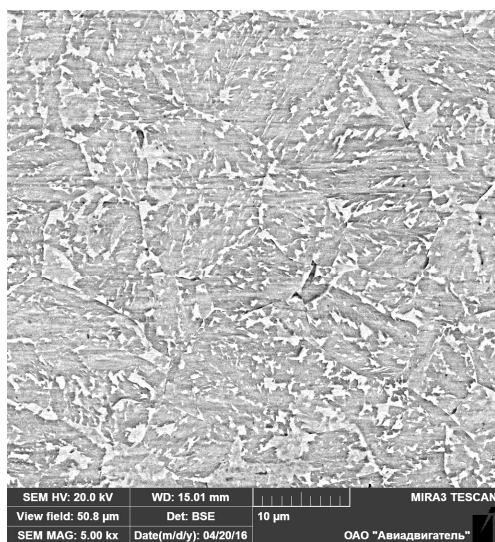


Рис. 4. Микроструктура металла шва в верхней (а, б) и нижней частях (в, г), оптическая микроскопия



а



б

Рис. 5. Микроструктура металла шва в верхней (а) и нижней частях (б), электронная микроскопия

Из представленных графиков (см. рис. 1, 2 и 3) видно, что значительное отличие в термических циклах и скоростях охлаждения наблюдается именно в высокотемпературной области, выше температуры 800 °С. При этом для различных участков сварного соединения значительные отличия наблюдаются только в значениях максимальной мгновенной скорости охлаждения $\max W_{\text{охл.}}$.

Таким образом, проведенный анализ термических циклов для различных участков сварного соединения и возможных критериев для дальнейшего прогнозирования формирующейся структуры показал следующее. Традиционно принятые время и скорость охлаждения в интервале значений температуры ниже 800 °С не отражают особенности

высокоскоростного охлаждения при электронно-лучевой сварке, отличающегося и по глубине и по ширине сварного соединения. В данном случае для полной характеристики термического цикла критерии должны отражать всю предысторию охлаждения начиная с максимально достигаемой температуры при нагреве, а не только в интервале значений температуры структурно-фазовых превращений. Такими критериями могут стать максимальная температура нагрева для данного термического цикла и максимально достигнутая в нем мгновенная скорость охлаждения.

Список литературы

1. Рыжков Ф.Н., Суворин В.Я. Технологические особенности сварки в вакууме колеблющимся поперек шва электронным пучком // Автоматическая сварка. – 1971. – № 1. – С. 16–21.
2. Yazovskikh V.M., Belen'kii V.Ya., Ol'Shanskaya T.V. Electron beam welding with beam oscillations along the X-shaped trajectory // Weld. Int. – 1995. – Vol. 9(2). – P. 139–142.
3. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 646 с.
4. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2001. – 550 с.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справ.: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996–2000. – 992 с.
6. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. – М.: Металлургия, 1968. – 695 с.
7. Князева А.Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 357 с.
8. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.
9. Пертров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов (с основами физической химии) – М.: Высш. шк., 1997. – 392 с.
10. Ефименко Л.А., Прыгаев А.К., Елагина О.Ю. Металловедение и термическая обработка сварных соединений: учеб. пособие. – М.: Логос, 2007. – 455 с.
11. Ольшанская Т.В. Изменение структуры и свойств ЗТВ низколегированных сталей от термического цикла сварки // Славяновские чтения: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Липецк, 2009. – С. 95–104.
12. Ольшанская Т.В. Исследование влияния технологических параметров сварки на свойства ЗТВ с помощью планирования и анализа регрессионных экспериментов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 92–102.
13. Сварка и свариваемые материалы: справ.: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов / под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.

14. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

15. Гривняк И. Свариваемость сталей / пер. со словац. Л.С. Гончаренко; под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.

16. Язовских В.М., Смирнов В.Ф., Ольшанская Т.В. Расчет режимов сварки микролегированной стали 16Г2АФ // Сварка в Сибири. – 2004. – № 2. – С. 38–40.

17. Язовских В.М., Смирнов В.Ф., Ольшанская Т.В. Расчет режимов сварки стали 16Г2АФ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика и технология материалов и конструкций. – 2004. – № 8. – С. 258–265.

18. Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V. Calculation of dynamic processes in the welded seams received at arc ways of welding // *Global J. of Pure and App. Mathem.* – 2017. – Vol. 13(1). – P. 81–88.

19. Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V. Structure formation and nonmetallic inclusions in welded joints when welding steel X65 by STT+API technology // *Materials Sci. Forum. Mechan. Eng., Materials Sci. and Civil Eng. IV.* – 2017. – Vol. 893 – P. 229–233.

20. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М., Колева Е.Г. Построение тепловых моделей при электронно-лучевой сварке методом функций Грина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 3. – С. 49–74.

References

1. Ryzhkov F.N., Suvorin V.Ia. Tekhnologicheskie osobennosti svarki v vakuume kolebliushchimsia poperek shva elektronnyim puchkom [Technological features of vacuum welding with an electron beam oscillating across the seam]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1971, no. 1, pp. 16–21.

2. Yazovskikh V.M., Belen'kii V.Ya., Ol'Shan-skaya T.V. Electron beam welding with beam oscillations along the X-shaped trajectory. *Welding International*, 1995, vol. 9(2), pp. 139–142.

3. Karkhin V.A. Teplovye protsessy pri svarke [Thermal processes in welding]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikheskogo universiteta, 2013, 646 p.

4. Kartashov E.M. Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel: ucheb. Posobie [Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 550 p.

5. Diagrammy sostoianii dvoinykh metallicheskih system [Status diagrams of double metal systems]. Ed. N.P. Liakisheva. Moscow: Mashinostroenie, 1996–2000, 992 p.

6. Prokhorov N.N. Fizicheskie protsessy v metallakh pri svarke [Physical processes in metals during welding]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 695 p.

7. Kniazeva A.G. Teplofizicheskie osnovy sovremennykh vysokotemperaturnykh tekhnologii: ucheb. Posobie [Thermophysical foundations of modern high-temperature technologies]. Izdatel'stvo Tomskogo politekhn. universiteta, 2009, 357 p.

8. Tsaplin A.I. Teplofizika v metallurgii: ucheb. Posobie [Thermal physics in metallurgy]. Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, 230 p.

9. Pertrov G.L., Tumarev A.S. Teoriia svarochnykh protsessov (s osnovami fizicheskoi khimii) [Theory of welding processes (with basics of physical chemistry)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1997, 33 p.

10. Efimenko L.A., Prygaev A.K., Elagina O.Iu. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka svarnykh soedinenii: ucheb. Posobie [Metal science and heat treatment of welded joints]. Moscow: Logos, 2007, 455 p.

11. Ol'shanskaia T.V. Izmenenie struktury i svoistv ZTV nizkolegированных сталей от termicheskogo tsikla svarki [Changes in structure and properties of the Thermal Influence Zone of Low Alloy Steels from the Welding Thermal Cycle]. *Slavianovskie chteniia: sbornik nauchnykh trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. konf.* Lipetsk, 2009, pp. 95–104.

12. Ol'shanskaia T.V. Issledovanie vliianiia tekhnologicheskikh parametrov svarki na svoistva ZTV s pomoshch'iu planirovaniia i analiza regressionnykh eksperimentov [Investigation of the influence of technological parameters of welding on the properties of fuel injection molding machines by planning and analyzing regression experiments]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashino-stroenie, materialovedenie*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 92–102.

13. Svarka i svarivaemye materialy [Welding and materials to be welded]. Ed. E.L. Makarova. M.: Metallurgiya, 1991, 528 p.

14. Teoriia svarochnykh protsessov: ucheb. dlia vuzov [Welding Process Theory]. Ed. V.M. Neronogo. Moscow: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E. Baumana, 2007, 752 p.

15. Grivniak I. Svarivaemost' staley [Steel weldability]. Ed. E.L. Makarova. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 216 p.

16. Iazovskikh V.M., Smirnov V.F., Ol'shanskaia T.V. Raschet rezhimov svarki mikrolegirovannoi stali 16G2AF [Calculation of 16Mg2NW microalloy steel welding modes]. *Svarka v Sibiri*, 2004, no. 2, pp. 38–40.

17. Iazovskikh V.M., Smirnov V.F., Ol'shanskaia T.V. Raschet rezhimov svarki stali 16G2AF [Calculation of steel welding modes 16Mg2NW]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika i tekhnologiia materialov i konstruktssii*, 2004, no. 8, pp. 258–265.

18. Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V. Calculation of dynamic processes in the welded seams received at arc ways of welding. *Global Journal of Pure and App. Mathem.*, 2017, vol. 13(1), pp. 81–88.

19. Fedoseeva E.M., Olshanskaya T.V. Structure formation and nonmetallic inclusions in welded joints when welding steel X65 by STT+API technology. *Materials Science Forum. Mechan. Eng., Materials Sci. and Civil Eng. IV*, 2017, vol. 893, pp. 229–233.

20. Ol'shanskaia T.V., Fedoseeva E.M., Koleva E.G. Postroenie teplovykh modelei pri elektronno-luchevoi svarke metodom funktsii Grina [Construction of thermal models for electron-beam welding by Green functions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 49–74.

Получено 11.05.19

Опубликовано 20.06.19

Сведения об авторах

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Федосеева Елена Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: emfedoseeva@pstu.ru.

About the authors

Tatyana V. Olshanskaya (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru.

Elena M. Fedoseeva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: emfedoseeva@pstu.ru.