

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.09

УДК 621.791

Т.В. Ольшанская, Е.М. ФедосееваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОСТА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ**

Неметаллические включения в сварном шве, как и во всем сварном соединении, могут служить концентраторами напряжений. Включения, образующиеся в сварном шве, имеют эндогенное происхождение. Форма, размер, состав включений зависит от многих факторов. Образование включений в результате взаимодействия компонентов, растворенных в металле, связано с процессом образования новой фазы внутри исходной. Процесс образования новой фазы определяется термодинамикой (принципиальная возможность протекания процесса) и кинетикой (интенсивность, скорость протекания) процесса. В работе рассмотрен процесс образования неметаллических включений с помощью математического анализа. Выполнен расчет времени пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии, с использованием математической модели, описывающей термический цикл при нагреве пластины ограниченной толщины нормально-круговым источником тепла. Модель термического цикла при нагреве пластины ограниченной толщины нормально-круговым источником тепла получена на основе теории теплопроводности. Распределение тепла в любой точке тела в каждый момент времени удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности, решение которого найдено с помощью функции Грина. Сопоставление результатов количественного и математического анализа показало, что увеличение времени пребывания металла шва в жидком состоянии приводит к увеличению объемной доли неметаллических включений в сварном шве. При этом при сварке электродами с рутиловым покрытием увеличивается объемная доля как мелких, так и средних включений. При сварке электродами с основным покрытием с увеличением времени пребывания металла в жидком состоянии происходит увеличение объемной доли включений как крупных, так и средних и мелких.

Ключевые слова: неметаллические включения, сварной шов, математический анализ, сварочная ванна, уравнение теплопроводности, функция Грина, электроды, объемная доля включений, источник тепла, термодинамика.

T.V. Olshanskaya, E.M. Fedoseeva

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

**THE MATHEMATICAL ANALYSIS OF GROWTH
OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN THE WELDING BATH**

Nonmetallic inclusions, as well as in all welded connection, can serve in a welded seam as concentrators of tension. In a welded seam the formed inclusions have an endogenous origin. The form, the size, structure of inclusions depends on many factors. Formation of inclusions as a result of interaction of the components dissolved in metal is connected with process of formation of a new phase in initial. Process of formation of a new phase is defined by thermodynamics (a basic possibility of course of

process) and kinetics (intensity, course speed) of process. In work process of formation of nonmetallic inclusions by means of the mathematical analysis is considered. Calculation of time of stay of metal of a welding bathtub in liquid state is executed, using the mathematical model describing a thermal cycle when heating a plate of limited thickness a normal and circular source of heat. The model of a thermal cycle when heating a plate of limited thickness a normal and circular source of heat is received on the basis of the theory of heat conductivity. Distribution of heat in any point of a body in each timepoint satisfies to the differential equation of heat conductivity which solution is found by means of Green's function. The analysis of comparison of results of the quantitative and mathematical analysis has shown that increase in time of stay of metal of a seam in liquid state leads to increase in a volume fraction of non-metallic inclusions in a welded seam. At the same time when welding by electrodes with a rutitovy covering the volume fraction of both small, and average inclusions increases. When welding by electrodes with the main covering with increase in time of stay threw in liquid state there is an increase in a volume fraction of inclusions as large, and average, and small.

Keywords: nonmetallic inclusions, welded seam, mathematical analysis, welding bathtub, heat conductivity equation, Green's function, electrodes, volume fraction of inclusions, heat source, thermodynamics.

Неметаллические включения присутствуют в сварном соединении в целом, как в основном металле, так и в сварном шве. На сегодняшний день известно, что неметаллические включения могут служить концентраторами напряжений, что в сочетании с понижением пластических свойств сварного шва приводит к разрушению сварных конструкций [1, 2].

Для оценки влияния неметаллических включений на свойства металла необходимо учитывать как их химический состав и количество, так и форму, размер и расположение. Однако неизвестно, какая из этих характеристик наиболее опасна с точки зрения воздействия на свойства сварного шва.

Большинство включений, образующихся в сварном шве, эндогенного происхождения. При этом их образованию в сварочной ванне будут способствовать обогащение жидкого металла примесями вследствие ликвационных процессов и понижение совместной растворимости примесей при охлаждении металла сварочной ванны [3]. Экзогенные включения могут образовываться в результате перехода в сварочную ванну части расплавленного покрытия или неполного удаления шлаковой корки с поверхности предыдущего валика (при многопроходной сварке).

Формы и размеры включений в металле шва в основном зависят от их температуры плавления, которая, в свою очередь, определяется химическим составом включений. Состав неметаллических включений во многом зависит от способа сварки и применяемых сварочных материалов [4].

Процесс образования включений в результате взаимодействия компонентов, растворенных в металле, а также выделение включений в результате уменьшения их растворимости в железе при понижении температуры связаны с процессом образования новой фазы внутри исходной.

Процесс образования новой фазы определяется термодинамикой (принципиальная возможность протекания процесса) и кинетикой (интенсивность, скорость протекания) процесса [5]. Образование новой фазы внутри раствора начинается с появления устойчивых зародышей. Необходимым условием их образования является наличие пересыщения, которое наступает или в результате уменьшения растворимости включений при охлаждении расплава, или вследствие образования различных соединений за счет протекания химических реакций. Основную долю включений в сварном шве составляют оксиды и сульфиды.

Анализ уравнений термодинамики, приведенный в работах [6–8], показал, что интенсивность зарождения неметаллических включений в сварочной ванне и размер образующихся зародышей зависят от степени пересыщения расплава выделяющимся веществом C/C_S и от величины межфазного натяжения на границе расплав – включение $\sigma_{м-в}$, что также подтверждено автором работы [5].

Образование оксидных включений происходит при значительном пересыщении (для образования SiO_2 пересыщение расплава должно быть 80–800, для Al_2O_3 – $3 \cdot 10^6 \dots 3,6 \cdot 10^{14}$). Необходимую величину пересыщения можно снизить путем снижения величины межфазного натяжения на границе металл – включение. Известно, что чем больше содержание FeO и MnO в выделяющихся включениях, тем меньше величина межфазного натяжения на границе металл – включение и тем больше интенсивность зарождения оксидных включений.

Образование сульфидных включений [9] во многом зависит от наличия в металле сульфидообразующих элементов, так как сера в отличие от кислорода имеет неограниченную растворимость в жидком железе. Сульфидные включения образуются в сварочной ванне во время кристаллизации и после нее, уже в твердом металле.

На процесс формирования сульфидных включений оказывают большое влияние условия перехода металла из жидкого состояния в твердое. При увеличении скорости охлаждения содержание сульфи-

дов существенно снижается, а вместе с ним уменьшается и радиус включений.

Наибольшая концентрация серы будет наблюдаться у границы расплав – кристалл. Ее распределение зависит от скорости затвердевания металла, коэффициента диффузии серы в расплаве и коэффициента распределения серы между жидким и твердым металлами.

Рассмотренные аспекты формирования оксидов и сульфидов справедливы для образования устойчивых зародышей в гомогенной среде. Однако в реальных условиях сварочная ванна будет являться гетерогенной средой. В этом случае процесс образования неметаллических включений во многом будет определяться степенью смачивания новой фазы подложки, на которой выделяется эта фаза. Чем лучше смачивает подложку материал новой фазы, тем легче происходит выделение новой фазы на подложке.

Такая особенность дуговых способов сварки, как протекание через сварочную ванну тока значительной величины, может повлиять на образование неметаллических включений. Ток, протекающий через границу металл – оксидный расплав, может существенно изменить величину межфазного натяжения.

Из теории электрокапиллярных явлений следует, что при прохождении тока через границу металл – электролит электрический потенциал металла практически не изменится в том случае, если электролит будет содержать большое количество ионов данного металла, т.е. при образовании зародышей сульфидов и оксидов, имеющих большую концентрацию Fe, наложение внешнего электрического поля не должно заметно изменить условия их возникновения. При наличии в оксидной фазе значительного количества MnO прохождение тока через границу металл – включение также будет влиять на величину межфазного натяжения незначительно. Таким образом, прохождение тока через сварочную ванну в момент зарождения неметаллических включений не будет оказывать существенного влияния на процесс их образования.

Процесс образования неметаллических включений в сварных швах при дуговых способах сварки с помощью математического анализа представляет большой интерес.

Исследования проводились на сталях 17Г1С и Ст3пс. Химический состав и механические характеристики сталей представлены соответственно в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Ст3пс	0,14–0,22	0,05–0,15	0,4–0,65	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,3	до 0,08
17Г1С	0,15–0,2	0,4–0,6	1,15–1,6	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,3	до 0,3	до 0,08

Таблица 2

Механические характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	KCU ⁻⁴⁰ , Дж/см ²
Ст3пс	245	370–480	26	39
17Г1С	345	510	23	39

Образцы сваривались многослойной ручной дуговой сваркой электродами с покрытиями разного типа. Сварочные материалы и размеры образцов указаны в табл. 3.

Таблица 3

Материалы, используемые в образцах

Номер образца	Марка стали	Марка электрода	Тип покрытия	Толщина образцов, мм
1 (46)	Ст3	ОК 46	рутиловый	10
2 (53)		ОК 53	основный	10
3 (Ст2)	17Г1С	ЛБ 52У*	основный	12,4
		УОНИ 13/55	основный	
		МТГ-02	основный	

* Марки электродов, которыми были заварены корневые проходы образцов.

В табл. 4 приведен химический состав наплавленного металла в зависимости от марки используемого электрода¹.

Таблица 4

Химический состав наплавленного металла

Марка электрода	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	S	P
ОК 46	0,08	0,3	0,4	до 0,04	до 0,045
ОК 53	0,06	0,4	1,1	до 0,015	до 0,015
ЛБ 52У	0,05–0,10	до 0,75	до 1,6	до 0,02	до 0,02
УОНИ 13/55	0,08	0,2–0,5	0,6–1,2	до 0,03	до 0,035

Таблица 5

Режимы сварки электродами разного типа

Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А		
	Нижнее	Потолочное	Вертикальное
3,2	Электроды с основным покрытием		
	90–130	80–120	90–110
3,0	Электроды с рутиловым покрытием		
	80–160	80–140	80–180

Режимы сварки представлены в табл. 5.

При проведении количественного анализа был отмечен разброс размеров неметаллических включений в образцах, сваренных электродами с одинаковым типом покрытия [10]. Все процессы, связанные с образованием и ростом включений, описанные выше, напрямую зависят от объема сварочной ванны и времени пребывания металла ванны в жидком состоянии [11]. Объем сварочной ванны определяется основными параметрами режима сварки: силой тока, напряжения и скоростью сварки [12]. Однако один и тот же объем сварочной ванны можно получить при разных сочетаниях этих параметров. Как следствие, для оценки полноты протекания процессов образования неметаллических включений и их удаления из сварочной ванны необходимо определить

¹ ГОСТ 9467–75. Electrodes покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей [Электронный ресурс]. URL: <http://metplus-vrn.ru/downloads/gost9467-75.pdf> (дата обращения: 25.10.2016).

время пребывания металла сварного шва в жидком состоянии для каждого прохода.

Для расчета времени пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии можно использовать математическую модель, описывающую термический цикл при нагреве пластины ограниченной толщины нормально-круговым источником тепла. Считая, что металл сварочной ванны будет находиться в жидком состоянии при температуре более $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и построив термический цикл, можно определить время пребывания металла сварного шва при температурах свыше $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, проведя изотерму.

Модель термического цикла при нагреве пластины ограниченной толщины нормально-круговым источником тепла получена на основе теории теплопроводности. Распределение тепла в любой точке тела в каждый момент времени удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности, решение которого найдено с помощью функции Грина. Физическая сущность метода функций Грина заключается в том, что любой процесс распределения тепла в теплопроводящем теле можно представить как совокупность процессов выравнивания температуры от элементарного источника тепла, распределенного как в пространстве, так и во времени.

В общем виде решение находится следующим образом:

$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{c\rho} \int_0^t \int_V G(x, x', y, y', z, z', t - \tau) \cdot W(x', y', z', \tau) dx' dy' dz' d\tau,$$

где $T(x, y, z, t)$ – температурное поле или распределение температуры в точке с координатами x, y, z в момент времени t ; $G(x, x', y, y', z, z', t - \tau)$ – функция Грина (также функция источника, или функция влияния), применительно к теории теплопроводности может определяться как температура в точке с координатами x, y, z в момент времени t , обусловленная действием мгновенного точечного источника единичной мощности, помещенного в точку с координатами x', y', z' в течение времени τ [8]; $W(x', y', z', \tau)$ – стандартизированная функция, зависящая от формы источника тепла, начальных и граничных условий. При нулевых начальных и граничных условиях стандартизированная функция находится как функция источника нагрева: $W(x', y', z', \tau) = F(x', y', z', \tau)$.

Решение задачи теплопроводности по этому методу сводится к правильному выбору источников нагрева и их распределению. В рассматриваемом случае источник тепла выбирается нормально-круговой непрерывно-действующий, как наиболее точно описывающий реальное воздействие сварочной дуги как источника нагрева. При построении модели, описывающей распределение тепла в теле под действием нормально-кругового источника, рекомендуется подбирать фиктивный сосредоточенный источник тепла. Фиктивный сосредоточенный источник тепла – это такой источник, тепло которого q , распространяясь по пластине в течение времени t_0 , приводит к такому же распределению температуры, которое вызвано данным нормально-круговым источником. Таким образом, распределение температуры, вызванное действием нормально-кругового источника, можно рассматривать как распределение температуры от фиктивного сосредоточенного источника, введенного в определенной точке, на время t_0 . Подбирая длительность распределения фиктивного источника t_0 и количество теплоты q , можно обеспечить совпадение распределения, вызванного фиктивным источником, с распределением, вызванным нормально-круговым источником:

$$q = \exp(-kr^2) = \exp\left(-\frac{r^2}{4at_0}\right) \rightarrow kr^2 = \frac{r^2}{4at_0} \rightarrow t_0 = \frac{1}{4ak},$$

где k – коэффициент сосредоточенности нормально-кругового источника; a – коэффициент температуропроводности металла пластины.

Трехмерное уравнение теплопроводности в подвижной системе координат имеет вид [8]

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + F(x, y, z, t).$$

Геометрические условия: $-\infty < x < +\infty$; $-\infty < y < +\infty$; $0 \leq z \leq L$.

Физические условия: $\rho, c, \lambda, a = \frac{\lambda}{c\rho}$.

Краевые условия: начальные условия – $T(x, y, z, t) = 0$, граничные условия 2-го рода – $\frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial T(x, y, L, t)}{\partial t} = 0$.

Решение уравнения теплопроводности методом функции Грина имеет следующий вид:

$$T(x, y, z, t) = \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^L G(x, x', y, y', z, z', t - \tau) \cdot W(x', y', z', \tau) \partial x' \partial y' \partial z' \partial \tau.$$

Поскольку краевые условия являются нулевыми, стандартизированная функция равна функции источника тепла:

$$W(x', y', z', \tau) = F(x', y', z', \tau),$$

$$F(x', y', z', \tau) = \frac{q}{c\rho} \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') E(\tau),$$

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau \geq t. \end{cases}$$

Функция Грина определяется следующим образом:

$$G(x, x', y, y', z, z', t - \tau) = G(x, x', t - \tau) \cdot G(y, y', t - \tau) \cdot G(z, z', t - \tau);$$

$$G(x, x', t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a(t - \tau)}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x')^2}{4a(t - \tau)}\right);$$

$$G(y, y', t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a(t - \tau)}} \cdot \exp\left(-\frac{(y - y')^2}{4a(t - \tau)}\right);$$

$$G(z, z', t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a(t - \tau)}} \cdots \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{(z - z' + 2nL)^2}{4a(t - \tau)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z' + 2nL)^2}{4a(t - \tau)}\right) \right\};$$

$$G(x, x', y, y', z, z', t - \tau) = \frac{1}{(2\sqrt{\pi a(t - \tau)})^3} \exp\left(-\frac{(x - x')^2 + (y - y')^2}{4a(t - \tau)}\right) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{(z-z'+2nL)^2}{4a(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z'+2nL)^2}{4a(t-\tau)}\right) \right\}; \\ T(x, y, z, t) = & \frac{q}{8c\rho(\sqrt{\pi a})^3} \int_0^t \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^L \frac{1}{(\sqrt{t-\tau})^3} \cdot \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4a(t-\tau)}\right) \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{(z-z'+2nL)^2}{4a(t-\tau)}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z'+2nL)^2}{4a(t-\tau)}\right) \right\} \times \\ & \times \delta(x-x')^2 \delta(y-y') \delta(z-z') E(\tau) dx' dy' dz' d\tau. \end{aligned}$$

Используя свойства δ -функции и единичной функции, а также учитывая подвижность источника и постоянную времени t_0 , окончательно получим

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) = & \frac{q}{4c\rho(\sqrt{\pi a})^3} \int_0^t \frac{1}{(\sqrt{\tau+t_0})^3} \cdot \exp\left(-\frac{(x+V\tau)^2 + y^2}{4a(\tau+t_0)}\right) \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(z+2nL)^2}{4a(\tau+t_0)}\right) d\tau. \end{aligned}$$

С использованием приведенной математической модели в программе MathCAD были произведены расчеты времени пребывания металла сварочной ванны для каждого случая. Расчет времени представлен на рис. 1.

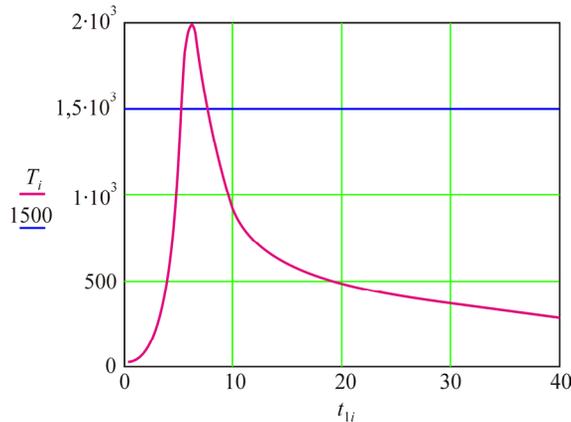


Рис. 1. Расчет времени пребывания металла шва при $T = 1500\text{ }^\circ\text{C}$

Данные количественного анализа были сопоставлены с результатами расчета времени пребывания металла шва в жидком состоянии для всех анализируемых случаев. Результаты сопоставления приведены в таблице.

Результаты расчета

Тип покрытия	Время пребывания при $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Общий об. %	Мелкие включения, об. %	Средние включения, об. %	Крупные включения, об. %
Рутиловый	1,3	0,4063	0,132117	0,267918	0,006261
Рутиловый	4,7	0,4496	0,147995	0,296237	0,005373
Рутиловый	8,2	0,508	0,18543	0,31815	0,004415
Основной	2	0,0213	0,0142	0,0071	0
Основной	5,1	0,0302	0,0178	0,0124	0
Основной	8,7	0,0365	0,0252	0,0113	0
Основной	5,57	0,0537	0,038057	0,015643	0
Основной	5,4	0,0527	0,022652	0,030049	0
Основной	4,4	0,0417	0,019563	0,022137	0
Основной	16,7	0,1634	0,07687	0,08394	0,00259
Основной	12,65	0,1148	0,066845	0,04756	0,000394
Основной	4,6	0,049	0,039596	0,009403	0
Основной	6,7	0,0712	0,048633	0,022566	0

Анализ сопоставления показал следующие закономерности. Увеличение времени пребывания металла шва в жидком состоянии приводит к увеличению объемной доли неметаллических включений в сварном шве (рис. 2, 4). При этом при сварке электродами с рутиловым покрытием увеличивается объемная доля как мелких, так и средних включений (рис. 3). При сварке электродами с основным покрытием

с увеличением времени пребывания металла в жидком состоянии происходит увеличение объемной доли и крупных, и средних, и мелких включений (рис. 5).

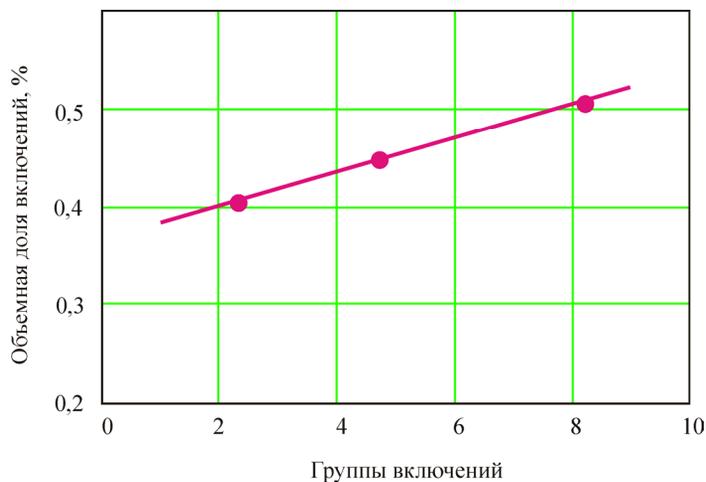


Рис. 2. Изменение общей объемной доли НВ в зависимости от времени пребывания металла шва в жидком состоянии при сварке электродами с рутиловым типом покрытия

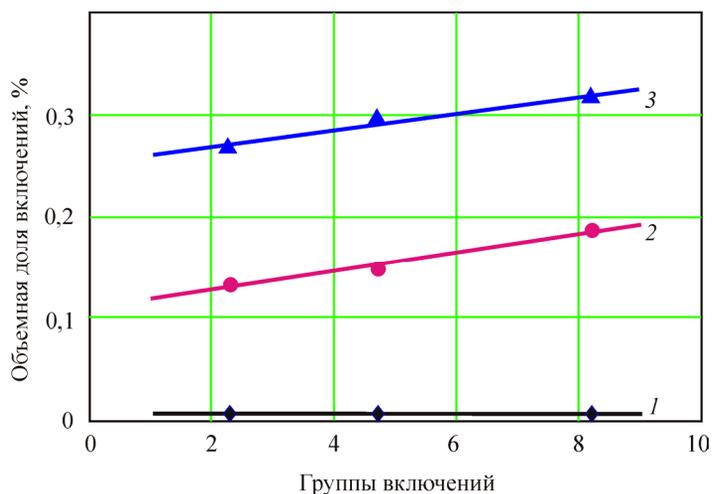


Рис. 3. Изменение объемной доли по группам включений в зависимости от времени пребывания металла шва в жидком состоянии при сварке электродами с рутиловым типом покрытия: 1 – мелкие; 2 – средние; 3 – крупные

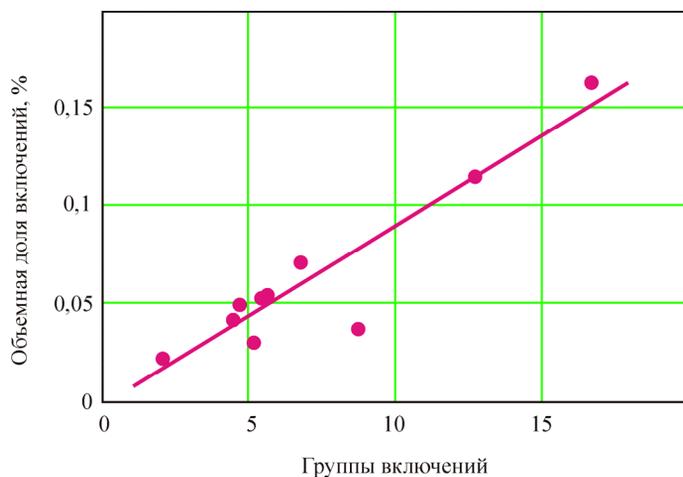


Рис. 4. Изменение общей объемной доли НВ в зависимости от времени пребывания металла шва в жидком состоянии при сварке электродами с основным типом покрытия

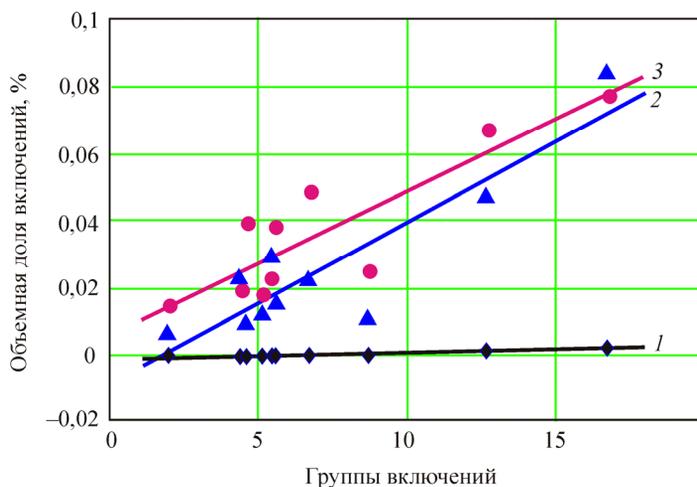


Рис. 5. Изменение объемной доли по группам включений в зависимости от времени пребывания металла шва в жидком состоянии при сварке электродами с основным типом покрытия: 1 – мелкие; 2 – средние; 3 – крупные

Таким образом, математический анализ неметаллических включений в сварных швах позволил количественно оценить объемную долю включений, которая по совокупности мелких, средних и крупных включений близка к объемной доле включений, полученных количественным анализом.

Список литературы

1. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Окенко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 175 с.
2. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А. В. Коновалов [и др.] / под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 749 с.
3. Неметаллические включения в низколегированной трубной стали / А.В. Дуб, Н.В. Баруленкова, Т.В. Морозова, С.В. Ефимов, В.Н. Филатов, С.Д. Зинченко, А.М. Ламухин // *Металлург.* – 2005. – № 4. – С. 67–73.
4. Лузгин В.П., Близиюков С.А., Близиюков А.С. Влияние природы неметаллических включений на механические свойства трубной стали 10Г2БТ // *Сталь.* – 1995. – № 6. – С. 21–26.
5. Кудрин В.А. *Металлургия стали: учебник для вузов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 560 с.
6. Деев Г.Ф., Пацкевич И.Р. *Дефекты сварных швов.* – Киев: Наук. думка, 1984. – 208 с.
7. Кривоносова Е.А., Лазарсон Э.В. *Теория сварочных процессов. Металлургические процессы при сварке и свариваемость: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т.* – Пермь, 1999. – 72 с.
8. Язовских В.М. *Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 2. Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете MathCad.* – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 119 с.
9. Новожилов Н.М., Соколова А.М. *Количество и состав сульфидных включений в металле швов при дуговой сварке // Сварочное производство.* – 1963. – № 3. – С. 12–15.
10. Ольшанская Т.В., Мясникова А.А. *Влияние типа электродного покрытия на образование неметаллических включений в сварных швах низколегированных сталей // Сварка и диагностика.* – 2014. – № 3. – С. 22–25.
11. Ольшанская Т.В. *Термодинамическая оценка условий трансформации неметаллических включений в околошовной зоне сварных соединений низколегированных сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 92–102.
12. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М., Игнатов М.Н. *Влияние термического цикла сварки на кинетику изменения формы и размеров неметаллических включений в зоне термического влияния низколегированных сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение.* – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 20–27.

References

1. Iavoiskii V.I., Rubenchik Iu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vklucheniia i svoistva stali* [Nonmetallic inclusions and properties of steel]. Moscow, Metallurgiiia, 1980, 175 p.
2. *Teoriia svarochnykh protsessov: uchebnik dlia vuzov* [Theory of welding processes: the textbook for higher education institutions]. Ed. V.M. Nerovnego, Moscow,

Izdatel'stvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N.E. Baumana, 2007, 749 p.

3. Dub A.V., Barulenkova N.V., Morozova T.V., Efimov S.V., Filatov V.N., Zinchenko S.D., Lamukhin A.M. Nemetallicheskie vklucheniia v nizkolegirovannoi trubnoi stali [Nonmetallic inclusions in the low-alloyed pipe steel]. *Metallurg*, 2005, no. 4, pp. 67–73.

4. Luzgin V.P., Blizniukov S.A., Blizniukov A.S. Vliianie prirody nemetallicheskih vklucheniia na mekhanicheskie svoistva trubnoi stali 10G2BT [Influence of the nature of nonmetallic inclusions on mechanical properties of pipe steel 10G2BT]. *Stal'*, 1995, no. 6, pp. 21–26.

5. Kudrin V.A. Metallurgiiia stali: uchebnik dlia vuzov [Steel metallurgy: the textbook for higher education institutions]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiiia, 1989, 560 p.

6. Deev G.F., Patskevich I.R. Defekty svarnykh shvov [Defects of welded seams]. Kiev: Naukova dumka, 1984, 208 p.

7. Krivososova E.A., Lazarson E.V. Teoriiia svarochnykh protsessov. Metallurgicheskie protsessy pri svarke i svarivaemost': uchebnoe posobie [Theory of welding processes. Metallurgical processes when welding and a svarivayemost: education guidance]. Permskii gosudarstvennyi tekhnichskii universitet, Perm', 1999, 72 p.

8. Iazovskikh V.M. Matematicheskoe modelirovanie i inzhener-nye metody rascheta v svarke: v 2 ch. Ch. 2. Teplovyie protsessy pri svarke i modelirovanie v pakete MathCad [Mathematical modeling and engineering methods of calculation in welding: in 2 parts. Part 2. Thermal processes when welding and modeling in a MathCad package]. Perm': Izdatel'stvo permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univernsiteta, 2008, 119 p.

9. Novozhilov N.M., Sokolova A.M. Kolichestvo i sostav sul'-fidnykh vklucheniia v metalle shvov pri dugovoi svarke [Quantity and structure of sulphidic inclusions in metal of seams at arc welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1963, no. 3, pp. 12–15.

10. Ol'shanskaia T.V., Miasnikova A.A. Vliianie tipa elektrodno-go pokrytiia na obrazovanie nemetallicheskih vklucheniia v svarnykh shvakh nizkolegirovannykh stali [Influence of type of an electrode covering on formation of nonmetallic inclusions in the welded seams low-alloyed by staly]. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 22–25.

11. Ol'shanskaia T.V. Termodinamicheskaia otsenka uslovii trans-formatsii nemetallicheskih vklucheniia v okoloshovnoi zone svarnykh soedinenii nizkolegirovannykh stali [Influence of type of an electrode covering on formation of nonmetallic inclusions in the welded seams low-alloyed by staly]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 92–102.

12. Ol'shanskaia T.V., Fedoseeva E.M., Ignatov M.N. Vliianie termicheskogo tsikla svarki na kinetiku izmeneniia formy i razmerov nemetallicheskih vklucheniia v zone termicheskogo vliianiia nizkolegirovannykh stali [Thermodynamic assessment of conditions of transformation of nonmetallic inclusions in an okoloshovny zone of welded connections of nizkolegiro-bathrooms of staly]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 20–27.

Получено 23.01.2017

Сведения об авторах

Ольшанская Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального 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: fedoseeva.pstu@mail.ru.

About the authors

Tatyana V. Olshanskaya (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: 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: fedoseeva.pstu@mail.ru.