



# Наномодифицирование – эффективный способ формирования структуры металла шва. Часть II. Повышение эффективности наноинокуляторов в сварочной ванне

А.М. Болдырев<sup>1</sup> , С.В. Сизинцев<sup>1\*</sup> , В.Г. Санников<sup>1</sup> , В.Ф. Першин<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

\* **Контакты:** e-mail: sizincev.1991@mail.ru

**РЕЗЮМЕ:** Кратковременность существования расплава в сварочной ванне и его перегрев, большой градиент температуры вблизи межфазной границы и двумерные центры кристаллизации в виде оплавленных зерен на границе сварочной ванны уменьшают вероятность и скорость образования центров кристаллизации в жидкой фазе. Это обуславливает формирование крупнозернистой столбчатой структуры металла шва, которая в сочетании с дефектами, возникающими в процессе кристаллизации, менее пластична, чем свариваемый мелкозернистый металлопрокат, и часто является причиной хрупкого разрушения конструкции. Поэтому получение мелкозернистой структуры металла шва является постоянной проблемой сварочного производства.

В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным способом получения мелкозернистой структуры металла шва является модифицирование сварочной ванны. При этом в сварочную ванну извне, в качестве готовых центров кристаллизации, вводят микро- или наночастицы тугоплавких металлов или их химических соединений (инокуляторы).

В перегретом расплаве скорость образования центров кристаллизации, из-за дезактивации частиц, снижается. Увеличить ее можно двумя способами: торможением процесса дезактивации и увеличением числа модифицирующих частиц, вводимых в сварочную ванну. В работе дан анализ факторов, определяющих модифицирующую активность инокуляторов и способов сохранения этой активности в сварочной ванне. Для обеспечения высокой активности инокулятора необходимо сократить время его пребывания в высокотемпературной зоне сварочной ванны, материал инокулятора должен иметь высокие значения температуры и теплоты плавления, но более низкие значения тепло- и температуропроводности. Уменьшение скорости нагрева и плавления частиц инокулятора достигается введением их в сварочную ванну, минуя столб дуги и высокотемпературную зону ванны, в комплексе с металлическими макрочастицами, выполняющими роль микроохлаждильников и средств транспортировки инокулятора в хвостовую часть ванны. Инокуляторы наноразмерного порядка обладают высоким термодинамическим потенциалом и связанной с этим высокой зародышеобразующей активностью. Включения оксидов, карбидов и нитридов, на базе которых формируются центры кристаллизации, в затвердевшем металле имеют прочные межатомные связи с матрицей, а в силу того, что коэффициенты их термического расширения на порядок меньше, чем матрицы, после охлаждения металла испытывают всестороннее сжатие. Поэтому такие включения не опасны, не являются концентраторами растягивающих напряжений и очагами зарождения трещин. В работе экспериментально показано, что введение в сварочную ванну углеродных нанотрубок с удельной поверхностью более 270 м<sup>2</sup>/г способствует получению мелкозернистой структуры металла шва.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** наномодифицирование металла шва, сохранение модифицирующей активности инокуляторов в сварочной ванне, модифицирование наноуглеродными трубками.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Болдырев А.М., Сизинцев С.В., Санников В.Г., Першин В.Ф. Наномодифицирование – эффективный способ формирования структуры металла шва. Часть II. Повышение эффективности наноинокуляторов в сварочной ванне // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 4. – С. 197–203. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-4-197-203.

## ВВЕДЕНИЕ

Особенности условий кристаллизации сварочной ванны: перегрев расплава, большой градиент температуры вблизи межфазной границы и двухмерные центры кристаллизации в виде полуплавленных зерен на границе ванны — уменьшают вероятность образования центров кристаллизации в жидкой фазе и обуславливают формирование в металле шва крупнозернистой столбчатой структуры. Такая структура в сочетании с дефектами, возникающими в процессе кристаллизации, менее пластична, чем свариваемый мелкозернистый металлопрокат, и часто является причиной хрупкого разрушения конструкций. Поэтому получение мелкозернистой структуры металла шва является постоянной проблемой сварочного производства. В настоящее время общепризнано, что наиболее эффективным и экономичным способом получения мелкозернистой структуры металла шва является модифицирование сварочной ванны [1].

Модифицирование — это процесс введения в сварочную ванну незначительного количества модификаторов-веществ, которые, не меняя химический состав, замедляют рост кристаллов (ингибиторы) или в качестве готовых центров кристаллизации увеличивают скорость зародышеобразования (инокуляторы).

Ингибиторы — поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые, осажаясь на гранях растущего кристалла, замедляют или приостанавливают его рост на некоторое время, за которое вследствие непрерывного теплоотвода происходит переохлаждение расплава и спонтанное эндогенное зарождение новых кристаллов. Модифицирование сварочной ванны ингибиторами пока не нашло применения в сварочном производстве из-за опасности возникновения горячих трещин по адсорбированным межзеренным прослойкам. Поэтому для получения мелкозернистой структуры металла в условиях сварки плавлением (дуговая, электронно-лучевая, лазерная) в основном применяют тугоплавкие инокуляторы. Однако из-за специфики условий кристаллизации сварочной ванны модифицирование металла при этом оказалось менее эффективным, чем при литье. Это объясняется тем, что при литье расплав перед заливкой обычно перегрет всего на 5–8% выше температуры ликвидус. А теория модифицирования и практика литейного производства показали, что с увеличением перегрева расплава в отливке формируется более крупное зерно, потому что вводимые в расплав инокуляторы с повышением температуры теряют зародышеобразующую способность (деактивируются) [2, 3]. В условиях сварки перегрев расплава в сварочной ванне в 2–3 раза больше, чем при литье (16–20% от температуры ликвидус). В связи

с этим, одной из главных проблем получения мелкозернистой структуры сварного шва является проблема сохранения модифицирующей активности инокуляторов в сварочной ванне.

### Факторы, определяющие активность инокулятора в сварочной ванне

Не все частицы инокулятора, введенные в сварочную ванну, становятся центрами кристаллизации. Это зависит от температуры сварочной ванны, времени пребывания частицы в опасной высокотемпературной зоне, степени структурного и размерного соответствия ее кристаллизующему металлу. Поэтому к вопросу зародышеобразования новых зерен при введении инокуляторов в расплав необходим вероятностный подход.

Если в единицу объема расплава за одну секунду вводится  $N$  частиц инокулятора, а вероятность того, что они могут стать зародышами новых зерен равна  $P_N$ , то скорость зародышеобразования  $n$  в этом случае будет равна произведению этих величин [ $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ ]:

$$n = N \cdot P_N \quad (1)$$

Отсюда следует, что увеличить скорость зародышеобразования в сварочной ванне можно двумя путями:

1 — увеличением числа модифицирующих частиц  $N$ , вводимых, например, за 1 сек. в ванну; 2 — повышением или сохранением модифицирующей активности этих частиц, т.е. увеличением вероятности  $P_N$  ( $0 \leq P_N \leq 1$ ).

Модифицирование кристаллизующегося металла, в отличие от легирования, не изменяет химический состав кристаллизующегося сплава. Поэтому для увеличения числа модифицирующих частиц  $N$  при неизменности химического состава сплава необходимо уменьшение их размеров. При этом увеличивается не только число возможных центров кристаллизации в единице объема жидкой фазы, но и в связи с увеличением удельной поверхности частицы возрастает вероятность  $P_N$  того, что частица станет активным зародышем нового зерна. Например, при введении в расплав керамических частиц радиусом 0,05 мкм (50 нм) в отливках из стали получают зерно в 1,5–2 раза мельче, чем в отливках без модификатора. А применение частиц с радиусом порядка 0,005 мкм (5 нм) обеспечивает измельчение структуры в 4–8 раз [4].

Модифицирующая частица на пути в зону кристаллизации, перемещаясь из головной части ванны с потоками расплава, проходит участки с различной температурой. Некоторое время  $\tau_M$  она находится в опасной зоне  $l_M$ , где температура расплава пре-

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

вышает температуру плавления частицы  $T_M$  и где энергично протекают дезактивационные процессы, в результате которых уменьшается поверхностная энергия частицы. При полном расплавлении частицы исчезает межфазная граница и полностью утрачивается ее модифицирующая роль. Время  $\tau_M$  определяется длиной  $l_M$ , скоростью потоков расплава из головной части ванны в хвостовую  $V_p$  и скоростью сварки  $V_{CB}$  (рис.):

$$\tau_M = l_M / V_{CB} + V_p \quad (2)$$

Время дезактивации частицы  $\tau_D$  упрощенно можно представить как сумму трех последовательных процессов [1]:

$$\tau_D = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \quad (3)$$

где  $\tau_1$  – время нагрева модифицирующей частицы от начальной температуры  $T_0$  до температуры плавления инкулятора  $T_M$ ;  $\tau_2$  и  $\tau_3$  – время ее плавления и растворения в расплаве.

Очевидно, что для сохранения модифицирующей активности частицы необходимо, чтобы время ее пребывания в опасной зоне  $\tau_M$  было меньше времени дезактивации  $\tau_D$ :

$$\tau_M < \tau_D \quad (4)$$

На основании анализа времени нагрева, плавления и растворения сферической модифицирующей частицы радиусом  $r$  в расплаве с температурой  $T_p$  время дезактивации частицы можно выразить следующим образом:

$$\tau_D = \frac{k_1 \cdot r^2 \cdot (T_M - T_0)}{\alpha_M \cdot \Delta T_M} + \frac{k_2 \cdot r^2 \cdot L_M \cdot \rho_M}{\Delta T_M \cdot \lambda_M} + \frac{k_3 \cdot r^2 \cdot C_M}{D \cdot C_{PP}}, \quad (5)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – безразмерные коэффициенты;  $L_M, \rho_M, \lambda_M, \alpha_M, T_0$  и  $\Delta T_M$  – соответственно, теплота плавления, плотность, тепло- и температуропроводность, начальная температура и перегрев модификатора;  $C_M$  и  $C_{PP}$  – концентрация и предельная растворимость модификатора в расплаве.

Если принять, что частица нерастворима в расплаве, а начальная температура частицы  $T_0 = 0$ , то условие (4) принимает следующий вид:

$$\frac{l_M}{V_{CB} + V_p} < r^2 \cdot \left( \frac{k_1 \cdot T_M}{\alpha_M \cdot \Delta T_M} + \frac{k_2 \cdot L_M \cdot \rho_M}{\Delta T_M \cdot \lambda_M} \right). \quad (6)$$

Из неравенства (6) следует, что активность модифицирующей частицы в сварочной ванне зависит от технологических параметров процесса сварки (ле-

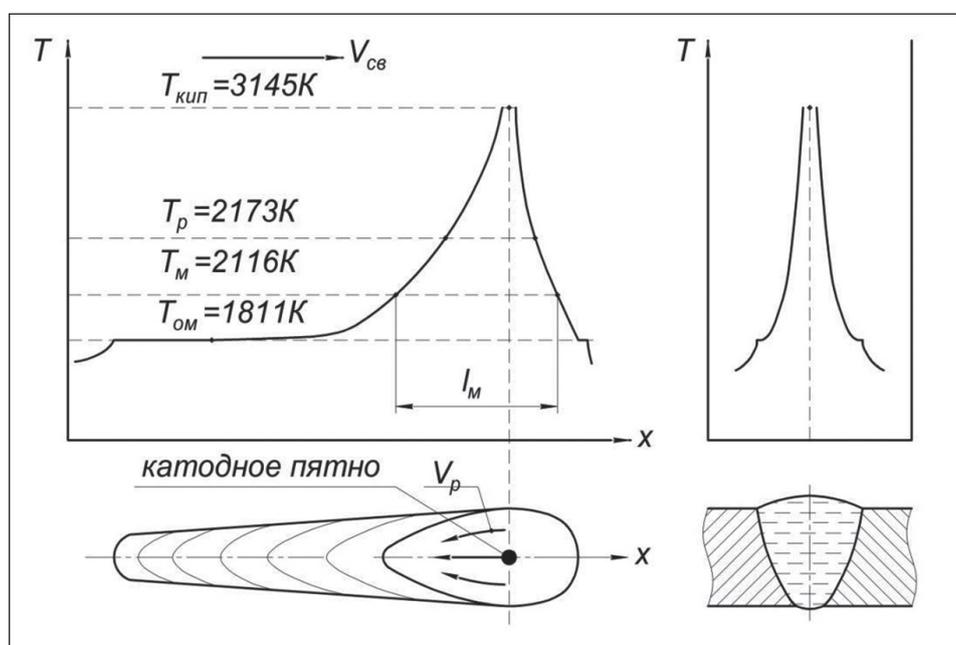


Рис. Изменение температуры расплава по оси сварочной ванны при сварке низкоуглеродистой стали с металлохимической присадкой (модификатор  $TiO_2$ ):  $T_{куп}$ ,  $T_p$ ,  $T_M$  и  $T_{ом}$  – температура кипения основного металла, средняя температура расплава, температура плавления модификатора и температура плавления основного металла;  $l_M$  – длина зоны перегрева модификатора

вая часть) и от природных ее свойств (правая часть неравенства). Для повышения активности модификатора в сварочной ванне необходимо стремиться к уменьшению левой и увеличению правой частей неравенства.

**К технологическим параметрам**, с помощью которых можно сократить время пребывания частицы в опасной зоне расплава, относятся: скорость сварки и движения частицы в хвостовую часть ванны  $V_{CB}$  и  $V_p$ ; длина опасной перегретой зоны  $l_M$  и температура расплава  $T_p$ , определяющая величину перегрева  $\Delta T_M = T_p - T_M$ . Из неравенства (6) следует, что для уменьшения времени пребывания частицы инокулятора в перегретой зоне необходимо сварку производить на максимальной скорости и принимать меры о сокращении длины  $l_M$  и перегрева  $\Delta T_M$ .

Скорость движения частицы с потоками расплава  $V_p$  возрастает пропорционально скорости сварки, кроме того ее можно увеличивать с помощью внешнего воздействия на сварочную ванну (пульсация тока, внешнее магнитное поле, колебания дуги и др.).

Длина зоны  $l_M$  с температурой, превышающей температуру плавления частицы, зависит от способа и точки ввода частицы в ванну. Введение инокулятора в хвостовую часть сварочной ванны, минуя столб дуги, сокращает до минимума величину  $l_M$  и время его пребывания в опасной зоне  $\tau_M$ .

Выше отмечено, что уменьшение размера частицы и связанное с этим повышение термодинамического потенциала резко увеличивает ее зародышеобразующую активность. Но, с другой стороны, время нагрева и плавления частицы, согласно с (5), пропорционально квадрату размера этой частицы. А это означает, что чем мельче частица, тем выше скорость ее нагрева и плавления, тем быстрее исчезнет вероятность появления в расплаве нового центра кристаллизации. Кроме того, высокая поверхностная энергия мелких частиц способствует комкованию, а малый удельный вес, характерный для оксидов, карбидов и нитридов, используемых при модифицировании сталей, приводит к их всплыванию и препятствуют равномерному распределению в расплаве. Поэтому непосредственное введение инокулятора в сварочную ванну малоэффективно.

Для обеспечения высокой модифицирующей активности частиц инокулятора предложено их вводить в сварочную ванну в комплексе с макрочастицами из металла того же или близкого состава, что и свариваемый металл. Такие макрочастицы выполняют роль микрохолодильников, служат средством доставки инокулятора в зону кристаллизации, понижают температуру расплава, препятствуют комкованию и всплыванию модифицирующих наночастиц [5]. Эта идея получила развитие и практическое применение при сварке под флюсом, с так называемой метал-

лохимической присадкой (МХП) [6]. МХП – это гранулированная присадка из проволоочной крошки (гранулята), прошедшей совместно с частицами инокулятора механосинтез в высокоэнергетической планетарной мельнице. В результате такой обработки увеличивается доля частиц наноразмерного порядка, и за счет прочных химических связей улучшается теплоотдача в гранулы. Сварка стыковых швов производится по слою МХП, засыпаемой в зазор стыка, что обеспечивает ввод модифицирующих частиц в сварочную ванну, минуя столб дуги.

Хорошие результаты модифицирования металла шва получены при введении инокулятора через дополнительную горячую проволоку (ДГП) в хвостовую часть сварочной ванны [7].

Способы ввода инокуляторов, минуя столб дуги, хотя и позволяют получить сварные соединения с высокими показателями пластичности и вязкости металла шва, но имеют и ряд недостатков. Сварку по слою МХП невозможно выполнять в других пространственных положениях, кроме нижнего, а введение инокуляторов через ДГП требует наличия двух источников электрической энергии и двух механизмов подачи проволоки. Кроме того, для большой точности точки ввода дополнительной проволоки в ванну необходима высокая синхронность работы механизмов подачи проволоки и движения сварочной головки. Рассогласование приведет к обгоранию или «примерзанию» проволоки.

По нашему мнению, дальнейшие исследования следует сосредоточить на изыскании способов модифицирования металла шва через электродную проволоку. Одним из перспективных направлений в решении этой задачи является использование современных цифровых инверторных источников питания с широкими возможностями управления процессом переноса электродного металла и сохранения модифицирующей активности инокуляторов. Программа работы таких источников позволяет сбрасывать с электрода одиночные или серию капель заданного размера через заданные промежутки времени, регулировать температуру и время пребывания капель на электроде, скорость и время их пролета через дугу и др. [8].

**Природные свойства модификатора** определяют время сохранения его активности в сварочной ванне. Их необходимо учитывать при выборе модификатора. В первую очередь, должна быть изоморфность кристаллических решеток модификатора и основного металла (правило Данкова о структурном и размерном соответствии). Преимущество имеют модификаторы с одинаковым типом и близкими размерными параметрами решеток. Кроме того, критериями пригодности модификатора должны быть его теплофизические свойства. Модификато-

ры с высокими значениями температуры и теплоты плавления, но с более низкими тепло- и теплопроводностью дольше сохраняют модифицирующую активность в сварочной ванне и, следовательно, предпочтительны.

Введенные в сварочную ванну инокуляторы, являясь центрами кристаллизации, остаются в шве в виде неметаллических включений, которые, с точки зрения механики разрушения, являются концентраторами напряжений и очагами зарождения трещин. Поэтому все инородные включения в шве до недавнего времени считались вредными. Сейчас к оценке роли включений в металле подходят избирательно.

Безусловно, включения, нарушающие сплошность металла (частицы шлака, газовые полости и поры) или уменьшающие силы межатомных связей на границах зерен, такие как *S* и *P*, являются вредными. А включения – центры кристаллизации в настоящее время рассматриваются как один из рычагов управления формированием оптимальной микроструктуры кристаллизующегося металла [9, 10]. Во-первых, вследствие малых размеров частиц инокулятора включения, образовавшиеся на их базе, менее опасны как концентраторы напряжений. Во-вторых, изоморфность их кристаллических решеток с матрицей обеспечивает высокий уровень сил взаимодействия на межфазной границе. А в связи с тем, что коэффициент термической усадки оксидов, карбидов, нитридов и др. неметаллических включений в разы меньше, чем у матрицы, в остывшем металле они будут испытывать всестороннее сжатие. Поэтому при растягивающих напряжениях разрыв на межфазной границе менее вероятен.

#### Перспективы наномодифицирования сварных швов углеродными нанотрубками

Новым направлением оксидной металлургии в борьбе с хрупкими разрушениями строительных металлоконструкций может стать наномодифицирование сварочной ванны углеродными нанотрубками (УНТ). Уникальные свойства УНТ, такие как фантастически огромная удельная поверхность (до 2000 м<sup>2</sup>/г), свидетельствует о колоссальной их адсорбционной способности и тугоплавкости (до 3000–4000°С), обеспечивающей наличие границы раздела УНТ-расплав [11], позволяют предположить о возможности использования УНТ в качестве активных инокуляторов в сварочной ванне.

В настоящее время в государственных технических университетах Воронежа (ВГТУ) и Тамбова (ТГТУ) проводятся совместные исследования модифицирования металла шва углеродными нанотрубками при дуговой сварке сталей. В качестве инокуляторов применяли разработанные и производимые

в ООО «НаноТехЦентр» при ТГТУ углеродные нанотрубки серии «Таунит-М» (внешний и внутренний диаметры, соответственно 10–30 и 5–15 нм, длина ≥ 2 мкм, удельная поверхность ≥ 270 м<sup>2</sup>/г, насыпная плотность 0,025–0,06 г/см<sup>3</sup>).

Модифицирующую активность УНТ «Таунит-М» сравнивали с активностью известных инокуляторов, применяемых при сварке сталей: TiO<sub>2</sub> – средний размер частиц 374 нм, температура плавления 1843°С, плотность 4,05 г/см<sup>3</sup> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – средний размер частиц 141,8 нм, температура плавления 2050°С, плотность 4,23 г/см<sup>3</sup>.

Образцы 300×250×10 мм из стали 09Г2С сваривали встык за один проход автоматической сваркой под флюсом АН-47. Пластины собирали с зазором 6<sup>+2</sup> мм. В зазор засыпали гранулированную металлохимическую присадку (МХП) из проволоочной крошки Ø2,5×1,5 и исследуемого инокулятора, синтезированных в планетарной мельнице. Режимы сварки: сварочный ток постоянный, полярность обратная – 650–750 А; напряжение на дуге 36–38 В; скорость сварки 18 м/ч; скорость подачи электродной проволоки Св08ГА Ø4 мм – 85 м/ч.

Оценку эффективности инокуляторов в измельчении зерна давали на основе подсчета количества зерен на фотографиях микроструктуры металла в центре поперечного сечения шва. Подсчет зерен производили в соответствии с ГОСТ 5639-82 на площади шлифа, ограниченной окружностью Ø0,798 мм, что при увеличении ×100 на фотографии соответствовала окружности Ø79,8 мм. Подсчитывали количество целых зерен внутри окружности  $n_1$  и пересеченных ее границей  $n_2$ . Вычисляли общее количество зерен на контролируемой площади  $n_{\Sigma} = n_1 + n_2/2$ ; средний размер зерна  $d_{CP}$  и относительные величины измельчения зерна в шве по количеству  $n_{\Sigma}/n_0$  и среднему размеру  $d_{CP}/d_0$  зерен ( $n_0$  и  $d_0$  – количество зерен и их средний размер в шве, выполненном без модификатора).

Результаты измерений и вычислений представлены в табл.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Таунит-М, введенные в сварочную ванну, являются активными модификаторами, почти в 2 раза увеличивающими количество центров кристаллизации. Наибольший модифицирующий эффект получен при введении в сварочную ванну Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Таунит-М и диоксид титана по модифицирующей активности показали примерно одинаковые результаты.

Необходимо заметить, что приведенная сравнительная количественная оценка активности инокуляторов является весьма грубой, так как не выдержано равенство условий их взаимодействия с расплавом (неравенство размеров частиц и концентрации, сил

Таблица

Инокулятор	Количество зерен, шт.			Размер зерна, мм	Относительная степень измельчения	
	$n_1$	$n_2$	$n_\Sigma$		$n_\Sigma/n_0$	$d_{CP}/d_0$
без инокул.	148	49	173	0,054	1	1
TiO <sub>2</sub>	307	49	332	0,039	1,81	1,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	372	54	399	0,035	2,2	1,54
Таунит-М	308	64	340	0,038	1,85	1,42

сцепления с гранулятом и др.). Данный эксперимент является поисковым, позволяющим подтвердить или опровергнуть возможность УНТ влиять на процесс кристаллизации и формирование структуры металла шва. Результаты эксперимента позволяют сделать заключение, что введение в сварочную ванну углеродных нанотрубок способствует получению мелкозернистой структуры металла шва, а исследования в области применения таких наночастиц для улучшения структуры и свойств сварных соединений актуальны и перспективны.

## ВЫВОДЫ

1. Наномодифицирование сварочной ванны на сегодняшний день является наиболее эффективным способом получения мелкозернистой структуры сварного шва при заводской и монтажной сварке крупногабаритных конструкций, не подвергающихся последующей термической обработке.

2. Для сохранения модифицирующей активности частиц инокулятора необходимо сокращать время их пребывания в высокотемпературной зоне, а материал частиц должен иметь высокие значения температуры и теплоты плавления, но более низкие тепло- и температуропроводность.

3. Включения оксидов, карбидов и нитридов, на базе которых формируются центры кристаллизации, в затвердевшем металле имеют прочные межатомные связи с матрицей, а в силу того, что коэффициенты их термического расширения на порядок меньше, чем матрицы, после охлаждения металла испытывают всестороннее сжатие. Поэтому такие включения не опасны, не являются концентратами растягивающих напряжений и очагами зарождения трещин.

4. Экспериментально показано, что введение в сварочную ванну УНТ в качестве инокуляторов способствует получению мелкозернистой структуры металла шва.

*Часть 1 статьи Болдырева А.М., Сизинцева С.В., Санникова В.Г., Першина В.Ф. «Наномодифицирование – эффективный способ формирования структуры металла шва» опубликована в номере 3/2020 журнала «Нанотехнологии в строительстве».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев А.М., Григораш В.В. Проблемы микро- и наномодифицирования швов при сварке строительных металлоконструкций // Нанотехнологии в строительстве. – 2011. – Том 3, № 3. – С. 42 – 52. – URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_3\\_2011\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_3_2011_RUS.pdf) (дата обращения: 22.11.2016).
2. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. – М.: Машиностроение, 1973. – 287 с.
3. Данков П.А. Кристаллохимический механизм взаимодействия поверхности кристалла с чужеродными элементарными частицами // Физическая химия. – 1946. – № 8. – С. 853–867.

4. Калинина А.П., Черепанов А.Н., Полубояров В.А., Коротаева З.А. Математическая модель нуклеации в жидких металлах на ультрадисперсных керамических частицах // Журнал физической химии. – 2001. – Т. 75. – № 2. – С. 275–281.

5. Болдырев А.М., Петров А.С., Дорофеев Э.Б. Способ электродуговой сварки // Авт.свид. СССР № 584996 Кл В 23 К 9/00, 17.04.76.

6. Болдырев А.М., Григораш В.В., Гушин Д.А., Гребенчук В.Г. Исследование прочности сцепления частиц в модифицирующей присадке для сварки мостовых конструкций под флюсом // Нанотехнологии в строительстве. – 2012. – Том 4, № 2. – С. 56–69. – Гос. регистр. №0421000108. URL: [http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_2\\_2012\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_2_2012_RUS.pdf).

7. Алешин Н.П., Якушин Б.Ф., Коберник Н.В., Килев В.С. Совершенствование процесса хладостойких сталей путем оптимизации баланса тепловой энергии дугового источника // Сварочное производство. – 2018. – № 10. – С. 3–13.

8. Федюкин С.В., Карасев М.В., Колодяжный Д.Ю., Жук В.В. Новое поколение промышленных импортозамещающих инверторных сварочных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитном газе стандартного типа и с разделением управления фаз горения дуги и короткого замыкания // Сварка и диагностика. – 2017. – № 5. – С. 49–53.

9. Головкин В.В., Болдырев А.М., Гушин Д.А., Кузнецов В.Д., Фомичев С.К., Смирнов И.В. Особенности распределения и роль неметаллических включений в металле шва при введении в сварочную ванну наноксидов // Сварка и диагностика. – 2015. – № 6. – С. 25–29.

10. Ma, Z.T., Janke D. Uxide metallurgy-its purposes and practical approaches // Acta Metall. – 1998. – Vol. 11, № 2. – P. 79–86.

11. Давыдов С.В. Наномодификатор как инструмент генной инженерии структурного состояния расплава чугуна // Сборник докладов Литейного консилиума № 1 «Модифицирование как эффективный инструмент повышения качества чугуна и сталей». – Челябинск: Челябинский дом печати, 2006. – 40 с.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Болдырев Александр Михайлович**, д-р. техн. наук, чл.-кор. РААСН, проф. каф. «Металлические и деревянные конструкции», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9685-4112>, e-mail: [boldyreff@inbox.ru](mailto:boldyreff@inbox.ru)

**Сизинцев Сергей Валерьевич**, асс. каф. «Металлические и деревянные конструкции», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-264X>, e-mail: [sizincev.1991@mail.ru](mailto:sizincev.1991@mail.ru)

**Санников Владимир Геннадьевич**, канд. физ.-мат. наук, доц. каф. «Физика», Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6153-5920>, e-mail: [sannikov@mail.ru](mailto:sannikov@mail.ru)

**Першин Владимир Федорович**, д-р. техн. наук, проф. каф. «Техника и технологии производства нанопродуктов», Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ); г. Тамбов, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0213-9001>, e-mail: [pershin.home@mail.ru](mailto:pershin.home@mail.ru)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

*Статья поступила в редакцию: 30.04.2020.*

*Статья поступила в редакцию после рецензирования: 26.05.2020.*

*Статья принята к публикации: 02.06.2020.*