

УДК 519.87:669.1

## РАСТВОРЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ ЧАСТИЦ ИНОКУЛЯТОРОВ КАРБИДА И НИТРИДА ТИТАНА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ

КОСТИН В. А.<sup>1</sup>, *д.т.н.*  
АЛЕКСЕЕНКО И.И.<sup>1</sup>, *м.н.с.*  
ГУРНИК О.А.<sup>2</sup>, *ст. преп.*

<sup>1</sup> Отдел физико-химических методов исследований материалов, Институт электросварки им. Е.О.Патона, ул. Боженко, 11, 03680, Киев-150, Украина, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net)

<sup>2</sup> Кафедра высшей математики и вычислительной техники, Национальный авиационный университет, пр. Комарова 1, 03058, Киев, Украина, тел. +38(063)243-47-37, e-mail: [olga.gurnick@vandex.ua](mailto:olga.gurnick@vandex.ua)

**Аннотация.** *Цель.* В последние годы для повышения качества и надежности сварных конструкций специального назначения большой интерес вызывает использование специально подготовленных нанопорошковых инокуляторов (НПИ) в качестве эффективных модификаторов структуры металла сварных швов. Вместе с тем, существует ряд обоснованных опасений, что сами частицы–инокуляторы непосредственно не оказывают влияния на формирование структуры сварного шва вследствие их возможного растворения в жидком металле сварочной ванны. В связи с этим, цель работы заключалась в моделировании процессов фазового перехода твердая/жидкая фаза при растворении тугоплавких нанопорошковых инокуляторов TiC и TiN в металле сварочной ванны и оптимизации параметров частиц обеспечивающих высокие механические свойства металла сварного шва. *Методика.* Введение частиц инокуляторов TiC и TiN в жидкую сварочную ванну осуществлялось путем использования сварочных порошковых проволок, в сердечник которых вводили дисперсные (10...100 нм) соединения карбидов TiC и нитридов TiN титана, полученных методом СВС-синтеза. Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет физического моделирования COMSOL Multiphysics. Моделирование кинетики растворения частиц было проведено для частиц различных размеров (100нм, 1мкм и 10 мкм) и формы (сферической, квадратной), которые были помещены в металлический расплав железа при температурах 2000°C и 2200°C. *Результаты.* На основе совместного решения задачи теплопроводности, диффузии и гидродинамики движения жидкости расплавленного металла с учетом движения межфазной границы металл-расплав разработана компьютерная программа для моделирования кинетики растворения частиц в металле сварочной ванны. Установлено влияние исходного размера частиц и скорости расплава на кинетику их растворения. Показано, что время существования частиц в жидкой ванне составляет от 4 до 20 с, вследствие чего некоторые фракции частиц инокуляторов могут полностью раствориться в металле сварочной ванны. Определены величина и кинетика изменения температурных, концентрационных, силовых и скоростных полей как в самих частицах, так и в расплаве. *Научная новизна.* На основе методов математического моделирования научно обоснована возможность управления параметрами частиц инокуляторов в сварочной ванне и как следствие, возможность влияния на процессы кристаллизации и формирования структуры металла шва. *Практическая значимость.* Использование наночастиц инокуляторов в металлургии сварочной ванны позволит расширить методы управления кристаллизацией сварочной ванны и обеспечат за счет изменения структуры высокий уровень механических и вязких характеристик металла сварного шва.

**Ключевые слова:** наночастицы; инокуляторы; карбиды и нитриды титана; сварочная ванна; компьютерное моделирование; растворение частиц.

## РОЗЧИНЕННЯ ТУГОПЛАВКИХ ЧАСТИНОК ІНОКУЛЯТОРІВ КАРБИДА ТА НІТРИДА ТИТАНУ В МЕТАЛЕВОМУ РОЗЧИНІ

КОСТИН В. А.<sup>1</sup>, *д.т.н.*  
АЛЕКСЕЄНКО І.І.<sup>1</sup>, *м.н.с.*  
ГУРНИК О.О.<sup>2</sup>, *ст. викладач*

<sup>1</sup> Відділ фізико-хімічних методів дослідження матеріалів, Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона, вул. Боженко, 11, 03680, Київ-150, Україна, тел. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net)

<sup>2</sup> Кафедра вищої математики та обчислювальної техніки, Національний авіаційний університет, пр. Комарова 1, 03058, Київ, Україна, тел. +38(063)243-47-37, e-mail: [olga.gurnick@vandex.ua](mailto:olga.gurnick@vandex.ua)

**Анотація.** *Мета.* В останні роки для підвищення якості та надійності зварних конструкцій спеціального призначення великий інтерес викликає використання спеціально підготовлених нанопорошкових інокуляторів (НПИ) в якості ефективних модифікаторів структури металу зварних швів. Разом з тим, існує ряд обґрунтованих побоювань, що самі частинки-інокулятори безпосередньо не впливають на формування структури зварного шва внаслідок їх можливого розчинення в рідкому металі зварювальної ванни. У зв'язку з цим, мета роботи полягала в моделюванні процесів фазового переходу тверда/рідка фаза при розчиненні тугоплавких нанопорошкових інокуляторів TiC і TiN в металі зварювальної ванни та

оптимізації параметрів частинок і зварювальної ванни, що забезпечують високі механічні властивості металу зварного шва.. **Методика.** Введення частинок інокуляторів TiC і TiN в рідку зварювальну ванну здійснювалося шляхом використання зварювальних порошкових дротів, в сердечник яких вводили дисперсні (10 ... 100 нм) сполуки карбідів TiC і нітридів TiN титану, отриманих методом СВС-синтезу. Для проведення комп'ютерного моделювання використовували розрахунковий пакет фізичного моделювання COMSOL Multiphysics. Моделювання кінетики розчинення частинок було проведено для частинок різних розмірів (100нм, 1мкм і 10 мкм) і форми (сферичної, квадратної), які було поміщено в металевий розплав заліза при температурах 2000°C і 2200°C. **Результати.** На основі спільного рішення задачі теплопровідності, дифузії та гідродинаміки руху рідини розплавленого металу з урахуванням руху міжфазної поверхні метал-розплав розроблена комп'ютерна програма для моделювання кінетики розчинення частинок в металі зварювальної ванни. Встановлено вплив вихідного розміру часток і швидкості розплаву на кінетику їх розчинення. Показано, що час існування частинок в рідкій ванні становить від 4 до 20 с, внаслідок чого деякі фракції частинок інокуляторів можуть повністю розчинитися в металі зварювальної ванни. Визначено величину і кінетику зміни температурних, концентраційних, силових і швидкісних полів як в самих частинках, так і в розплаві. **Наукова новизна.** На основі методів математичного моделювання науково обґрунтована можливість керування параметрами частинок інокуляторів в зварювальній ванні і як наслідок, можливість впливу на процеси кристалізації і формування структури металу шва. **Практична значимість.** Використання наночастинок інокуляторів в металургії зварювальної ванни дозволить розширити методи керування кристалізацією зварювальної ванни і забезпечать за рахунок зміни структурного стану високий рівень механічних і в'язких характеристик металу зварного шва.

**Ключові слова:** наночастинок; інокулятори; карбіди і нітриди титану; зварювальна ванна; комп'ютерне моделювання; розчинення частинок.

## MELTING REFRACTORY PARTICLES INOCULATORS CARBIDE AND TITANIUM NITRIDE IN THE METAL MELT

KOSTIN V. A.<sup>1</sup>, DR. SC. (TECH.),  
ALEKSEENKO I.I.<sup>1</sup>, Jr. SC. (TECH.),  
GURNIK O.A.<sup>2</sup>, senior lecturer

<sup>1</sup> Department of physical and chemical methods of research materials, PWI, st. Bozenko, 11, 03680, Kiev-150, Ukraine, tel. +38 (068) 434-34-22, e-mail: [office\\_22@ukr.net](mailto:office_22@ukr.net).

<sup>2</sup> Department of Mathematics and Computer Science, National Aviation University, pr. Komarova 1, 03058, Kiev, Ukraine, tel. +38(063)243-47-37, e-mail: [olga.gurnick@vandex.ua](mailto:olga.gurnick@vandex.ua)

**Abstract. Purpose.** In the past few years to improve the quality and reliability of welded structures for special purposes of great interest is the use of specially prepared nanopowder inoculators (NPI) as effective modifiers structure of weld metal. However, there are some reasonable fears that the particles themselves are not directly inoculator-influence on the structure of the weld due to their possible dissolution in the molten metal weld puddle. In this regard, the goal of the work was the modeling of the phase transition process solid / liquid phase by dissolving refractory nanopowder inoculators TiC and TiN in the metal of the weld pool and to optimize parameters of the particles providing high mechanical properties of the weld metal. **Methodology.** Introduction inoculators TiC particles and TiN in molten weld puddle welding was performed by utilizing the flux-cored wires in which the core is injected dispersion (10 ... 100 nm) of compound carbides TiC and titanium nitride TiN, obtained by CBC synthesis. To carry out computer simulation used the calculated physical modeling package COMSOL Multiphysics. Dissolution kinetics modeling was conducted for the particles of different particle sizes (100nm, 1 mkm and 10 mkm) and shapes (spherical, square), which were placed in a molten metal iron at temperatures of 2000°C and 2200°C. **Findings.** On the basis of the joint solution of the problem of heat conduction, diffusion and hydrodynamic fluid motion of the molten metal with the movement of the interface metal-melt developed a computer program for modeling the kinetics of dissolution of the particles in the metal of the weld pool. The influence of particle size and initial velocity of the melt on the kinetics of dissolution. It has been shown that the lifetime of the particles in the liquid bath is from 4 to 20, whereby some fraction of particles inoculators can be completely dissolved in the metal of the weld pool. Determine the magnitude and kinetics of changes in temperature, concentration, power and velocity fields both in the particles and melt. **Originality.** On the basis of mathematical modeling methods scientifically proved the possibility of controlling the parameters of the particles inoculators in the weld pool and as a consequence, the ability to influence the processes of crystallization and the formation of the structure of the weld metal. **Practical value.** The use of nanoparticles inoculators in metallurgy of the weld pool will enhance management practices crystallization of the weld pool and provide due to changes in the structure of the high level of mechanical and viscous characteristics of the weld metal.

**Keywords:** nanoparticles; inoculators; Titanium carbides and nitrides; weld pool; computer modeling; dissolution of the particles.

**Введение**

В последние годы для повышения качества и надежности сварных конструкций специального назначения большой интерес вызывает использование специально подготовленных нанопорошковых инокуляторов (НПИ) в качестве эффективных модификаторов структуры металла сварных швов. Инокуляторы представляют собой микро- (1...100 мкм) и нано- (10...10 нм) порошки различных (и прежде всего) тугоплавких соединений (оксидов, нитридов, карбидов, боридов и др.) [1-3]. Введенные в расплав сварочной ванны они однородно распределяются по объему жидкого металла сварочной ванны и служат эффективными центрами кристаллизации металлической фазы.

Использование дополнительных возможностей для управления процессом кристаллизации сварочной ванны при дуговых способах сварки позволяет эффективно контролировать параметры первичной и вторичной структуры с целью повышения комплекса механических и вязких свойств сварных соединений.

Вместе с тем, существует ряд обоснованных опасений, что сами частицы-инокуляторы непосредственно не оказывают влияния на формирование структуры сварного шва вследствие их возможного растворения в жидком металле сварочной ванны. Хотя температуры плавления большинства тугоплавких соединений (TiN – 3290°C, TiC – 3067°C, ZrO<sub>2</sub> – 2710°C) [4-6] значительно превышают температуру плавления стали (1550°C) и сварочной ванны (2000...2200°C), введение частиц инокуляторов в жидкий металл сварочной ванны все же может вызвать процесс их растворения. Это, прежде всего, связано с процессом диффузии кислорода, углерода и азота из включений в расплав при высоких температурах.

По мере развития данного процесса концентрация диффундирующих элементов в приповерхностных слоях включений будет постепенно снижаться в соответствии с их диаграммами состояния (рис.1), вызывая заметное понижение температуры ликвидуса частиц, что приведет к дальнейшей интенсификации процесса их растворения.

Известно, что процесс растворения включений локализуется в тонком слое на границе раздела фаз. Причем различают диффузионный слой в твердой фазе, толщина которого определяется величиной температурного  $dT$  и концентрационного  $dC$  переохлаждения и приповерхностный слой в жидкости, движение жидкости в котором принимают ламинарным.

С течением времени наружные слои включений (с низким содержанием элемента) растворяются, а градиент концентрации по мере растворения частицы перемещается к центру включения вместе с поверхностью раздела фаз.

Скорость данного процесса зависит как от скорости отвода тепла, так и от скорости отвода растворившихся элементов набегающим потоком.

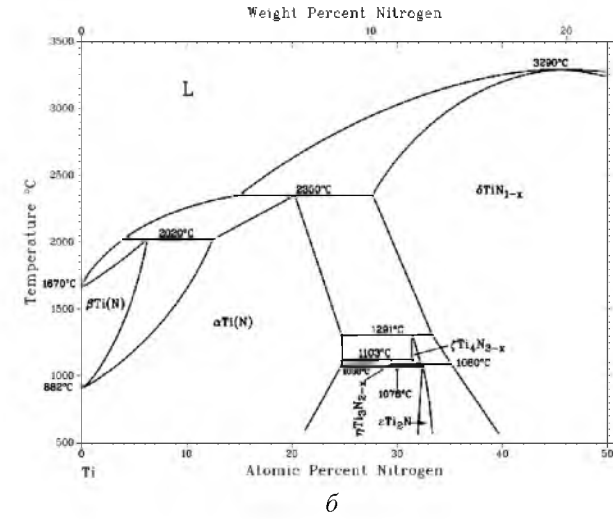
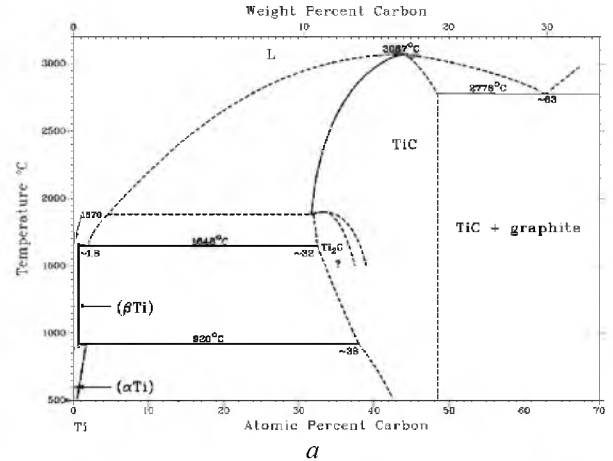


Рис.1 Диаграммы состояния систем: а) Ti-C; б) Ti-N. / Phase diagram of the system: а) Ti-C; б) Ti-N [7,8].

Отвод элементов от растворяющихся частиц может осуществляться различными механизмами – молекулярной диффузией, конвективным массопереносом (самой жидкой средой) в направлении ее движения, турбулентным (вихревым) течением жидкости.

Многие задачи по исследованию растворения сравнительно крупных частиц инокуляторов в процессе литья уже решены [9-11], тогда как их поведение в сварочной ванне практически не изучено.

Учет всех особенностей растворения частиц в жидкой сварочной ванне создает значительные трудности как для экспериментального исследования кинетики их растворения, так и для теоретического (расчетного) описания совокупности всех процессов.

**Цель**

Цель работы заключалась в моделировании процесса фазового перехода твердая/жидкая фаза при растворении тугоплавких нанопорошковых инокуляторов TiC и TiN в металле сварочной ванны и оптимизации параметров частиц и сварочной ванны обеспечивающих высокие механические свойства металла сварного шва.

**Методика**

Введение частиц инокуляторов TiC и TiN в жидкую сварочную ванну осуществлялось путем использования сварочных порошковых проволок, в сердечник которых вводили дисперсные (10...100 нм) соединения карбидов TiC и нитридов TiN титана, полученных методом СВС-синтеза. Общий вид исходных порошков наноинокляторов TiC и TiN приведен на *рис.2*.

Для проведения компьютерного моделирования использовали расчетный пакет междисциплинарных исследований COMSOL Multiphysics [12], который позволяет объединить задачи диффузии, тепло- и массопереноса, гидродинамики, механики деформируемого твердого тела в одну взаимосвязанную задачу.

Обычно при решении задачи моделирования процессов растворения твердых частиц в жидкой ванне многие авторы достаточно сильно упрощают исходную физическую модель. Не учитываются гидродинамические процессы массопереноса (конвективный, турбулентный), выделение скрытой теплоты плавления при растворении частиц, некоторые силы действующие на включение (Архимеда, тяжести, поверхностного натяжения, сопротивления жидкости), зависимость многих коэффициентов от температуры и концентрации элементов, движение межфазной границы (жидкость-частица) и другие.

Моделирование кинетики растворения частиц было проведено для частиц различных размеров (100нм, 1мкм и 10 мкм) и формы (сферической, квадратной), которые были помещены в металлический расплав железа при температурах 2000°C и 2200°C.

В зависимости от характера потока (ламинарный, турбулентный) и параметров частиц (размер, форма, плотность) частицы могут двигаться как вместе с потоком жидкости, так и всплывать (сила Архимеда) или опускаться (сила тяжести) на дно сварочной ванны.

В связи с этим в процессе моделирования принималось, что скорость движения жидкости в сварочной ванне могла изменяться от 0 до 10 мм/с.

С целью создания реальной физической модели плавления частиц учитывалось изменение параметров частиц - плотности, коэффициентов диффузии, теплопроводности от температуры металлического расплава.

В ходе расчетов учитывалось различное состояние потока жидкости взаимодействующего с частицами (ламинарное, конвективное, турбулентное), которое обуславливает различие в механизмах диффузии, тепло- и массопереноса.

**Результаты**

Для решения поставленной задачи решалась совместная нестационарная задача теплопроводности (1,2), диффузии (3,4) и гидродинамики движения жидкости расплавленного металла в форме уравнения Навье-Стокса (5) [13].

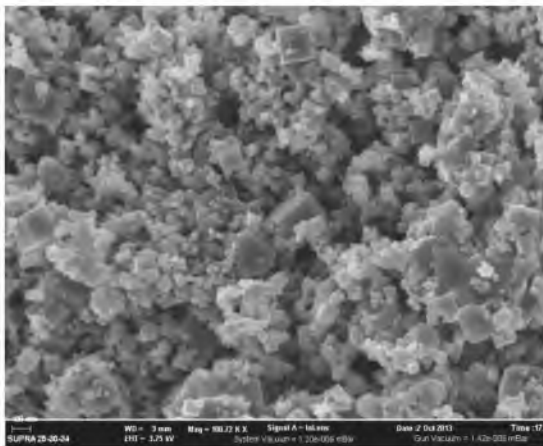
Задача о нахождении поля распределения температур в условиях фазового превращения (твердое вещество – жидкость) и динамики движения границы раздела фаз  $d\xi/dt$  сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (a_s \nabla T_s) & \text{для } 0 < \Omega < \xi \\ \rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} + \rho_l c_l u \nabla T_l = \nabla \cdot (a_l \nabla T_l) - Q_p & \text{для } \xi < \Omega < \infty \end{cases} \quad (1)$$

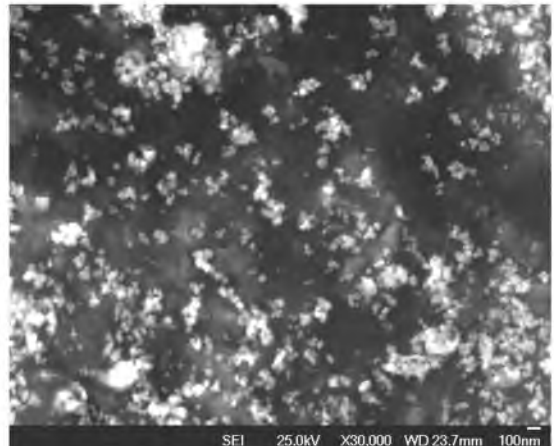
Исходя из условий энергетического баланса тепловых потоков на межфазной границе (условие Стефана) выполняется условие

$$\Phi_l - \Phi_s = k_l \nabla T_l \Big|_{\Omega=\xi} - k_s \nabla T_s \Big|_{\Omega=\xi} = \lambda \frac{d\xi}{dt} \quad (2)$$

$$T(\xi, t) = T_{ns}$$



*а*



*б*

*Рис.2* Общий вид исходных нанопорошковых материалов: *а) TiN; б) TiC/ General view of the nanopowders а)×100000; б)×30000.*

где  $\Phi_l, \Phi_s$  - тепловые потоки через границу раздела фаз  $\xi$ ,  $\rho_s, c_s, a_s, k_s$  и  $\rho_l, c_l, a_l, k_l$  - плотность (кг/м<sup>3</sup>), коэффициенты теплоемкости (Дж/(кг·К)), температуропроводности, теплопроводности твердой (s) и жидкой (l) фаз соответственно,  $\lambda$  - удельная теплота плавления частиц (Вт/м<sup>3</sup>).

Нестационарное уравнение диффузии в условиях фазового превращения может быть записано в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial C_s}{\partial t} = \nabla(D_s(T)\nabla C_s) & \text{для } 0 < \Omega < \xi \\ \frac{\partial C_l}{\partial t} = \nabla(D_l(T)\nabla C_l) & \text{для } \xi < \Omega < \infty \end{cases} \quad (3)$$

Скорость движения межфазной границы определяется из условия

$$(C_s^\xi - C_l^\xi) \cdot \frac{d\xi}{dt} = -D_s \nabla C_s \Big|_{\Omega=\xi} + D_l \nabla C_l \Big|_{\Omega=\xi} \quad (4)$$

$$C_s \Big|_{\Omega=0} = C_0, \quad C_l \Big|_{\Omega=\infty} = 0$$

где  $C_s(t)$  и  $C_l(t)$  - концентрация элемента в твердой и жидкой фазе,  $D_s, D_l$  - коэффициенты диффузии в фазах,  $C_s^\xi, C_l^\xi$  - значения концентраций элемента на границе раздела фаз  $\xi$  со стороны твердой и жидкой фаз.

Для сжимаемой жидкости уравнение Навье-Стокса может быть записано в виде:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \quad (5)$$

где  $t$  - время (с),  $\mathbf{u}$  - поле скоростей жидкости (м/с);  $\mu$  - коэффициент динамической (сдвиговой) вязкости,  $\rho$  - плотность жидкости (кг/м<sup>3</sup>),  $p$  - давление (МПа).

Выделяют два основных подхода для численного решения задач с фазовыми переходами. Первый – это методы с выделением границы раздела фаз, «ловлей фронта в узел сетки», второй класс образуют численные методы без выделения этой границы, т.е. методы сквозного счёта, предложенные Самарским (1965) и Тихоновым (1969).

В работе решение системы дифференциальных уравнений проводилось методом конечных элементов (МКЭ), путем построения неоднородной адаптивной сетки (рис. 4) и задания в каждой ячейке сетки интерполяционного многочлена Лагранжа второго порядка. Алгебраическую систему уравнений, полученную дискретизацией обыкновенных дифференциальных уравнений, решали в пакете расчетов MUMPS, PARDISO. Время расчета составляло 2...4 часа.

В результате проведенных численных экспериментов было рассчитано поле скоростей, характер изменения температуры, давления, концентрации элементов в частице и расплаве

сварочной ванны, параметры растворения частиц инокуляторов (время, скорость, геометрия).

В зависимости от скорости набегающего потока и свойств металлического расплава сварочной ванны в работе учитывался характер растворения частицы в ламинарном, конвективном и турбулентном потоке (рис. 3).

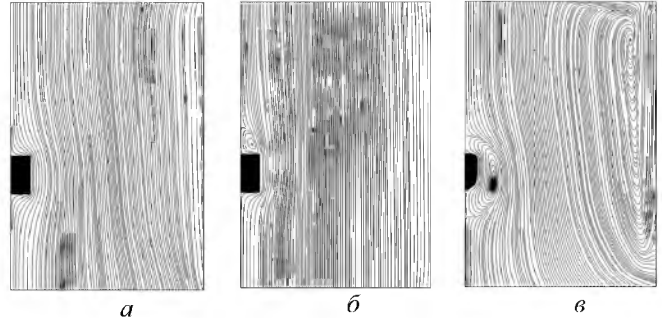


Рис.3 Характер потока металлического расплава сварочной ванны обтекающей частицу: а) ламинарный; б) конвективный; в) турбулентный / The flow pattern of the molten metal of the weld pool flowing around a particle: a) laminar; b) convective; c) turbulent.

Расчеты показывают, что при сравнительно низких скоростях потока жидкости (до 10 мкм/с) характер потока гладкий, без образования вихрей (рис.3а). При скоростях потока от 10 до 100 мкм/с в жидкости начинают образовываться вихри в области за частицей (рис.3б). При скоростях потока выше 100мкм/с вихри образуются по всему потоку жидкости (рис.3в).

В зависимости от характера набегающего потока процесс растворения частиц, температурное и концентрационное поле будет изменяться.

Расчеты показывают, что при низких скоростях потока жидкости в области, прилегающей к частице, образуется вихрь, который полностью охватывает ее со всех сторон (рис.4)

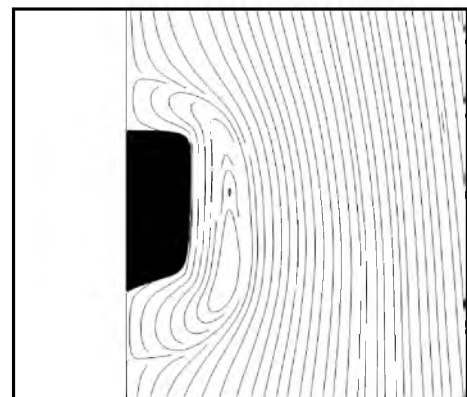


Рис.4 Формирование вихря вокруг растворяющейся частицы (черный прямоугольник частица) / Vortex formation around the dissolving particles (black rectangle - particle)

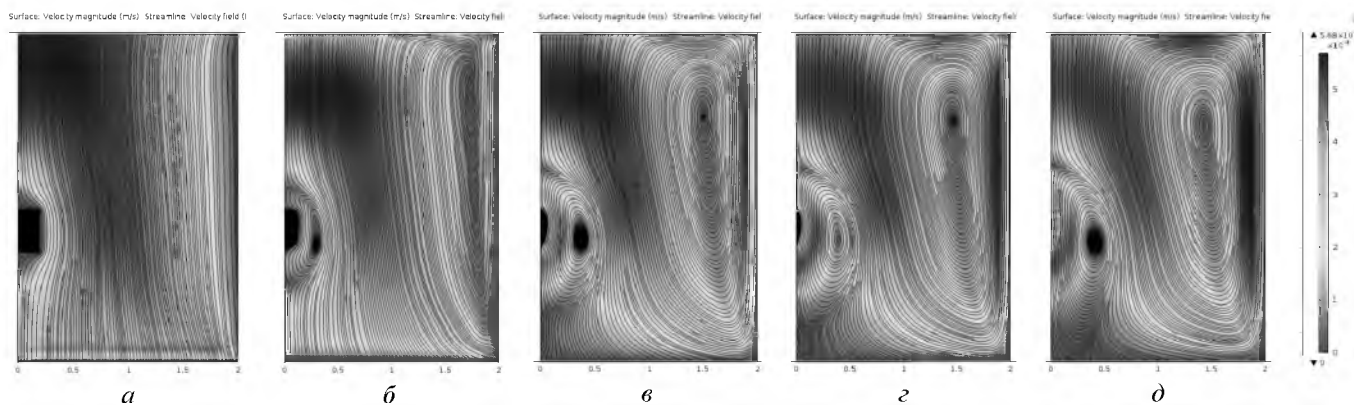


Рис.5 Кинетика растворения частиц TiC во времени / Kinetics of dissolution particle TiC over time  
а) 0 с; б) 1 с; в) 3 с; г) 5 с; д) 6 с.

В результате вокруг частицы образуется устойчивая область с повышенной концентрацией растворяющегося вещества, что значительно замедляет процесс ее дальнейшего растворения.

Кинетика растворения частиц TiC (размером 1.0 мкм и скоростью расплава 1 мм/с) во времени представлена на рис.5.

Исследование влияния размера частиц на их стойкость к растворению представлено на рис.6.

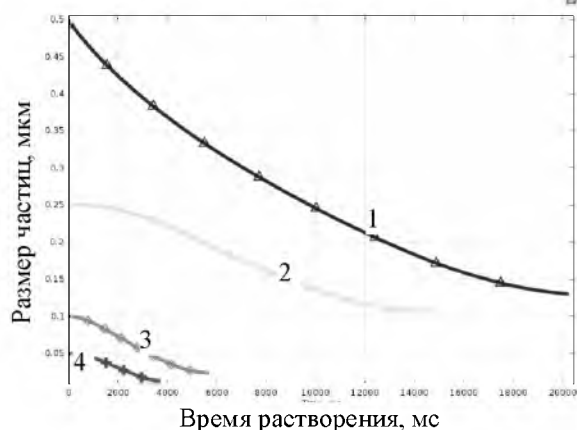


Рис.6 Влияние исходного размера частиц TiC на кинетику их растворения / Effect of initial particle size of TiC on the kinetics of dissolution:  
1) 0.5 мкм; 2) 0.25 мкм; 3) 0.1 мкм; 4) 0.05 мкм

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением размера частиц (от 0.5 до 0.05 мкм) время их существования в жидкой металлической ванне быстро снижается. Так частицы TiC размером 0.5 мкм остаются в жидкой ванне в течении 20 с, тогда как эти же частицы размером 0.05 мкм сохраняются в ванне в течении лишь 4 с.

Исследование температурного поля вокруг частицы в процессе ее растворения представлено на рис.7

Таким образом, суммируя полученные результаты следует заключить, что хотя такие модификаторы как TiN и TiC, и, особенно NbN являясь достаточно труднорастворимыми соединениями, обеспечивают сравнительно «длгое» время существования частиц в сварочной ванне (4...20 с, рис.6) которое

сопоставимо с временем существования самой жидкой ванны до момента начала ее кристаллизации (0.2 с – лазерная сварка, 5...30 с – сварка под флюсом, 50...100 с – электрошлаковая сварка), однако относительно мелкие частицы действительно могут полностью раствориться в жидкой ванне.

Вместе с тем, несмотря на их полное растворение в расплаве, «новые» частицы TiN и TiC могут вновь выделяться но уже в процессе дисперсионного твердения из пересыщенного твердого раствора. Различие же между этими частицами состоит в том, что вторичные частицы TiN и TiC будут когерентны с матрицей, тогда как первичные – нет. Первичные частицы TiN и TiC будут влиять на размер кристаллитов (аустенитных зерен), тогда как вторичные – на кинетику распада аустенита и формирование вторичной микроструктуры (бейнита).

По сравнению с оксидами (например TiO<sub>2</sub> или ZrO<sub>2</sub>) они оказываются менее устойчивыми к растворению в сварочной ванне. Повышенная устойчивость к растворению в сварочной ванне оксидов TiO<sub>2</sub> или ZrO<sub>2</sub>, по-видимому, связаны с их более низкой скоростью растворения, низкими показателями коэффициентов диффузии кислорода в оксидах и округлой формой большинства оксидов.

Соединения VN, VC и ZrC хорошо растворимы в жидком металле сварочной ванны и, вследствие этого, они малопригодны в качестве эффективных модификаторов структуры металла шва [11,12].

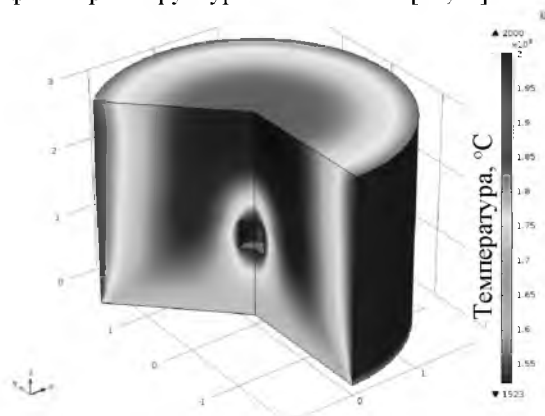


Рис.7 Температурное поле вокруг частицы TiC / Temperature field around the particle TiC.

В общем случае, для достижения большего модифицирующего эффекта от использования инокуляторов, мелкодисперсные нанопорошковые инокуляторы предпочтительнее вводить в металлургическую ванну максимально близко к моменту начала кристаллизации с целью предотвращения их растворения и получения максимального эффекта от их введения [13].

#### Научная новизна и практическая значимость

Разработана компьютерная программа для расчета растворения тугоплавких частиц в жидкой металлической ванне с учетом влияния гидродинамики сварочной ванны, теплопереноса, процессов диффузии и массопереноса учетом движения поверхности раздела фаз металл-жидкость.

Использование нанопорошковых инокуляторов позволит значительным образом модифицировать

структуру и обеспечить высокий комплекс механических свойств металла шва.

#### Выводы

1. Использование методов компьютерного моделирования металлургических процессов позволяет эффективно прогнозировать процессы растворения частиц в жидком металле сварочной ванны.
2. Расчеты показывают возможность полного растворения тугоплавких частиц TiC и TiN в жидком металле сварочной ванны в зависимости от их исходного размера и скорости потока. Данный факт позволяет объяснить отсутствие частиц инокуляторов в металле некоторых сварных швов.
3. Представляется целесообразным в дальнейшем использовать в качестве частиц инокуляторов оксиды TiO<sub>2</sub> или ZrO<sub>2</sub>.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCE

1. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / Сабуров В.П., Черепанов А.Н. и др. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1995, – 344 с.

Saburov V. P., Cherepanov A. N. et al. Plazmo-chimicheskiy sintez ultradispersnykh poroshkov i ich primeneniye dlya modifitsirovaniy metallov i splyavov [Plasma-chemical synthesis of ultrafine powders and their application for the modification of metals and alloys]. Novosibirsk: Nauka, 1995, 344 p.

[http://books.google.com.ua/books/about/Плазмохимический\\_синтез\\_ultradispersnykh\\_poroshkov\\_i\\_ich\\_primnenenie\\_dlya\\_modifitsirovaniy\\_metallov\\_i\\_splyavov?id=RBK2AAAAIAAJ&redir\\_esc=y](http://books.google.com.ua/books/about/Плазмохимический_синтез_ultradispersnykh_poroshkov_i_ich_primnenenie_dlya_modifitsirovaniy_metallov_i_splyavov?id=RBK2AAAAIAAJ&redir_esc=y)

2. Костин В.А. Влияние нановключений на формирование структуры металла швов феррито-бейнитных сталей (обзор) / В.А. Костин В.В. Головкин, Г.М. Григоренко // Збірник наукових праць НУК ім. Макарова – 2011. – №4 (433), электронное издание.

Kostin V.A. Vliyanie nanovklucheniy na formirovaniye struktury metalla shvov ferrito-beybitnykh staley (obzor) [Nano-inclusions influence on the structure of weld metal ferrite-bainite steels (Review)] Zbirnik naukovykh prac natsionalnoho universytetu korablobuduvanniy imeni Makarova [Collection of scientific papers of National Shipbuilding University named after Makarova], 2011, Issue 4(433).

<http://jnn.nuos.edu.ua/article/download/25589/23055>

3. Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами / Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.Н., Миннеханов Г.Н. – Омск.: Изд-во ОмГТУ, 2002, – с.257.

Saburov V.P., Eremin E.N., Cherepanov A.N., Minnehanov G.N. Modifitsirovaniye staley i splyavov dispersnyimi inokulyatorami [Modification of steels and alloys dispersed inoculators], Omsk: OmGTU, 2002, 257 p.

[http://lib.omgtu.ru/?id=EC&o=Search&base%5B%5D=E\\_OMS\\_TU&query=%28%221%3D621.74/%D0%9C74-920659%22%29&lf=1&rc=1&fmt=full](http://lib.omgtu.ru/?id=EC&o=Search&base%5B%5D=E_OMS_TU&query=%28%221%3D621.74/%D0%9C74-920659%22%29&lf=1&rc=1&fmt=full)

4. Тугоплавкие соединения / Самсонов Г.В., Винницкий И.М. – Москва: Металлургия, 1976, – 560 с.

Samsonov G.V., Vinnytsiy I.M. Tugoplavkie soedineniy [Refractory compounds], – Moscow, Metallurgy, 1976, 560 p.

<http://www.twirpx.com/file/232833/>

5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Карбид\\_титана](https://ru.wikipedia.org/wiki/Карбид_титана)

6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Нитрид\\_титана](https://ru.wikipedia.org/wiki/Нитрид_титана)

7. <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/C-Ti.php>

8. <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/N-Ti.php>

9. Харлашин П.С. Кинетические особенности растворения твёрдых тел в жидком расплаве / Харлашин П.С., Бакст В.Я., Бендич А.В.// Вісник Приазовського державного технічного університету – 2012. –25. – с.13-20.

Kharlashin P.S. Kineticheskie osobennosti rastvoreniya nverdykh tel v zidkom rasplave [Kinetic characteristics of dissolution of solids in the liquid melt] Visnik Priazovskoho Derzavnoho Technichnoho Universitetu [The bulletin of Pryazovskyi State Technical University]. – Mariupol : 2012. – V.25. – pp. 13 – 20.

[http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv\\_2012\\_25\\_4.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv_2012_25_4.pdf)

10. Троцан А.И. Модифицирование расплава дисперсными частицами с учетом их разброса по размерам/ Троцан А. И., Каверинский В. В., Бродецкий И. Л., Карликова Я.П.// Вісник Приазовського державного технічного університету – 2011. –22. – с.144-150.

Trotsan A.I. Modifitsirovaniye rasplava dispersnyimi chasticami s uchetom ich raznrosa po razmeram [Modification melt dispersed particles based on their size dispersion] Visnik Priazovskoho Derzavnoho Technichnoho Universitetu [The bulletin of Pryazovskyi State Technical University]. – Mariupol : 2011. – V.22. – pp. 144 – 150.

[http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv\\_2011\\_22\\_29.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv_2011_22_29.pdf)

11. Троцан А.И. Влияние распределения и размеров частиц модификатора на эффективность его действия в расплаве/ Троцан А. И., Каверинский В. В., Бродецкий И. Л., Карликова Я.П.// Вісник Приазовського державного технічного університету – 2011. –23. – с.131-138.

Trotsan A.I. Vliyanie raspredeleniya i razmerov chastic modifikatora na effektivnost ego deistviya v rasplave [Effect of particle size and distribution of the modifier on the effectiveness of its action in the melt] Visnik Priazovskoho Derzavnoho Technichnoho Universitetu [The bulletin of Pryazovskyi State Technical University]. – Mariupol : 2011. – V.23. – pp. 131 – 138.

[http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv\\_2011\\_23\\_20.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vpdvtv_2011_23_20.pdf)

12. <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

13. Голоскоков А. Е. Применение прикладного пакета Comsol Multiphysics для решения дифференциального

уравнения параболического типа / Голоскоков А. Е. Рудницкий А. В. // Вестник НТУ «ХПИ» –2010. –№11(67), электронное издание.

Goloskokov A.E. Primenenie prikladnogo paketa Comsol Multiphysics dlya pesheniya diferencialnogo uravneniya parabolicheskogo tipa [Application application package Somsol Multiphysics for solving differential equations of parabolic type]

Visnik Kharkovskogo Natsionalnoho Technichnoho Universytetu [The bulletin of Kharkov State Technical University, 2010, Issue 11(67).

[http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/vestnik/Системний\\_аналіз,\\_управління\\_і\\_інформаційні\\_технології/2010/67/statya11\\_67.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Системний_аналіз,_управління_і_інформаційні_технології/2010/67/statya11_67.pdf)

*Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. Г. М. Григоренко (Украина); д-ром. техн. наук, проф. В. Н. Сидорцом (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015