



МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ СВАРНЫХ ШВОВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В. В. ГОЛОВКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны эксперименты по проверке адекватности разработанной компьютерной программы прогнозирования количества и состава неметаллических включений в металле сварных швов низколегированных сталей. Данная программа позволяет моделировать не только окончательное количество и состав неметаллических включений, но и рассчитывать характеристики включений, находящихся в металле сварочной ванны в докристаллизационный период ее существования.

Ключевые слова: сварка, низколегированная сталь, металл шва, неметаллические включения, компьютерное моделирование, прогнозирование состава, проверка адекватности

Качество сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей в значительной мере определяется уровнем физических и физико-химических характеристик металла швов, на которые существенно влияют морфология, состав и распределение неметаллических включений. Ранее основное внимание уделялось вопросу формирования включений в процессе кристаллизации швов, и значительно меньше изучено образование оксидов при твердении металла. Охлаждение стали как в жидком, так и в твердом состоянии сопровождается уменьшением растворимости кислорода и выделением его либо в газовую фазу, либо в составе неметаллических включений. Образование в структуре металла различных по виду включений в первую очередь обусловлено избирательным химическим сродством кислорода к элементам-раскислителям. На различных этапах образования металла сварных швов это сродство различное. В работе [1] показано, что при твердении стали объемная доля вторичных (образующихся в процессе охлаждения раскисленного металла до температуры ликвидуса), третичных (образующихся в процессе охлаждения между линиями ликвидуса и солидуса) и четвертичных (образуются при температурах ниже температуры солидуса) неметаллических включений может достигать 70...80 %. В отношении металла сварных швов такие исследования не проводили, однако известно, что сами неметаллические включения в металле швов представляют собой многослойные образования, в центре которых находятся наиболее тугоплавкие соединения, а на периферии — соединения с наиболее низкой температурой плавления, значительно ниже температуры кристаллизации стали [2–4]. Исходя из этого вполне закономерно допустить, что образование неметаллических включений не заканчивается при температуре солидуса стали, а еще некоторое время продолжается в двухфазной зоне, которая образуется вокруг зародыша включения и поддерживается ликвационными процессами. В работе [2] показано, что время существо-

вания этой зоны в металле сварных швов при их кристаллизации превышает время существования жидкого металла в докристаллизационный период.

В ходе многочисленных исследований установлено, что неметаллические включения влияют на условия формирования структурных составляющих металла швов, а это в свою очередь и на служебные свойства сварных соединений. Данное влияние может определяться как общим количеством включений в металле [5, 6], так и особенностями их химического состава [7–9].

При условии многослойной морфологии включений важнейшую роль в этих процессах играет поверхностный слой, т. е. слой, сформированный на последнем этапе образования включения. Условия контакта поверхностного слоя с металлической матрицей определяют возможность образования несплошностей около включения, которые являются ловушками при диффузии водорода в металле швов [10, 11], или возможность возникновения напряженного состояния в окружающих объемах металла [12, 13].

Понятно, что прямые экспериментальные исследования в динамике процесса образования неметаллических включений в металле сварного шва практически невозможны. Исходя из этого с учетом изложенного выше, вытекает вывод об актуальности проблемы исследования состава, размеров и содержания неметаллических включений в сварных швах высокопрочных низколегированных сталей методами математического моделирования и числового эксперимента.

Методика работы. Для описания процессов образования и роста неметаллических включений была выбрана детерминированная динамическая модель с распределенными параметрами. Подобные модели универсальны и практически не стареют (на данном уровне знаний процесса), а также легко адаптируются применительно к конкретным технологиям [14]. Адаптация этих моделей к условиям, отвечающим определенным процессам сварки, производится путем уточнения параметров модели на базе экспериментальных данных, характерных для конкретных технологических режимов сварки. Эк-

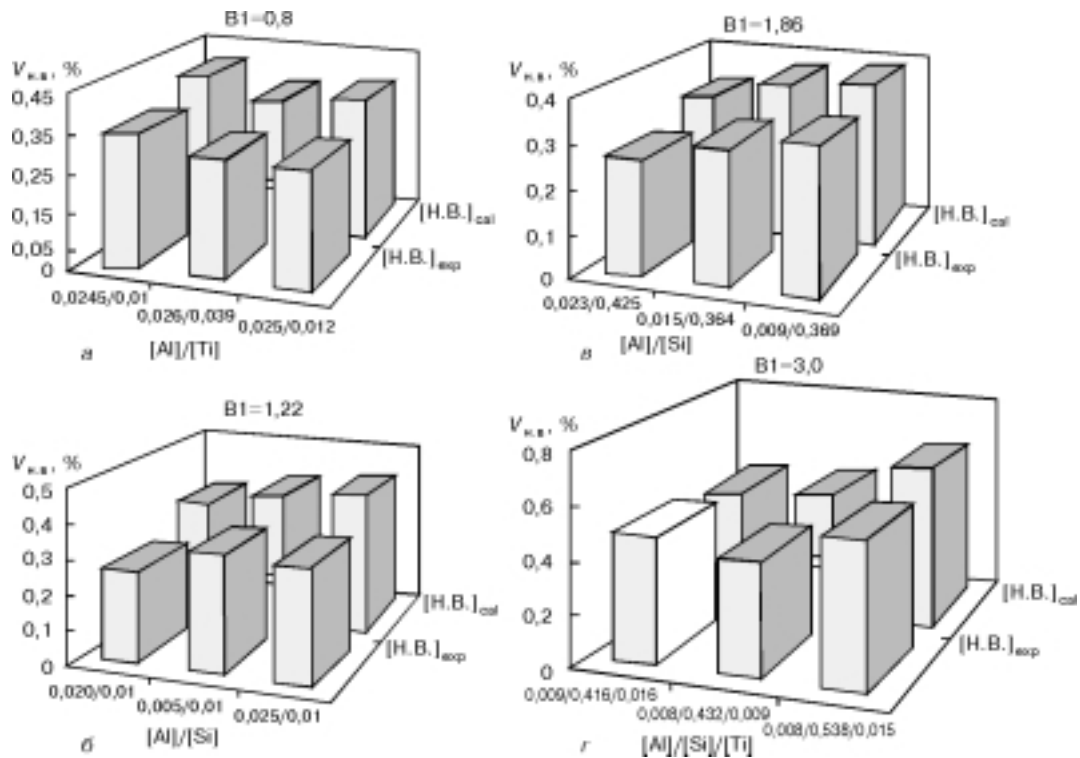


Рис. 1. Сопоставление объемов расчетных неметаллических включений $[H.V.]_{calc}$ с экспериментальными $[H.V.]_{exp}$ в зависимости от соотношений алюминия, кремния, титана в металле швов, выполненных под флюсом с различной основностью

спериментальная часть работы выполнена при сварке под флюсом.

В опытах использованы агломерированные флюсы в сочетании со сварочной проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм. Сварка выполнена на постоянном токе обратной полярности при следующих параметрах режима: $I_{св} = 640...650$ А, $U_{д} = 30...31$ В; $v_{св} = 27...28$ м/ч. В ходе экспериментов изготовлены стыковые соединения из низколегированной стали марки 10ХСНД толщиной 25 мм с разделкой кромок под углом 60° и зазором в корне шва 20 мм. Из металла последнего прохода, расположенного по середине верхнего слоя, вырезаны темплеты для изготовления шлифов для металлографических исследований.

Металлографические исследования проведены на поперечных шлифах, вырезанных из сварных соединений. Количественный анализ неметаллических включений выполнен на приборах «Omnimet» и «Quantimet-720». Общую загрязненность шва включениями определяли на «Quantimet-720», укомплектованном сканирующей телевизионной камерой, позволяющей выявлять и обрабатывать объекты размером до 0,5 мкм. Распределение включений по размерам и построение соответствующих графиков выполняли с помощью прибора «Omnimet» непосредственно со шлифов. По заданной программе на приборе подсчитано количество включений в каждом образце по размерным группам — от минимального до максимального размера. Анализ фазового состава неметаллических включений выполнен на электронном микроскопе JSM-35 с помощью энергодисперсного спектрометра «Link-860» «по точкам» с целью устранения фонового излучения.

Физико-химическое моделирование. В целом процесс формирования включения фактически состоит из двух различных по своей физико-химической основе процессов: процесса образования включения в жидкой стали, а также последующего выделения конденсированной фазы на поверхности раздела в двухфазной зоне в посткристаллизационный период. В соответствии с этим моделирование проводили отдельно для каждого из указанных процессов.

При создании физико-химической модели процесса образования включений в жидкой стали исходили из обычно принимаемого допущения, что высокая интенсивность перемешивания металла и шлака в сварочной ванне, нагрев расплавленного электродного металла на стадии капли до температуры 2000°C и выше обеспечивают приближение системы к равновесным условиям в фиксированный момент времени, достаточный для составления достоверных прогнозов. Термодинамические расчеты равновесия для реакций металл-шлак-газ позволяют установить наиболее благоприятные условия для формирования включений определенного состава. Расчеты, выполненные по формуле Вагнера [15], показали, что уже через 2 с после образования сварочной ванны средний размер включений в жидком металле составляет 0,5 мкм и со временем продолжает увеличиваться. Следовательно, при анализе количества, состава и распределения неметаллических включений достаточно ограничиться исследованием включений размером не менее 0,5 мкм.

При моделировании процессов конденсации включений в области температур ниже температуры кристаллизации стали исходили из положений квазиравновесной теории двухфазной зоны [16]. В

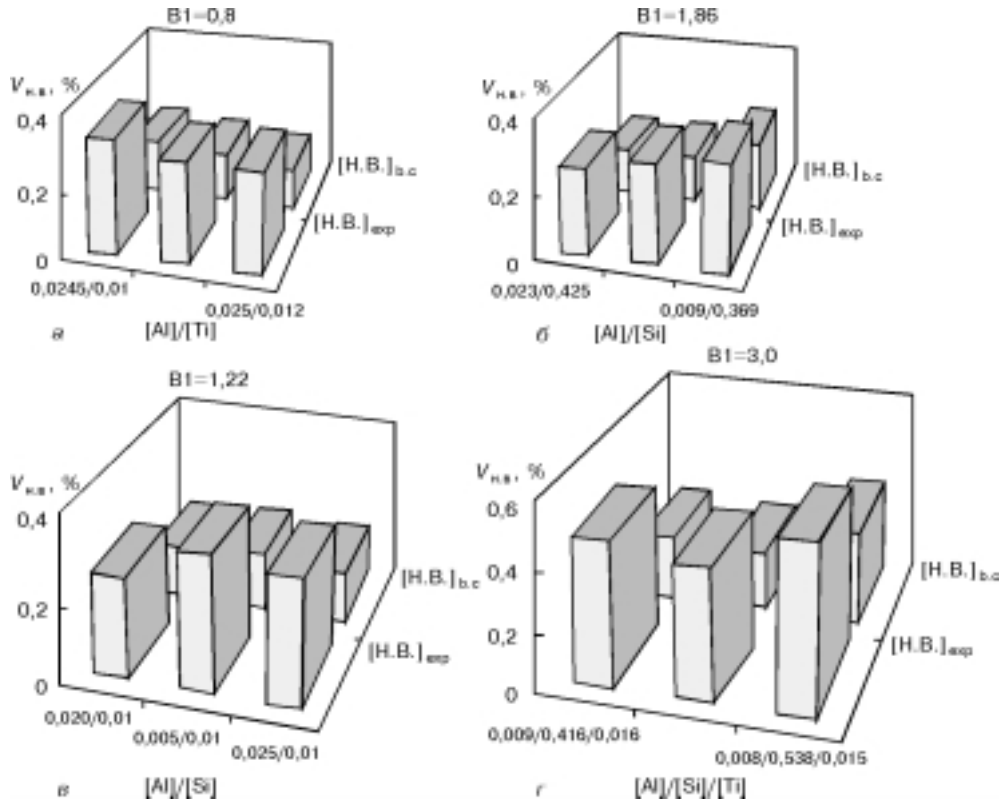
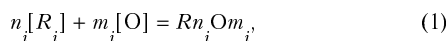


Рис. 2. Сопоставление объемов расчетных (докристаллизационных) с экспериментальными в зависимости от соотношений алюминия, кремния, титана в металле швов, выполненных под флюсом с основностью $B1 = 0,8...3,0$

этом случае интенсивность роста оксидной фазы на поверхности раздела определяется долей жидкой составляющей в двухфазной области S .

При дуговых процессах сварки шлак, как правило, является окислительной средой по отношению к расплавленному металлу, поэтому реакцию взаимодействия между элементами-раскислителями, растворенными в сварочной ванне, и шлаком можно записать в общем виде как:



в результате которой образуется M_i количество продуктов i -й реакции. Однако в данном случае в результате протекания этих реакций, а также ликвиационных процессов будет изменяться концентрация кислорода C_O , и баланс кислорода в молях может быть записан следующим образом [17]:

$$d(SC_O)/dt = k_0 C_O dS/dt - \sum_{i=1}^N m_i dM_i/dt. \quad (2)$$

Возможность тех или иных реакций и выход их продуктов зависят от концентрации i -го элемента-раскислителя C_i . Уравнение баланса (в молях) для каждого i -го элемента-раскислителя имеет вид

$$d(SC_i)/dt = k_i C_i dS/dt - n_i dM_i/dt. \quad (3)$$

При локальном термодинамическом равновесии для концентрации кислорода C_O и реагирующего с ним i -го элемента-раскислителя C_i имеем

$$C_i^n C_O^m = \frac{1}{K_i f_i^n f_O^m}, \quad (4)$$

где K_i — константа равновесия реакции окисления i -го элемента-раскислителя.

Система уравнений (2)–(4) складывается из $2N + 1$ замкнутых уравнений и позволяет определить концентрацию кислорода и N элементов-раскислителей, реагирующих с ним, а также содержание оксидов M_i , образовавшихся на всех этапах кристаллизации.

Количество докристаллизационных включений можно определить из системы N уравнений типа

$$\left(C_i^0 - \frac{M_i}{1 + 16m_i/n_i A_i}\right)^n \left(C_O^0 - \sum_{i=1}^N \frac{M_i}{1 + n_i A_i / 16m_i}\right)^m = \frac{1}{K_i f_i^n f_O^m}, \quad (5)$$

где C_O^0, C_i^0 — начальные концентрации соответственно кислорода и элемента-раскислителя в расплаве до начала кристаллизации; A_i — атомная масса i -го элемента-раскислителя.

Тогда исходное содержание элемента-раскислителя в расплаве имеет вид

$$C_i^* = \frac{C_i^0 - M_i^*}{(1 + 16m_i/n_i A_i)}, \quad (6)$$

а кислорода

$$C_O^* = \frac{C_O^0 - \sum_{i=1}^N M_i^*}{(1 + n_i A_i / 16m_i)}. \quad (7)$$

Полученная сложная система алгебраических и обыкновенных уравнений (2)–(4) и (5), как и ал-

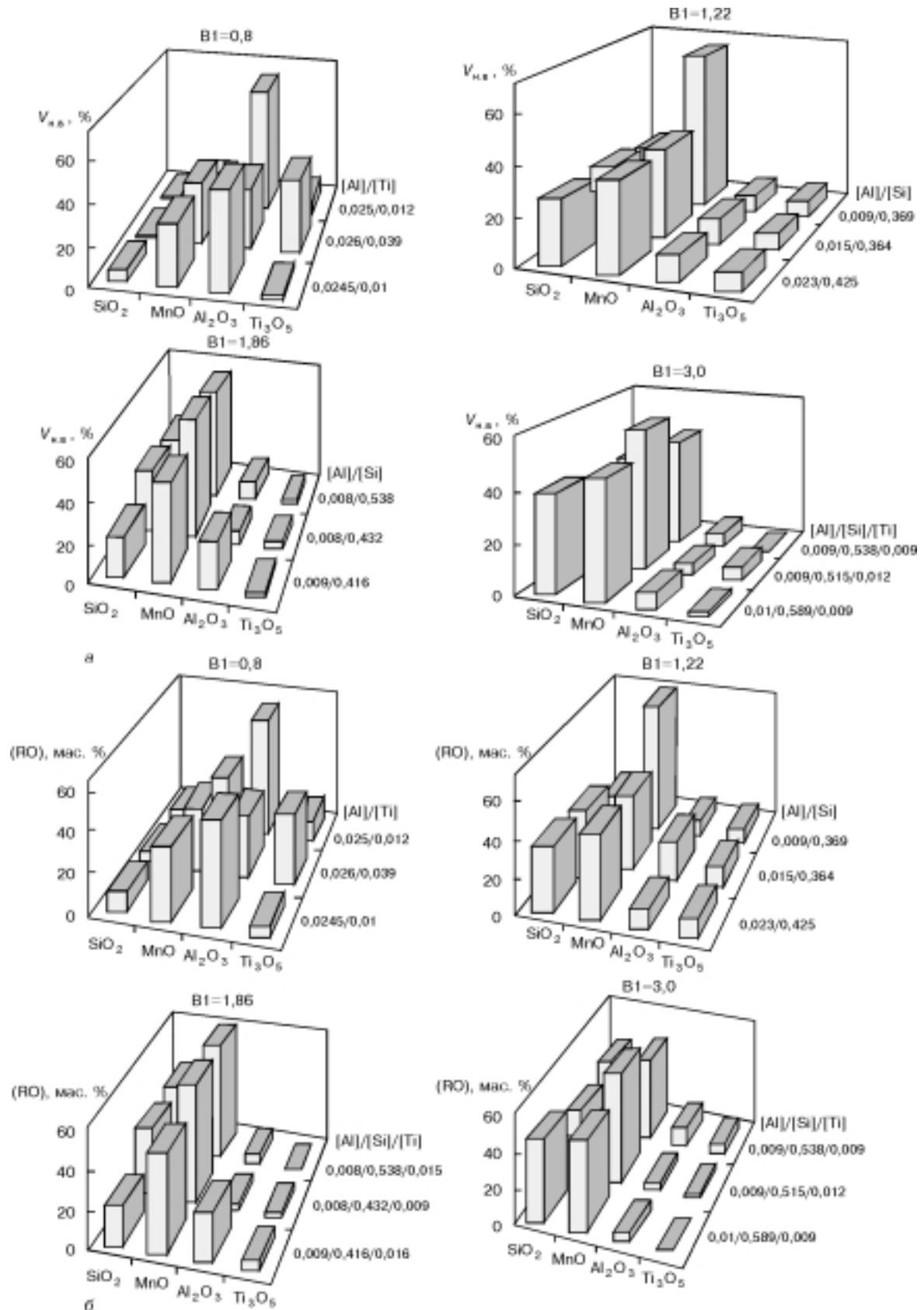


Рис. 3. Экспериментальные (а) и расчетные (б) данные о составе неметаллических включений в зависимости от соотношения алюминия, кремния и титана в металле швов, выполненных под флюсом с основностью $B1 = 0,8...3,0$ (а) и с учетом действия элементов-раскислителей (б)

горитм их решения, должны быть конкретизированы в каждом конкретном случае.

По описанному алгоритму на языке ФОРТРАН была составлена и отработана (совместно с канд. физ.-мат. наук Л. А. Тараборкиным) программа для



расчета процессов образования неметаллических включений в соответствии с разработанной математической моделью.

Для проверки адекватности разработанной модели были выбраны пять агломерированных флюсов различного типа и различной основности. Флюсы флюоритно-основного типа имели индекс основности $B1 = 3,0$ и $B1 = 1,86$. Флюс алюминатно-основного типа имел $B1 = 1,22$, а марганцево-силикатный флюс имел индекс основности $B1 = 0,8$.

В опытные флюсы с целью интенсификации процессов образования неметаллических включений вводили такие элементы-раскислители, как кремний, титан и алюминий в количествах до 1 %. Из стыковых соединений, полученных при сварке под опытными флюсами, по описанной выше методике изготавливали образцы для металлографических исследований в металле последнего прохода.

На рис. 1, 2 сопоставлены результаты расчета количества и состава неметаллических включений, выполненного по разработанной программе с данными экспериментов, которые получены при металлографическом анализе образцов металла швов. Данные на рис. 1 показывают хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Исходя из этого можно считать, что результаты расчета количества докристаллизационных включений (рис. 2) также соответствуют реальной ситуации в сварочной ванне. Таким образом, данная программа позволяет анализировать содержание включений в ванне до начала процессов ее кристаллизации, что затруднительно сделать в настоящее время экспериментальным путем.

Как видно из приведенных на рис. 3 данных, разработанная модель позволяет описать условия формирования неметаллических включений в широком диапазоне составов флюсов при их различной основности и с учетом действия элементов-раскислителей, введенных в состав флюса, что подтверждается адекватностью расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, разработанная компьютерная модель позволяет описать процессы формирования неметаллических включений в металле сварочных швов на различных этапах их образования. Исследования, выполненные с использованием этой программы, подтвердили не только хорошую сходимость расчетных данных с результатами экспериментов, но и показали принципиальную возможность прогнозирования содержания и состава неметаллических включений в жидком металле сварочной ванны, что затруднительно получить опытным путем.

Использование разработанной программы для анализа условий формирования структуры металла

сварных швов высокопрочных низколегированных сталей даст возможность использовать методы компьютерного моделирования при решении проблемы повышения работоспособности сварных соединений, разработки сварочных материалов нового поколения с прогнозируемыми свойствами.

1. Явойский В. И., Тьонг В. М., Горохов Л. С. Раскисление углеродистых и низколегированных мартеновских сталей // Неметал. включения в стали. — 1961. — Т. 1. — С. 228.
2. Klucken A. O., Grong O. Mechanisms of inclusion formation in Al-Ti-Si-Mn deoxidized steel weld metals // Metallurgical Transactions A. — 1989. — 20, № 8. — P. 1335-1349.
3. *Metalurgie et proprietes mecaniques du metal fondu en soudage multipasse sous flux d'acier au C-Mn micro-allie* / L. Devillers, D. Kaplan, A. Ribes, P. V. Riboud // Memoires et etudes scientifiques revue de metallurgie. — 1986. — 83, № 1. — S. 43-62.
4. Dowling J. M., Corbett J. M., Kerr H. W. Inclusion phases and the nucleation of acicular ferrite in submerged arc welds in high strength low alloy steels // Metallurgical Transactions A. — 1986. — 17, № 10. — P. 1611-1623.
5. Boniszewski T. Fine oxide particles in mild steel CO₂ weld metal // Welding J. — 1972. — № 1. — P. 19-22.
6. Irvine K. J., Pickering F. B. Relationship between microstructure and mechanical properties of mild steel weld deposits // British welding J. — 1960. — № 5. — P. 353-364.
7. Inclusion formation in self-shielded flux cored arc welds // M. Quintana, J. E. McLane, S. S. Babu, S. A. David // Abstracts of papers AWS meeting. — 1999. — P. 193-195.
8. Terashima H., Hart P. H. M. Effect of flux TiO₂ and Ti content on tolerance to high Al content of submerged-arc welds made with basic fluxes // Intern. conf. «The effects of residual, impurity, and microalloying elements on weldability and weld properties», London, 15-17 Nov., 1983. — Abington Cambridge, 1984. — P. 22-27.
9. Chemical composition and cristal structure of oxide inclusions promoting acicular ferrite transformation in low alloy submerged arc weld metal / Y. Horii, K. Ichikawa, S. Ohkita et al. // Quarterly J. of JWS. — 1995. — 13, № 4. — P. 500-507.
10. Martensite start temperature as a weldability index / D. L. Olson, S. Liu, W. Wang et al. // Trends in welding research: Proc. of 4th Intern. conf., 5-8 June, 1995, Gatlinburg, Tennessee, USA. — 1995. — P. 615-620.
11. Кузев А. А., Волков В. А., Чернуха Л. Г. О механизме влияния неметаллических включений на диффузию водорода в стали // Металлы. — 1984. — № 4. — С. 43-49.
12. Шульга А. В., Никишанов В. В. Анализ напряженного состояния при выделении частиц фаз внедрения // Там же. — 1990. — № 5. — С. 128-134.
13. Цивирко Э. И., Гончаренко В. И., Бялик Г. А. Поведение неметаллических включений в условиях термо-деформационного передела стали // Изв. вузов. Черн. металлург. — 1992. — № 2. — С. 20-23.
14. Кабанова О. В., Максимов Ю. А., Рузинов Л. П. Статистические методы построения физико-химических моделей металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1989.
15. Development of macro- and microstructures of carbon-manganese low alloy steel welds: inclusion formation / S. S. Babu, S. A. David, J. M. Vitek et al. // Materials Science and Technology. — 1995. — 11, № 2. — P. 186-199.
16. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, А. Г. Пономаренко и др. — М.: Металлургия, 1989. — 288 с.
17. Борисов В. Т. Теория образования неметаллических включений в двухфазной зоне кристаллизующегося слитка // Неметал. включения в стали. — 1961. — Т. 1. — С. 71-87.

Experiments on validation of adequacy of the developed computer software for prediction of the amount and composition of nonmetallic inclusions in the low-alloy steel weld metal are described. In addition to modelling of the final amount and composition of nonmetallic inclusions, this software allows also the calculation of characteristics of the inclusions which are contained in the weld pool metal in a presolidification period of its existence.

Поступила в редакцию 29.09.2000