

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.4.11

УДК 621.791

**А.В. Мышкина, С.Н. Акулова, Е.А. Кривоносова,
Ю.Д. Щицын, И.Л. Синани**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛИ

Посвящено проблеме трансформации неметаллических включений в сварных швах под воздействием плазменной дуги. Рассматривается возможность использования плазменной дуги для повышения качественных характеристик сварного шва. Различными методами количественной металлографии исследуются количество, форма, размер и распределение неметаллических включений в металле шва до плазменной обработки и после нее, а также их перераспределение в зоне термического влияния.

При плазменной обработке стали 16Г2АФ зафиксирована значительная разница между объемной долей неметаллических включений в зоне сварного шва и в зоне термического воздействия. Во всех исследованных образцах в зоне термического воздействия общее количество неметаллических включений превышает количество включений в зоне сварного шва на 20–30 %, с ростом погонной энергии такая разница может увеличиваться. Определено, что при смене полярности плазменной обработки с прямой на обратную происходит увеличение объемной доли неметаллических включений в зоне сварного шва и в зоне термического воздействия. Отмечается, что с увеличением силы тока до 200 А объемная доля неметаллических включений уменьшается независимо от полярности и защитного газа, а при силе тока свыше 200 А количество включений снова увеличивается.

При использовании углекислого газа как защитного наблюдается в основном глобулярная (округлая) форма включений, характерная для оксидов и оксисульфидов. При использовании азота в качестве защитного газа в наплавленном металле появляются граненые частицы сложной формы – нитриды и карбонитриды.

Неметаллические включения, имеющие размер более 10 мкм, могут быть существенными концентраторами напряжений, поэтому уровень напряжений вблизи включения может превышать предел текучести стали и достигать предела прочности.

Скорость всплывания неметаллических включений зависит от размера частиц, вязкости жидкого металла, разницы удельного веса частицы и металла. Чем крупнее частица и чем меньше ее плотность, тем больше будет скорость всплывания частиц. На скорость всплывания шлаковых частиц может существенно влиять наличие конвективных потоков в металле, выделение из металла пузырей, которые перемешивают металл и увлекают шлаковые частицы к поверхности металлической ванны.

Ключевые слова: неметаллические включения исследованных образцов, сварной шов, зона термического воздействия, плазменная обработка, прямая полярность, обратная полярность, защитный газ, развитие деформации, скорость всплывания частиц.

**A.V. Myshkina, S.N. Akulova, E.A. Krivonosova,
Iu.D. Shchitsyn, I.L. Sinani**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE INFLUENCE OF PLASMA TREATMENT REGIMES ON THE DISTRIBUTION OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN STEEL

This article is devoted to the problem of transformation of nonmetallic inclusions in welded joints under the action of a plasma arc. The possibility of using a plasma arc to improve the quality characteristics of a welded seam is considered. The quantity, shape, size and distribution of nonmetallic inclusions in the weld metal before and after plasma treatment by the methods of quantitative metallography, as well as redistribution of nonmetallic inclusions over the thermal exposure zone are investigated.

A significant difference was noted between the volume fraction of nonmetallic inclusions in the weld zone and in the zone of thermal action during plasma treatment of 16G2AF steel. In 100% of the samples examined in the thermal exposure zone, the total amount of nonmetallic inclusions is 20-30% higher than the number of inclusions in the weld zone, and this difference increases with increasing running energy. It is established that when the polarity of the plasma treatment changes from direct to reverse, an increase in the volume fraction of inclusions is observed, both in the weld zone and in the zone of thermal action. It is noted that irrespective of the polarity and protective gas with increasing current to 200 A, the volume fraction of nonmetallic inclusions decreases. And with a current strength of more than 200 A, the number of inclusions again increases.

When carbon dioxide is used as the protective gas, a predominantly globular (rounded) form of inclusions characteristic of oxides and oxysulfides is observed. When using nitrogen as a protective gas in the weld metal, the appearance of faceted particles of complex shape – nitrides and carbonitrides – is observed.

Non-metallic inclusions larger than 10 μm can be serious stress concentrators – the stress level near the inclusion may exceed the yield strength of steel and even reach the ultimate strength.

The rate of floating of non-metallic inclusions depends on their size, the viscosity of the liquid metal, the difference in the specific gravity of the particle and the metal. The velocity of the particles ascending is the greater, the bigger the particle, the less its density. The rate of emergence of slag particles is significantly affected by the presence of convective flows in the metal, the release of bubbles from the metal that mix the metal and entrain the slag particles to the surface of the metal bath.

Keywords: nonmetallic inclusions of the investigated samples, welded seam, heat affected zone, plasma treatment, direct polarity, reverse polarity, shielding gas, deformation development, particle emergence rate.

Введение

В настоящее время особый интерес вызывает модифицирование поверхностных слоев массивных деталей из недефицитных материалов для повышения эксплуатационных свойств их рабочих поверхностей. Одним из эффективных способов влияния на свойства поверхности является плазменная обработка. Плазменная дуга как концентрированный источник нагрева в зависимости от энергетических и силовых параметров может вносить значительные изменения в структуру поверх-

ностных слоев в результате массопереноса химических элементов и трансформации неметаллических включений в зоне термического воздействия.

Несмотря на то, что изучение влияния плазменной дуги на качественные характеристики сварного шва не привело к получению полного представления о взаимодействии плазменного излучения и материала, это позволило определить ряд положений, которые и составляют основу этого представления. Недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с перераспределением химических элементов и трансформацией неметаллических включений в сварном шве и зоне термического воздействия.

Актуальными научно-техническими проблемами являются исследование и анализ неизвестных механизмов, их теоретическое объяснение и описание, разработка новых методов, которые позволят обеспечить повышение производительности и эффективности технологического процесса, а также снижение себестоимости и повышение качества продукции. Исследование влияния режимов плазменной обработки на перераспределение неметаллических включений в металле – это актуальная задача в области обработки материалов высококонцентрированными источниками энергии.

Одним из главных факторов, понижающих качество стали, является степень загрязненности ее примесями. Свойства стали определяются также природой, формой, размером и распределением включений, которые зависят от состава стали, способа выплавки, разливки и раскисления, скорости охлаждения и последующей деформации.

Значительное влияние на обеспечение физико-механических свойств изделия оказывают неметаллические включения, находящиеся в рабочем сварном шве. Как правило, такое влияние является негативным. Устранить отрицательное и усилить положительное влияние с помощью подбора технологических параметров плазменной обработки – это способ повышения работоспособности и долговечности изделия.

В публикациях, которые посвящены различным аспектам применения плазменного излучения для решения различных технологических и материаловедческих задач, еще не выяснены некоторые вопросы, например природа взаимодействия плазменного излучения с металлическими материалами и процессов в зоне обработки. Современное решение вопроса о назначении технологических процессов

плазменной обработки связано с тем, что необходимо получить требуемую структуру зоны обработки на определенном участке за счет регулирования скоростей нагрева и охлаждения изделия, а также времени пребывания изделия при высоких температурах. В настоящее время выбор определенных технологических параметров плазменного излучения для получения требуемых свойств сварного шва связывают в основном с получением соответствующей структуры в зоне плазменного воздействия. Однако практически не оценивают состояние неметаллических включений до обработки и после, а также перераспределение легирующих элементов по зоне термического влияния.

В структуре стали могут быть различные неметаллические включения, которые образуются в результате реакции компонентов стали с кислородом, серой, азотом. Большое количество включений окислов независимо от класса и химического состава стали принадлежит к системе $Fe_xMn_{1-x}O-SiO_2-Al_2O_3$ [1]. Также часто встречаются включения окислов магния, титана, кальция, хрома. Образование сульфидов в стали определяется сродством ее элементов к сере, которое повышается от железа к марганцу, титану, кальцию и церию [2]. Образование нитридов зависит от сродства компонентов к азоту, которое увеличивается от хрома к ванадию, алюминию, титану и цирконию [2].

Проблема неметаллических включений возникает на многих стадиях технологического процесса изготовления стальных изделий. Исключением не является и производство сварных соединений. Неметаллические включения, как правило, присутствуют во всех сварных швах. Состав, размер, количество, форма неметаллических включений и их распределение в металле шва могут существенно влиять на механические свойства сварных соединений. Неудобство изучения неметаллических включений сварных соединений связано с малым объемом сварочной ванны. Однако изучению этой проблемы посвящено немало работ [3]. Многие из них предоставляют лишь конечные данные процесса: описывается состав включений, их форма и распределение. Важные вопросы кинетики зарождения, укрупнения и удаления включений в основном рассмотрены не были. В то же время изучение данных вопросов может привести к уменьшению образования неметаллических включений в сварном шве или к получению таких неметаллических включений, которые в наименьшей степени могли бы влиять на качество шва.

Металлургические и кинетические аспекты процесса образования неметаллических включений имеют большое значение. Большинство включений, которые образуются в сварном шве, эндогенного происхождения. При этом образовании неметаллических включений в сварочной ванне способствуют обогащение жидкого металла примесями вследствие ликвационных процессов и понижение совместной растворимости примесей при охлаждении металла сварочной ванны [3]. Формы и размеры неметаллических включений в металле шва будут зависеть от времени кристаллизации металла сварочной ванны и температуры плавления включений, которая будет определяться химическим составом включений [4, 5].

Изменение структуры и трансформация сульфидов и оксидов железа и марганца в металле происходит под действием плазменного источника тепла [6–9]. Появление структуры бейнита и мартенсита в стали 16Г2АФ при скоростях охлаждения свыше 20 °С/с приводит к уменьшению ударной вязкости участка зоны термического влияния [10] и влияет на характер распространения трещин. Форма и размеры оксисульфидных включений, которые являются главными концентраторами напряжений в структуре, значительно влияют на зарождение и траекторию движения трещины [6].

Часто разрушение сварных конструкций происходит именно в зоне термического воздействия. Структура и свойства зоны термического воздействия зависят от параметров термического цикла сварки (например, скорости охлаждения ω_{65} (°С/с) в интервале критических температур 600–500 °С). Также было отмечено, что наиболее опасный участок зоны термического влияния – это участок полной перекристаллизации (максимальная температура нагрева на данном участке достигает 1350 °С), поскольку в зависимости от режимов сварки и реализуемых скоростей охлаждения на этом участке возможно образование как ферритных, так и бейнитных и мартенситных структур [11, 12]. Кроме того, под действием источника тепла в металле протекают физико-химические процессы, которые влияют на размеры и форму неметаллических включений.

Методика исследования

Для того чтобы спрогнозировать влияние плазменной дуги на образование, трансформацию и перераспределение неметаллических

включений в зоне обработки в образцах из стали 16Г2АФ, применялись следующие параметры режима: сила тока (100, 150, 200, 240 А); напряжение (18, 20, 22, 24 В); полярность плазменной обработки (прямая (ПП) и обратная (ОП)); защитный газ (углекислый газ (СО₂) и азот (N)); плазмообразующий газ – Ar; скорость перемещения плазмотрона не изменялась.

Химический состав стали 16Г2АФ приведен ниже.

Химический состав 16Г2АФ, мас. % (ГОСТ 19281–89)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
0,14– 0,2	0,3– 0,6	1,3– 1,7	До 0,3	До 0,04	До 0,035	До 0,4	0,08– 0,14	0,015– 0,025	До 0,3	До 0,08

Количественный анализ уровня загрязненности неметаллическими включениями сварного шва и зоны теплового воздействия

Для проведения количественного металлографического анализа использовался автоматизированный комплекс анализа изображений и моделирования структур «Видеотест-металл».

Количественно состав неметаллических включений определялся отношением темных участков (пятен), создаваемых включениями на нетравленном шлифе, к общей площади зоны плазменного воздействия. Поле зрения составляло 0,765 мм².

В табл. 1 приведены режимы плазменной обработки всех серий эксперимента.

Таблица 1

Обозначения образцов в серии при плазменной обработке
стали 16Г2АФ

Номер серии швов	Защитный газ	Полярность
Серия 1 – сварной шов 1	углекислый СО ₂	прямая
Серия 2 – сварной шов 2	углекислый СО ₂	обратная
Серия 3 – сварной шов 3	азот N ₂	прямая
Серия 4 – сварной шов 4	азот N ₂	обратная

В каждой серии испытывались по восемь образцов.

В табл. 2–5 сведены данные об объемной доле включений в металле шва и в зоне термического влияния (ЗТВ) на единицу площади в зависимости от погонной энергии.

Таблица 2

Сварной шов № 1 (CO₂, ПП)

Зона	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
Сварной шов	0,41	0,49	0,27	0,35	0,28	0,15	0,31	0,27
ЗТВ	0,64	0,70	0,40	0,90	0,44	0,33	0,38	0,61

Таблица 3

Сварной шов № 2 (CO₂, ОП)

Зона	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
Сварной шов	0,49	0,55	0,43	0,69	0,39	0,38	0,47	0,50
ЗТВ	0,89	1,32	0,49	0,94	0,70	0,56	0,36	0,48

Таблица 4

Сварной шов № 3 (N, ПП)

Зона	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
Сварной шов	0,32	0,39	0,4	0,29	0,31	0,34	0,21	0,20
ЗТВ	0,7	0,85	0,59	0,74	0,35	0,30	0,45	0,47

Таблица 5

Сварной шов № 4 (N, ОП)

Зона	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
Сварной шов	0,56	0,56	0,62	0,63	0,32	0,36	0,40	0,48
ЗТВ	0,97	1,08	0,98	0,66	0,80	0,86	0,54	0,36

Результаты количественного металлографического анализа неметаллических включений, характерные для сварного шва и зоны термического влияния при плазменном воздействии, представлены на рис. 1–4.

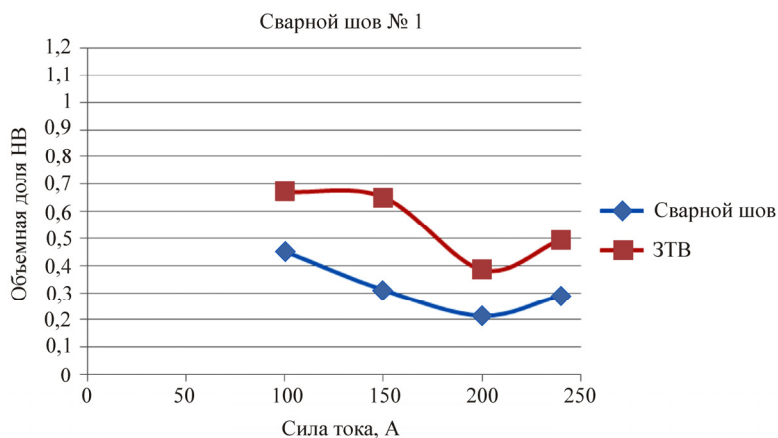


Рис. 1. Зависимость объемной доли неметаллических включений в металле шва и в зоне термического влияния на единицу площади от силы тока, сварной шов № 1 (защитный газ CO_2 , ПП)

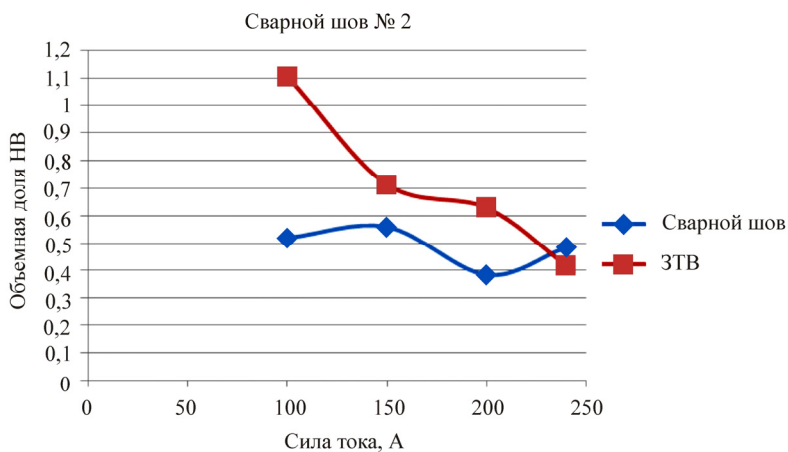


Рис. 2. Зависимость объемной доли неметаллических включений в металле шва и в зоне термического влияния на единицу площади от силы тока, сварной шов № 2 (защитный газ CO_2 , ОП)

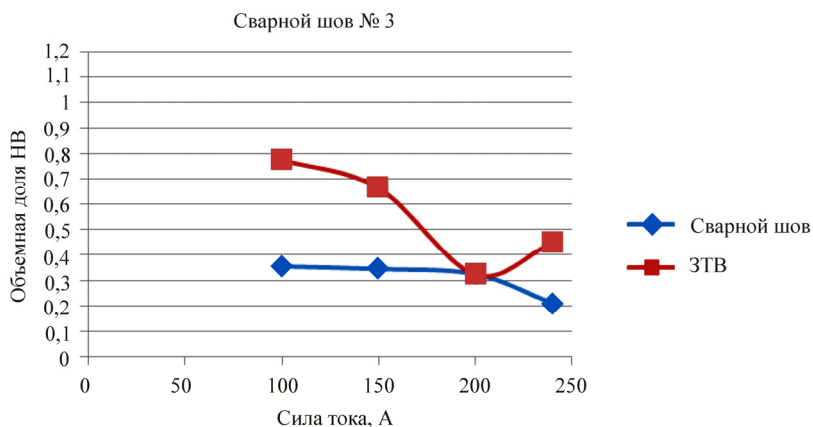


Рис. 3. Зависимость объемной доли неметаллических включений в металле шва и в зоне термического влияния на единицу площади от силы тока, сварной шов № 3 (защитный газ N, ПП)

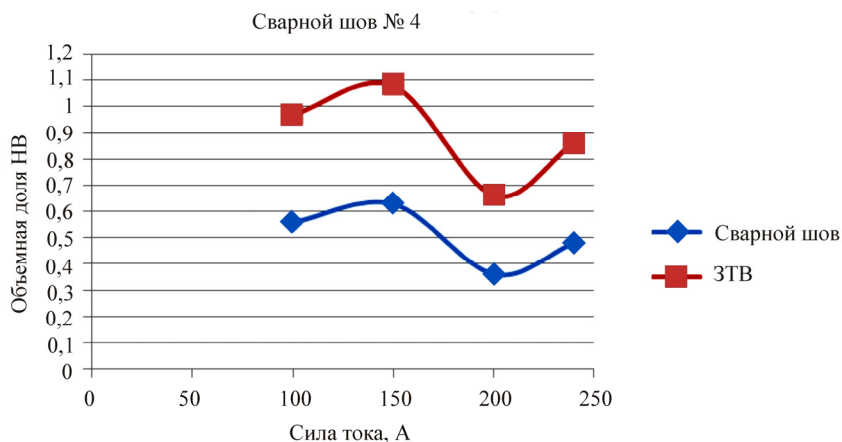


Рис. 4. Зависимость объемной доли неметаллических включений в металле шва и в зоне термического влияния на единицу площади от силы тока, сварной шов № 4 (защитный газ N, ОП)

Под действием плазменного источника нагрева в зоне оплавления металл перегревается свыше температуры плавления и кристаллизуется с образованием литой структуры. В зоне перегрева температура металла достигает высоких значений, но металл при этом не переходит в жидкое состояние. Это приводит к усилению фазообразования и формированию структурных превращений.

Объемная доля включений в металле шва № 1 (защитный газ – CO₂, ПП) на единицу площади меньше, чем в зоне перегрева. С увеличением силы тока наблюдается уменьшение доли неметаллических включений как в сварном шве, так и в зоне термического влияния.

Анализ данных по шву № 2 (защитный газ – CO₂, ОП) показывает, что тенденция миграции неметаллических включений от центра ванны сохраняется при смене полярности при плазменной обработке.

Во всех случаях наблюдается увеличение объемной доли неметаллических включений в поле зрения по сравнению с образцами, выполненными на прямой полярности. Особенности тепловложения в изделие плазмотроном, который работает на прямой и обратной полярности, можно объяснить увеличение объемной доли включений в зоне расплавления и в зоне перегрева при смене полярности. Распределение мощности по пятну нагрева подчиняется закону нормального распределения при работе плазмотрона на прямой полярности. При нормальном распределении максимальная мощность сосредоточена в основном в центре пятна нагрева. Зона контакта дуги при работе плазмотрона на прямой полярности представляет собой анодное пятно. Размеры пятна при этом будут определяться диаметром плазмообразующего сопла.

Плазменная дуга обратной полярности может характеризоваться наиболее равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия. Это объясняется тем, что при работе плазмотрона в режиме дуги прямого действия на обратной полярности изделие является холодным катодом. Термин «холодный катод» принято применять к катодам из металлов, температура кипения которых ниже точки, при которой можно рассчитывать на заметную термоэлектронную эмиссию. В этом случае дуга относится к типу дуг с нестационарными катодными пятнами, которые «блуждают» по его поверхности. Особенности нестационарных катодных пятен является кратковременность их существования и большие плотности тока в них. Явление «блуждания» катодных пятен по поверхности изделия обеспечивает более равномерный нагрев зоны обработки, т.е. скорости нагрева меньше, чем в случае работы плазмотрона на прямой полярности. Следовательно, неметаллические включения медленнее совершают переход из твердой фазы в газожидкостную и не успевают за время существования жидкой ванны перераспределиться до числового показателя, который мы ви-

дим в швах, выполненных дугой прямой полярности. С ростом погонной энергии эта разница становится менее заметна, так как неметаллические включения будут получать достаточное количество теплоты для мгновенного трансформирования и перераспределения.

В сварном шве № 3 (защитный газ – азот, ПП) также наблюдается меньшее количество включений, чем в зоне термического влияния. Как и в шве № 2, с увеличением погонной энергии наблюдается уменьшение количества неметаллических включений и уменьшается разница объемной доли включений в сварном шве и в зоне термического влияния.

В сварном шве № 4 (защитный газ – азот, полярность обратная) результаты аналогичны шву № 2. При смене полярности было зафиксировано увеличение объемной доли включений в зоне плазменного воздействия. Однако общая закономерность сохраняется. В сварном шве при плазменной обработке отмечено меньше включений, чем в зоне термического воздействия.

Существенное различие между объемной долей неметаллических включений в зонах сварного шва и термического влияния можно объяснить физико-химическими переходами по аналогии с процессами, отмеченными при лазерной сварке [13], т.е. различием теплофизических и оптических свойств неметаллических включений, находящихся в основном металле, и самой металлической матрицы. Неметаллические включения по сравнению с основным металлом поглощают большее количество энергии, так как неметаллические включения имеют более высокую степень черноты и теплоемкость. Это приводит к появлению градиента температуры вглубь от обрабатываемой поверхности и по направлению от неметаллических включений к зернам металла. Следовательно, включения при высоких скоростях нагрева, соответствующих плазменной дуге, быстрее совершают переход из твердой фазы в газ. В этом месте может образовываться газовый или газожидкостный канал за счет некоторой потери теплоты. По этим каналам и происходит перенос элементов. При этом диамагнитные атомы будут перемещаться вглубь металла, а парамагнитные – к поверхности детали.

Влияние неметаллических включений на развитие деформации швов

При моделировании распределения напряжений в металлической матрице с включениями использованы программные средства COMSOL

Multiphysic. Исходные данные по теплофизическим свойствам принимали для металла шва – низколегированной стали, для включений – несжимаемой твердой и прочной материи. Такие параметры соответствуют реальным физическим свойствам основного материала и включений. Например, модуль упругости SiO_2 , Al_2O_3 и других оксидов на несколько порядков превосходит значения для металлов. Внешняя распределенная нагрузка составляла 1000 Н/м^2 . На шкале указаны напряжения внутри шва. По рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что неметаллические включения, имеющие размер более 10 мкм , могут служить серьезными концентраторами напряжений, поэтому уровень напряжений вблизи включения может превысить предел текучести стали и достичь предела прочности.

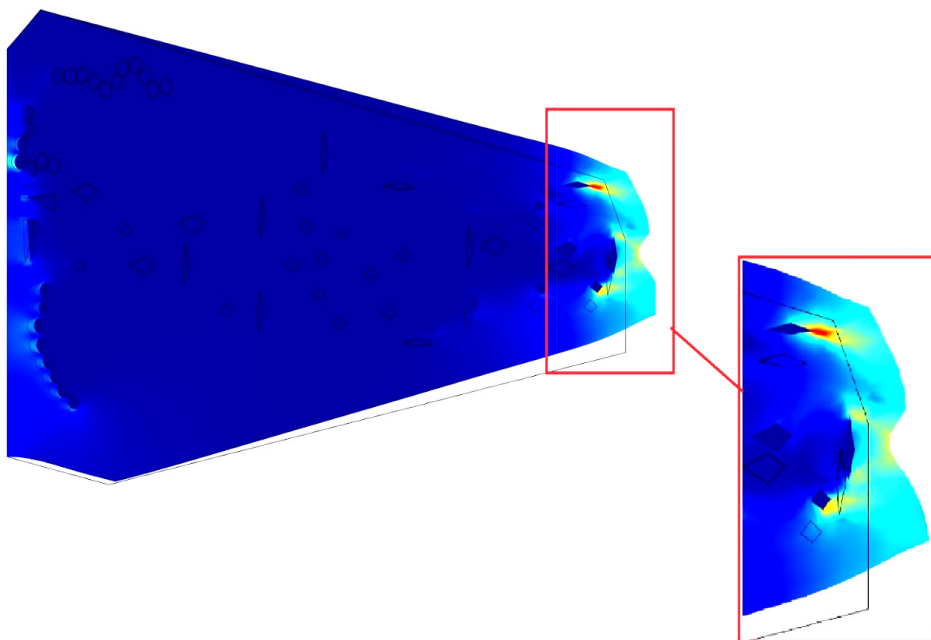


Рис. 5. Распределение напряжений в стальной матрице вблизи включений нитрида ванадия

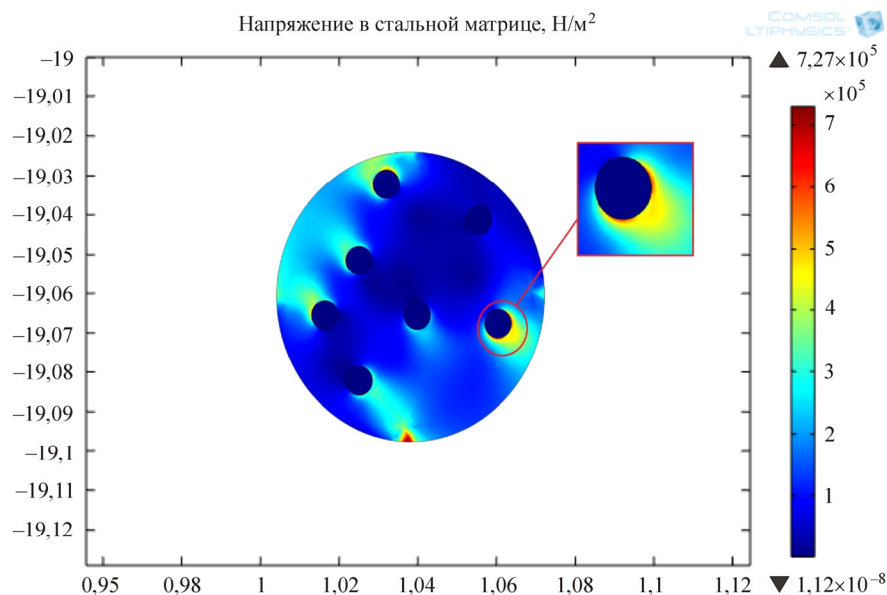


Рис. 6. Распределение напряжений в стальной матрице вблизи оксидных включений Al_2O_3

Расчет скорости всплывания шлаковых частиц в стали при сварке

Неметаллические включения состоят из различных оксидов и частично из сульфидов. Как правило, они имеют эндогенное (внутреннее) происхождение, т.е. образуются в самой сварочной ванне.

При сварке с применением кислых шлаков образующиеся включения имеют мелкодисперсный характер и в основном состоят из силикатов. Основные шлаки дают более крупные включения с меньшим содержанием силикатов [4]. Количество и величина неметаллических включений в сварном шве при данном составе включений и металла зависят от двух основных факторов: способности шлаковых частиц к коагуляции и скорости всплывания шлаковых частиц в жидком металле.

Способность частиц неметаллических включений к коагуляции, в свою очередь, зависит от температуры металла, поверхностного натяжения на границе «включение – жидкий металл», вязкости включений, динамической вязкости жидкого металла и др. При более высокой температуре металла и поверхностном натяжении частиц, меньшей вязкости их коагуляция протекает легче [4]. Тугоплавкие включения,

имеющие повышенную вязкость, плохо коагулируют и поэтому распределяются в металле в дисперсном виде.

Скорость всплывания неметаллических включений зависит от их размера, вязкости жидкого металла, разницы в удельном весе частицы и металла и др. (рис. 7). Эту скорость можно приближенно определить с помощью формулы Стокса:

$$v = \frac{2r^2 g (\rho_M - \rho_B)}{9\eta_M},$$

где r – радиус частиц, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 , $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; ρ_M – плотность вещества среды; ρ_B – плотность включения; η_M – динамическая вязкость среды.

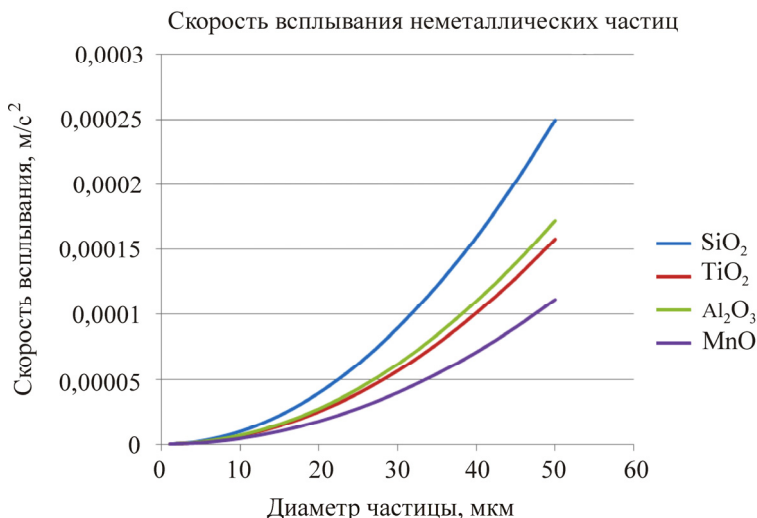


Рис. 7. Изменение скорости всплывания неметаллических частиц в зависимости от их размера

Включения в металле шва, как правило, не имеют округлой формы, что заметно влияет на скорость их подъема. Для включений неправильной формы вводится поправочный коэффициент. Для включений SiO₂ поправочный коэффициент – 1/3, для включений Al₂O₃ – 1/6.

Проведенный расчет показывает, что включения SiO₂ всплывают быстрее, что связано с их округлой формой и меньшей плотностью.

Заключение

На основании исследований можно сделать следующие выводы:

Зафиксировано существенное различие между объемной долей неметаллических включений в зоне сварного шва и в зоне термического влияния при плазменной сварке стали 16Г2АФ. В 100 % исследованных образцов в зоне термического воздействия в среднем суммарное количество неметаллических включений на 20–30 % превышает количество включений в зоне шва.

При смене полярности наблюдается увеличение объемной доли включений как в зоне расплавления, так и в зоне перегрева, объясняемое особенностями тепловложения в изделие плазмотроном, работающим на прямой и обратной полярности.

Также следует отметить, что независимо от полярности и защитного газа с увеличением силы тока до 200 А объемная доля неметаллических включений уменьшается. Это можно объяснить увеличением скорости нагрева материала и большей продолжительностью существования жидкой сварочной ванны. При силе тока свыше 200 А количество включений снова увеличивается. Это может быть связано с перераспределением неметаллических включений в материале шва и в зоне термического влияния под воздействием более высоких температур. При сварке с большой погонной энергией стали 16Г2АФ часть неметаллических включений не успевает вновь раствориться в аустените и под действием высоких температур коагулирует [13].

При использовании в качестве защитного газа углекислого газа может наблюдаться в основном глобулярная (округлая) форма включений, которая характерна для оксидов и оксисульфидов. При использовании азота в качестве защитного газа в наплавленном металле наблюдается появление граненых частиц сложной формы – нитридов и карбонитридов.

Неметаллические включения, имеющие размер более 10 мкм, могут служить серьезными концентраторами напряжений, поэтому уровень напряжений вблизи включения может превысить предел текучести стали и достичь предела прочности.

Чем крупнее частица и меньше ее плотность, тем больше скорость всплывания частиц. На скорость всплывания шлаковых частиц может существенно влиять наличие конвективных потоков в металле, выделение из металла пузырей, которые перемешивают металл и увле-

кают шлаковые частицы к поверхности металлической ванны. Значительная часть шлаковых включений выталкивается к поверхности сварочной ванны растущими кристаллитами металла шва.

Список литературы

1. Кисслинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали. – М.: Металлургия, 1968. – 123 с.
2. Виноград М.И., Громова Г.П. Неметаллические включения в легированных сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
3. Деев Г.Ф., Пацкевич И.Р. Дефекты сварных швов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 208 с.
4. Кривоносова Е.А. Теория сварочных процессов: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 262 с.
5. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А.В. Коновалов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
6. Барахтин Б.К., Немец А.М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справочник / под ред. Б.К. Барахтина. – СПб.: Профessional, 2006. – 487 с.
7. Олышанская 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.
8. Влияние неметаллических включений на развитие деформации сварных швов / Е.А. Кривоносова, О.А. Рудакова, А.И. Горчаков, Ю.В. Щербаков // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 36–39.
9. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вассерман Н.Н. Структурные аспекты усталостного разрушения металла сварных швов // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 9. – С. 20–23.
10. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вассерман Н.Н. Влияние режима сварки на структуру и свойства зоны термического влияния сталей с карбонитридным упрочнением // Тяжелое машиностроение. – 2009. – № 7. – С. 23–27.
11. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров, К.М. Ямалаев, Г.В. Журавлев, Ф.И. Бадиков. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 231 с.
12. Шоршоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: атлас. – М.: Наука, 1972. – 219 с.
13. Семенцев А.М. Повышение эффективности лазерной обработки деталей из железноуглеродистых сплавов, основанное на установленном механизме массопереноса легирующих элементов в зоне лазерного воздействия: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Брянск, 2008. – 231 с.

References

1. Kissling R., Lange N. Nemetallischeskie vklucheniia v stali [Nonmetallic inclusions in steel]. Moscow, Metallurgiya, 1968, 123 p.

2. Vinograd M.I., Gromova G.P. Nemetallicheskie vklucheniia v legirovannykh staliakh i splavakh [Nonmetallic inclusions in alloyed the stalyakh and alloys]. Moscow, Metallurgii, 1972, 216 p.

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

4. Krivonosova E.A. Teoriia svarochnykh protsessov: uchebnoe posobie [Theory of welding processes]. Perm', Izdatel'stvo permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007, 262 p.

5. Konovalov A.V. et al. Teoriia svarochnykh protsessov: uchebnik dlia vuzov [Theory of welding processes: the textbook for higher education institutions]. Moscow, Izdatel'stvo moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Bauman, 2007.

6. Barakhtin B.K., Nemets A.M. Metally i splavy. Analiz i issledovanie. Fiziko-analiticheskie metody issledovaniia metallov i splavov. Nemetallicheskie vklucheniia: spravochnik [Metals and alloys. Analysis and research. Fiziko-analitichesky methods of a research of metals and alloys. Nonmetallic inclusions]. Ed. B.K. Barakhtina. Saint Petersburg, Professional, 2006, 487 p.

7. Ol'shanskaia T.V. Termodinamicheskaiia otsenka uslovii transformatsii nemetallicheskiikh vkluchenii v okoloshovnoi zone svarynykh soedinenii nizkolegirovannykh stalei [Thermodynamic assessment of conditions of transformation of nonmetallic inclusions in an okoloshovny zone of the welded connections low-alloyed by staly]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 92–102.

8. Krivonosova E.A., Rudakova O.A., Gorchakov A.I., Shcherbakov Iu.V. Vliianie nemetallicheskiikh vkluchenii na razvitie deformatsii svarynykh shvov [Influence of nonmetallic inclusions on development of deformation of welded seams]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2003, no. 12, pp. 36–39.

9. Krivonosova E.A., Iazovskikh V.M., Vasserman N.N. Strukturnye aspekty ustalostnogo razrusheniia metalla svarynykh shvov [Structural aspects of fatigue failure of metal of welded seams]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2005, no. 9, pp. 20–23.

10. Krivonosova E.A., Iazovskikh V.M., Vasserman N.N. Vliianie rezhima svarki na strukturu i svoistva zony termicheskogo vliianiia stalei s karbonitridnym uprochneniem [Influence of the mode of welding on structure and property of a zone of thermal influence staly with karbonitridny hardening]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2009, no. 7, pp. 23–27.

11. Gumerov A.G., Iamalaev K.M., Zhuravlev G.V., Badikov F.I. Treshchinostoikost' metalla trub nefteprovodov [Crack resistance of metal of pipes of oil pipelines]. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2001, 231 p.

12. Shorshorov M.Kh., Belov V.V. Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv stali pri svarke: atlas [Phase transformations and changes of properties became when welding]. Moscow, Nauka, 1972, 219 p.

13. Sementsev A.M. Povyshenie effektivnosti lazernoi obrabotki detalei iz zheleznouglерodistykh splavov, osnovannoe na ustanovlennom mekhanizme massopere-nosa legiruiushchikh elementov v zone lazernogo vozdeistviia [The increase in efficiency of laser processing of details from the zheleznouglерodistykh of alloys based on the in-

stalled mechanism of a mass transfer of the alloying elements in a zone of laser influence]. Doctor's degree dissertation. Briansk, 2008, 231 p.

Получено 10.07.2017

Об авторах

Мышкина Альбина Васильевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: albina_myshkina@mail.ru.

Акулова Светлана Николаевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: veta-ru@yandex.ru.

Кривоносова Екатерина Александровна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: katerinakkkk@mail.ru.

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Синани Игорь Лазаревич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sinani.pstu@yandex.ru.

About the authors

Albina V. Myshkina (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: albina_myshkina@mail.ru

Svetlana N. Akulova (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: veta-ru@yandex.ru

Ekaterina A. Krivonosova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkk@mail.ru.

Iurii D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Igor L. Sinani (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sinani.pstu@yandex.ru.