

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.4.06

УДК 621.791.771

**Е.М. Федосеева**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, г. Пермь, Россия**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ  
НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ ИЗ СТАЛИ X65**

Стойкость к образованию трещин сварных швов и соединений в целом непосредственно связана с неоднородностью строения материалов, заключающейся в случайных вариациях механических свойств, размеров и очертаний отдельных зерен металла, направлений их кристаллографических плоскостей, наличием неоднородных фаз, включений, остаточных напряжений. Определена скорость роста трещины в разных зонах сварного шва, характеризующая склонность металла к усталостному разрушению. Оценен характер разрушения в зависимости от структуры и доли неметаллических включений в шве. Установлено, что скорость роста усталостной трещины наиболее низкая в корне шва, выполненного технологией STT, несмотря на преобладающую долю перлита, и замедляется в заполняющих слоях с мелкозернистой однородной структурой, выполненных технологией АПИ. Характер разрушения преимущественно вязкий за счет значительной доли пластичного феррита, что повышает стойкость к усталостному разрушению. На границе усталостной трещины, проходящей со стороны облицовки в заполняющие слои, выполненной порошковой проволокой в защитных газах по технологии АПИ, обнаружены включения, располагающиеся цепочками, ослабляющие связь матрицы и включения и увеличивающие вероятность роста скорости распространения усталостной трещины. Количество, объемная доля, распределение и форма включений в многослойных сварных швах меняется в результате химических реакций и диффузии. Эти параметры в значительной степени зависят от режимов сварки применяемых технологий, которые должны обеспечивать определенное тепло-вложение в металл при заданной погонной энергии. Можно ожидать, что любое усиление химической связи между включением и матрицей способствовало бы повышению стойкости к усталостному разрушению, поскольку степень отрицательного влияния включения зависит от его коэффициента сцепления с металлической матрицей и разницы свойств.

**Ключевые слова:** металл шва, неметаллические включения, усталостные испытания, твердость, технологии сварки, дефекты швов, микроструктура, ударная вязкость, трещина, долговечность.

**E.M. Fedoseeva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**INFLUENCE OF STRUCTURE AND NONMETALLIC INCLUSIONS  
ON PROPERTIES OF WELDED SEAMS FROM X65 STEEL**

Resistance to formation of cracks of welded seams and connections in general is directly connected with the heterogeneity of a structure of materials consisting in casual variations of mechanical properties, the sizes and outlines of separate grains of metal, the directions of their crystallographic planes, existence of non-uniform phases, inclusions, residual tension. The crack growth rate in different zones of a welded seam characterizing tendency of metal to fatigue failure is determined. Nature of destruction de-

pending on structure and a share of nonmetallic inclusions in a seam is estimated. It is established that the growth rate of a fatigue crack the lowest in a root of the seam executed by the STT technology despite the prevailing perlite share, and is slowed down in the filling layers with fine-grained uniform structure, executed by the API technology. Nature of destruction mainly viscous at the expense of a considerable share of plastic ferrite that increases resistance to fatigue failure. On border of the fatigue crack passing from the facing in the filling layers executed by a powder wire in protective gases on the API technology the inclusions which are settling down chains, weakening communication of a matrix and inclusion and increasing probability of growth of the speed of distribution of a fatigue crack are found. The quantity, a volume fraction, distribution and a form of inclusions in multilayered welded seams changes, as a result of chemical reactions and diffusion. These parameters substantially depend on the modes of welding of the applied technologies which have to provide a certain heatinvestment in metal at the set running energy. It is possible to expect that any strengthening of a chemical bond between inclusion and a matrix would promote increase of resistance to fatigue failure as extent of negative influence of inclusion depends on its coefficient of coupling with a metal matrix and a difference of properties.

**Keywords:** seam metal, nonmetallic inclusions, fatigue tests, hardness, technologies of welding, defects of seams, microstructure, impact strength, crack, durability.

Сварные швы, как и сварное соединение трубопроводов в целом заслуживают особого внимания. Как известно, разрушение трубопроводов происходит вследствие образования дефектов. Любое несоответствие контролируемого параметра качества материалов и изделий регламентированным нормам можно рассматривать как дефект. Дефекты трубопроводов можно классифицировать по двум видам: металлургические и чисто внешние (механические) дефекты стенки трубы. К металлургическим относятся следующие:

а) дефекты металла трубы: неметаллические шлаковые, флюсовые включения, плены, закаты, коррозии, ликвация, науглероживание, перегрев, пережог, пузыри газовые, разнотолщинность листов, разрывы внутренние, раковины усадочные, трещины (водородные, горячие, термические, усталостные и т.д.), флокены и др.;

б) дефекты стенки трубы: царапины, риски, задиры, забоины, вмятины с различными геометрическими характеристиками (глубина, радиус кривизны, длина, расположение на трубе и т.д.); эрозионные разрушения внутренней поверхности трубы; трещины, возникающие при нарушениях технологии проката; вмятины (в отличие от вмятин механического происхождения), образовавшиеся от вдавливания валками неудаленной окалины, металлической крошки или случайных ударов.

К механическим дефектам труб относятся риски, задиры, царапины, вмятины и т.д. Эти дефекты в большой степени связаны с транспортировкой труб от места изготовления до места потребления и с грузочно-разгрузочными работами.

Дефекты (в том числе и микродефекты – поры, неметаллические включения) являются иницирующими факторами начального образования усталостных трещин и снижения трещиностойкости сварных соединений. Оценка влияния дефектов на работоспособность сварных соединений трубопроводов дает подход, основанный на изучении концентрации напряжений в зоне расположения дефектов. Этот метод применим для оценки влияния на несущую способность сварных соединений объемных дефектов – пор, округлых шлаковых включений и неметаллических включений.

Метод концентрации напряжений основывается на положении, что разрушение происходит от концентраторов, у которых коэффициент концентрации напряжений в упругой зоне максимален [1]. При таком подходе все дефекты в сварном шве рассматриваются как концентраторы напряжений.

В связи с этим к трубопроводам предъявляются жесткие требования. Механические характеристики и эксплуатационные свойства, в том числе трещиностойкость и образование усталостных трещин от концентраторов напряжений, должны удовлетворять требованиям нормативной документации и строго соответствовать заданным параметрам.

С целью повышения качества сварных соединений продолжают исследования влияния структуры и неметаллических включений на механические и эксплуатационные свойства трубопроводов. Неметаллические включения всегда присутствуют в металле шва и основном металле и, хотя они не относятся к числу дефектов сварных швов, тем не менее оказывают заметное влияние на их качество и свойства. В сталях и сварных швах присутствуют неметаллические включения различного характера и состава; наряду с простыми соединениями встречаются включения сложного характера и комплексного строения [2]. Неметаллические включения не имеют когерентной связи с металлом и являются концентраторами напряжений, вследствие чего могут в процессе эксплуатации приводить к образованию более сложных дефектов типа трещин, вызывающих разрушение трубопроводов.

В связи с этим представляет интерес изучение влияния структуры металла и неметаллических включений на образование усталостных трещин и снижение трещиностойкости сварных соединений трубопроводов.

Исследования проведены на образцах сварных швов из низколегированной стали Х65 (класс прочности до К60), применяемой для

сварки магистральных нефте- и газопроводов и обеспечивающей требуемые механические свойства. Сварные швы получены по технологии STT + АПИ (автоматическая сварка труб в среде защитных газов комплексом CRC–EVANS Automatic Welding: корень – сварка проволокой сплошного сечения Super Arc L-56 Ø 1,14 мм в защитных газах; заполнение и облицовка – порошковой проволокой ПГ 54-А5В Ø 2,0 мм в защитных газах, защитный газ 25 % Ar + 75 % CO<sub>2</sub>).

Металлографические исследования по сечению сварного шва показали следующие изменения микроструктуры: основной металл имеет мелкозернистую феррито-перлитную структуру, наблюдается определенная полосатость, полученная от контролируемой прокатки металла. В корневом шве наблюдается также феррито-перлитная структура с преобладанием перлитной фазы и участками игольчатого феррита (видманштетта), в заполняющих слоях доля ферритной фазы значительно увеличивается, зерна мельче и близки по строению к структуре основного металла, соотношение структурных составляющих меняется (таблица), в облицовочном слое формируется структура с преобладанием участков игольчатого феррита (рис. 1).

Количественные показатели изменения микроструктуры  
и неметаллических включений в швах стали X65

Часть сварного шва	Объемная доля неметаллических включений (количество), ГОСТ 1778	Соотношение структурных составляющих и балл по шкале 7 ГОСТ 8233
Основной металл	0,844 (78)	Феррит ≈ 38,7 %; Перлит ≈ 61,3 %; балл 7 П/Ф – 65/35
Облицовочный слой	0,528 (76)	Феррит ≈ 70 %; Перлит ≈ 30 %; балл 7 П/Ф – 35/65
Заполняющие слои	0,808 (122)	Феррит ≈ 51,3 %; Перлит ≈ 48,7 %; балл П/Ф – 50/50
Корневой слой	0,502 (88)	Феррит ≈ 28,3 %; Перлит ≈ 71,7 %; балл 8 П/Ф – 75/25

Для анализа неметаллических включений использовали программу «ВидеоТест – Металл». Она дает возможность определить объемный процент включений, разделить сульфиды и оксиды на группы по площади, сравнить со стандартными шкалами.

Анализ неметаллических включений по ГОСТ 1778 (метод П – подсчет количества и объемного процента включений оксидов и суль-

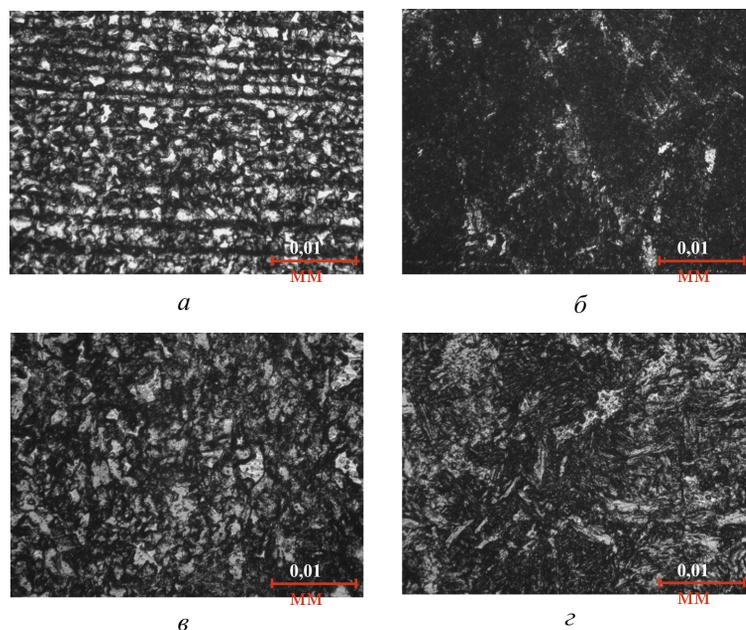


Рис. 1. Микроструктура низколегированной трубной стали X65:  
*а* – основной металл; *б* – корень шва; *в* – заполняющие слои;  
*г* – видманштеттовая структура

фидов и разделение их на группы по площади) показал, что доля включений в корне шва (0,502 – см. таблицу) отличается незначительно от доли включений в облицовочном слое (0,528). Значительная доля и количество включений содержится в заполняющих слоях (см. таблицу). Поскольку заполняющие слои выполняются в несколько проходов и представляют собой многопроходный шов, то увеличение объемной доли включений объясняется, вероятно, влиянием повторного термического цикла сварки в многопроходных швах. Количество, объемная доля, распределение и форма включений в многослойных сварных швах меняется в результате химических реакций и диффузии [3].

О природе неметаллических включений можно судить по некоторым частным признакам и свойствам. К ним относятся форма, размеры, цвет, микротвердость и отражающая способность включений.

По своим размерам включения весьма разнообразны. Природные включения обычно меньше, чем посторонние. Включения, возникающие в результате раскисления металла, обычно бывают небольших размеров. Их величина зависит от того, образуются они в твердом или жидком состоянии. На размер силикатных, а особенно сульфидных

включений оказывает влияние скорость охлаждения. Чем меньше скорость охлаждения, тем крупнее частицы. Размеры некоторых включений: оксид алюминия – от 2 до 7 мкм, нитриды титана – около 7 мкм, сульфиды марганца и железа от 2 до 8 мкм, силикатные включения до 150 мкм. Наиболее крупные силикатные включения содержат много закиси железа и марганца.

Форма включений очень разнообразна. Каплеобразную форму имеют включения закиси железа. Оксисульфидам железа и силикатным стеклам всегда присуща правильная шарообразная форма. Эти включения образуются в расплавленном металле в виде жидких капель. Включения, которые выделяются в жидком металле, в твердом виде могут иметь кристаллическое строение, иногда дендритного характера [4–6, 9].

Некоторые включения образуют с основным металлом и другими включениями эвтектику, которая располагается в виде сплошной или прерывистой пленки по границам зерен. К подобного вида включениям относится сульфид железа.

Известно, что для сталей необходим метод испытания, с помощью которого можно оценить склонность к хрупкости при работе в условиях низких температур. С этой целью применяют испытания на ударный изгиб надрезанных образцов при низких температурах, которые способствуют повышению сопротивления пластической деформации и тем самым увеличивают склонность металлов к хрупкому разрушению (среднее значение  $112,3 \text{ Дж/см}^2$ ).

Ударная вязкость швов с надрезом по центру шва и по линии сплавления (среднее значение  $136,21 \text{ Дж/см}^2$ ) показывает допустимые значения (см. таблицу) в соответствии с нормативной документацией (норма по СП 105-34-96 –  $29,4 \text{ Дж/см}^2$ ) при температуре испытаний –  $20^\circ$ . Величина ударной вязкости тесно связана с видом излома ударных образцов. В изломе не допускается крупнозернистость, шлаковины, расслоения и тому подобные дефекты. При изучении вязкости материалов в сварных соединениях решающее влияние на ударную вязкость оказывает структура, находящаяся непосредственно под надрезом.

Образцы типа Шарпи для испытаний на усталость вырезаны из сварных швов таким образом, чтобы одни максимально захватывали облицовочный слой и часть заполняющих слоев с надрезом со стороны облицовочного слоя шва, а другие – корень шва и заполняющие слои с надрезом со стороны корня шва. Результаты исследований показали, что

инкубационный период зарождения усталостной трещины составляет в среднем  $1,5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^5$  циклов с надрезом со стороны облицовочного слоя шва, а с надрезом со стороны корня шва –  $3,2 \cdot 10^5 \dots 3,5 \cdot 10^5$  циклов (рис. 2).

Скорость роста трещины в корне шва развивается равномерно (1,1–1,3 мм/цикл), разрушение преимущественно по границе перлитного зерна (рис. 3), замедление скорости происходит при прохождении трещины через заполняющие слои шва (1,3–1,5 мм/цикл), что связано с увеличением доли феррита (см. таблицу), характер излома преимущественно вязкий (рис. 4).

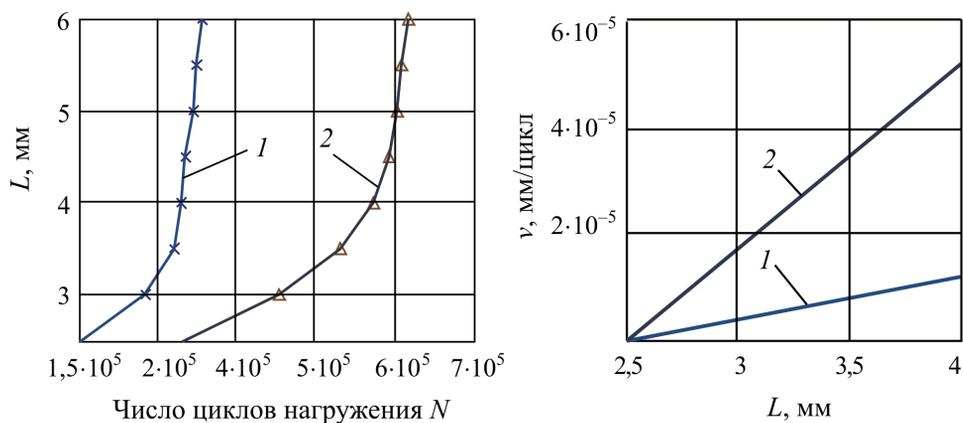


Рис. 2. Усталостные кривые и скорость роста трещины для швов из стали X65, технология STT + АПИ: 1 – надрез со стороны облицовочного слоя шва; 2 – надрез со стороны корня шва

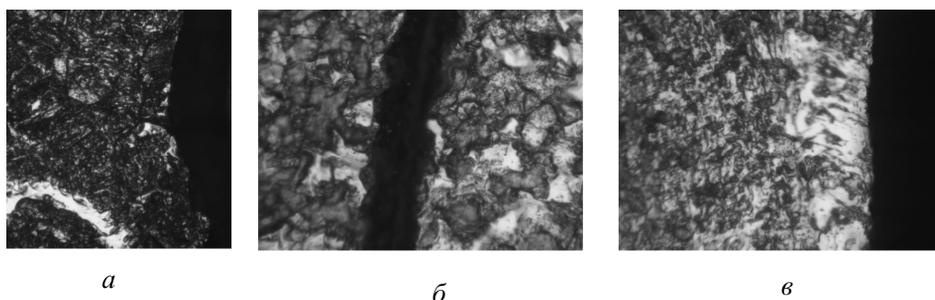


Рис. 3. Характер прохождения усталостной трещины: а – в корне шва; б – заполняющих слоях; в – облицовочном шве

Со стороны облицовочного слоя шва трещина растет быстро (1,3–2,8 мм/цикл), и разрушение в структуре с видманштеттовым (игольчатым) ферритом наблюдается внутризеренное, при переходе

трещины в заполняющие слои скорость незначительно замедляется за счет увеличения доли феррита, но продолжает расти (2,8–4,8 мм/цикл). Внутризеренное разрушение связано с анизотропией кристаллов. Вследствие указанной неоднородности при переменных напряжениях, даже не превышающих среднего значения предела пропорциональности, в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах начинается циклическая пластическая деформация.

Характер излома имеет некоторые очаги хрупкого разрушения (см. рис. 4).

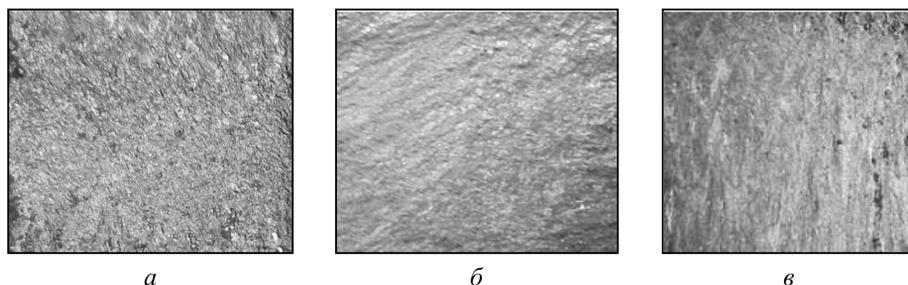


Рис. 4. Структура изломов: *а* – в корне шва; *б* – заполняющих слоях; *в* – облицовочном шве

На границе усталостной трещины, проходящей со стороны облицовки в заполняющие слои, выполненной порошковой проволокой в защитных газах по технологии АПИ, обнаружены включения, располагающиеся цепочками (рис. 5), ослабляющие связь матрицы и включения и увеличивающие вероятность роста скорости распространения усталостной трещины. Доля и количество включений в многослойном заполняющем шве больше, чем в других областях шва, что, безусловно, снижает усталостные свойства.

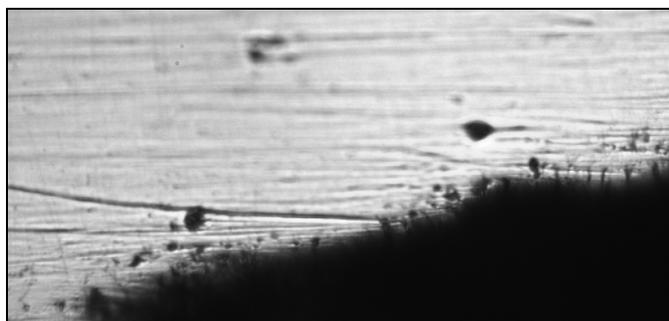


Рис. 5. Неметаллические включения на границе усталостной трещины

Для случаев, когда усталостная долговечность составляет менее  $10^6$  циклов, зарождению трещины предшествует нарушение связи включения с матрицей. Для большей долговечности роль отрыва в усталостном разрушении, зародившемся на включении, еще не выяснена. Тем не менее можно ожидать, что любое усиление химической связи между включением и матрицей способствовало бы повышению усталостной долговечности. Степень отрицательного влияния включения зависит от его коэффициента сцепления с металлической матрицей [7].

Механизм образования трещин от включений достаточно сложен в силу коагуляции и коалесценции последних [3] и различий свойств с металлом шва. Одну из важных причин коагуляции включений в многослойных швах играют технология и режимы сварки. Как правило, подобные включения имеют сложный состав, что подтверждено рентгеноспектральным анализом (рис. 6). Рентгеноспектральный анализ позволяет определить химический состав неметаллических включений и идентифицировать их на более высоком уровне принадлежности и значимости [8].

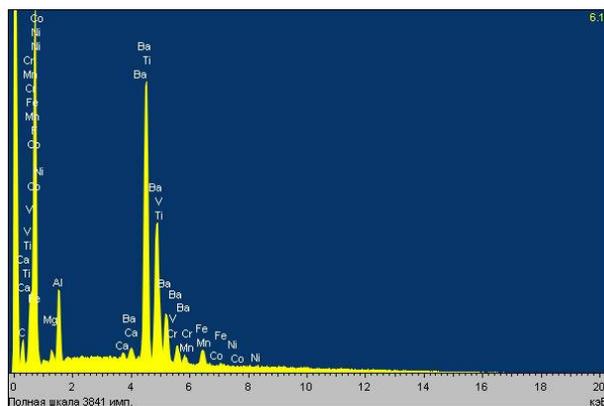


Рис. 6. Спектр состава неметаллических включений в шве

Отличие свойств включений и металла шва показал нанотест. Теоретической основой данной методики является аналитическое решение так называемой задачи Герца [9]. Задача Герца позволяет определить параметры деформации в «точке» соприкосновения двух тел. При постановке задачи Герца используется модель сплошной упругой однородной среды и предположение малости деформаций. В месте «точечного» соприкосновения зонда с поверхностью образца образует-

ся контактная площадка. Решение задачи Герца позволяет определить величину прогиба в зависимости от приложенной нагрузки. Величина прогиба пропорциональна степени сдвливающей силы. Характер действующей нагрузки на материал характеризует рис. 7 листинга программы NanoTest.

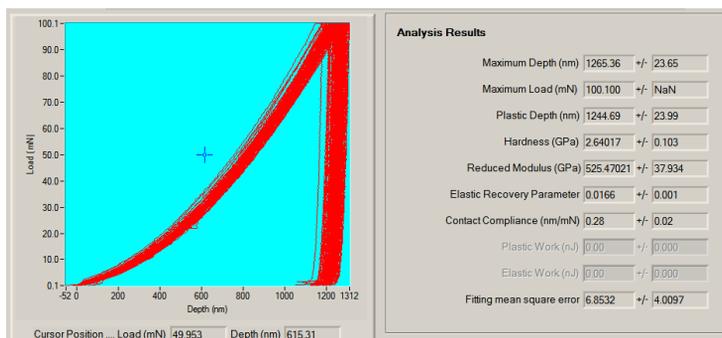


Рис. 7. Характер действующей нагрузки на материал при определении твердости. Листинг программы NanoTest

Результаты испытаний, характеризующие количественное изменение характеристик твердости по цветовой интенсивности, визуализированы топографией распределения свойств по площади участка эксперимента и представлены на рис. 8.

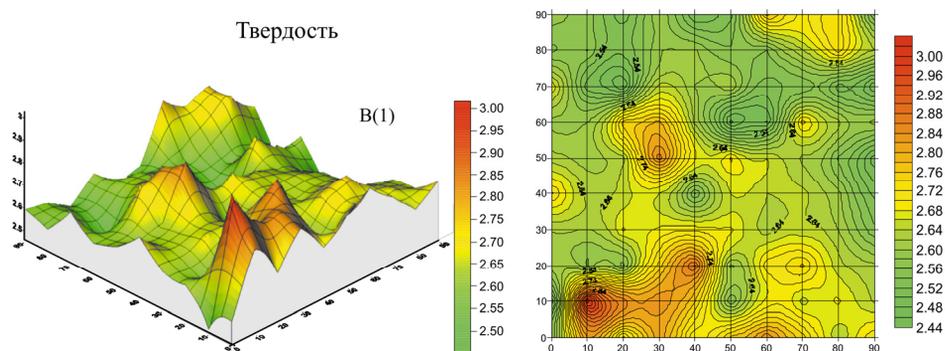


Рис. 8. Топография распределения свойств (твердости) по площади участка эксперимента

Анализ результатов, полученных в ходе наноэксперимента, позволил установить, что твердость неметаллических включений составляет 2,5–2,7 ГПа, что примерно на 20 % выше стальной матрицы (по опытным данным сталь обладает твердостью 1,5–2 ГПа [10]).

Результаты исследований позволили установить, что неоднородность структуры металла шва, размеры и очертания отдельных зерен металла, наличие неоднородных фаз и неметаллические включения влияют на усталостные свойства сварного соединения. Скорость роста усталостной трещины наиболее низкая (1,1–1,3 мм/цикл) в корне шва, выполненного технологией STT, несмотря на преобладающую долю перлита (71,7 %), и, что характерно, понижается в заполняющих слоях с мелкозернистой однородной структурой, выполненных технологией АПИ. Характер разрушения преимущественно вязкий за счет значительной доли пластичного феррита, что повышает стойкость к усталостному разрушению, в отличие от облицовочного слоя, имеющего структуру с участками игольчатого феррита и твердого перлита (в количестве до 61,3 %), где наблюдается значительная скорость роста трещины. Это важный факт в оценке свойств металла шва и склонности к усталостному разрушению, поскольку в процессе эксплуатации трубопровода под действием рабочего давления корень сварного шва находится в контакте с рабочей средой и испытывает наибольшие нагрузки, и его анализ представляет значительный интерес.

На границе усталостной трещины, проходящей со стороны облицовки в заполняющие слои, выполненной порошковой проволокой в защитных газах по технологии АПИ, обнаружены включения, располагающиеся цепочками. Доля и количество включений здесь наибольшие, по сравнению с другими областями шва, что, безусловно, снижает усталостные свойства. Количество, объемная доля, распределение и форма включений в многослойных сварных швах меняются в результате химических реакций и диффузии. Эти параметры в значительной степени зависят от режимов сварки применяемых технологий, которые должны обеспечивать определенное тепловложение в металл при заданной погонной энергии. Можно ожидать, что любое усиление химической связи между включением и матрицей способствовало бы повышению стойкости к усталостному разрушению, поскольку степень отрицательного влияния включения зависит от его коэффициента сцепления с металлической матрицей и разницы свойств.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ в сфере научной деятельности № 11.1196.2014/К от 17.07.2014.*

### **Список литературы**

1. Усталость и вязкость разрушения металлов / под ред. В.С. Ивановой. – М.: Наука, 1974. – 260 с.
2. Лаборатория металлографии / под ред. Б.Г. Лившица, Е.В. Панченко [и др.]. – М.: Металлургия, 1965. – С. 440.
3. Федосеева Е.М., Игнатов М.Н., Летягин И.Ю. Влияние повторного термического цикла сварки на образование неметаллических включений в многослойных сварных швах трубных сталей // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 18–21.
4. Гольдштейн М.И., Грачев С.В. Специальные стали: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
5. Новожилов Н.М., Соколова А.М. Количество и состав сульфидных включений в металле швов при дуговой сварке // Сварочное производство. – 1963. – № 3. – С. 12–15.
6. Дуб А.В. Неметаллические включения в низколегированной трубной стали // Металлург. – 2003. – № 4. – С. 67–73.
7. Ларииков Л.Н., Рябов В.Р., Фальченко В.М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. – М.: Машиностроение, 1975. – 192 с.
8. Федосеева Е.М., Игнатов М.Н., Игнатова А.М. Идентификация неметаллических включений в металле сварных соединений стали Х70 электронным сканирующим микроскопом // Сварка: наука, практика, образование: сб. докл. науч.-техн. конф. в рамках 10 Междунар. специализир. выставки «Сварка. Диагностика и контроль», г. Екатеринбург, 2010 г. / Урал. федер. ун-т; Урал. ин-т сварки. – Екатеринбург, 2010. – С. 116–122.
9. Головин С.А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
10. Современные методы идентификации неметаллических включений в сварных соединениях трубных сталей / Е.М. Федосеева, М.Н. Игнатов, К.П. Казымов, И.Ю. Летягин // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 45–47.

### **References**

1. Ustalost' i viazkost' razrusheniia metallov [Fatigue and viscosity of destruction of metals]. Ed. V.S. Ivanova. Moscow: Nauka, 1974. 260 p.
2. Laboratoriia metallografii [Laboratory of a metallography]. Eds. B.G. Livshits, E.V. Panchenko. Moscow: Metallurgii, 1965. 440 p.

3. Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Letiagin I.Iu. Vliianie povtornogo termicheskogo tsikla svarki na obrazovanie nemetallicheskih vklucheni v mnogosloinykh svarnykh shvakh trubnykh stali [Influence of a repeated thermal cycle of welding on formation of nonmetallic inclusions in multi-layered welded seams pipe the staly]. *Svarka i Diagnostika*, 2011, no. 2, pp. 18-21.

4. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V. Spetsial'nye stali [Special became]. Moscow: Metallurgii, 1985. 408 p.

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

6. Dub A.V. Nemetallicheskie vklucheniia v nizkolegirovannoi trubnoi stali [Nonmetallic inclusions in the low-alloyed pipe steel]. *Metallurg*, 2003, no. 4, pp. 67-73.

7. Larikov L.N., Riabov V.R., Fal'chenko V.M. Diffuzionnye protsessy v tverdoi faze pri svarke [Diffusive processes in a firm phase when welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 192 p.

8. Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Ignatova A.M. Identifikatsiia nemetallicheskih vklucheni v metalle svarnykh soedinenii stali Kh70 elektronnyim skaniruiushchim mikroskopom [Identification of nonmetallic inclusions in metal of welded compounds of X70 steel the electronic scanning microscope]. *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Svarka: nauka, praktika, obrazovanie"*. Ekaterinburg: Ural'skii Federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, Ural'skii institut svarki, 2010, pp. 116-122.

9. Golovin S.A. Mikroplastichnost' i ustalost' metallov [Microplasticity and fatigue of metals]. Moscow: Metallurgii, 1980. 239 p.

10. Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Kazymov K.P., Letiagin I.Iu. Sovremennye metody identifikatsii nemetallicheskih vklucheni v svarnykh soedineniiakh trubnykh stali [Modern methods of identification of nonmetallic inclusions in welded connections pipe the staly]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2011, no. 1, pp. 45-47.

Получено 28.10.2015

### **Об авторе**

**Федосеева Елена Михайловна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство и технологии конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Elena.fedoseeva.79@mail.ru.

### **About author**

**Elena M. Fedoseeva** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Welding Production and Structural Materials Technology”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Elena.fedoseeva.79@mail.ru.