

УДК 621.86

## **ХАРАКТЕРИСТИКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

### **CHARACTERISTIC NONMETALLIC INCLUSIONS IN WELDED JOINTS OIL AND GAS OF PIPELINES**

Карташов М.Ф., Игнатова А.М., Федосеева Е.М., Игнатов М.Н.,  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация

M.F. Kartashov, A.M. Ignatova, E.M. Fedoseeva, M.N. Ignatov,  
FSBEI NPE «Perm National Research Polytechnic University», Perm,  
the Russian Federation

e-mail: iampstu@gmail.com

**Аннотация.** Магистральные трубопроводы работают в условиях циклического нагружения от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта, поэтому в них возникают усталостные явления, которые развиваются до образования усталостных трещин. Чаще всего усталостные явления образуются в районе неметаллических включений. Для того, что бы оценить влияние неметаллических включений на вероятность аварийной ситуации следует учитывать их характеристики, многие из которых могут быть установлены только с помощью современной исследовательской техники.

Современными методами исследования установлено, что на аварийность сварных соединений трубопроводов влияют ни сколько уровень загрязненности неметаллическими включениями, сколько их морфологический, тип, состав и размер. Представлены результаты исследований сварных соединений, полученных при использовании разных материалов. Использовались методики предусмотренные ГОСТ,

сканирующая растровая электронная микроскопия, спектральный микрозондовый анализ и наноиндентирование. Установлено, что неметаллические включения являются концентраторами напряжений, не только по той причине, что имеют значительно отличающиеся от металлической матрицы свойства. Определенную роль в их негативном действии играет наличие усадочных дефектов. Усадочные дефекты неметаллических включений приводят к тому, что между ними и металлической матрицей образуется зазор, перемещаясь в котором неметаллическое включение оказывает ударное воздействие на металл изнутри. Наиболее аварийно опасны включения 5-6 размерной группы остроугольной формы. Полученные данные позволяют утверждать, что при контроле сварных соединений на предмет загрязненности неметаллическими включениями следует больше уделять внимания содержанию определенных включений, а не общей загрязненности.

**Abstract.** Trunk pipelines work under a cyclic mechanical load because when oil or gas pumped pressure is changing constantly - pulsates. Therefore, fatigue phenomena are a common cause of accidents. Often fatigue phenomena are formed near nonmetallic inclusions. To know how the characteristics of non-metallic inclusions influenced on the probability of an accident, need to use the most modern research methods.

Modern methods of study found that on the accident rate of welded joints of pipelines most influence have morphological type, composition and size nonmetallic inclusion, this effect more important than common level of pollution by nonmetallic inclusions. The article presents the results of investigations of welded joints produced with the use of different popular welding materials. We used the methods, described in the state standards, scanning electron microscopy, spectral microprobe analysis and nanoindentation. We found that non-metallic inclusions are stress concentrators because they have shrunk. Between metal and non-metallic inclusions formed blank space due to shrinkage, it strengthens the differential properties of this

boundary. Nonmetallic inclusion is not fixed, it can move. This means that in a pulsation, nonmetallic inclusion strikes on the metal inside. We found that the most dangerous emergency inclusion size group 5-6 acute form. The data that we have received means that the control of quality and reliability of welded joints need define contamination by characteristics nonmetallic inclusions, it more important than total pollution.

**Ключевые слова:** трубопровод, неметаллические включения, надежность, усталостные нагрузки, твердость, усадка, наноиндентирование.

**Key words:** pipeline, non-metallic inclusions, reliability, load fatigue, hardness, shrinkage nanoindentation.

По статистике в среднем на каждом нефте- или газопроводе случается около 10 крупных аварий в год [1]. Причины аварий могут быть различны, наиболее распространенная – усталостные разрушения. Магистральные трубопроводы работают в условиях циклического нагружения (от изменения внутреннего давления перекачиваемого продукта – пульсации), поэтому в них возникают усталостные явления, которые развиваются до образования усталостных трещин [2-3]. Чаще всего усталостные явления образуются в районе неметаллических включений (НВ). Для того, что бы оценить влияние неметаллических включений на вероятность аварийной ситуации следует учитывать их характеристики.

Целью исследования является изучение характеристик неметаллических включений и определение их влияния на аварийность сварного соединения.

Исследование проводилось на образцах сварных соединений выполненных в производственных условиях с использованием наиболее востребованных сварочных материалов и технологий, номенклатура образцов представлена в таблице 1.

Первый этап исследования заключался в оценке общей загрязненности образцов НВ разных зон сварного шва. Для этого использовалась методика предусмотренная ГОСТ 1778-70, обработка результатов проводилась с помощью программы ВидеоТест 1.0.

В результате статистической обработки полученных данных установлено, что значительное количество НВ присутствует в корне шва вне зависимости от метода сварки.

При статистической оценке загрязненности сварного шва значимо, к какой размерной группе относится их преобладающая часть.

На следующем этапе исследования установлено, что в наибольшем количестве встречаются включения 4-6 размерной группы. На рисунке 1 представлена диаграмма характеризующая содержание НВ в сварных соединениях полученных различными методами дифференцированно по размерным группам.

Известно [4-5], разные по размеру НВ относятся к разному химическому и структурному типу. Так, например включения 1-3 группы чаще оказываются аморфными включениями диоксида кремния, а включения более крупного размера, как правило, кристаллические и представляют собой сложные силикаты или другие комплексные минеральные соединения, наиболее крупные включения или состоят из нескольких разных по составу консолидированных включений или относятся к сернистым соединениям [6].

Таблица 1. Сварные соединения сталей трубного назначения

Ручная дуговая сварка (РД)	
Марка стали; размер трубы	Сварочные материалы (Ø электродов, мм)
17Г1С-У; 1220×12,4	LB-52U (2,6); УОНИ 13/55 (4,0)
17Г1С-У; 1220×12,4	Fox Cel (4,0); МТГ-02 (4,0)
X70; 1420×18,7	LB-52U (3,2); Кессель5520 Мо (4,0)
Корень: механизированная сварка сплошной порошковой проволокой в среде углекислого газа; заполнение и облицовка: механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (STT+МПС)	
X70; 1420×15,7	L-56 (1,14)+CO <sub>2</sub> ; NR-208S (2,0)
17Г1С-У; 1220×11,0	L-56 (1,14)+CO <sub>2</sub> ; NR-207 (1,7)
Корень: ручная дуговая сварка; заполнение и облицовка: автоматическая под флюсом (РД+АФ)	
X70;1420×18,7	LB-52U (3,2); Св08ХМ (3,0); АН47
X70;1420×15,7	Fox Cel (4,0); Fox Cel Мо (4,0); Св08ХМ (3,0); АН47
Корень: ручная дуговая сварка; заполнение и облицовка: механизированная сварка самозащитной порошковой проволокой (РД+МПС)	
X70; 1420×15,7	LB-52U (3,2); NR-208S (2,0)
X70; 1420×15,7	Fox Cel (4,0); Fox Cel Мо (4,0); NR-208S (2,0)

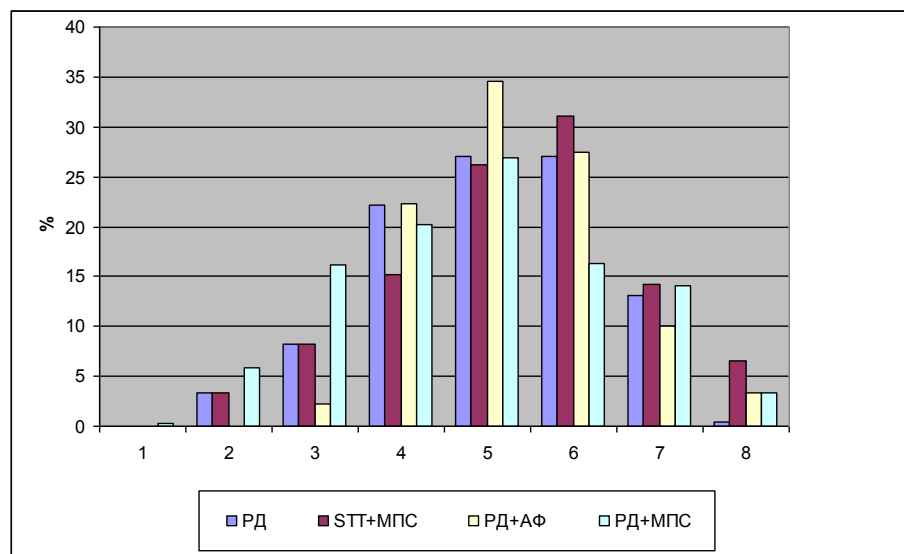


Рисунок 1. Содержание НВ разных размерных групп, в сварных соединениях полученных различными способами

Для того что бы оценить на макроуровне какая морфология характерна для включений разных размерных групп была проведена оптическая микроскопия, в результате были выявлены следующие характерные особенности.

Как правило, включения 1-2 группы имеют сферическую форму (рисунок 2, а), включения 3-4 группы несимметричные, остроугольные и вытянутые (рисунок 2, б). Включения 5-6 группы, так же имеют остроугольную и неправильную форму (рисунок 2, в, г, д ). Наиболее крупные включения имеют форму с округлыми краями и при этом имеют сложную, визуально идентифицируемую структур (рисунок 2, е, ж). Визуальная идентификация при оптической микроскопии не дает представления ни о строение, ни о составе включений, судить об этих параметрах можно используя наиболее современные методы, а именно сканирующую растровую электронную микроскопию [7].

Следующий этап исследований заключался в оценке морфологии микровключений с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 7500F фирмы “JEOL” при увеличениях от 2 до 45 тысяч раз. Полученные микрофотографии обычно не позволяют получить резких очертаний микровключений. Это связано с тем, что обычно они находятся на некоторой глубине от поверхности. Их размеры меняются в пределах от 50 до нескольких микрон и менее. Преобладают микровключения размером в единицы микрон. Химический анализ включений был проведен спектральным микронзондовым анализом (таблица 2).

По форме можно выделить сферические (таблица 2, а), сферические многофазные (таблица 2,б), остроугольные (таблица 2, в) и составные (таблица 2, г). На поверхности включений присутствуют многочисленные поры, имеющие диаметр в наноразмерной области (50-100 нм), а так же обнаружено, что зачастую между включением и металлической матрицей существует определенно пространство, что может свидетельствовать о наличие собственной усадки НВ. Усадочные явления, возникающие при

затвердевании НВ, могут приводить к образованию воздушной подушки вокруг включения, которая обеспечивает ему некоторую свободу перемещения. Опасность, с точки зрения влияния на аварийность в такой ситуации, заключается в том, что не зафиксированное в матрице включение при пульсирующих нагрузках способно производить микроудары на металлическую матрицу вокруг себя изнутри [8].

Установлено, что остроугольные и составные НВ является многофазными, что проявляется в неоднородности. Сферические многофазные включения имеет отчетливо выраженное зональное строение, что связано, вероятно, с многостадийным ростом с участием ликвации.

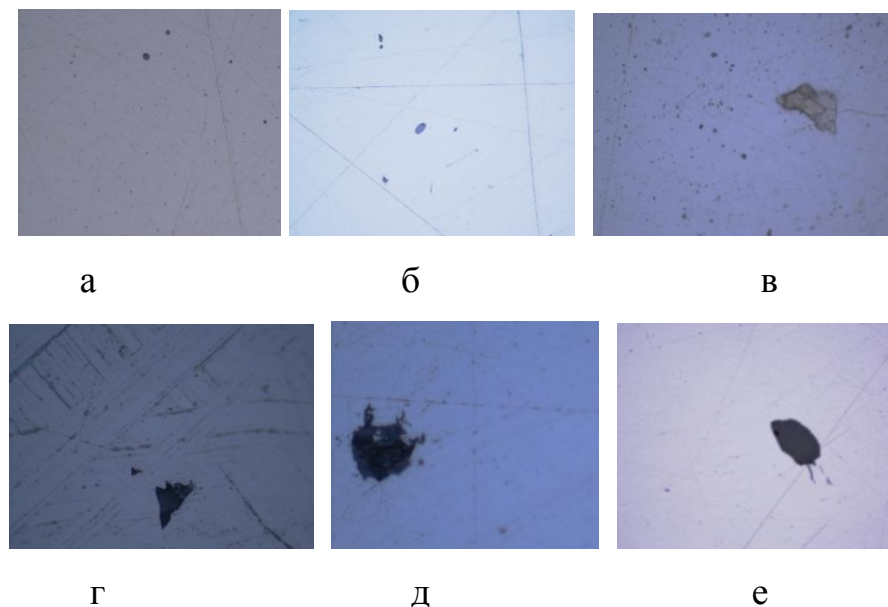
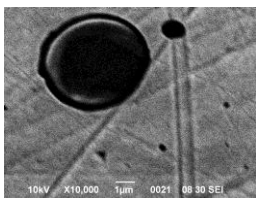
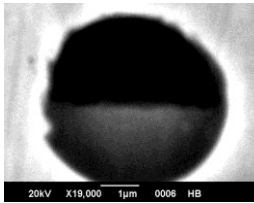
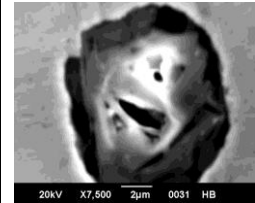
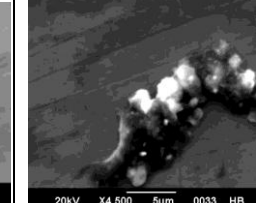


Рисунок 2. Неметаллические включения, в сварных соединениях трубных сталей выявленные при оптической микроскопии: а – включения 1-2 размерной группы ( $\times 500$ ); б – включения 3-4 размерной группы ( $\times 500$ ); в, г, д – включения 5-6 размерной группы ( $\times 1000$ ); е – наиболее крупные включения 7-8 группы ( $\times 100$ )

Таблица 2. Характеристика химического состава различных по морфологии включений

Компоненты	Тип включений			
	а	б	в	г
				
Содержание компонентов, %				
SiO <sub>2</sub>	64,80	54,45	53,60	4,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,60	5,30
SO <sub>3</sub>	-	-	-	29,24
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	7,25
MgO	30,49	15,5	30,15	3,15
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	0,72
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	-	0,11	-
MnO	-	-	0,11	-
CaO	-	-	-	26,23
FeO*	4,22	25,22	14,95	17,26
ZnO	-	-	-	3,82
NiO	0,35	-	0,43	-

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что включения разной формы и разного размера обладают разным строением и составом, причем некоторые из включений, даже не классифицируются стандартными методиками по группам размерности, так как, просто не могут быть обнаружены при оптической микроскопии. Следовательно, нанести урон могут те включения, которые обладают составной и остроугольной формой, ведь в результате усадки и дальнейшего перемещения таких включений в рамках образовавшегося пространства скорее приведет к образованию микроразрушений металлической матрицы. Как правило, размер таких включений превышает 4-5 мкм, то есть относятся к 4-6 размерным группам.



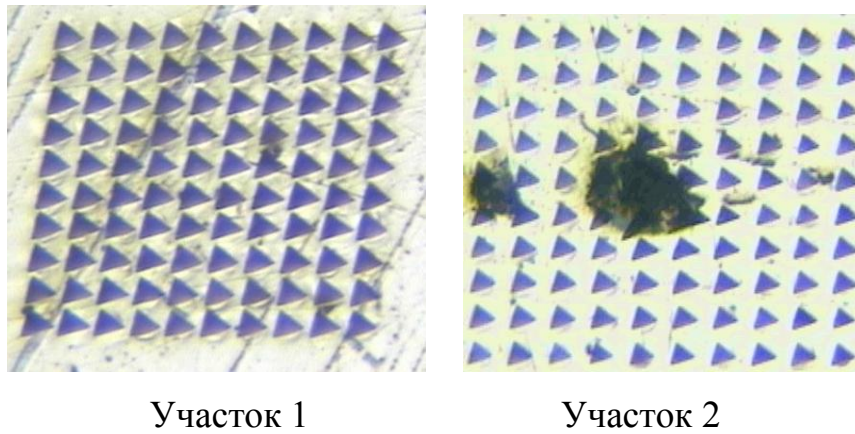


Рисунок 3. Участки поверхности образцов сварных соединений для проведения эксперимента по наноиндентированию

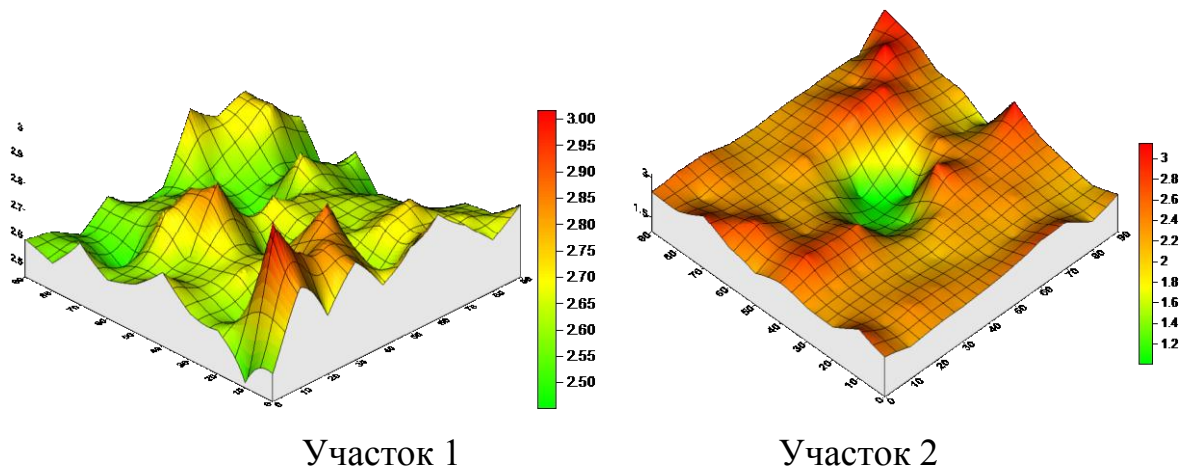


Рисунок 4. Топографическое изображение распределения величин твердости на поверхности исследованных участков

По результатам анализа были сделаны расчёты кристаллохимических формул НВ в корне шва и заполняющих слоях. В корне выявлены включения соответствующие типу *a* в таблице 2, по стехиометрии его можно отнести к сепиолиту (минерал из класса силикатов). Его кристаллохимическая формула –  $(\text{Mg}_{2.792} \text{Fe}_{0.218} \text{Ni}_{0.015983} \text{Cr}_{0.002})_{3.025}[\text{Si}_3, \text{O}_{11}]$ , типа *б* - не имеют кристаллохимической формулы, они затвердевают в состоянии расслоения на две жидкие фазы, типа - *в* по стехиометрии относится к бронзиту  $(\text{Mg}_{1.616} \text{Fe}_{0.449} \text{Ni}_{0.012} \text{Mn}_{0.004})_{2.081}[(\text{Si}_{1.929} \text{Al}_{0.025} \text{Cr}_{0.002})_{1.956} \text{O}_6]$ , типа *г* - является полиминеральным агрегатом, в составе которого

можно выделить преобладающую в процентном отношении сульфатную составляющую (возможные минеральные фазы: ангидрит- $\text{CaSO}_4$ , мелантерит- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , астраханит- $\text{Na}_2\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), хлоридную (галит- $\text{NaCl}$ ) и силикатную (кальциевый, железистый и магнезиальный алюмосиликат) [9].

Завершающим этапом было исследование механических свойств включений различного типа методом наноиндентирования. Данный метод предполагает пошаговое внедрение микроскопического индентора, который представляет собой алмазную пирамидку, на участке поверхности образца, на котором присутствует «вскрытое» НВ. Результаты исследований получены с помощью прибора NanoTest-600 (производитель Micro Materials Ltd., Великобритания). Площадь участка на поверхности образца составила  $90 \times 90$  мкм (рисунок 3), шаг индентирования составил 5 мкм, нагрузка в каждой точке составила 100 кН, в результате испытания данные были получены о распределении значения твердости и модуля упругости на участке эксперимента, а значит, были получены сравнительные характеристики этих величин, как у НВ, так и у основного металла.

Для эксперимента были выбраны два включения, двух кардинально противоположных размерных групп (рисунок 3). Участок 1 содержит включение 1 группы размерности, силикатного состава и эндогенного типа. Участок 2 содержит включение 5-6 группы, сложного комплексного состава и относится к экзогенным включениям.

Первичные результаты имели вид диаграммы «сила перемещение», с помощью графической визуализации и автоматизированного математического расчета, эти результаты были переведены в топографические схемы распределения значений твердости и модуля упругости на поверхности исследуемого участка (рисунок 4).

Анализ результатов, полученных в ходе эксперимента, позволил установить, что твердость неметаллических включений на участке 1

составляет  $2,64 \div 3$  ГПа, а приведенный модуль упругости  $525 \div 580$  ГПа, что примерно на 20% выше стальной матрицы (по опытным данным сталь обладает твердостью  $1,5 \div 2$  ГПа и приведенным модулем упругости 465 ГПа). Твердость НВ на поверхности участка 2 составляет  $1,32 - 1,00$  ГПа, а приведенный модуль упругости  $147 - 95$  ГПа, что ниже, чем у основного металла.

Кроме того, подтвердились сведения об усадочном пространстве вокруг включения, поскольку, при надавливании индентора, включение опускалось на дно усадочной раковины [10].

### **Выводы**

Проведенное исследование показывает, что для НВ разных размерных групп характерны определенные: морфология, состав и механические свойства. НВ разного размера в различной степени влияют на развитие усталостных трещин в сварном соединении. Наиболее аварийно опасны включения 5-6 размерных групп остроугольной формы. Полученные данные позволяют утверждать, что при контроле сварных соединений НВ следует больше уделять внимания содержанию определенных включений, а не общей загрязненности. Так как доказано, что экзогенные включения, составного и остроугольного типов, размером свыше 8-10 мкм, наиболее вредоносны для сварных соединений.

### **Список используемых источников**

1 Семенова Е.С. Проблемы оценки качества металла, методы и объем контроля трубопроводной арматуры опасных производственных объектов. Техническое регулирование//Actual Conferens. 2(65) 2010. С. 22-25.

2 Ромашкин А.Н. Влияние неметаллических включений на свойства стали. URL: [http://www.steelcast.ru/nonmetallic\\_inclusions](http://www.steelcast.ru/nonmetallic_inclusions).

3 Игнатов М.Н., Игнатова А.М., Канина А.Е. Идентификация и изучение свойств неметаллических включений в сварных соединениях //

Изв. высших учеб. заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 2 (26). С. 140-148.

4 Игнатова А.М. Механизм образования неметаллических включений в сталях // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 208-211.

5 Количественные и качественные характеристики неметаллических включений в стали 09Г2С на разных этапах металлургического передела/ Игнатова А.М. [и др.] // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2012. № 4. С. 116-120.

6 Минералогия неметаллических включений в сварных соединениях магистральных трубопроводов / Федосеева Е.М. [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13. № 4. С. 60-68.

7 Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода / Федосеева Е.М. [и др.] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2011. № 5. С. 376-381.

8 Федосеева Е.М., Игнатов М.Н., Игнатова А.М. Рентгеноспектральный микронзондовый анализ минералогического состава неметаллических включений сварных соединений магистральных трубопроводов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13. № 4. С. 69-77.

9 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.

10 Современные методы идентификации неметаллических включений в сварных соединениях трубных сталей / Игнатов М.Н.[и др.]. //Тяжелое машиностроение. 2011. № 1. С. 45-50.

## References

- 1 Semenova E.S. Problemy ocenki kachestva metalla, metody i obem kontrolja truboprovodnoj armatury opasnyh proizvodstvennyh obektov. Tehnicheskoe regulirovanie//Actual Conferens. 2(65) 2010. S. 22-25.[in Russian].
- 2 Romashkin A.N. Vlijanie nemetallicheskih vkljuchenij na svojstva stali. -URL: [http://www.steelcast.ru/nonmetallic\\_inclusions](http://www.steelcast.ru/nonmetallic_inclusions). [in Russian].
- 3 Ignatov M.N., Ignatova A.M., Kanina A.E. Identifikacija i izuchenie svojstv nemetallicheskih vkljuchenij v svarnyh soedinenijah//Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki. 2013. № 2 (26). S. 140-148. [in Russian].
- 4 Ignatova A.M. Mehanizm obrazovanija nemetallicheskih vkljuchenij v staljah// Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2012. № 2. S. 208-211. [in Russian].
- 5 Ignatova A.M. i Kolichestvennye i kachestvennye karakteristiki nemetallicheskih vkljuchenij v stali 09G2S na raznyh jetapah metallurgicheskogo peredela//Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja. 2012. № 4. S. 116-120. [in Russian].
- 6 Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Ignatova A.M., Ol'shanskaja T.V., Vylezhneva N.V. Mineralogija nemetallicheskih vkljuchenij v svarnyh soedinenijah magistral'nyh truboprovodov// Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2011. T. 13. № 4. S. 60-68. [in Russian].
- 7 Fedoseeva E.M., Ol'shanskaja T.V., Ignatov M.N., Shestakov A.P. Modelirovanie nestacionarnyh processov v svarnom soedinenii truboprovoda// Neftegazovoe delo. Jelektron. Nauch. zhurn. 2011. № 5. S. 376-381. [in Russian].
- 8 Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Ignatova A.M. Rentgenospektral'nyj mikrozondivyj analiz mineralogicheskogo sostava nemetallicheskih vkljuchenij svarnyh soedinenij magistral'nyh truboprovodov//Vestnik Permskogo

nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie. 2011. T. 13. № 4. S. 69-77. [in Russian].

9 Fedoseeva E.M., Ignatov M.N., Letjagin I.Ju. Vlijanie povtornogo termicheskogo cikla svarki na obrazovanie nemetallicheskih vkljuchenij v mnogoslojnyh svarnyh shvah trubnyh stalej// Svarka i diagnostika. 2011. № 2. S. 18-21. [in Russian].

10 Ignatov M.N., Letjagin I.Ju., Fedoseeva E.M., Kazymov K.P. Sovremennye metody identifikacii nemetallicheskih vkljuchenij v svarnyh soedinenijah trubnyh stalej//Tjazheloe mashinostroenie. 2011. № 1. S. 45-50. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Карташов М.Ф., студент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация

M.F. Kartashov, Student of the Chair «Welding Manufacturing and Technology of Construction Materials», Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Perm, the Russian Federation

Игнатова А.М., канд. техн. наук, старший науч. сотрудник, Институт безопасности труда, производства и человека (структурное подразделение ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация

A.M. Ignatova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research, Institute of Safety Labor, Manufacturing and Human (PNRPU), Perm, the Russian Federation

iampstu@gmail.com

Федосеева Е.М., канд. техн. наук, кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация

E.M. Fedoseeva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair, «Welding Manufacturing and Technology of Construction Materials». Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Perm, the Russian Federation

Игнатов М.Н., д-р техн. наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь, Российская Федерация

M.N. Ignatov Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Welding Manufacturing and Technology of Construction Materials», Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Perm, the Russian Federation