

4. *Мохов, В. А.* Корпус реактора проекта ВВЭР-ТОИ. Конструкция и конструкционные материалы / В. А. Мохов, А. С. Зубченко, И. Ф. Акбашев, В. П. Семишкин // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – № 4. – С. 5-11.

## Modernization of the WWER-TOI Reactor Vessel

**M.G. Utigalieva**

*Branch of JSC «AEM-technology» «Atommash» Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
e-mail: utigalieva\_mg@atommash.ru*

**Abstract** – The paper represents an ability to manufacture a reactor vessel with the elimination of welding joint No. 4 by making the reactor flange solid forged with the upper nozzles shell. The forgings and billets of the product were modelled, the possibility of manufacturing and changes in the total metal consumption were evaluated.

*Keywords:* reactor vessel, flange, upper shell of the nozzle area.

УДК 620.186.5;621.9.011

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И НАЛИЧИЯ МИКРОДЕФЕКТОВ НА СКЛОННОСТЬ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ 16ГНМА К ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

**Е.И. Колоколов<sup>\*</sup>, С.С. Таранов<sup>\*\*</sup>**

*<sup>\*</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

*<sup>\*\*</sup>ООО «Атомспецсервис», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе рассмотрено влияние термической обработки листовых заготовок для штампованных днищ из стали 16ГНМА на склонность к образованию флокеноидов – микротрещин, развивающихся по механизму псевдоскола, характерного для водородного охрупчивания.

*Ключевые слова:* термическая обработка, нормализация, высокий отпуск, ликвационная неоднородность, микрофрактографические исследования, объемные микродефекты металлургического происхождения, коллекторы водорода, флокеноиды на микродефектах в участках с бейнитной структурой, псевдоскол.

В течение длительного периода известны случаи катастрофического разрушения барабанов высокого давления ТЭС, изготовленных из стали 16ГНМА. Длинномерные цилиндрические сосуды диаметром до 2000 мм с толщиной стенки до 120 мм хрупко разрушались взрывообразным образом после ремонтной сварки и гидроиспытаний [1]. Разрушения начинались в околошовной зоне (ОШЗ), не содержащей видимых дефектов, но имеющих в ряде случаев повышенную неравновесность ввиду высокой твердости, и распространялись в основном металле. В других случаях происходил рост зерна ОШЗ, в которой наблюдалось наличие микронадрывов. В первом случае проводилась сварка без подогрева, а во втором случае применялись технологии сварки с подогревом. Местная термическая обработка после ремонтной сварки не проводилась. В обоих случаях характерно начало разрушения путем образования холодных трещин. Роль водорода в их образовании в данной статье не рассматривалась.

В настоящем исследовании был проведен анализ влияния термической обработки на структуру и свойства штампованных днищ барабанов из листовой стали 16ГНМА толщиной 115 мм. Проводилось сравнение свойств днищ после нормализации и

нормализации с высоким отпуском (табл. 1). После охлаждения на воздухе предел текучести был выше нормативных значений, а относительное удлинение, ударная вязкость и ударная вязкость после мехстарения – ниже нормативных значений. Это свидетельствует о неравновесности – подкалке заготовок и их охрупчивании. Высокий отпуск возвращает соответствующие результаты к нормативным значениям.

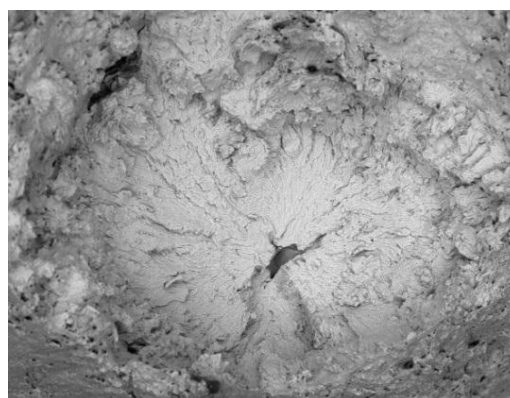
Таблица 1 – Сравнение свойств дниц

	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	KCU <sub>MC</sub> Дж/см <sup>2</sup>
Нормативные значения по ОСТ108.030.118-78	500	323-510	20	50	78	39
Нормализация	665	524	18.2	53.2	33	22.3
Нормализация, высокий отпуск	615	509	25.4	72.8	199	144

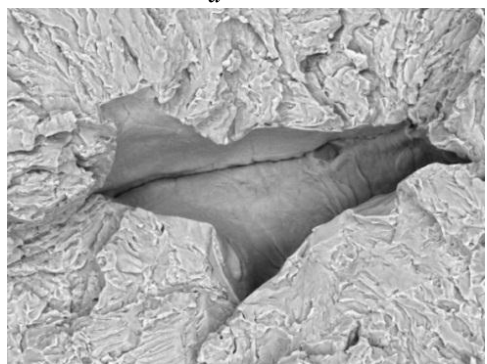
На изломах образцов для растяжения после нормализации, показавших пониженную пластичность, были выявлены многочисленные светлые блестящие пятна (рис. 1 а), которые отсутствуют после испытаний на ударную вязкость. Микрофрактографические исследования показали, что каждое из таких пятен представляет собой флокеноид – плоский дефект водородного происхождения с характерным псевдоручьистым рельефом (рис. 1 б). В литературе такой вид излома часто называют квазисколом, хотя логичнее применять термин – псевдоскол. В работе [2] показано, что к сколу такое разрушение отношения не имеет, так как имеет совершенно иную природу. Коллекторами водорода, от которых распространяется водородные трещины, являются расположенные в их центре объемные микродефекты металлургического происхождения: в основном, незалеченные при прокатном обжати стьки аустенитных зерен со сглаженным рельефом и следами деформации (рис. 1 в), скопления неметаллических включений, горячие микротрещины с расположенными в них шлаковыми включениями (рис. 1 г).



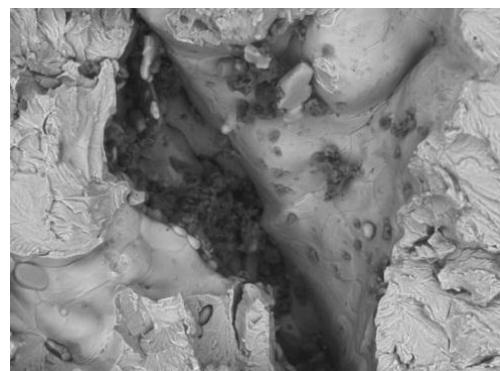
а



б; x200



в; x3000

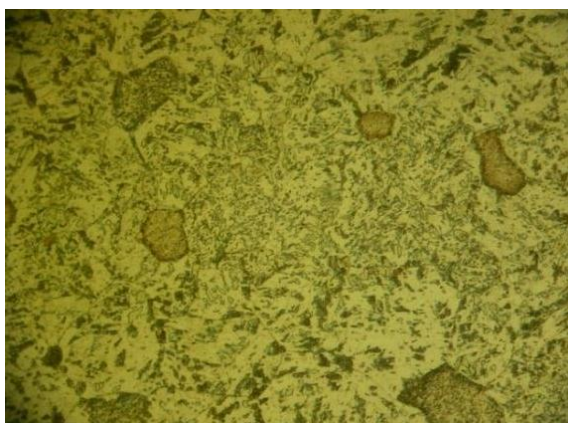


г; x1200

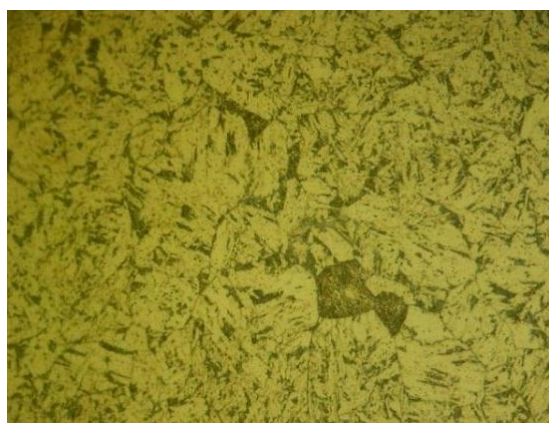
г;

Рисунок 1 – Изломы образцов

Микроструктурный анализ выявил в нормализованном металле ликвационную неоднородность с разной степенью неравновесности, выражающейся в бейнитных участках повышенной твердости, включающих скопления небольших нетравящихся включений мартенситно-аустенитной составляющей различной формы в ферритной матрице – в одних зонах, и ферритно-перлитную структуру – в других (рис. 2). Маркерами дефектов, вызывающих образование флокеноидов, являются округлые участки коричневатого цвета, расположенные в зонах с бейнитным строением (рис. 2 а). После отпуска микроструктура во всех зонах имеет ферритно-перлитное строение (рис. 2 б), а следы водородного охрупчивания отсутствуют. Это свидетельствует об эффективности для удаления водорода высокого отпуска стали 16ГНМА после нормализации.



а; x500



б; x500

Рисунок 2 – Нетравящиеся включения

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланин, А. А. Влияние технологии сварочного ремонта на хрупкую прочность барабанов высокого давления / А. А. Ланин., Ю. Т. Дьяков, В. В. Рева. // Энергетик. – 2018. – № 4. – С. 14-17.
2. Мерсон, Е. Д. О природе квазискола в низкоуглеродистой стали, охрупченной водородом. / Е. Д. Мерсон, В. А. Полуянов, Д. Л. Мерсон, А. Ю. Виноградов // МиТОМ. – 2019. – №3. С. 53-57.

### **Influence of Heat Treatment and the Presence of Microdefects on The Tendency of Workpieces from Steel 16GNMA to Cold Cracking**

**E.I. Kolokolov<sup>\*1</sup>, S.S. Taranov<sup>\*\*2</sup>**

*\*Volgodonsk Engineering and Technical Institute – a branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*\*\*ООО «Atomspetservice», Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*<sup>1</sup>e-mail: E.I.Kolokolov@yandex.ru*

*<sup>2</sup>e-mail: realren0@mail.ru*

**Abstract** – The paper considers the effect of heat treatment of sheet blanks for stamped heads made of 16GNMA steel on the tendency to form flokenoids – microcracks developing by the mechanism of pseudo-cleavage characteristic of hydrogen embrittlement.

**Keywords:** heat treatment, normalization, high tempering, liquation inhomogeneity, microfractographic studies, bulk microdefects of metallurgical origin, hydrogen collectors, flokenoids on microdefects in areas with a bainitic structure, pseudo-spall.