

## **Исследование прочностных характеристик сварного шва парогенератора после эксплуатационной наработки методом инструментированного индентирования**

**В. В. Харченко<sup>а</sup>, О. А. Каток<sup>а</sup>, А. В. Панасенко<sup>а</sup>, Н. П. Рудницкий<sup>а</sup>,  
А. В. Бажуков<sup>б</sup>, П. Е. Мельник<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Южно-Украинская АЭС, Южноукраинск, Украина

*Представлено распределение характеристик прочности металла сварного шва теплостойкой стали 10ГН2МФА по толщине и высоте узла соединения "горячего" коллектора с патрубком парогенератора АЭС, определенных методом инструментированного индентирования.*

**Ключевые слова:** сварной шов, прочность, инструментированное индентирование.

**Введение.** В настоящее время особое внимание уделяется безопасной эксплуатации оборудования АЭС. Контроль характеристик прочности металла оборудования проводится как на этапе производства, так и во время эксплуатации. Проведение традиционных испытаний на растяжение в большинстве случаев невозможно без нарушения целостности конструкций ввиду необходимости изготовления образцов для таких испытаний. Одно из решений данного вопроса – применение косвенных методов неразрушающего контроля характеристик прочности с использованием результатов испытаний на твердость (традиционная твердость, инструментированное индентирование [1, 2]).

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины выполнен большой цикл исследований, направленных на разработку оборудования, используемого при испытаниях материалов методом инструментированного индентирования в лабораторных и производственных условиях при разнообразных режимах статического и циклического нагружения в макродиапазоне усилий индентирования [3–7].

В настоящей работе приведены результаты исследований распределения характеристик прочности металла узла сварного соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 после эксплуатационной наработки, выполненных методом инструментированного индентирования. Полученные результаты могут быть использованы при текущем контроле работоспособности узла и прогнозировании его остаточного ресурса.

**Материал, методика испытаний.** Исследовали фрагмент металла (далее – темплет) узла сварного соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора, состоящий из отрезка кольцевого сварного шва № 111 и основного металла – корпусная сталь 10ГН2МФА. Темплет вырезали из парогенератора, снятого с эксплуатации после наработки 12 тыс. ч. Схема парогенератора и место вырезки темплета показаны на рис. 1.

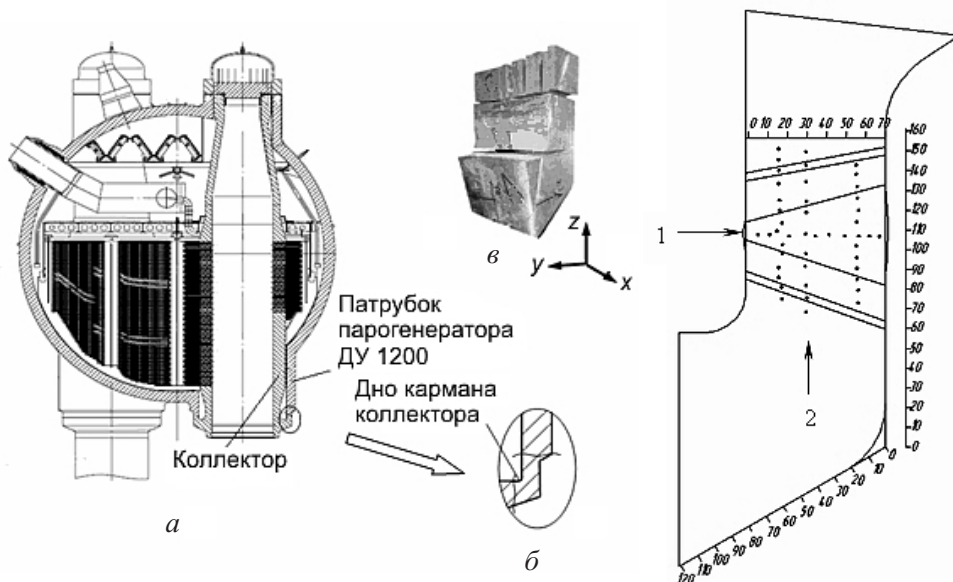


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 1. Схема парогенератора (а), место вырезки (б) и вид темплета для механических испытаний (в).

Рис. 2. Схема мест индентирования темплета по толщине (1) и высоте (2) узла сварного соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора.

Инструментированное индентирование проводили в соответствии с требованиями международного стандарта [2] в циклическом режиме нагружения шариком диаметром 2,5 мм на лабораторной установке UTM-20НТ [3]. Диаграммы индентирования записывали с постоянной скоростью перемещения индентора 0,05 мм/мин. Схема мест индентирования темплета представлена на рис. 2.

Условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  определяли по усовершенствованной методике Хаггага [8, 9]. Для стали 10ГН2МФА была получена корреляционная зависимость между оцениваемым по данным испытания образцов на растяжение [10] пределом текучести металла и параметром  $A$ , характеризующим запас пластичности материала в уравнении, которое описывает диаграмму индентирования в координатах  $F/d^2 - d/D$  [8]:

$$\sigma_{0,2} = a_{\sigma_{0,2}} A + b_{\sigma_{0,2}},$$

где  $a_{\sigma_{0,2}}$ ,  $b_{\sigma_{0,2}}$  – коэффициенты, для стали 10ГН2МФА равны 0,24 и 0 соответственно.

Предел прочности методом индентирования определяли по методике, разработанной в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины [7].

Испытания на растяжение проводили на установке Instron-8802. Скорость перемещения захвата составляла 0,01 мм/мин. Изготавливали образцы IV типа с диаметром рабочей части 5 мм из заготовок, вырезанных из зоны

термического влияния верхней части патрубка парогенератора. Деформацию регистрировали с помощью установленного на рабочую часть образца тензорезисторного преобразователя с базой  $l_0 = 12,5$  мм.

Микроструктуру характерных участков сварного шва № 111 и зоны термического влияния изучали на оптическом микроскопе модели Axiotech Vario фирмы Карл Цейсс (Германия).

**Результаты исследований и их обсуждение.** По данным испытаний методом инструментированного индентирования определяли характеристики прочности. На рис. 3 показано распределение характеристик прочности по толщине, на рис. 4 – по длине узла сварного соединения коллектора с патрубком парогенератора.

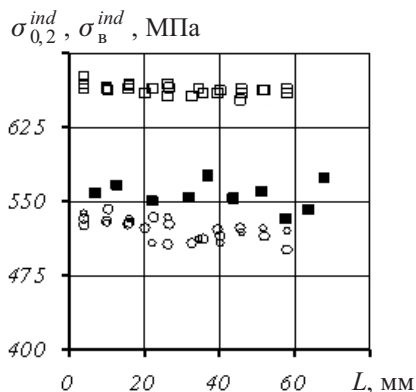


Рис. 3. Распределение предела прочности  $\sigma_B^{ind}$  (■, □) и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}^{ind}$  (○) теплостойкой стали 10ГН2МФА по толщине узла сварного соединения  $L$  горячего коллектора с патрубком парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 после эксплуатационной наработки: ■ – металл сварного шва № 111; □, ○ – металл зоны термического влияния верхней части патрубка парогенератора ДУ 1200.

Как показали исследования, предел прочности  $\sigma_B^{ind}$  и условный предел текучести  $\sigma_{0,2}^{ind}$  металла по толщине зоны термического влияния верхней части патрубка парогенератора изменяются незначительно (в пределах 1,5%) при средней величине  $\sigma_B^{ind} = 662,7$  МПа и  $\sigma_{0,2}^{ind} = 520$  МПа. Металлографические исследования зоны термического влияния верхней и нижней частей патрубка свидетельствуют о том, что вследствие стабилизирующего отжига после сварки отмечается однородная структура (рис. 5 и 6). В зоне сварного шва (по длине сварного соединения) предел прочности  $\sigma_B^{ind}$  изменяется существеннее (в пределах 7,2%) при средней величине 558 МПа.

Величины  $\sigma_B^{ind}$  по длине (поперек сварного шва) в направлении от дна кармана коллектора к патрубку парогенератора изменяются неравномерно. Видно, что на расстоянии более 80 мм от дна кармана коллектора характеристики механических свойств постоянны. Разброс значений характеристик механических свойств металла сварного шва может быть обусловлен наличием внутри последнего разных по структуре зон. На границах сварного шва нижней и верхней частей патрубка (на рис. 4 поз. 2 и б) отмечается упрочнение металла благодаря наличию участков перегрева и нормализации зоны

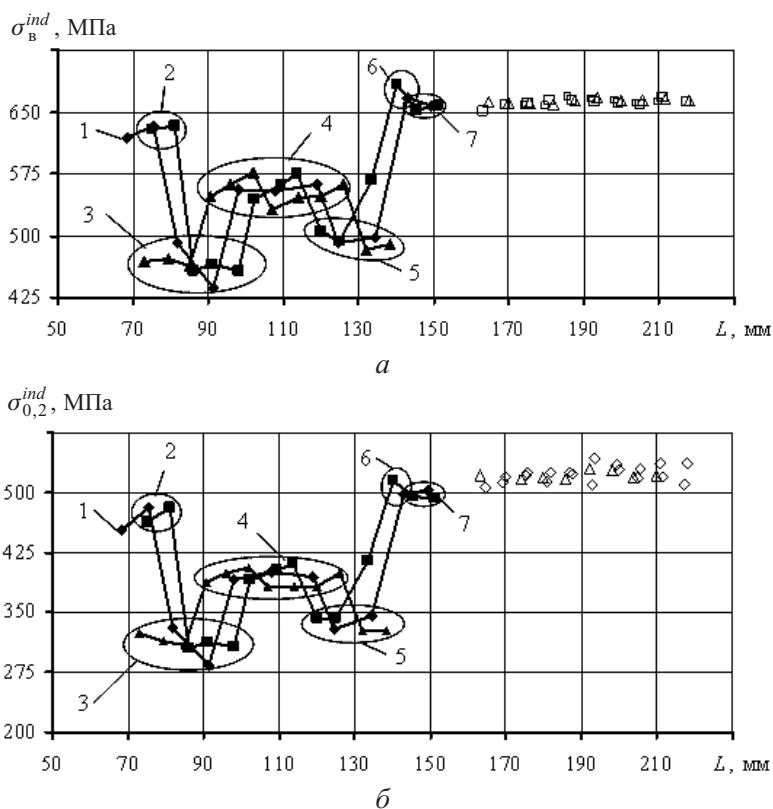


Рис. 4. Изменение предела прочности  $\sigma_B^{ind}$  (а) и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}^{ind}$  (б) теплоустойчивой стали 10ГН2МФА по длине узла сварного соединения  $L$  горячего коллектора с патрубком парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 после эксплуатационной наработки: 1, 7 – металл зоны термического влияния нижней и верхней частей патрубка соответственно, примыкающих к металлу шва; 2 – участок перегрева металла зоны термического влияния нижней части патрубка; 3, 5 – прослойки, примыкающие к зоне термического влияния (верхняя и нижняя соответственно); 4 – центральный слой металла шва; 6 – участок перегрева металла зоны термического влияния верхней части патрубка ( $\blacklozenge, \blacktriangle, \blacksquare$  – металл сварного шва № 111;  $\diamond, \triangle, \square$  – патрубок парогенератора ДУ 1200;  $\blacktriangle, \blacklozenge, \blacksquare$  – расстояние от наружной поверхности сварного соединения, составляющее 14, 40 и 50 мм соответственно).

термического влияния металла патрубка парогенератора. При переходе от зоны термического влияния основного металла к зоне сварного шва предел прочности  $\sigma_B^{ind}$  уменьшается из-за различия характеристик механических свойств основного металла патрубка и используемого присадочного металла электрода, которое носит сложный немонотонный характер, при этом изменение предела прочности металла достигает 35%.

Металлографические исследования показали, что после травления металла сварного соединения существуют три слоя: металл шва и две прослойки, примыкающие к зоне термического влияния (верхняя и нижняя) – рис. 7,а. Фазовый состав слоев, примыкающих к кромкам раздела, существенно отличается от фазового состава центрального слоя (здесь доля  $\alpha$ -фазы меньше), что, очевидно, объясняется использованием двух разных типов электродов при сварке.

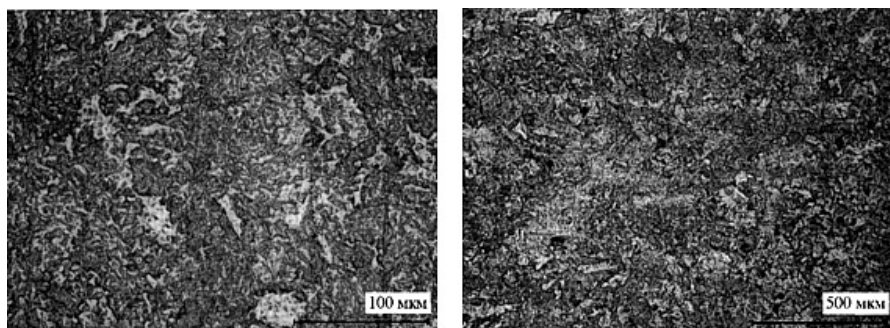


Рис. 5. Участок перегрева металла зоны термического влияния нижней части патрубков парогенератора (на рис. 4 поз. 2).

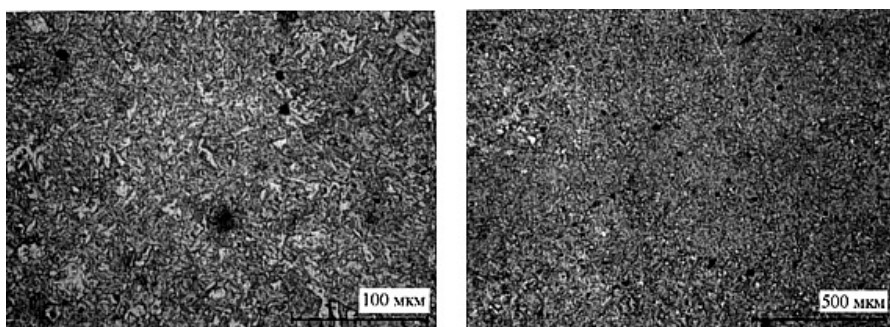


Рис. 6. Участок перегрева металла зоны термического влияния верхней части патрубков парогенератора (на рис. 4 поз. 6).

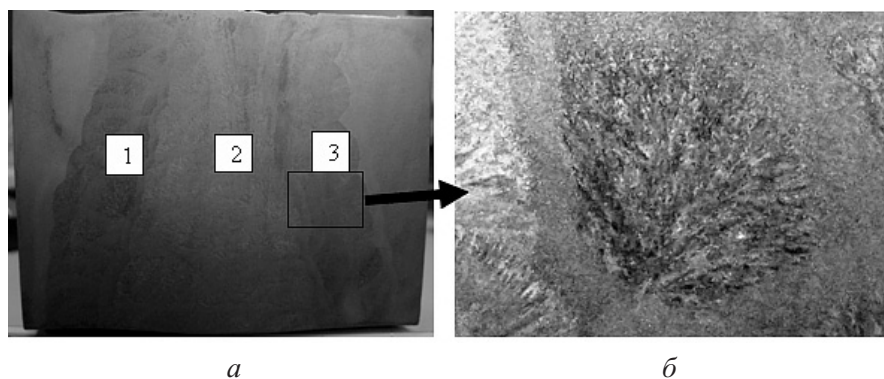


Рис. 7. Макроструктура сварного соединения: а – макрошлиф после травления (1, 3 – верхняя и нижняя прослойки, примыкающие к зоне термического влияния соответственно; 2 – металл сварного шва; б – валик нижней прослойки зоны термического влияния).

Кроме фазовой неоднородности слоев обнаружена также морфологическая неоднородность. Зерна в валиках слоев, прилегающих к кромкам раздела, имеют столбчатую (дендритную) форму, их диаметр составляет 100...500 мкм. Форма зерен в центральном слое более равноосная, их диаметр равен 15...80 мкм. Данная неоднородность обусловлена технологией многопроходной сварки, а именно: порядком заполнения слоев. Кристаллизация валиков в центральном слое проходит в более равновесных условиях по сравнению с таковой в слоях, прилегающих к кромкам раздела, где теплоотвод интенсивнее.

Каждый из выявленных при макротравлении слоев сварного соединения состоит из валиков – закристаллизовавшихся ванн жидкого металла, образованных при проходе электрода (рис. 7,б). Процесс сварки заключается в многократном проходе электрода по слоям, образованным при предыдущем проходе, что приводит к температурному воздействию на закристаллизовавшиеся ранее слои. Данная технология сварки обуславливает образование в металле сварного соединения участков структур, характерных для зоны термического влияния – рис. 8,а,б. Этим объясняется наличие разброса значений характеристик механических свойств для одного и того же слоя в зависимости от микроструктуры индентируемого участка. Например, значения предела прочности  $\sigma_B^{ind}$  в слое, прилегающем к верхней части патрубка парогенератора, изменяются в интервале 484...506 МПа, в слое, прилегающем к нижней части патрубка, – 436...491 МПа, в центральном слое – 532...661 МПа.

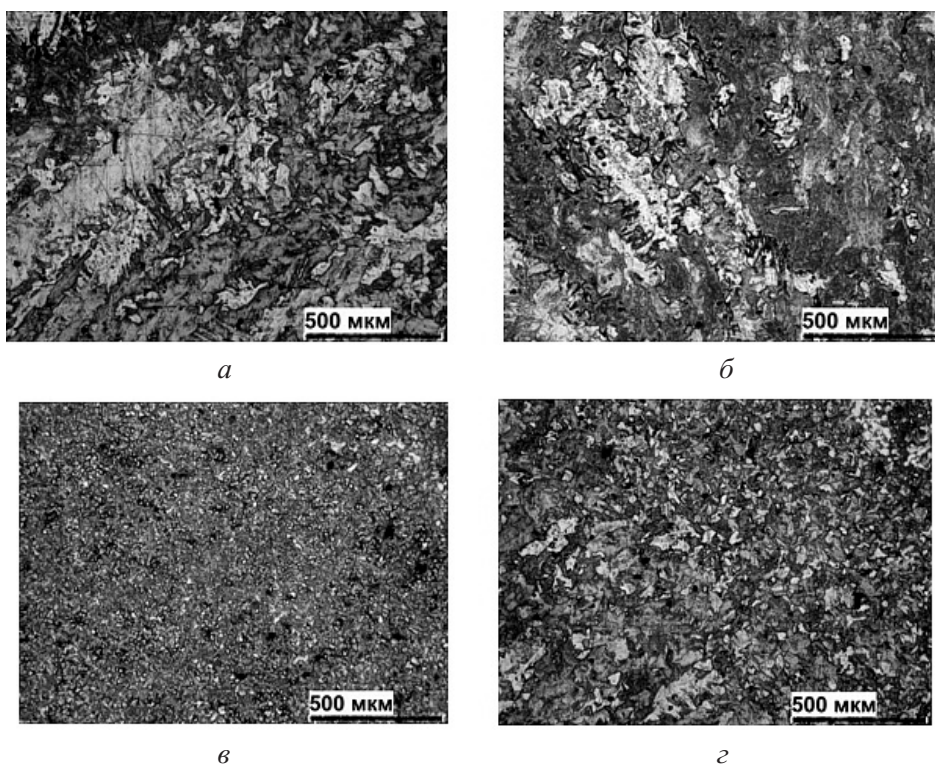


Рис. 8. Микроструктура участков сварного соединения: а, б – большие столбчатые кристаллы валика нижней и верхней прослоек, примыкающих к зоне термического влияния металла сварного соединения; в – нормализация кристаллов валика металла шва сварного соединения; г – неполная перекристаллизация валика металла шва сварного соединения.

Значения характеристик прочности зоны термического влияния верхней части патрубка парогенератора, оцененные по диаграммам индентирования с помощью усовершенствованной методики Хаггага и разработанной методики [7], приведены в таблице. Видно, что разброс значений предела текучести, оцененных по результатам испытаний на растяжение и путем индентирования, равен 1%, предела прочности – 5,4%.

**Сопоставление значений характеристик прочности стали 10ГН2МФА, полученных при одноосном растяжении и путем инструментированного индентирования**

Одноосное растяжение		Метод инструментированного индентирования			
$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}^{ind}$ , МПа	$\Delta$ , %	$\sigma_B^{ind}$ , МПа	$\Delta$ , %
528,0	627,7	522,5	1,0	662,0	5,4

**Примечание.**  $\Delta$  – относительное отклонение характеристик прочности, полученных методом инструментированного индентирования, от таковых, определенных при испытаниях на растяжение (ГОСТ 1497-84).

**Заключение.** Методом индентирования впервые определено распределение характеристик прочности теплоустойчивой стали 10ГН2МФА по геометрии узла сварного соединения горячего коллектора с патрубком парогенератора АЭС после эксплуатационной наработки. По толщине основного металла предел прочности изменяется не более чем на 1,5%, по длине изменение достигает 35%.

## Резюме

Представлено розподіл характеристик міцності металу зварного шва теплоустійкої сталі 10ГН2МФА по товщині і висоті вузла з'єднання "гарячого" колектора з патрубком парогенератора АЕС, визначених методом інструментованого індентування.

1. *ГОСТ 9012-59.* Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 01.01.60.
2. *ISO 14577-1:2002.* Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters. Test Method.
3. Харченко В. В., Рудницький Н. П., Каток О. А. и др. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 27. – С. 140 – 147.
4. Харченко В. В., Каток О. А., Дроздов О. В. та ін. Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого індентування // Там же. – 2009. – Вип. 32. – С. 162 – 168.
5. Пат. № 57446 Україна, МПК (2011.01) G 01 N3/40. Установка для реєстрації діаграми інструментованого індентування / В. В. Харченко, О. А. Каток, М. П. Рудницький та ін. – Чинний з 25.02.11. Бюл. № 4.
6. Пат. № 57444 Україна, МПК (2011.01) G 01 N3/40. Мобільна установка для визначення характеристик міцності матеріалів методом інструментованого індентування РІТ 02 / В. В. Харченко, О. А. Каток, В. В. Кутняк та ін. – Чинний з 25.02.11. Бюл. № 4.
7. Каток О. А., Харченко В. В., Дроздов А. В., Панасенко А. В. Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – Вып. 31. – С. 208 – 213.

8. Haggag F. M. Innovative SSM technology determines structural integrity of metallic structures: example applications for pressure vessels and oil and gas pipelines // *Int. J. Pure Appl. Phys.* – 2007. – **3**, No. 1. – P. 91 – 108.
9. РД ЭО 0027-2005. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – М.: Концерн Росэнергоатом, 2006. – 52 с.
10. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.

Поступила 10. 09. 2012