

## МИКРОСТРУКТУРА И КОЭРЦИТИМЕТРИЯ ШВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА С КОРПУСОМ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА ЭНЕРГОБЛОКЕ ВВЭР-1000

*Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.А. Десненко, С.В. Шрамченко,  
Е.А. Крайнюк, Н.Д. Рыбальченко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: ozhigov@kipt.kharkov.ua; тел./факс +38(057)335-15-53*

Представлены результаты исследований по выявлению корреляции между микроструктурой металла многослойного сварного шва и коэрцитивной силой. Показано, что для разных микроструктурных фаз сварного шва (мелкокристаллическая и столбчатая структуры) происходят существенные изменения измеренных магнитных параметров. Данный способ определения взаимозависимости  $H_c$  и текстуры деформации в металле можно рассматривать как перспективный для контроля структуры металла конструкций.

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитометрические методы на основе измерения коэрцитивной силы  $H_c$  рассматриваются как перспективные для неразрушающего контроля структуры металла оборудования и трубопроводов. Известны исследования по определению взаимозависимости  $H_c$  и текстуры деформации в трубопроводе из стали марки Ст20 и в металле сосудов высокого давления [1–3]. Известны также работы, в которых рассматривается применение коэрцитиметрии наряду с методом ультразвукового контроля для диагностики качества сварных соединений [4].

В тепловой и атомной энергетике значительная часть оборудования, работающего при повышенных давлениях, изготовлена с применением электросварки. При этом большое внимание уделяется контролю качества наплавленного металла, особенно в случаях многослойных швов, полученных многопроходной сваркой [5]. Анализ инцидентов с разрушением узла сварного соединения коллектора с корпусом парогенератора на энергоблоках ВВЭР-1000 (СШ №111) показывает, что разрушение становится возможным при одновременном действии эксплуатационных напряжений и остаточных технологических напряжений в сварном шве [6, 7]. Последний фактор зависит от технологии изготовления сварного шва, структуры наплавленного металла, ее однородности. При соединении толстостенных элементов конструкций многослойным сварным швом СШ №111 в наплавленном металле реализуется слоистая структура с чередующимися мелкокристаллическими и столбчатыми слоями [4]. Структурная неоднородность обуславливает напряженное состояние металла шва, которое не снимается последующим отжигом. Как известно, этот узел подвержен растрескиванию при эксплуатации [6].

В связи с тем, что напряженное состояние металла коррелирует с его магнитными свойствами, представляет интерес определение магнитных характеристик различных слоев сварного шва после его длительной эксплуатации.

В данной работе исследовались микроструктура и магнитные характеристики металла сварного шва, соединяющего корпус парогенератора с коллекто-

ром на энергоблоке ВВЭР-1000? с целью установления их взаимозависимости для применения в неразрушающем контроле магнитными методами.

### МЕТОДИКА

Объектом исследований был металл темплетов, вырезанных из сварного шва, соединяющего коллектор с корпусом парогенератора (соединение СШ №111) на энергоблоке с ВВЭР-1000 ЮУ АЭС при ремонте. Соединение СШ №111 – это крупногабаритная толстостенная трубная конструкция диаметром около 1200 мм и толщиной стенки порядка 70 мм, изготовленная из стали 10ГН2МФА. Клиновидный сварной шов через всю толщину выполнен многопроходной электросваркой. Ультразвуковой контроль, осуществляемый в рамках планово-предупредительного ремонта, показал наличие в металле сварного соединения ряда сверхнормативных несплошностей. По результатам контроля был произведен ремонт соединения с предварительной вырезкой темплетов металла сварного шва.

Образцы для исследований магнитных свойств в различных зонах сварного шва имели размеры 4,3×3,0×1,7 мм. Их изготавливали путем распиловки темплета на пластинки толщиной 1,7 мм на фрезерном станке с последующей вырезкой образцов электроэрозионным методом.

Микроструктуру металла образцов исследовали с помощью оптического микроскопа ММО-1600.

Магнитные характеристики образцов определяли известным методом с помощью магнитного гистерографа и с использованием импульсно-индукционной методики [8] в соответствии с ГОСТ 8.377-80 [9]. При этом на образцах были проведены измерения коэрцитивной силы  $H_c$  (А/м), остаточной магнитной индукции  $B_r$  (Тл) и максимальной магнитной проницаемости  $\mu$ .

Образцы с намотанными на них катушками индуктивности, содержащими по 20 витков провода ПЭЛ-0,1, размещали в разрыве магнитопровода; магнитное поле создавали намагничивающим соленоидом и контролировали датчиком Холла типа ПХЭ. При расстоянии между полюсами магнита 4,3 мм, что соответствовало длине образцов, маг-

нитное поле составляло 130 кА/м при токе 1 А. Магнитный поток, проходящий через образцы, измеряли микроверберметром Ф5050, подключенным к катушкам индуктивности. Блок-схема установки показана на рис. 1.

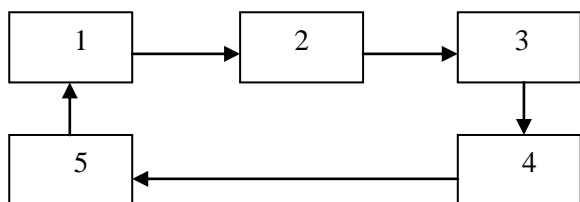


Рис. 1. Блок-схема магнитного гистерезографа:  
1 – электромагнит с образцом в разрыве магнитопровода; 2 – микроверберметр Ф5050; 3 – компьютер; 4 – программируемый источник тока; 5 – вольтметр В7-40/4

Процесс измерений осуществлялся следующим образом. В намагничивающую обмотку от регулируемого компьютером источника постоянного тока подаются импульсы тока по заданной программе, а соответствующие приращения напряжения в индукционной катушке фиксируются микроверберметром и поступают для обработки в компьютер. В итоге получаем зависимость магнитного потока  $\Phi$  в образце от напряженности магнитного поля  $H$ , которая пропорциональна току в намагничивающей обмотке. Вольтметр В7-40/4 служит для контроля напряжения на обмотке.

Расчеты проводили по известным формулам для магнитной индукции  $B$  и относительной магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$B = \Phi_{cp} / (S \cdot N); \quad \mu = B / (\mu_0 \cdot H), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, в которые подставляли экспериментально полученные значения:  $\Phi_{cp}$  – усредненный по пяти измерениям магнитный поток в образце, Вб;  $S$  – площадь сечения образца, мм<sup>2</sup>;  $N$  – число витков измерительной катушки непосредственно на образце.

Поскольку в нашем случае площади поперечного сечения образца  $S$  и измерительной катушки  $S_k$  отличались, магнитная индукция в образце определялась по соотношению (2):

$$B = \Phi_{cp} / (S \cdot N) - \mu_0 \cdot H \cdot (S_k / S - 1). \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структура наплавленного металла в сварном шве СШ №111 вследствие многопроходной сварки состоит из чередующихся слоев с мелкокристаллической и столбчатой микроструктурами. Структура исследовалась нами в [10] и показана на рис. 2.

В мелкокристаллических слоях преобладает однородная ферритоперлитная структура с величиной зерен по ферриту 7...10 мкм и по перлиту 13...15 мкм. Содержание перлита составляет около 60%. В слоях со столбчатой микроструктурой, как показали результаты исследований [10], столбцы состоят из продуктов распада аустенита с окантовкой из остаточного аустенита.

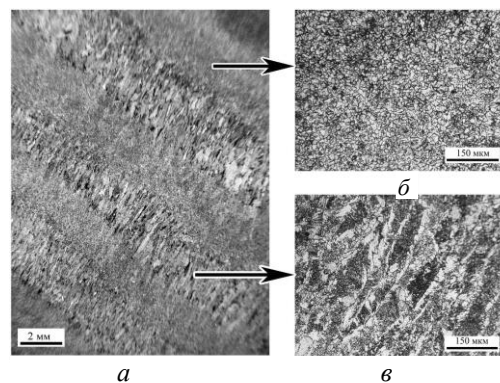


Рис. 2. Структура наплавленного металла (а) СШ №111; б – микроструктуры в мелкокристаллических зонах и в – со столбчатыми зёрнами

Материал образцов, в которых определялись магнитные свойства, содержал мелкокристаллическую и столбчатую микроструктуры в различных соотношениях. Для определения микроструктуры поверхности образцов шлифовали и протравливали на зерно в 3%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Однородность микроструктуры по толщине образцов проверяли путем их послойного шлифования на толщину 0,1; 0,5 и 1,0 мм. Всего было исследовано 12 образцов. На рис. 3 показаны примеры образцов с различной микроструктурой, выявленной после сошлифовки слоя 0,5 мм.

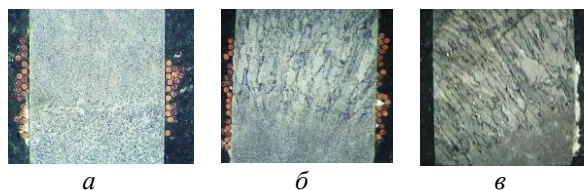


Рис. 3. Микроструктуры в исследованных образцах:  
а – №1 – мелкокристаллическая,  $H_c = 430$  А/м;  
б – №2 – столбчатая 68%,  $H_c = 524$  А/м;  
в – №3 – столбчатая 92%,  $H_c = 831$  А/м

Видно различное сочетание столбчатой и мелкозернистой структур в образцах, а также видны сечения витков индукционных катушек, что показывает направление магнитного потока. Аналогичные микроструктуры были получены после послойного шлифования на другие толщины. На рис. 4 показана часть трещины, которая прошла через слой со столбчатой структурой и остановилась в мелкокристаллической структуре.



Рис. 4. Трещина в микроструктуре образца №4,  $H_c = 605$  А/м

Общая длина трещины составляет около 3 мм; наличие таких трещин в сварном шве ультразвуковой контроль показывает как сверхнормативные несплошности.

На образцах с различным соотношением микроструктур были получены зависимости магнитного потока  $\Phi$  от напряженности магнитного поля  $H$ . Процесс перемагничивания образцов был представлен в виде петель гистерезиса, по которым были определены наиболее значимые параметры, описывающие магнитные свойства структурных составляющих.

Петли гистерезиса для образцов №1 и 3 с наибольшей разностью значений коэрцитивной силы показаны на рис. 5.

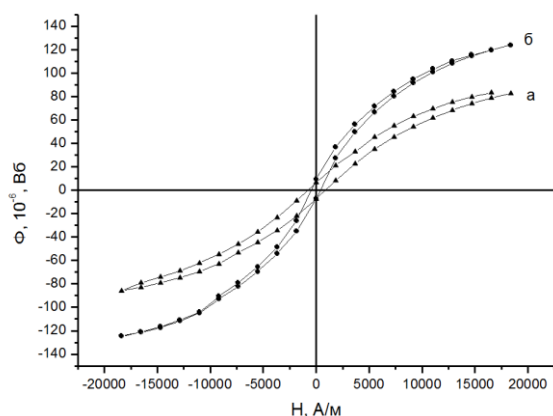


Рис. 5. Петли гистерезиса образцов: а – №3 и б – №1

Результаты проведенных расчетов по петлям гистерезиса образцов (см. рис. 3 и 4) приведены в таблице. Там же представлены данные процентного содержания  $A_{cp}$  столбчатой микроструктуры в образцах, усредненные по трем толщинам. Для наглядности значения коэрцитивной силы  $H_c$  (А/м) образцов наплавленного металла в различном структурном состоянии показаны под рисунками.

Процентное содержание столбчатой микроструктуры и магнитные параметры образцов

Номер образца	$A_{cp}$ , %	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$\mu$
1	0	430	0,103	150
2	68	524	0,074	89
3	92	831	0,096	106
4	80	605	0,12	–

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам исследований можно констатировать, что в металле сварного шва №111 после его длительной эксплуатации имеются области, в которых магнитные параметры изменяются в зависимости от особенностей микроструктуры. Наиболее определенно это наблюдается для коэрцитивной силы  $H_c$ , причем проявляется тенденция к увеличению  $H_c$  с увеличением содержания столбчатой микроструктуры в образцах. Так, в наплавленном металле с наибольшим содержанием мелкокристаллической структуры (образец №1) наблюдаются наименьшие значения  $H_c$ , тогда как в образцах с преимущественно столбчатой структурой (напри-

мер, образец №3) наблюдали в 1,5–2,0 раза более высокие значения  $H_c$ .

Повышенное значение коэрцитивной силы в столбчатой структуре, по сравнению с мелкокристаллической, можно объяснить неоднородностью структуры с продуктами распада аустенита, что приводит к напряженному состоянию столбчатых слоев. Подтверждением этого являются результаты ранее проведенных исследований микроструктуры и микротвердости многослойного сварного шва №111 [10], где было замечено, что в слоях с мелкокристаллической структурой трещины развиваются вязко, а в столбчатой структуре – хрупко, что является признаком напряженного состояния металла в столбчатых слоях. Было также замечено, что трещины пересекают всю толщину столбчатых слоев и образуются в них значительно чаще, чем в мелкокристаллических. Интересно то, что напряженное состояние столбчатой структуры не снимается полностью с образованием в ней одиночных трещин (см. рис. 4). По-видимому, релаксация напряжений при образовании трещины распространяется лишь на локальные области вокруг нее.

Однородность микроструктуры, так же как и однородности механических свойств и химического состава, является залогом надежности и долговечности сварного соединения. Чередование мелкокристаллической и столбчатой микроструктур в наплавленном металле сварных швов, по нашему мнению, не является оптимальным вариантом с точки зрения ресурса. В рассмотренном примере после длительной эксплуатации сварного соединения СШ №111 в слоях со столбчатой структурой развились трещины длиной около 3 мм (через толщину слоев), которые привели к необходимости ремонта соединения. Практика эксплуатации, а также результаты исследований показывают, что для долговечности сварных соединений важными являются не только соблюдение технологии сварки, но и контроль однородности структуры наплавленного металла.

Выявленная в настоящей работе корреляция коэрцитивной силы с микроструктурой может быть использована для разработки методик контроля напряженного состояния и соответственно однородности структуры многопроходных сварных швов типа СШ №111. При этом очевидно, что методики на основе гистереографа, применяемые в лабораторных исследованиях образцов, не приемлемы для неразрушающего контроля крупногабаритных конструкций. Однако коэрцитивная сила как структурно-чувствительная характеристика часто используется для диагностики напряженного состояния и соответственно структурных и фазовых превращений в магнитных материалах. Для неразрушающего контроля сварных соединений требуется специальное аппаратное обеспечение, позволяющее производить измерения  $H_c$  с помощью выносных приставных датчиков.

Что же касается остаточной магнитной индукции  $B_r$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu$ , то в данных исследованиях устойчивой корреляции между этими свойствами и микроструктурой не было установлено.

## ВЫВОДЫ

В сварном соединении коллектора с корпусом парогенератора на энергоблоке ВВЭР-1000 (соединение СШ №111) выявлена корреляция коэрцитивной силы с характером микроструктуры наплавленного металла сварного шва.

Исследования показали, что метод коэрцитиметрии может найти применение при контроле металла эксплуатируемых многопроходных сварных швов, а также при их изготовлении и ремонте.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, Е.Н. Ткачук. Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали // *Деформация и разрушение материалов*. 2010, №10, с.19-24.

2. Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.А. Костин, В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2011, №4, с.14-24.

3. Б.Е. Попов, Е.А. Левин, В.С. Котельников, Г.Я. Безлюдько, В.М. Долинский, А.В. Зарудный. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением // *Безопасность труда в промышленности*. 2001, №3, с. 25-30.

4. В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, С.В. Шрамченко, Е.А. Крайнюк. Идентификация несплошностей в металле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором на энер-

гоблоках ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «ФРП и РМ»*. 2014, №4(92), с. 82-87.

5. А.В. Дуб, В.А. Дурынин, А.Н. Разыграев, Н.П. Разыграев, И.Л. Харина, Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, О.В. Махненко, Г.Ю. Сапрыкина. Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014, №4, с. 36-51.

6. Г.В. Степанов, В.В. Харченко, А.И. Бабуцкий и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // *Проблемы прочности*. 2003, № 5, с. 142-153.

7. А.Ю. Чирков, В.В. Харченко, С.В. Кобедьский, В.И. Кравченко, В.А. Пиминов, М.Е. Курдин. Напряженное состояние узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при воздействии эксплуатационных нагрузок с учетом остаточных технологических напряжений // *Проблемы прочности*. 2013, №4 (424), с. 98-106.

8. В.И. Чечерников. *Магнитные измерения*. М.: МГУ, 1969, 387 с.

9. ГОСТ 8.377-80. *Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик*. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986, 21 с.

10. И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.Н. Воеводин, Г.Д. Толстоуцкая, Н.С. Зарицкий, В.В. Брык, Е.А. Крайнюк, А.Г. Руденко. Особенности повреждений сварных соединений №111 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 // *Физика и химия обработки материалов*. 2013, №2, с.18-25.

*Статья поступила в редакцию 08.12.2015 г.*

## МИКРОСТРУКТУРА ТА КОЕРЦИТИМЕТРІЯ ШВА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ КОЛЕКТОРА З КОРПУСОМ ПАРОГЕНЕРАТОРА НА ЕНЕРГОБЛОЦІ ВВЕР-1000

*Л.С. Ожигов, А.С. Митрофанов, В.О. Десненко, С.В. Шрамченко, Є.О. Крайнюк, Н.Д. Рибальченко*

Представлено результати досліджень з виявлення кореляції між микроструктурою металу багат шарового зварного з'єднання та коерцитивною силою. Показано, що для різних микроструктурних фаз зварного з'єднання (дрібнокристалічна та стовпчаста структури) мають місце значні зміни вимірних магнітних параметрів. Даний спосіб визначення взаємозалежності  $H_c$  та текстури деформації в металі можна розглядати як перспективний для контролю структури металу конструкцій.

## MICROSTRUCTURE AND COERCIMETRY OF SEAM WELDED JOINT OF COLLECTOR WITH THE BODY STEAM GENERATOR AT NUCLEAR UNIT VVER-1000

*L.S. Ozhigov, A.S. Mitrofanov, V.A. Desnenko, S.V. Shramchenko, Ye.A. Krainyuk, N.D. Rybalchenko*

The results of research to identify the correlation between the microstructure of the weld metal laminated and coercive force are presented. It is shown that for different phases of the weld microstructure (fine-grained and columnar structure) there are significant changes in the measured magnetic parameters. This method for determining the interdependencies  $H_c$  and deformation texture in a metal can be regarded as promising for the control structure of the metal structures.