

**Б.В. Борц, В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов, И.М. Короткова, А.А. Лопата,  
А.Т. Лопата, Н.Д. Рыбальченко, В.И. Сытин, В.А. Александров**

ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОФАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРОВ 2-го И 3-го ПОКОЛЕНИЙ**



Методом горячей вакуумной прокатки получено твердофазное соединение углеродистой и нержавеющей сталей. Проведено исследование границы твердофазного соединения методами металлографии и электронной микроскопии. Исследованы нано- и микротвердость, коррозионная стойкость и циклическая прочность композита сталь 20 – сталь 08X18H10T.

*Ключевые слова:* вакуумная прокатка, твердофазное соединение, структура, нано- и микротвердость, коррозионная стойкость, циклическая прочность.

Действующие атомные энергетические установки 2-го и 3-го поколений нуждаются в повышении надежности и продлении ресурса в отношении обеспечения соединений разнородных материалов, например аустенитных сталей, с углеродистыми и другими материалами. Одним из перспективных методов получения качественных соединений разнородных материалов является метод высокотемпературной вакуумной прокатки в твердой фазе [1–3]. Для развития твердофазного соединения разнородных материалов актуальным является получение знаний, основанных на экспериментальных исследованиях физической природы явлений, происходящих при твердофазном соединении. Не менее актуальной задачей является исследование влияния условий эксплуатации на действующей АЭС на состояние границы твердофазного соединения.

В рамках выполнения инновационных проектов в ННЦ «Харьковский физико-технический институт» проведены исследования возможности применения твердофазного соединения нержавеющей и углеродистой сталей в элементах трубопроводов АЭС. В работе [4] представлены результаты исследований технологии изготовления композиционного материала *сталь 20 – сталь 12X18H10T*, а также результаты металлографических исследований и механических испытаний.

Целью данной работы является комплексное исследование границы твердофазного соединения методами металлографии и электронной микроскопии высокого разрешения, исследование нано- и микротвердости зоны твердофазного соединения, коррозионной стойкости и циклической прочности композита *сталь 20 – сталь 08X18H10T*.

### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Композит *сталь 20 – сталь 08X18H10T* и модельное твердофазное соединение Cu–Nb

получали методом горячей прокатки на вакуумном прокатном стане ДУО-170. Из полученных композитов изготавливались образцы для лабораторных исследований. Для натуральных испытаний на трубопроводах АЭС из композита *сталь 20 — сталь 08X18H10T* изготавливались композитные вставки.

Для исследования процессов, происходящих на границе раздела модельного твердофазного соединения Cu–Nb применялась электронная микроскопия высокого разрешения НРЕМ (микроскоп JEM 2100F). Микроэлементный анализ производился с помощью приставки к микроскопу рентгеновского микроанализатора INCA (Oxford Instruments).

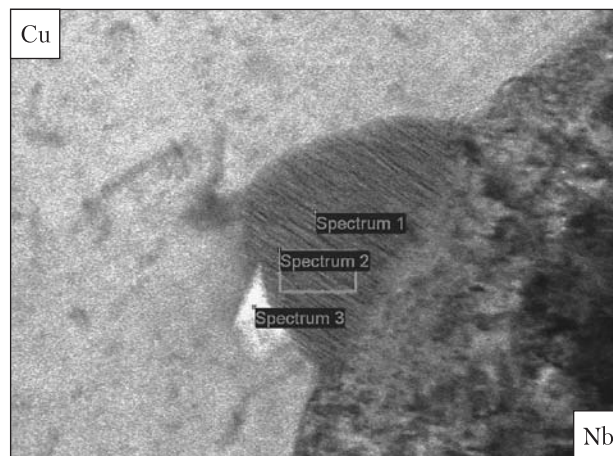
Металлографические исследования проводили с помощью металлографического комплекса LECO (микроскоп «Olympus» GX-51 с анализатором изображения IA–32). Микрошлифы вырезались по толщине композита перпендикулярно границе соединения составляющих. Исследования изменения нано- и микротвердости проводили по поверхности относительно границы соединения сталей с помощью микротвердомера LECO LM-700 и нанотвердомера Nano Indenter G200 MTS Systems.

Коррозионные испытания проводили в лабораторных условиях и в трубопроводах турбинного отделения Запорожской АЭС, отнесённых к 4-му классу безопасности. Для лабораторных испытаний использовался автоклав вместимостью 2,5 л, в котором поддерживались температура 350 °С и давление 16,5 МПа. За базу испытаний было выбрано 6500 ч процесса коррозии с отбором образцов через 50; 100; 500; 1000; 3000; 5000 и 6500 ч. Во время испытаний применялась очищенная путем двукратной дистилляции вода из  $pH = 6,0–6,5$  и удельным сопротивлением  $1–2 \cdot 10^6$  Ом·см с добавками веществ, которые используются в теплоносителе реактора ВВЕР-1000.

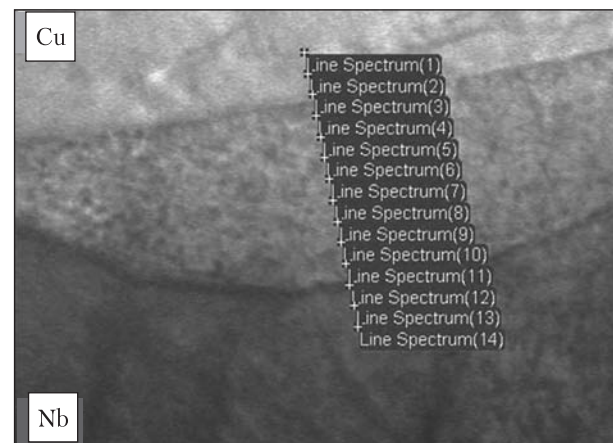
При проведении испытаний на блоке № 6 Запорожской АЭС в турбинном отделении устанавливались опытные композитные вставки Ду-20 и Ду-50. После эксплуатации на Запо-

рожской АЭС ( $T = 230$  °С,  $P = 1,23$  МПа) в течение 4500 ч композитная вставка Ду-20 вырезалась для проведения лабораторных исследований.

Исследование многоциклового усталости проводили в соответствии с ГОСТ 25.502-79 на

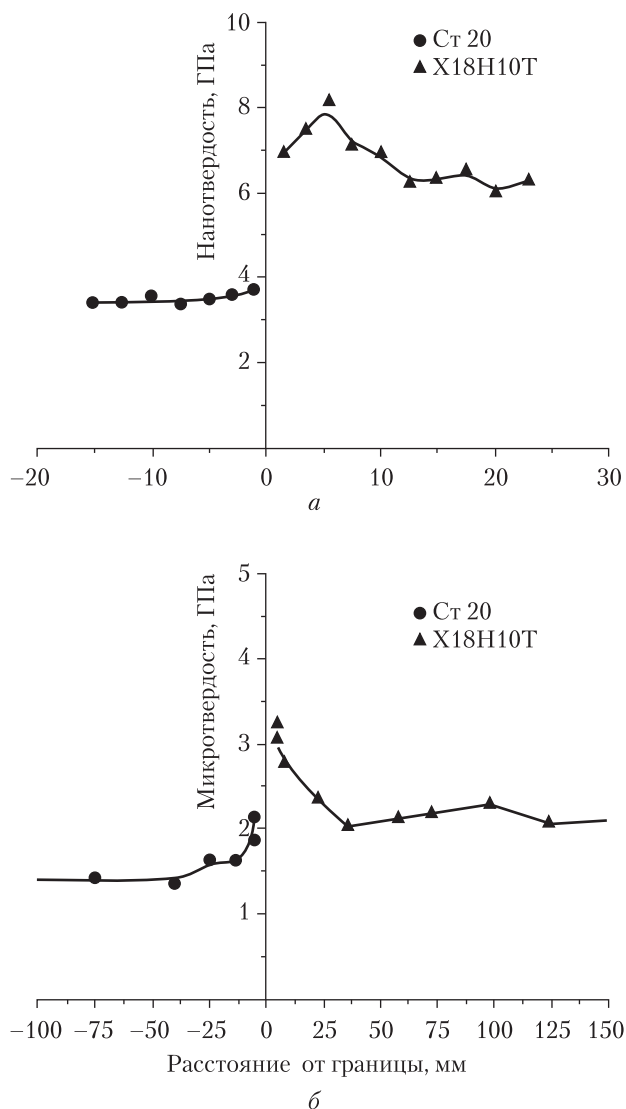


Spectrum	1	2	3
Cu, atomic %	8.67	11.32	86.83
Nb, atomic %	91.33	88.68	13.17



Spectrum	1	2	3	4	5	6	7
Cu, atomic %	98.06	97.55	27.03	8.22	7.88	7.44	7.26
Nb, atomic %	1.94	2.45	72.97	91.78	92.12	92.56	92.74
Spectrum	8	9	10	11	12	13	14
Cu, atomic %	7.24	7.20	6.92	7.34	6.69	7.06	6.95
Nb, atomic %	92.76	92.80	93.08	92.66	93.31	92.94	93.05

Рис. 1. Электронная микроскопия зоны твердофазного соединения Cu–Nb: а — перемещение Nb в Cu; б — перемещение Cu в Nb



**Рис. 2.** Нанотвердость (а) и микротвердость (б) композита сталь 20 – сталь 08X18H10T вблизи границы соединения

цилиндрических образцах при постоянной максимальной нагрузке. Испытания проводились при температуре 20 °С на установке Vi-00-201 NANO с частотой 20 Гц и коэффициентом асимметрии цикла 0,1.

Испытания на растяжение проводили на цилиндрических образцах при температуре 20 °С в соответствии с ГОСТ 1497-84 на разрывных машинах Instron 5581 и УМ-5. Испыта-

ния на статический изгиб проводили на плоских образцах со стыковым соединением разнородных сталей, используя гидравлический пресс с максимальным усилием 50 т.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ Электронно-микроскопические исследования границы твердофазного соединения разнородных металлов

Для анализа процессов, происходящих на границе раздела металлов, соединенных в твердой фазе с помощью метода горячей вакуумной прокатки, использовалась электронная микроскопия высокого разрешения. Исследования наноструктурного состояния границы соединения проводились на модельном материале Cu–Nb, компоненты которого практически не растворимы между собой согласно диаграмме состояния.

С помощью электронной микроскопии высокого разрешения (рис. 1) установлен факт переноса атомов соединяемых металлов навстречу друг другу. На приведенных электронно-микроскопических снимках границы твердофазного соединения хорошо просматривается перемещение Nb в Cu (рис. 1, а) и Cu в Nb (рис. 1, б), исследования были проведены на одном образце. Массоперенос атомов одного металла в другой осуществляется отдельными порциями, движущимися в виде волнового фронта навстречу друг другу. Согласно данным спектрального анализа граница раздела состоит из приповерхностного перемешанного слоя двух соединяемых металлов.

В процессе пластической деформации контактных поверхностей происходит перемещение поверхностных масс в зоне контакта, что вызывает перемещение не только точечных дефектов (вакансий и дислоцированных атомов), но и взаимный массоперенос атомов через границу соединения разнородных металлов в виде волнового фронта (см. рис. 1). Таким образом, массоперенос осуществляется не только по дислокационным каналам, но и за счет механического внедрения атомов од-

ного металла в кристаллическую решетку другого на границе соединения под действием давления и напряжений, возникающих в биметалле в процессе горячей прокатки. Перемещение осуществляется волновым фронтом, который обусловлен сдвигом отдельных плоскостей металла и дальнейшим перемещением атомов металла через границу твердофазного соединения.

Физической основой твердофазного соединения разнородных металлов при прокатке может являться возникновение металлической связи. Механическое давление вызывает направленную деформацию, с помощью которой осуществляются очистка поверхностей и направленность связей. Сближение атомов разнородных металлов на расстояние действия сил межатомного взаимодействия приводит к освобождению энергии в виде коллективных процессов электронного взаимодействия. Эти явления сводятся к коллективизации валентных электронов положительными ионами, благодаря чему между системой атомов, образующих кристаллическую решетку, возникает прочная металлическая связь, объединенная электронами и ионами двух материалов.

#### Исследования нано- и микротвердости границы твердофазного соединения

Исследования нано- и микротвердости вблизи границы твердофазного соединения композита *сталь 20 — сталь 08X18H10T* (рис. 2) показали увеличение твердости стали 08X18H10T на расстоянии ~35 мкм от границы по данным  $H_v^{10}$  и ~13–15 мкм по данным нанотвердости. Такое повышение твердости вблизи границы соединения объясняется, по-видимому, массопереносом углерода (в составе перлита) из стали 20 в нержавеющую сталь за счет наличия градиента по содержанию его в этих составляющих.

Что касается твердости стали 20, то повышение её микротвердости наблюдалось в пределах до 10–12 мкм, что также связано, по-видимому,

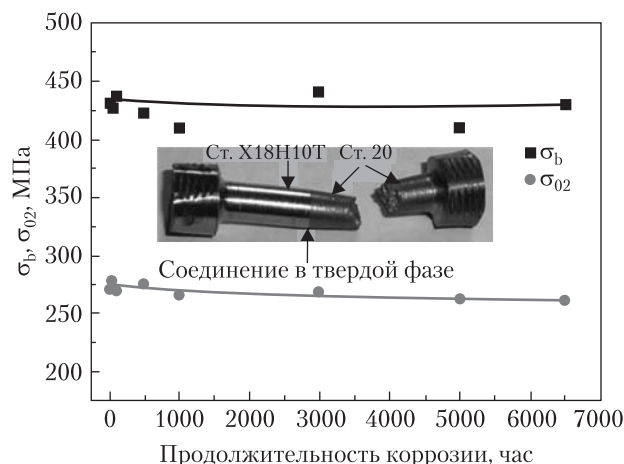


Рис. 3. Механические свойства композита *сталь 20 — сталь 08X18H10T* после коррозионных испытаний

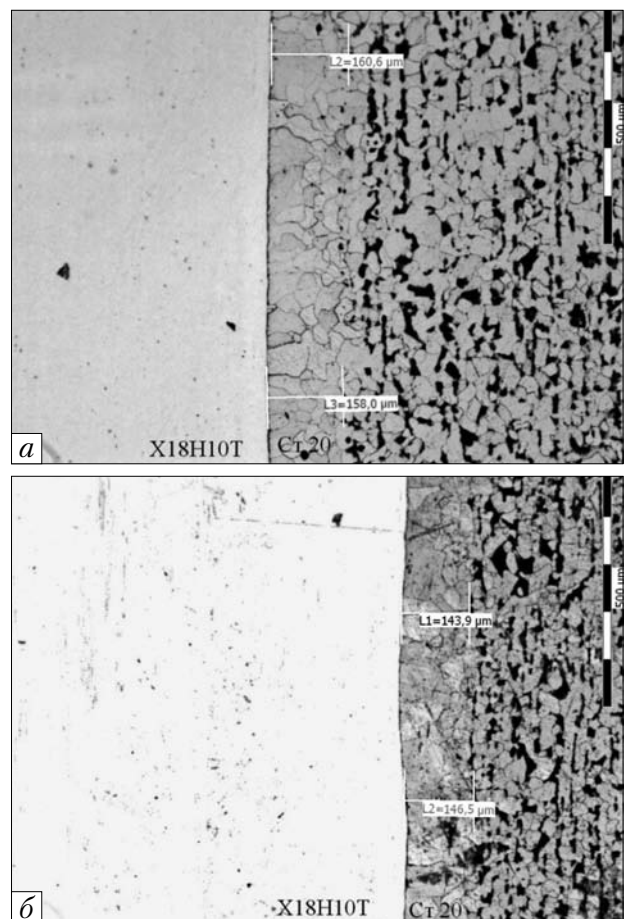


Рис. 4. Граница твердофазного соединения стали 20 и стали 08X18H10T после прокатки (а) и после лабораторных коррозионных испытаний в течение 6500 ч (б)

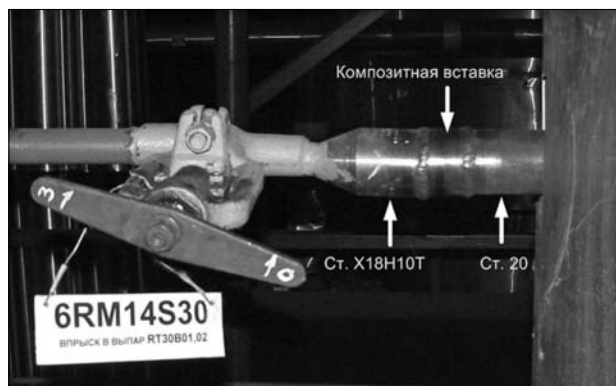


Рис. 5. Опытная композитная вставка Ду-50 на блоке № 6 Запорожской АЭС (турбинное отделение)

с направлением движения углерода в сторону границы и встречного движения возможно хрома из стали 08X18H10T. Различия в значениях нано- и микротвердости по составляющим объясняются глубиной поверхностного внедрения индентора. В случае нанотвердости глубина отпечатка достигает 200 нм, а при измерении микротвердости — до нескольких микрон.

Таким образом, прочность границы твердофазного соединения может быть выше, чем прочность составляющих и будет зависеть от взаимного массопереноса атомов одного металла в другой. Причём существенным образом это определяется механическим давлением и напряжениями, возникающими в материале в процессе горячей прокатки.

#### Прочность границы твёрдофазного соединения после коррозионных испытаний, испытаний на многоцикловую усталость и на статический изгиб

Для расширения области опытно-промышленных испытаний композитных вставок, полученных соединением в твёрдой фазе, и возможности их использования на зарегистрированных трубопроводах необходимо провести аттестацию технологии и исследовать свойства композиционного материала *сталь 20 — сталь 08X18H10T*. В перечень необходимых при аттестации композита характеристик вхо-

дят характеристики коррозионной стойкости, циклической прочности, механические свойства [5].

При взаимодействии металлов с водой, водными растворами солей, кислот, лугов и т.д. происходит электрохимическая коррозия, которая развивается в результате возникновения электрического тока между отдельными структурными составляющими сплава или металлами, которые находятся в контакте и имеют разные электрохимические потенциалы. Обычно скорость коррозии металла определяется по приростам массы образцов на единицу площади за определенное время испытаний. Использование такого метода при исследовании коррозионной стойкости композита из низкоуглеродистой и нержавеющей стали проблематично, поскольку разнородные стали имеют разную стойкость к окислению в коррозионных средах. Кроме того, возникает опасность электрохимической коррозии на границе соединения, что может привести к частичному растворению составляющих композит сталей и появлению дефектов. Поэтому критериями оценки коррозионной стойкости композита *сталь 20 — сталь 08X18H10T* были характеристика внешнего вида поверхности (цельность, однородность); механические характеристики (предел прочности); наличие или отсутствие на границе твердофазного соединения дефектов в виде пор, трещин, расслоений, скопления продуктов коррозии. Результаты механических испытаний композиционного материала *сталь 20 — сталь 08X18H10T* при 20 °С после лабораторных коррозионных испытаний приведены на рис. 3.

Все образцы композита *сталь 20 — сталь 08X18H10T* разрушались по стали 20. Как видно из приведенного рисунка, значения предела прочности и предела текучести композита после прокатки и после коррозионных испытаний в автоклаве в течение 6500 ч существенно не изменялись.

Для детального исследования влияния коррозионной среды, имитирующей условия работы материалов в трубопроводах энергоблоков,

были проведены металлографические исследования. Изучение состояния и структуры границы соединения разнородных сталей непосредственно после горячей прокатки (рис. 4, а) показало наличие на границе твердофазного соединения обезуглероженной зоны чистого феррита в стали 20. Размеры этой зоны зависят от температурных параметров процесса прокатки. При изменении температуры прокатки от 950 °С до 1160 °С размер этой зоны может изменяться от 40 мкм до 130–180 мкм. После горячей прокатки на границе твердофазного соединения разнородных сталей дефектов в виде пор, расслоений и трещин не обнаружено.

После коррозионных испытаний при 350 °С и давлении 16,5 МПа в течение 1000; 3000; 5000 и 6500 ч (рис. 4, б) размер зоны феррита практически не изменяется. После 3000 ч зона составляет 150–160 мкм, после 5000 ч – 155–160 мкм, а после 6500 ч – до ~150 мкм. Дефекты в виде трещин, расслоений, скопления продуктов коррозии на границе твердофазного соединения отсутствуют. Испытания на Запорожской АЭС композита *сталь 20 – сталь 08X18H10T* проводились совместно с представителями ННЦ ХФТИ и НАЭК «Энергоатом». Установленная на блоке № 6 Запорожской АЭС опытная композитная вставка Ду-50 приведена на рис. 5. Композитная вставка Ду-20 (см. рис. 6, а) вырезалась после эксплуатации в натуральных условиях в течение 4500 ч для металлографических исследований. Анализ темплета, полученного из композитной вставки, показал, что размер обезуглероженной зоны со стороны стали 20 по сравнению с исходным состоянием (после прокатки) не изменился (рис. 6, б). Граница соединения композита тонкая, чистая, дефектов в виде пор, трещин, расслоений, скопления продуктов коррозии не обнаружено. Отсутствуют видимые структурные изменения, которые могли бы привести к механической неоднородности композита. Для наработки необходимой часовой базы на энергоблоке №2 турбинного отдела-

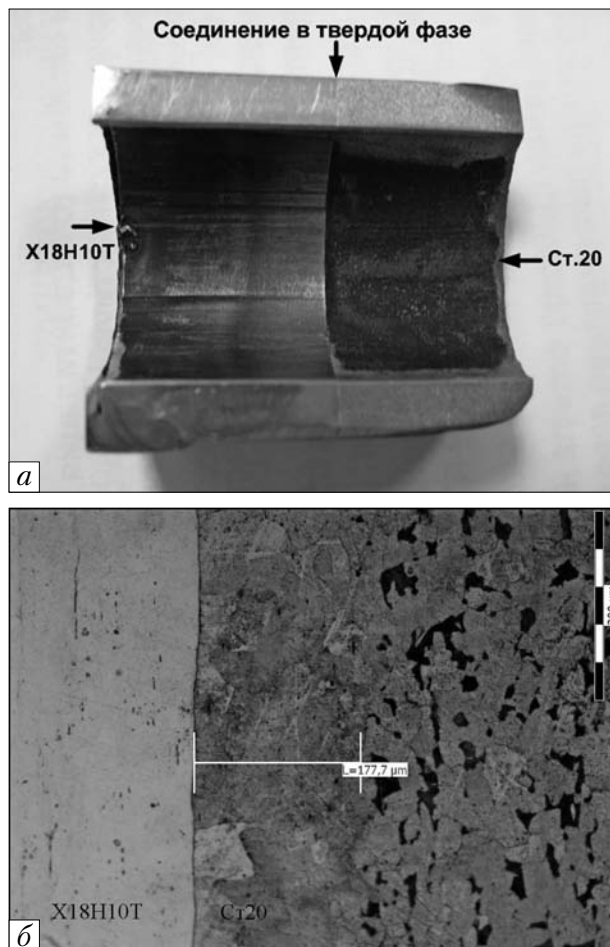


Рис. 6. Разрезанная композитная вставка Ду-20 после опытной эксплуатации на ЗАЭС (а), граница твердофазного соединения (б)

ния Запорожской АЭС установлены дополнительные опытные композитные вставки *сталь 20 – сталь 08X18H10T*.

Испытания на многоцикловую усталость проводили на базе  $10^7$  циклов. Основными критериями разрушения при определении предела выносливости и построении кривой усталости являлись полное разрушение или появление макротрещины заданного размера. Для анализа результатов использовались данные работы [6], в которой приводятся кривые усталости стали 20 и композита *сталь 20 – сталь 12X18H10T*, полученного сваркой плавлением. Результаты проведенных ис-

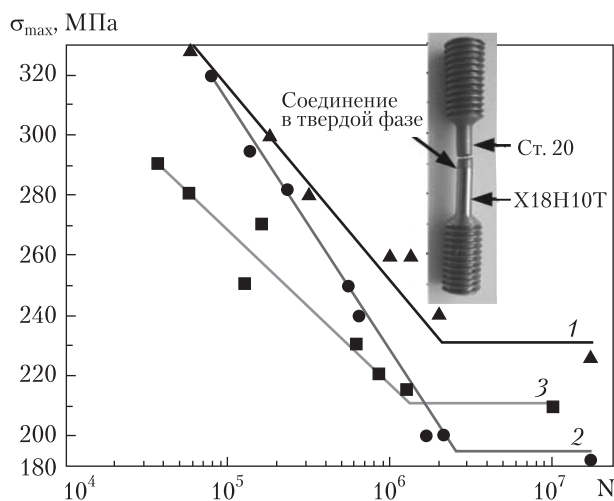


Рис. 7. Кривые усталости: стали 20 (1), композита *сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т* (2, сварка плавлением) за данными [6] и композита *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т* (3, твердофазное соединение)

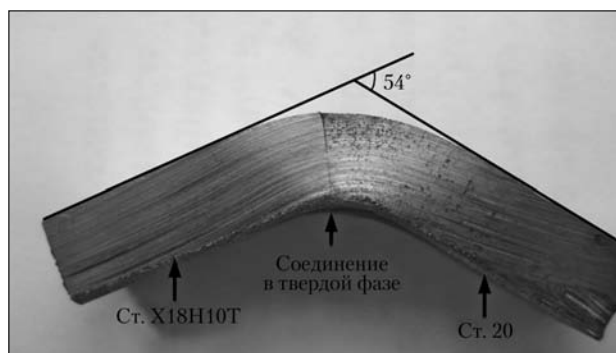


Рис. 8. Испытание на статический изгиб композита *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т*

следований приведены на рис. 7. При испытаниях на многоцикловую усталость композита *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т*, полученного соединением в твердой фазе, разрушение образцов до достижения предела выносливости происходило по стали 20. Предел выносливости композита *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т* составляет 210 МПа. Исходя из данных рис. 7, предел выносливости композита *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т*, полученного соединением в твердой фазе, выше предела выносливости композита, полученного сваркой плавлением.

Способность композиционного материала *сталь 20 – сталь 08Х18Н10Т* принимать заданный по размеру и форме изгиб проиллюстрирована на рис. 8. Образец, подвергнутый испытанию на изгиб, достиг угла изгиба  $54^\circ$  без разрушения по границе твердофазного соединения разнородных сталей.

Результаты проведенного комплексного исследования позволяют сделать вывод о высоком качестве твердофазного соединения стали 20 и стали 08Х18Н10Т, полученного методом горячей вакуумной прокатки.

## ВЫВОДЫ

1. На основании результатов электронной микроскопии высокого разрешения установлен факт массопереноса атомов соединяемых в твердой фазе металлов навстречу друг другу. Массоперенос осуществляется не только по дислокационным каналам, но и за счет механического внедрения атомов одного металла в кристаллическую решетку другого металла на границе твердофазного соединения.

2. Исследования нано- и микротвердости вблизи границы твердофазного соединения стали 20 и стали 08Х18Н10Т показали, что прочность границы соединения может быть выше прочности составляющих композит сталей. В процессе испытаний композита на растяжение и многоцикловую усталость установлено, что разрушение материала происходит не по границе твердофазного соединения, а по менее прочной составляющей, в данном случае по стали 20. Значения предела прочности и предела текучести композита после прокатки и после коррозионных испытаний в лабораторных условиях существенно не отличаются.

3. Металлографические исследования показали, что граница твердофазного соединения стали 20 и стали 08Х18Н10Т после лабораторных коррозионных испытаний и натурных испытаний на Запорожской АЭС тонкая. Дефектов в виде пор, трещин, расслоений и скопле-

ния продуктов коррозии не обнаружено. Отсутствуют видимые структурные изменения, которые могли бы привести к механической неоднородности композита.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент України №80204, В23К20/00 // «Спосіб зварювання у твердій фазі металевих пластин». І.М. Неклюдов, Б.В. Борц, І.Е. Вареха, О.Т. Лопата. Опуб. 25.06.2007. Бюл. № 9.
2. Иванов В.Е., Амоенко В.М., Тронь А.С. Высокотемпературная прокатка в вакууме металлов, сплавов и многослойных материалов // УФЖ. — 1978. — Т. 23, № 11. — С. 1782—1789.
3. Neklyudov I.M., Borts B.V., Tkachenko V.I. Features of formation of dissimilar metal joints in hot roll welding in vacuum // The Paton Welding J. — 2011. — № 2. — P. 27—32.
4. Неклюдов І.М., Борц Б.В., Лопата О.Т. та ін. Створення композиційних перехідників із матеріалів сталь 20, сталь 12Х18Н10Т, виготовлених з'єднанням у твердій фазі, для підвищення ресурсу та надійності роботи трубопроводів АЕС // Наука та інновації. — 2009. — Т. 5, № 1. — С. 44—49.
5. ПНАЭ Г-7-008-89 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок».
6. Рябов В.Р., Рабкин Д.М., Курочко Р.С., Стрижевская Л.Г. Сварка разнородных металлов и сплавов. — М.: Машиностроение, 1984. — 239 с.

Б.В. Борц, В.М. Воєводін, І.М. Неклюдов,  
І.М. Короткова, О.О. Лопата, О.Т. Лопата,  
Н.Д. Рибальченко, В.І. Ситін, В.О. Александров

#### ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДОФАЗНИХ З'ЄДНАНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ РЕАКТОРІВ 2-го ТА 3-го ПОКОЛІНЬ

Методом гарячої вакуумної прокатки отримано твердофазне з'єднання вуглецевої та нержавіючої сталей. Проведено дослідження межі твердофазного з'єднання методами металографії та електронної мікроскопії. Досліджено нано- і мікротвердість, корозійну стійкість та циклічну міцність композиту *сталь 20 — сталь 08Х18Н10Т*.

*Ключові слова:* вакуумна прокатка, твердофазне з'єднання, структура, нано- і мікротвердість, корозійна стійкість, циклічна міцність.

B.V. Borts, V.N. Voyevodin, I.M. Neklyudov,  
I.M. Korotkova, O.O. Lopata, O.T. Lopata,  
N.D. Rybalchenko, V.I. Sytin, V.A. Alexandrov.

#### APPLICATION OF SOLID-PHASE BONDING TO INCREASE THE RELIABILITY OF PIPELINES OF REACTORS 2 AND 3 GENERATIONS

Solid-phase bonding carbon steel and stainless steel obtained by the method of hot vacuum rolling. The study of solid-phase bonding boundary was carried out using methods of metallography and electronic microscopy. Nano- and microhardness, corrosion resistance and cyclic strength of composite steel 20 — steel 08Cr18Ni10Ti are researched.

*Key words:* vacuum rolling, solid-phase bonding, structure, nano- and microhardness, corrosion resistance, cyclic strength.

Стаття надійшла до редакції 26.04.12