

УДК 621.7

**Е.О. Бабкин, С.П. Ковко, О.В. Силина**

**E.O. Babkin, S.P. Kovko, O.V. Silina**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ПОЛУЧЕНИЕ ПРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ  
БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПАРЫ  
ДЛЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ  
CONNECTION OF A BIMETALLIC PAIR  
FOR PUMPING AND COMPRESSOR PIPES**

Рассмотрены различные варианты изготовления биметаллических цилиндров, различающиеся величиной зазора, скоростью деформации и температурами нагрева. Установлено, что на адгезию влияют два основных фактора: физический контакт и химическое взаимодействие на границе. Изучены процесс образования соединения и влияние на него микрорельефа.

**Ключевые слова:** адгезия, биметаллическая пара, биметаллические трубы, насосно-компрессорные трубы, соединение биметаллической пары.

Various solutions for the manufacture of bimetallic cylinders are considered, differing in the size of the gap, the rate of deformation, and heating temperatures. It has been established that adhesion is influenced by two main factors: physical contact and chemical interaction at the border. Along the way, the process of formation of the compound and the effect of microrelief on it are considered.

**Keywords:** adhesion, bimetallic pair, bimetallic pipes, pumping and compressor pipes, connection of a bimetallic pair.

В ходе эксплуатации насосно-компрессорных труб (НКТ) под воздействием механических нагрузжений, механических частиц и коррозионных процессов, под влиянием агрессивных составляющих (сероводород, уголекислота) внутренний слой сильно изнашивается и нуждается в увеличении эксплуатационного ресурса.

Для этого НКТ должны иметь как высокую прочность, так и высокую коррозионную стойкость, а данные свойства противоположны друг другу: при повышении коррозионной стойкости снижаются прочностные свойства. Такая сложная задача – увеличение эксплуатационного ресурса труб за счёт повышения прочностных характеристик и увеличения их коррозионной стойкости – решается созданием биметаллического цилиндра, который состоит из двух частей (рис. 1): лайнера (внутренней части 1) и обечайки (внешней части 2).

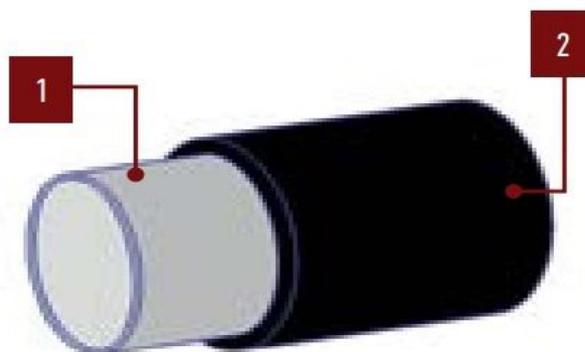


Рис. 1. Биметаллическая НКТ: 1 – лайнер (внутренняя часть);  
2 – обечайка (внешняя часть)<sup>1</sup>

Основной слой (обечайка) изготавливается из углеродистых сталей Ст3, 20К, 45, низколегированных сталей 16ГС, 09Г2С, а плакирующий слой (лейнер) из коррозионностойких сталей 08Х13, 12Х18Н10Т. Биметаллический прокат обеспечивает высокую коррозионную стойкость, снижает массу изделия и в несколько раз увеличивает срок службы. Технологический процесс изготовления биметаллических цилиндров имеет множество различных решений.

1. Первичный нагрев полой центробежнолитой биметаллической заготовки до температуры 800–850°C со скоростью 3,3–4,5 град/мин, последующий нагрев до температуры 1180–1200°C со скоростью 2,7–3,3 град/мин и деформацию на пилигримовом стане на дорне [1]. Существенный недостаток метода в том, что он позволяет получать биметаллические трубы, где одна из частей – лайнер, выполнен из антифрикционного и антикоррозионного металла с большими коэффициентами линейного расширения, поэтому используемые режимы не обеспечивают цилиндр с постоянными толщиной и диаметральной размер по всей длине, что делает биметаллическое изделие нестабильным в эксплуатации, а в некоторых случаях даже полностью неработоспособным.

2. Способ, включающий установку с зазором трубной заготовки внутри оболочки из материала покрытия, нагрев наружной оболочки, горячую деформацию с одновременным охлаждением внутренней трубной заготовки и последующее редуцирование до совпадения поверхностей оболочки и лайне-

---

<sup>1</sup> ГОСТ 9.005–72 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами».

ра и обеспечения при этом зазора по всему периметру [2]. Существенный минус метода в наличии зазора у биметаллического цилиндра, который заметно снижает жесткость и прочность, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик в осложненных, динамических условиях. Например, в качестве корпуса цилиндра НКТ, работающей в сложных условиях скважины. Помимо этого, рекомендуемые режимы данного метода не позволяют получать лейнер с постоянными размерами по всей длине. Это связано с тем, что металлы, используемые для обечайки и лейнера, выполнены из сталей с различными коэффициентами линейного расширения. Ввиду этого использование режима горячей деформации с одновременным охлаждением лейнера приведет к неоднородному температурному воздействию в зоне соприкосновения поверхностей, что в свою очередь может привести к снижению эксплуатационного ресурса.

3. Процесс производства включает следующие операции: соосное размещение с зазором в оболочке, которая выполнена из низкоуглеродистой стали тонкостенной трубы, лейнера, который выполнен из высокоуглеродистой стали, и последующее их соединение по сопрягаемым поверхностям путем деформирования посредством холодной радиальнойковки на оправке [3]. Основным недостатком состоит в том, что при применении данных технологий к длинномерным трубам происходят значительные отклонения значений внутреннего диаметра.

Повышение эксплуатационного ресурса происходит не только при налаженном производстве биметаллических НКТ, но и при правильном подборе биметаллической пары. Данные параметры позволяют получать при производстве прочное соединение. Главная характеристика его получения *адгезия* – прочность сцепления лейнера с обечайкой. Механизм образования прочного соединения, а именно основа взаимодействия лейнера с обечайкой, заключается во взаимодействии как механическом, так и молекулярном. Первое определяется в контакте неровностей микропрофиля поверхностей. Для благоприятных предпосылок механического взаимодействия в большинстве случаев проводится дополнительная механическая обработка: дробеструйная, получение резьбы и т.д. Молекулярное взаимодействие состоит из межатомного взаимодействия материалов на границе и зависит от характера и величины.

Для получения высокой адгезии, а именно прочного соединения, необходимы: физический контакт между биметаллической парой, который повышается с помощью ударного взаимодействия за счет нарезки резьбы при статическом нагружении, и химическое взаимодействие на границе, высокая степень которого достигается благодаря нагреву или предварительной подготовке контактирующей поверхности – дробеструйной обработке. Способы, повышающие величину адгезии, представлены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Способы предварительной обработки поверхности  
для повышения величины адгезии

Метод	Способ	Цель
Механический метод	Шлифование, галтовка, полирование, струйно-абразивная обработка	Очистка от грубых загрязнений, окалины, оксидных пленок, активация поверхности, изменение шероховатости
Химический метод	Обезжиривание, травление, полирование, ультразвуковая очистка	Удаление жиров, уменьшение шероховатости

Благоприятные предпосылки возникают при соединении биметаллической пары, когда в процессе обработки давлением возникает напряженное состояние в плоскости соединения с преимущественно высокими сжимающими напряжениями. Следовательно, растягивающих нормальных напряжений в зоне контакта следует избегать [4].

Различные исследования показали несколько механизмов соединения [5–11]. Существенным недостатком всех теорий является то, что они лишь описывают процесс образования соединения на качественном уровне. Наибольшее распространение получила теория, которая описывает процесс соединения как многостадийный, состоящий из трех стадий: 1) разрушение оксидных пленок, обжатие неровностей, механическое взаимодействие, появление узлов схватывания; 2) последующее появление мостов сцепления и зон с повышенной концентрацией вакансий, дислокаций; 3) появление межслойной границы. Процесс соединения двух сталей состоит из взаимодействия рельефа шероховатости поверхности более прочной стали с менее прочной. При двухсторонней деформации более пластичная сталь заполняет полости профиля прочной стали. Процесс получения биметаллических НКТ состоит из трех стадий: 1) внедрение выступов профиля шероховатой поверхности с более твердой составляющей в мягкую, с одновременным выдавливанием второй; 2) заполнение мягкой составляющей полостей профиля шероховатой поверхности; 3) наклеп мягкой составляющей, накопление степени деформации и последующее достижение предела заполнения. Последующее приложение силы приводит к деформации всего объема заготовки.

Большинство из представленных исследований [5–11] игнорируют профиль микрорельефа поверхности, несмотря на то, что геометрия более твердой составляющей определяет напряженно-деформированное состояние соединения двух сталей, а также площадь контакта двух сталей, степень заполнения полостей более твердой составляющей и прочностные характеристики

соединения и их стабильность на всей протяженности контакта. Площадь соприкосновения влияет на полноту протекания диффузионных процессов, а прочность соединения зависит от напряженно-деформированного состояния более мягкой составляющей, величины накопленной степени деформации, поврежденности двух сталей, наличия остаточных напряжений [12]. В статье [13] было схематично представлено (рис. 2) соединение двух составляющих: более твердой – стальной и менее твердой – из алюминия. Авторами установлено, что механические свойства зоны соединения определяются напряженно-деформированным состоянием материалов из-за взаимодействия профилей микрорельефа биметаллической пары. Взаимодействие протекает в соответствии с теорией, которая описывает процесс соединения как много-стадийный, состоящий из трех стадий (I, II, III), описанных выше.

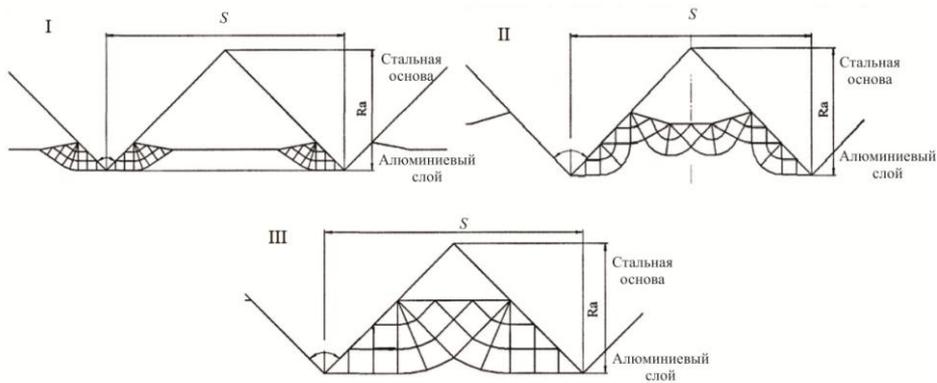


Рис. 2. Поэтапный процесс внедрения стальной основы в алюминиевый слой

Процесс внедрения одной составляющей в другую зависит не только от профиля микрорельефа, но и от твердости заготовок, коэффициента линейного расширения, стационарных потенциалов, которые способствуют качественному и постоянному соединению на всей протяженности изделия.

Оптимальный подбор сталей *по твердости* позволяет иметь большую площадь контакта, так как более твердая сталь без затруднений внедряется в другую. Стали же с одинаковым уровнем прочности будут только соприкасаться, имея при этом небольшую площадь контакта. Поэтому стали, из которых состоит биметалл, не должны быть одного уровня твердости.

*Коэффициент линейного расширения* зависит от температуры [14]. Установлено [14], что одно и то же тело при высоких температурах испытывает большее тепловое расширение, чем при низких, но в различных исследованиях данным фактором пренебрегают и принимают, что изменение размеров тела пропорционально температуре. Следовательно, если биметаллический

цилиндр претерпевает нагрев до высоких температур, то для сохранения прочности соединения и избегания дефектов следует подбирать стали с небольшой разницей значений коэффициента линейного расширения. Чем выше нагрев, тем меньше должна быть разница для устранения всех дефектов.

Большая разница *стационарных потенциалов* может привести к гальванокоррозии (контактной коррозии). Разрушению подвергается металл, чей электродный потенциал будет меньше (более активный металл) [15]. Также большое значение имеет состав среды, так как в различных средах металлы имеют различные потенциалы. В табл. 2 представлены примеры некоторых сплавов и сталей. Результатом контактной коррозии могут быть локальные коррозионные повреждения.

Таблица 2

Стационарные потенциалы некоторых металлов  
и сплавов в морской воде по отношению к нормальному  
водородному электроду (ГОСТ 9.005–72)

Металл	Стационарный потенциал, В
Магниевый сплав (6 % Al, 3 % Zn, 0,5 % Mn)	-1,20
Цинк	-0,80
Алюминиевый сплав (10 % Mn)	-0,74
Алюминиевый сплав (10 % Zn)	-0,70
Дюралюминий и алюминиевый сплав Амг6	-0,50
Железо	-0,50
Сталь 45Г17Ю3	-0,47
Сталь типа АК и углеродистая сталь	-0,40
Серый чугун	-0,36
Нержавеющие стали X13 и X17 (активное состояние)	-0,32
Бронза «Нева»	+0,01
Бронза Бр. АЖН 9-4-4	+0,02
Нержавеющая сталь X13 (пассивное состояние)	+0,03
Никель (пассивное состояние)	+0,05
Нержавеющая сталь X17 (пассивное состояние)	+0,10
Нержавеющая сталь X18N10T	+0,25

Таким образом, получение высокого уровня адгезии и прочного соединения биметаллического изделия – это многокомпонентная задача, так как на качество соединения могут также влиять условия эксплуатации, состав среды, механические напряжения. С учетом этих факторов решение проблемы может быть комплексным и не заканчиваться выбором только марки стали или методов обработки данных материалов перед использованием.

### Список литературы

1. Пат. 2171164. Рос. Федерация, МПК В23К20/02. Способ изготовления биметаллических цилиндрических изделий типа труб / Картель Г.А., Бычков Н.А., Ростовщиков В.А. – № 2000121828/02: заявл. 15.08.2000: опубл. 27.07.2001.
2. Пат. 1332675. Рос. Федерация, МПК В05С5/02. Способ производства биметаллических труб. – № 3790073/27: заявл. 18.09.1984.
3. Пат. 2133160. Рос. Федерация, МПК В21В21/00. Способ производства биметаллических труб / Федоров А.А., Сафьянов А.В., Овчаренко И.И. – № 98107132/02: заявл. 16.04.1998: опубл. 20.07.1999.
4. Зенин Б.С., Слосман А.И. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: учеб. пособие / Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – 120 с.
5. Биметаллический прокат / П.Ф. Засуха, В.Д. Кортиков, О.Б. Бухвалов, А.А. Ершов. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
6. Семенов Н.П. Схватывание металлов. – М.: Машгиз, 1958. – 280 с.
7. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности: учеб. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1990.
8. Красулин Ю.Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. – М.: Наука, 1971. – 119 с.
9. Шоршоров М.Х., Дрюндин С.С. Кинетика соединения металлов в твердой фазе // Физика и химия обработки материалов. – 1981. – №1. – С. 75–85.
10. Jose A., Rodriguez D., Goodman W. The nature of the Metal-Metal Bond in Bimetallic Surfaces // Science. New Series. – Vol. 257, no. 572. – P. 897–903.
11. A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys // N. Orhan, M. Aksoy, M. Eroglu // Material Science and Engineering A271. – P. 458–468.
12. Богатов А.А., Салихьянов Д.Р. Разработка и исследование модели схватывания при производстве биметаллического проката сталь–алюминий. – Vol. 1. Series: Monograph № 31. – Czestochowa, 2013. – P. 295–300.
13. Богатов А.А., Салихьянов Д.Р. Напряженно-деформированное состояние переходной зоны биметаллического проката // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2013. – № 1 (39). – С. 43–49.
14. Фицак В.В., Дьяконов К.В. Физика. Тепловые процессы в жидкостях и твердых телах: метод. указания; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – СПб., 2016. – 23 с.
15. Иванов М.Г., Нечаев А.В. Свойства металлов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. – 168 с.

Получено 06.08.2021

**Бабкин Евгений Олегович** – магистрант, гр. МТО-21-1м, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: Babkin.Evgenii.Olegovich@yandex.ru.

**Ковко София Петровна** – магистрант, гр. МТО-21-1м, механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: sofiya.kovko@yandex.ru.

**Силина Ольга Валентиновна** – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: silina-olga@mail.ru.