

5. Klimov A.S., Komirenko A.V., Klimov V.S., Antsiborov A.N. *Sposob stabilizatsii teplovydeleniia pri kontaktnoi tochechnoi svarke* [The method of heat stabilizing at resistance spot welding]. Patent RU, no. 2424097, 2011. (Rus.)
6. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. *Avtomatizirovannaia sistema upravleniia istochnikom pitaniia mashiny kontaktnoi svarki* [Automatic Control System of Power Supply for Resistance Welding Machine]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Tekhnicheskie nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, vol. 33, pp. 131-141. (Rus.)
7. Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. *Sposib stabilizatsii teplovidilennia pri kontaktnomu zvariuvanni* [Method of stabilization of heat emission in resistance welding]. Patent UA, no. 115735, 2017. (Ukr.)
8. Bondarenko O., Bondarenko Iu., Safronov P., Sydorets V. Current and force control in micro resistance welding machines. Review and development. Proceedings of 8th IEEE International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), Slovenia, Ljubljana, 2013, pp. 298-303. **doi:10.1109/CPE.2013.6601173.**
9. Bondarenko O.F., Dubko A.H., Sydorets V.M., Bondarenko Iu.V. *Zastosuvannia dilatometrichnogo efektu dlia avtomatizatsii kontaktnogo zvariuvannia* [Applying of dilatometric effect for resistance welding automation]. *Tekhnologiya i konstruirovannia v elektronnoi apparature – Technology and design in electronic equipment*, 2017, vol. 6, pp. 14-21. (Ukr.)
10. Burlaka V.V., Kisliak V.G. *Modernizatsiia oborudovannia dlia ispytanniia svarnykh soedinenii na primere razryvnoi mashiny 2167R-50. Anotatsii dopovidei Mizhn. nauk.-tekhn. konf. "Universitetskaia nauka-2017"* [Modernization of equipment for testing welded joints using the example of the breaking machine 2167P-50. Abstracts of Int. Sci.-Tech. Conf. "University science-2017"]. *Mariupol'*, 2017, vol. 2, pp. 137-138. (Rus.)

Рецензент: В.І. Щегініна  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.02.2018

УДК 669.045:669.046.581.2

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142533

© Коваленко І.В.\*

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ДВУХСЛОЙНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

*В статье представлены основные подходы к выбору двухслойных материалов, применяемых для производства судовых вспомогательных механизмов. В современном широком спектре конструкционных материалов, комбинированные сварные конструкции из двухслойных сталей могут различаться между собой по характеру распределения в них материалов легирования, соответствию свариваемых сталей условиям работы и областям применения. Особую группу судовых комбинированных конструкций составляют двухслойные конструкции, в которых из легированных сталей изготавливаются не отдельные детали, а лишь их поверхностные слои, непосредственно примыкающие к агрессивной среде или к источнику интенсивного износа. Такие конструкции широко применяются в судостроении, а также при изготовлении судовых энергетических установок.*

**Ключевые слова:** *двухслойная сталь, легирующие элементы, коррозионная стойкость, прочность, сварной шов, судовые механизмы, энергетические установки.*

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Азовский морской институт», г. Мариуполь, [ivankovalenko165@gmail.com](mailto:ivankovalenko165@gmail.com)

**Коваленко І.В. Обґрунтування вибору двошарової сталі для виготовлення судових допоміжних механізмів.** У статті представлені основні підходи до вибору двошарових матеріалів, що вживаються для виробництва судових допоміжних механізмів. У сучасному широкому спектрі конструкційних матеріалів, комбіновані зварні конструкції з двошарових сталей можуть розрізнятися між собою за характером розподілу в них матеріалів легування, відповідності зварюваних сталей умовам роботи і сферам застосування. Особливу групу судових комбінованих конструкцій складають двошарові конструкції, у яких з легованих сталей виготовляються не окремі деталі, а лише їх поверхневі шари, що безпосередньо примикають до агресивного середовища або до джерела інтенсивного зносу. Такі конструкції широко застосовуються у суднобудуванні, а також при виготовленні судових енергетичних установок. Двошарові сталі широко використовуються у деталях машин різного призначення, поверхневі шари яких випробують значні зусилля або схильні до зносу різного характеру. Номенклатура матеріалів, що використовуються у комбінованих конструкціях, дуже велика і включає більшість зварюваних сталей. По поєднанню матеріалів в одному вузлі доцільно виділити дві основні групи конструкцій: із зварними з'єднаннями сталей одного структурного класу, але різного легування, та із зварними з'єднаннями сталей різних структурних класів. При виконанні зварювання сталей одного структурного класу без яких-небудь додаткових вимог до вибору методу зварювання та режиму, що враховують різномірність з'єднання, треба враховувати міцність з'єднання. У межах одного структурного класу теплофізичні властивості сталей помітно один від одного не відрізняються. Тому у даній статті описуються властивості перехідних шарів шва, які виникають за рахунок проплавлення основного металу, властивості яких у подібних з'єднаннях, а також у більшості випадків, істотно не відрізняються від властивостей наплавленого металу.

**Ключові слова:** двошарова сталь, легуючі елементи, корозійна стійкість, міцність, зварний шов, судові механізми, енергетичні установки.

***I.V. Kovalenko. Grounds for choice of ply steel for making vessels auxiliary mechanisms.***

*In the modern wide spectrum of construction materials the combined weldments from bi-metal steels can be differentiated by alloying materials distribution in them, steels to be welded combinations, operating conditions and applications. A special group of the combined constructions are the bimetallic constructions in which not individual parts are made from alloyed steel, but just the superficial layers of them that are in immediate contact with the aggressive environment, or with the source of intensive wear. Such constructions of bi-metals are used mainly for vessels, working under pressure and under the influence of aggressive environments in chemical and petroleum machine building, and in atomic power plants as well. Ply steels are widely used in machines parts of various purpose if the superficial layers of them are subjected to wear of different character or are under heavy pressure. The nomenclature of the materials used in the combined constructions is rather extensive and comprises most weldable steels. As to the combination of materials in one knot it is expedient to distinguish two basic groups of constructions: with the steel weldments of one structural class, but different alloying; and steel weldments of different structural classes. At welding steels of one structural class there are not usually requirements either to the choice of a welding method or to its mode, taking into account the heterogeneity of connection. Within one structural class thermal and physical properties of steel do not differ. The characteristics of transitional layers of parent metal in similar connection in most cases do not substantially differ from the characteristics of the filler metal.*

**Keywords:** *ply steel, alloying elements, corrosion resistance, strength, weldment, ship mechanisms, power plants.*

**Постановка проблеми.** Постоянное повышение требований к качеству изготовления узлов судовых вспомогательных конструкций, выполнению их ремонтов с применением сварки двухслойных сталей обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплу-

тационных свойств. Особую роль играет процесс обоснования и выбора двухслойной стали для проектирования и изготовления определённого узла. В связи с этим, разработки в указанном направлении являются весьма актуальными.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Свойства двухслойных сталей ВСтЗсп5 + 10Х13 широко известны [1]. Они применяются как коррозионностойкие и термостойкие материалы при изготовлении деталей, работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в судостроительной промышленности. Имеется информация по определению свойств коррозионного износа и значению скорости общей коррозии 0,1-0,3 мм/год.

Особую роль при изготовлении судовых энергетических установок необходимо уделять качеству выполняемых работ. Контроль необходимо проводить на каждом из этапов изготовления судовых конструкций, с применением как предварительных теоретических расчетов, так и приборов по определению уровня контроля качества.

Необходимость в проведении исследований, направленных на определение работоспособности судовых сварных соединений двухслойных сталей, имеет особое значение, так как данные материалы применяются как при изготовлении, так и при ремонте судовых установок [2].

Данные [3] свидетельствуют, что из-за увеличения уровня остаточных напряжений и образования неоднородностей структуры при сварке двухслойных сталей значения ударной вязкости снижаются на 20-25% по сравнению с исходным вариантом.

В работе [3] установлено, что вблизи сварных соединений двухслойных сталей могут возникать дефекты, вызванные пластической деформацией усадки. Склонность сварных соединений к образованию таких дефектов тем больше, чем меньше деформационная способность.

Приведенная информация требует дополнительного анализа и исследования.

**Целью данной работы** является представление и обобщение подходов к выбору двухслойных сталей, включающих в себя проведение анализа свойств материалов судовых металлоконструкций.

**Изложение основного материала.** Судовые конструкционные материалы разделяют на несколько групп. К конструкциям первой группы относятся сварные узлы, в которых свариваются между собой малоуглеродистая сталь Ст20 с хромомолибденовой 9ХГМ; сталь 1Х18Н10Т с аустенитной сталью, имеющей повышенное содержание никеля-сталь 20ХН12М. Наибольшее распространение среди конструкций второй группы нашли соединения перлитных сталей с аустенитными хромоникелевыми и мартенситно-ферритными высокохромистыми сталями, как пример 30ХН5 и 12ХНМ. Особенно важно при внедрении данной группы конструкций обеспечить высокое качество соединения вследствие заметного развития в них химической, структурной и механической неоднородности и наличия в изделии поля остаточных напряжений, которые не могут быть сняты при термической обработке.

На выбор сварочных материалов, технологию сварки и работоспособность комбинированных конструкций из двухслойных сталей заметное влияние оказывают условия их работы. По этому признаку следует выделить следующие четыре группы сварных узлов:

- конструкции, работающие при комнатной температуре (строительные конструкции, узлы машин и механизмов общего машиностроения, а также узлы гидротурбин, работающие в условиях интенсивного кавитационного износа);

- конструкции различных криогенных установок, работающих в условиях интенсивного кавитационного износа;

- конструкции, работающие при высоких температурах (узлы энергетического машиностроения, атомных установок);

- конструкции, работающие в коррозионных средах при сравнительно умеренных температурах (узлы химического и нефтяного машиностроения).

При использовании сварных соединений из двухслойных сталей в конструкциях общего назначения (применительно к условиям эксплуатации при комнатной температуре) достигается снижение веса изделия за счет изготовления наиболее напряженных деталей из высокопрочной стали.

Применение материалов данного типа при изготовлении судовых металлоконструкций и является той рациональной составляющей, которая выделяет экономические преимущества материалов данного типа. Также важно, что в сочетании с другими факторами свойства двух-

слоейных соединений могут влиять на характеристики всей конструкции.

В рассматриваемых сварных узлах основное применение находят перлитные стали различного легирования, а также стали мартенситного класса, приведенные в таблице.

Таблица

Стали, применяемые в биметаллических конструкциях общего назначения

Область применения	Высокопрочные стали		Малопрочные стали, марки
	Характеристика	Марка	
Судовые конструкции (балки и др.)	Низколегированные, хорошо сваривающиеся	09Г2С, 14Г2, 15ГС, 14ХГС, 10ХСНД	Ст.3
Узлы машин и механизмов	Низко- и среднелегированные	20Х, 40Х, 40ХС	Ст.3 Сталь 25 Сталь 35
Узлы гидротурбин	Кавитационностойкие	ШХ13 ОХ12НДЛ 10Х18Н3Г3Д2Л	Ст.3 20К 20ГСЛ

Примером такой конструкции общего назначения являются сварные балки с полками из стали повышенной прочности и стенками из малоуглеродистой стали марки Ст.3. Согласно проведенным расчетам, применение подобных балок позволяет снизить вес и общую стоимость изделий на 5-7%. Имеются примеры успешного их использования в производственных целях [4]. Преимущества подобных балок оцениваются и представляются при их расчете по критерию предельной несущей способности с допущением пластических деформаций в верхних ребрах стенки. Значительно более простым является использование в строительстве конструкций из биметаллических сталей (типа ферм), в которых усилия передаются последовательно от одного элемента к другому. Внедрение подобных узлов позволяет по проведенным расчетам снизить вес, а, следовательно, и стоимость изделия на 10-15%.

По условиям работы различных машин и механизмов общего назначения отдельные участки тех или иных узлов испытывают значительные усилия или подвергаются повышенному износу. Так, шейки валов, работающие в подшипниках, валы, находящиеся в зацеплении с другими деталями, должны изготавливаться из высокопрочных сталей. В этих случаях повышение надежности машин может быть достигнуто либо изготовлением деталей, входящих в узел из высокопрочной или износостойкой стали, либо наплавкой этих участков материалом, стойким против износа.

По условиям работы рам станков интенсивным нагрузкам и повышенному износу подвергаются, прежде всего, их направляющие. В связи с этим при изготовлении сварных станин направляющие целесообразно изготавливать из высокопрочной стали 40Х. После сварки участки направляющих, подвергающиеся износу, упрочняют методом поверхностной закалки газовым пламенем или токами высокой частоты [5].

Конструкции, работающие при высоких температурах и в коррозионных средах, требуют специальных технических решений.

К указанной группе конструкций относятся сварные узлы энергетических, атомных, химических судовых установок. К выбору материалов для них и к изготовлению предъявляются особо жесткие требования в связи с тяжелыми условиями эксплуатации.

В конструкциях судовых установок и химических аппаратов в ряде случаев трубы выполняются из менее легированной стали, чем примыкающие к ним трубопроводы. На рис. 1. показан корпус судового парового котла. Корпус представляет собой сосуд, изготовленный из листов низколегированной марганцовистой стали (0,23% С, 0,74% Мn, 0,2% Si). Внутри корпуса установлена защитная оболочка толщиной 25 мм из нержавеющей стали типа Х18Н9. Гелий, протекающий в пространстве между корпусом и этой оболочкой, обеспечивает температуру наружной стенки не выше 343°С [6].

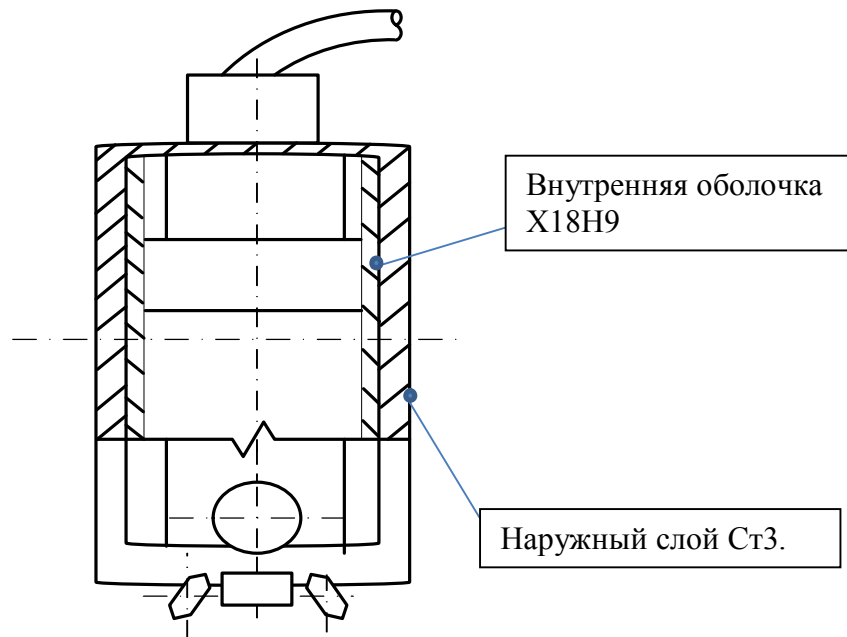


Рис. 1 – Корпус судового парового котла

В целях экономии легированных сталей, к обечайкам и днищам котлов из нержавеющей сталей химических аппаратов часто производится приварка различных элементов из малоуглеродистой стали для крепления сосуда, охлаждения его стенок и т.д. Таким образом, происходит оптимизация состава поверхностного слоя агрегата. Применение композиций материалов при производстве двухслойных изделий и является той рациональной составляющей, которая выделяет экономические преимущества материалов данного типа. Также важно, что в сочетании с другими факторами свойства двухслойных материалов могут существенно влиять на геометрию, работоспособность и надежность сварных конструкций. Но одним из факторов, влияющим на уровень качества разработок, является экономия затрат на изготовление и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик в условиях работы поверхностного слоя изделия из двухслойных сталей [7].

При умеренных температурах стенок сосуда и отсутствии коррозионного воздействия в месте сварного соединения основное внимание следует уделять выбору сварочных материалов, обеспечивающих отсутствие трещин при сварке. При высоких и низких температурах стенок должны предъявляться также дополнительные требования к сочетанию свариваемых сталей и плавности сопряжения элементов между собой.

В различных машинах общего назначения встречается необходимость изготовления узлов, работающих при высокой температуре или при воздействии коррозионной среды. На рис. 2 показан эскиз тонколистовой конструкции судовой энергетической установки, в которой все основные элементы выполнены из малоуглеродистой стали и лишь внутренняя ее часть, где происходит сгорание смеси и температура повышается до  $1073\div 1273$  К, сделана из жаростойкой стали X23H18.

Особенности строения сварных соединений разнородных сталей и обусловленная ими явно выраженная химическая, структурная и механическая неоднородность должны учитываться при назначении материалов конструкции и выборе технологии её изготовления [8].

При изготовлении указанной конструкции используется ручная дуговая и шовная дуговая сварка. В данном агрегате одним из основных конструктивных элементов является соединение труб 4 с рабочим слоем 3, наносимого из рулонного накопителя 1. Когда температура и агрессивный характер теплоносителя внутри труб заметно отличаются от соответствующих параметров теплоносителя, поступающих во внутреннее пространство, целесообразно выполнять трубки и плакирующий слой корпуса из разных сталей в соответствии с условиями их работы. Основной слой конструкции 2 – из низколегированных сталей.

Выполняя анализ производительности методов сварки при изготовлении данного сосуда

и учитывая его серийность и возможность выпуска в потоке, возникает идея об отказе от низкопроизводительных методов сварки и РДС (ручной дуговой сварке) и переход к полуавтоматическому и автоматическому методам сварки в среде защитных газов и под флюсом. При этом уровень погонной энергии сварки не должен выходить за величину, гарантированно обеспечивающую структуру шва, не подверженную образованию холодных трещин, так как именно они являются одной из основных проблем при сварке биметаллов одного класса [9].

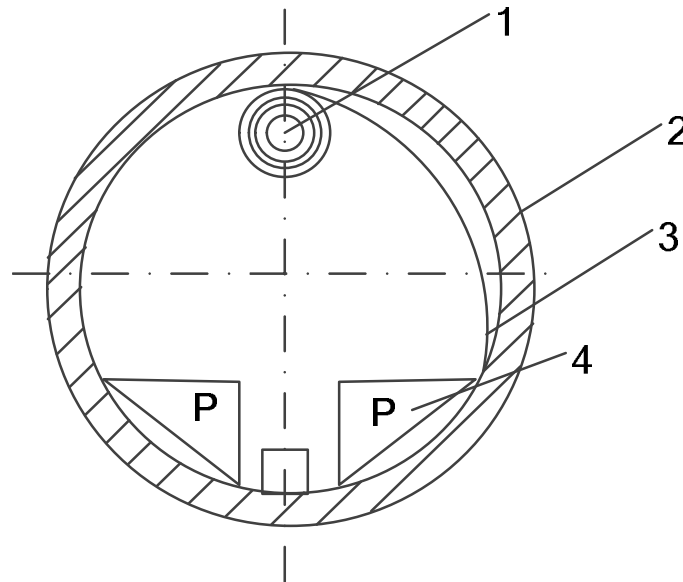


Рис. 2 – Схема расположения плакирующих слоев сосуда, изготовленного из биметаллов

Метод наплавки трубных досок целесообразен при большой их толщине. Если толщина последних мала, то можно рекомендовать изготовление трубной доски целиком из аустенитной стали с выносом комбинированного стыка в соединении трубной доски с корпусом.

Двухслойные сварные конструкции широко применяются в судостроении, т.к. обеспечивают надежную работу в различных частях как судовых турбинных установок, так и судовых паровых котлов. На рисунке 3 представлен микрошлиф биметаллического сварного соединения лопасти ротора с втулкой статора судовой газовой турбины.

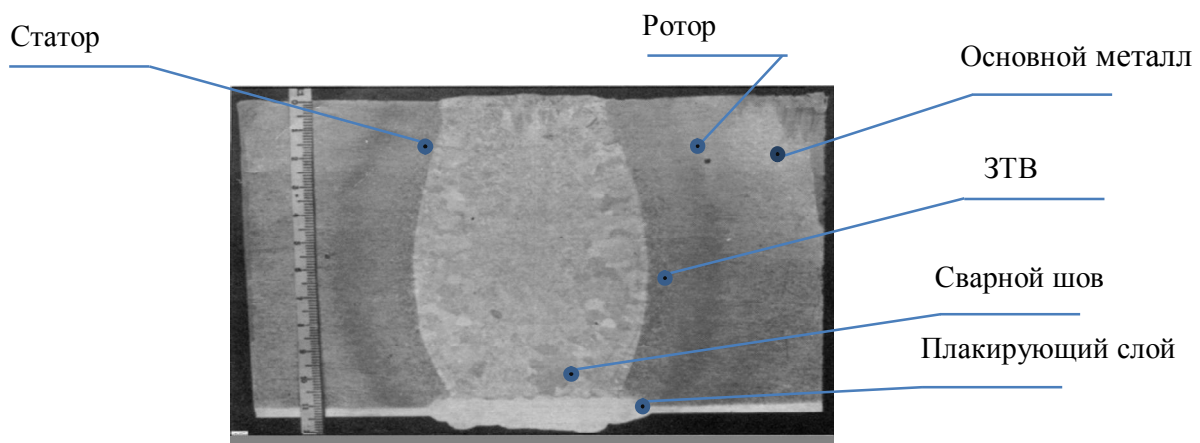


Рис. 3 – Макрошлиф сварного соединения биметалла Вст3 +10X13

Комбинированные сварные конструкции из биметаллических сталей судовых паровых и газовых турбин применяются в узлах статорной части и во вращающихся частях машин. Наи-

большее распространение имеют в этих конструкциях сварные соединения перлитных сталей с высокохромистыми нержавеющейими и жаропрочными сталями, а также с хромоникелевыми аустенитными сталями. В судовых газовых турбинах с рабочими температурами выше 923-1023°C возможно также сочетание сплавов на никелевой основе с мартенситными и перлитными сталями. Типовые конструктивные решения сварных узлов приведены в работе [10].

Особенностями рассматриваемых узлов является сложность их конструкции, повышенные требования к точности изготовления и высокая напряжённость условий работы. Основной специфической трудностью сварки биметаллов данного класса являются процессы, происходящие в зоне сплавления основного металла и металла шва. В результате здесь образуются прослойки разупрочненного или охрупченного металла. Разупрочнение или охрупчивание в зоне сплавления разнородных сталей может быть настолько сильным, что происходит преждевременное разрушение сварного соединения. В практике эксплуатации сварных соединений разнородных сталей происходило немало разрушений по зоне сплавления, хотя биметалл имеет высокую вязкость. Таким образом, подтверждены данные о выходе из строя по причине образования структурной неоднородности [11].

При сварке между собой сталей одного структурного класса каких-либо дополнительных требований к выбору метода сварки и ее режима, учитывающих разнородность соединения, можно обычно не вводить.

В пределах одного структурного класса теплофизические свойства сталей заметно друг от друга не отличаются. Свойства переходных слоев шва за счет проплавления основного металла в подобных соединениях также в большинстве случаев существенно не отличаются от свойств наплавленного металла.

Основными и распространенными способами сварки разнородных сталей являются ручная дуговая и сварка в среде углекислого газа, автоматическая сварка под слоем флюса. Основными преимуществами данных видов сварки являются гибкость процесса и возможность обеспечения сравнительно умеренных степеней проплавления свариваемого биметалла. Данные виды сварки широко применяются при выполнении изделий из легированных сталей разной степени легирования и перлитных сталей с высокохромистыми мартенситными и высоколегированными сталями. В отдельных случаях сварки в CO<sub>2</sub>, когда формирование шва идет за счет проплавления основного металла, свойства шва могут регулироваться не только изменением режима сварки, но и другими способами.

Так, например, при данном способе сварки в процессе приварки шипов из стали 10X13 к трубам из малоуглеродистой стали поверхностей нагрева котлов в швах за счет проплавления материала шипа образуется однофазная ферритная структура и они становятся хрупкими после эксплуатации в интервале температур 400-500°C. Стойкость швов против охрупчивания была повышена, когда перед сваркой ввели операцию никелирования шипов [11]. При сварке никель из гальванического покрытия переходил в шов, дополнительно шлифуя его и приводя к устранению однофазной ферритной структуры.

Для вышперечисленных методов соединения разнородных сталей многое зависит от выбора материалов, применяемых для сварки. Степень легирования как основного, так и присадочного материалов, влияет на скорость образования в переходных слоях шва мартенситных структур, диффузионных прослоек, отрицательно влияющих на механические свойства соединения.

Одной из основных проблем биметаллических сварных конструкций являются условия эксплуатации, особенно при высоких температурах. Поэтому наиболее важной тенденцией является влияние содержания никеля в металле шва на те напряжения, которые возникают от различия коэффициентов линейного расширения сплавляемых металлов, появляющегося при эксплуатации сварного соединения. Из данных [12] следует, что максимальные напряжения, возникающие в соединении биметаллических сталей при эксплуатации его в условиях высоких температур вследствие различия коэффициентов линейного расширения сплавляемых металлов, практически не зависят от содержания никеля в металле шва. Однако с увеличением его концентрации существенно уменьшается скачок напряжений в зоне сплавления металла шва с перлитным основным металлом, которая является наиболее слабым местом сварного соединения биметаллов вследствие скопления в ней микродефектов и несовершенств строения вакансий и дислокаций из-за металлов, значительно отличающихся по физическим свойствам. Одна

из основных целей разрабатываемой работы – решение этой проблемы.

Применение электрошлаковой сварки особенно целесообразно при изготовлении толсто-стенных биметаллических корпусов. Особенностью данного способа при сварке биметаллов больших толщин является обязательная нормализация изделия после сварки. При термообработке крупногабаритных сосудов такой высокотемпературный нагрев может привести к потере формы изделия. По этой причине нормализацию небольших сосудов или отдельных узлов (длиной до 4 м) по возможности проводят в вертикальном положении. Затем отдельные нормализованные после электрошлаковой сварки (ЭШС) узлы свариваются автоматической многослойной сваркой под флюсом с последующим отпуском [13].

Для ЭШС продольных и кольцевых швов биметаллического корпуса рекомендована разделка кромок с полным удалением строжкой плакирующего слоя (шириной 20...40 мм на каждую кромку) по длине шва. Кроме того, для продольных швов была опробована комбинированная разделка кромок с предварительной подваркой основного слоя внутри сосуда, которая легко обеспечивает требуемую геометрическую форму обечаек и значительно уменьшает объем наплавочных работ внутри корпуса. Такая технология при ЭШС применяется при сварке цилиндрического сосуда с толщиной до 170 мм из биметалла 09Г2С+0Х18Н10Т. Однако применительно к сварке корпусов из биметалла 18Х2МА+0Х18Н10Т этот тип разделки оказался неприемлемым, поскольку при дуговой подварке основного слоя требуется предварительный подогрев, а также последующий отпуск, что осложняло технологический процесс.

#### Выводы

Положительно подтверждено, что описанные подходы по выбору конструкционного материала являются правильными, подтверждают необходимость пошагового обоснования поиска двухслойной стали. Основными критериями при выборе материала являются механические свойства, эксплуатационные характеристики, свариваемость.

В ходе обоснования выбора способа сварки, а также сварочных материалов, в качестве приоритета выступает эксплуатационная нагруженность агрегата, а также способность материала металла шва выдерживать коррозионные агрессивные среды.

#### Список использованных источников:

1. Панасюк В.В. Застосування методів механіки руйнування матеріалів для поцінування міцності зварних з'єднань / В.В. Панасюк // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 151-156.
2. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – К. : Наукова думка, 2006. – 618 с.
3. Патон Б.Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Е. Саенко // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 2-5.
4. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей / Б.И. Медовар. – М. : Машгиз, 1958. – 258 с.
5. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б.А. Мовчан. – К. : Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
6. Касаткин Б.И. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушения / Б.И. Касаткин, В.Я. Бреднев, В.В. Волков // Автоматическая сварка. – 1981. – № 11. – С. 1-11.
7. Недосека А.Я. Основы расчета сварных конструкций / А.Я. Недосека. – К. : Вища школа, 1988. – 263 с.
8. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 270 с.
9. Стафаков Ю.П. Рост трещин вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия / Ю.П. Стафаков, И.Л. Побаль, А.Г. Князева // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 1. – С. 81-88.
10. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей / В.Н. Земзин. – Л. : Машиностроение, 1966. – 190 с.
11. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б.А. Мовчан. – К. : Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
12. Коваленко И.В. Вдосконалення технології дугового зварювання двошарових сталей при виготовленні промислових металоконструкцій : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 : захищена



08.12.13; затв. 12.12.13 / Коваленко Іван Васильович. – Маріуполь, 2013. – 146 с. – № 128863.

13. Kovalenko I. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods / I. Kovalenko, V. Spiridonov // *The scientific heritage*. – 2016. – № 6. – Pp. 88-91.

#### References:

1. Panasyuk V.V. Zastosuvannia metodiv mekhaniki ruinuвання materialiv zvarnich zednan [Application of methods of fracture mechanics of materials to assess the strength of welded joints]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2008, no. 11, pp. 151-156. (Ukr.)
2. Makhnenko V.I. *Resurs bezopasnoi ekspluatatsii svarnich soedinenii i uzlov sovremenich konstrukcii* [Resource of safe service of welded joints and units of modern structures]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2006. 618 p. (Rus.)
3. Paton B.E., Medovar L.B., Saenko V.E. Novie vozmozhnosti avtomat svarki v mashinosstroeniy [New possibilities of automatic welding in mechanical engineering]. *Metallurgia mashinos-troyeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2003, no. 1, pp. 2-5. (Rus.)
4. Medovar B.I. *Svarka khromonikelevich austenitnich staley* [Welding austenitic chromium-Nickel steels]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 258 p. (Rus.)
5. Movchan B.A. *Mikroskopicheskay neodnorodnost v litych splavach* [Microscopic heterogeneity in cast alloys]. Kiev, Gostehizdat of the USSR Publ., 1968. 230 p. (Rus.)
6. Kasatkin B.I., brednev, V.I., Volkov V.V. Methodica isledovaniy kinetiki deformatsii pri razrushenii [Methodology of the study of the kinetics of de-formations in the slow motion destruction]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1981, no. 11, pp. 1-11. (Rus.)
7. Nedoseka A.Y. *Osnovi rascheta svarnich konstrukciy* [The basis of calculation of welded structures]. Kiev, Vyscha shkola Publ., 1988. 263 p. (Rus.)
8. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokurov V.A. *Svarnie konstrukcii. Prochnost svarnich soedineniy i deformatsiy konstrukciy* [Welded construction. Strength of welded joints and deformation of structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 270 p. (Rus.)
9. Stefanov Y.P., Pobol I.L., Knyazeva A.G. Rost treshin blizi granici razdela raznich materialov [The growth of cracks near the interface of heterogeneous materials under compression]. *Fizicheskaiia mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2002, no. 1, pp. 81-88. (Rus.)
10. Zemzin V.N. *Svarniye soedineniy raznorodnich staley* [Welded joints of dissimilar steels]. Leningrad, Engineering Publ., 1966. 190 p. (Rus.)
11. Movchan B.A. *Mikroskopicheskay neodnorodnost v litich splavah* [Microscopic heterogeneity in cast alloys]. Kiev, Gostehizdat of the USSR Publ., 1968. 230 p.
12. Kovalenko I.V. *Vdoskonalennia tekhnologii dugovogo zvariuvannia dvosharovikh staley pri vigo-tovlenni promislovikh metalokonstruktsii*. Diss. cand. techn. nauk [Improvement of technology of arc welding of bimetallic steels in the manufacture of industrial steel structures. Cand. tech. sci. diss.]. Mariupol, 2013. 146 p. (Ukr.)
13. Kovalenko I., Spiridonov V. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods. *The scientific heritage*, 2016, no. 6, pp. 88-91.

Рецензент: В.И. Щетинина  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.03.2018