



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРКИ

И. В. ГОРЫНИН

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». РФ. 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49. E-mail: mail@crism.ru

Рассмотрена ретроспектива сотрудничества ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» с ИЭС им. Е.О.Патона в области создания особо надежных металлических материалов и промышленных технологий для специальной техники, разработки покрытых электродов, агломерированных флюсов, порошковых проволок, сварочных технологий и оборудования. Был использован единый подход к разработкам технологии металлургии и сварки с конечной целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности создаваемых на основе новых материалов современных конструкций. Отмечены совместные работы по оценке сопротивления материалов хрупким разрушениям, развитию методов оценки циклического ресурса сварных конструкций, совершенствованию методик сертификационных испытаний металла. Табл. 2, рис. 4.

*Ключевые слова:* инновационные технологии, конструкционные стали, сварочные материалы, эксплуатационная надежность, нанотехнологии и наноматериалы, сотрудничество

Совместные работы с ИЭС им. Е. О. Патона в советские годы и в постсоветский период положили начало научным направлениям работ, которые получили свое дальнейшее развитие в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» при создании особо надежных материалов и промышленных технологий для специальной техники, эксплуатирующейся в экстремальных условиях. Наиболее значимые из них посвящены разработкам технологий электрошлакового переплава (ЭШП) высокопрочных свариваемых сталей, созданию высококачественных сварочных материалов, а также обеспечению эксплуатационной надежности крупногабаритных сварных конструкций.

Способ ЭШП разработан в начале 70-х годов прошлого столетия совместно учеными Института электросварки им. Е. О. Патона, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ЦНИИ ЧМ им. И. П. Бардина и специалистами металлургических заводов Украины. Основная задача, требовавшая решения — повысить металлургическое качество и исключить анизотропию свойств толстолистового проката из высокопрочных сталей для предотвращения хрупких разрушений. Новая технология позволила существенно снизить содержание серы, кислорода,

неметаллических включений (рис. 1); обеспечить 2-3-кратное повышение значений пластичности и ударной вязкости (табл. 1); снижение критических температур хрупкости, повышение сопротивления распространению трещины; максимально ограничить содержание углерода, регламентировать содержание легирующих элементов в узких пределах.

Это позволило расширить сортамент и обеспечить производство крупногабаритного листового проката, высокую равномерность структуры и механических свойств по площади крупногабаритного листа и в направлении его толщины, улучшить свариваемость и повысить стабильность механических свойств в зоне термического влияния сварных соединений. Практически сталь превратилась в изотропный материал.

Переход российских предприятий на рыночные отношения потребовал новых способов выплавки — с применением комплекса внепечной обработки (внепечного рафинирования и вакуумирования). Опыт использования технологии ЭШП позволил перейти на принципиально новую схему производства металла, не уступающего по качеству металлу, получаемому ЭШП (табл. 1). Отметим, что способ ЭШП позволяет получать новые продукты, разрабатываемые в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», высокого качества (например, при производстве азотистых сталей).

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ИЭС им. Е. О. Патона проводились работы по соз-

**Таблица 1. Механические свойства высокопрочных сталей**

Способ выплавки	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\Psi_{z^2}$ , %
ЭШП	17,0...21,5	64...70	128...300	50...55
Внепечное рафинирование	17,0...20,5	64...68	124...235	40...55

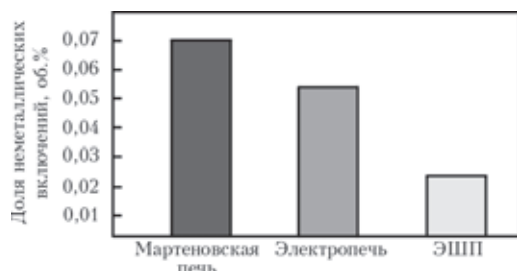


Рис. 1. Содержание неметаллических включений в высокопрочной стали различной выплавки

© И. В. Горынин, 2013



Таблица 2. Эксплуатационные характеристики металла шва при сварке порошковых проволок

Марка порошковой проволоки	$R_m$ , МПа	$R_p$ , МПа	$A_5$ , %	$KV$ , Дж
48ПП-8Н	510...650	440...480	22...28	75...90 (-20 °С)
48ПП-11Н	610...770	500...530	20...24	60...80 (-40 °С)
ПП-СВП1	650...710	500...550	23...27	75...90 (-40 °С)
48ПП-10Т	545...560	460...480	22...25	60...80 (-60 °С)

данию сварочных покрытых электродов, агломерированных флюсов для автоматической сварки, порошковых проволок малого диаметра, а также разрабатывали сварочные технологии и оборудование. Новые перспективные сварочные материалы создаются на основе оптимизации систем легирования, микролегирования и модифицирования металла шва для обеспечения требуемой работоспособности сварных соединений (в том числе при отрицательных температурах), высокой свариваемости и трещиностойкости.

Созданы новые высокотехнологичные порошковые проволоки малых диаметров для сварки сталей с пределом текучести от 360 до 550 МПа, по уровню эксплуатационных характеристик не уступающие лучшим зарубежным аналогам и разработана промышленная технология их изготовления (табл. 2).

Серия разработанных покрытых электродов флюоритно-кальциевого типа позволяет обеспечить низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, стабильно высокие эксплуатационные характеристики, заданный уровень прочностных и пластических свойств металла шва при сварке хладостойких сталей.

Для автоматической сварки под флюсом разработаны агломерированные флюсы в сочетании с различными проволоками, обеспечивающие комплекс необходимых служебных характеристик. Промышленное изготовление флюсов освоено на производственной базе ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», рис. 2. Отличительной особенностью разработанных флюсов является их высокая конкурентоспособность, базирующаяся на высокой технологичности процесса сварки и приемлемой стоимости.

Разработана принципиально новая технология изготовления сварочного флюса при помощи лазерного гранулирования, позволяющая обеспечить: низкую гигроскопичность флюса; возможность раскисления, легирования и модифицирования металла шва через флюс; низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, а также относительно высокую прочность гранул флюса. Внедрение нового флюса в производство позволяет снизить температуру предварительного и сопутствующего подогрева при сварке; выполнять сварку высокопрочных сталей с пределом текучести более 800 МПа; значительно повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений.

Широко используемая в трубной промышленности многодуговая сварка под флюсом разрабо-

танными новыми сварочными материалами при внедрении ее в судостроении позволяет значительно повысить производительность труда и максимально автоматизировать производственный цикл изготовления плоских секций.

Высокопроизводительная электрогазовая сварка по щелевой разделке до настоящего времени является непревзойденной при сварке пазовых швов конструкций из высокопрочных сталей. Приведенная технология обеспечивает возможность сварки высокопрочных сталей без предварительного подогрева низколегированными проволоками, высокие качество металла сварных соединений и производительность процесса.

В период сотрудничества ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» и ИЭС им. Е. О. Патона применялся единый подход к разработкам технологий металлургии и сварки. Целью разработок являлось не только создание новых материалов, но и обеспечение высокой эксплуатационной надежности создаваемых из этих материалов конструкций. Поставленная цель требует решения трех задач: разработки научно обоснованных требований к материалам, их всесторонней сертификации, а также работ, направленных на «подгонку» конструкции к материалу. Для решения первой и третьей задач необходима разработка расчетных методов оценки прочности и ресурса, из которых должны вытекать как обоснования требований к материалу, так и обоснования требований к конструкции сварных узлов.

Для обеспечения надежности конструкций, работающих в арктических условиях, актуальна разработка методики оценки сопротивления хрупкому разрушению. Ее задачей является не только определение требований к хладостойкости металла сварных соединений, но и к эффективности и объемам неразрушающих методов контроля. Именно такую «обратную» задачу пришлось решать, оценивая возможность эксплуатации в арктических условиях конструкции, изготовленной для более высоких расчетных температур.



Рис. 2. Технологическая линия для производства агломерированных флюсов

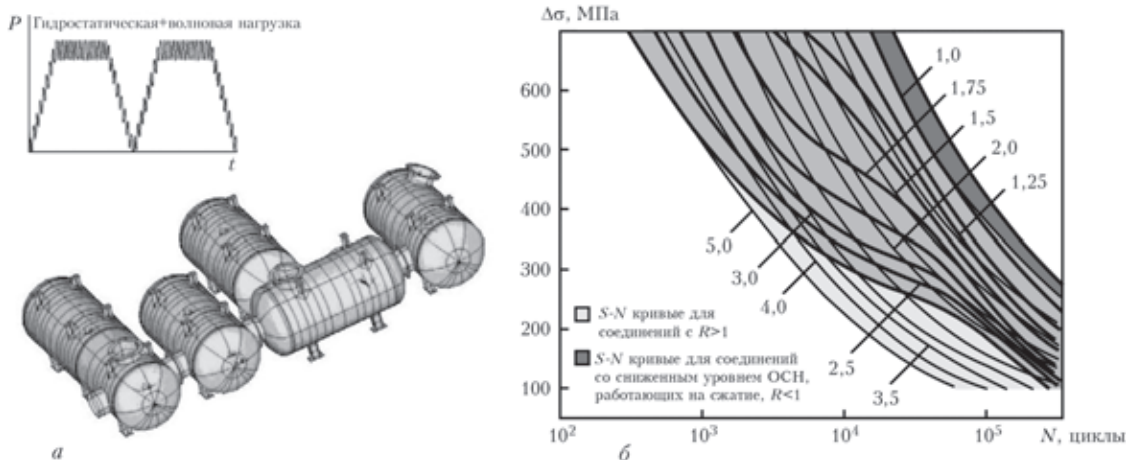


Рис. 3. Расчетные оценки для выбора конструкции узлов барокомплекса: а — система барокамер; б — расчетные кривые допускаемых усталостных повреждений



Рис. 4. Стенд для ресурсных испытаний элементов труб длиной до 6 м

Развитие методов оценки циклического ресурса сварных конструкций также берет свое начало из совместных работ с ИЭС им. Е. О. Патона — исследовалось влияние двухчастотного нагружения на усталостную прочность конструкций. Пример подобной решаемой в настоящее время задачи — с помощью расчетных оценок необходимо выбрать конструкцию узлов барокомплекса, устанавливаемого на палубе судна (рис. 3). Здесь к малоцикловым нагрузкам от изменений внутреннего давления в барокамерах добавляются нагрузки второй частоты, связанные с волновыми нагрузками на палубу.

Новые задачи, связанные со строительством трубопроводов высокой надежности в арктических регионах, требуют и совершенствования методик сертификационных испытаний металла. Для контроля энергоемкости разрушения металла магистральных газопроводов освоены методики определения работы пластического деформирования при распространении трещины при динамических испытаниях на уникальном по энергоемкости вертикальном копре 60 кДж, показана необходимость проведения испытаний на трещиностойкость металла сварных соединений при различных схемах нагружения, предложены методы контроля нового параметра — критического угла раскрытия трещины (СТОА).

Для исследования ресурса новой трубной продукции создан стенд (рис. 4), позволяющий имитировать реальный спектр нагружения труб в составе газо- и нефтепроводов. Результаты полномасштабных испытаний подтверждают необходимость их использования в ответственных конструкциях — комплексная проверка всей технологической цепочки производства позволяет выявить «слабые места», которые не отслеживаются при испытаниях стандартных образцов.

Совместно разработанные сварочные материалы, технологические процессы и методики оценки прочности позволяют изготавливать металлоконструкции с гарантированно высокими эксплуатационными характеристиками (от районов крайнего Севера до высокоагрессивных условий тропических широт).

Одним из дальнейших направлений кардинального повышения потребительских качеств материалов являются разрабатываемые в ИЭС им. Е. О. Патона нанотехнологии и наноматериалы, а также использование инжиниринга поверхности. Разработаны технологии испарительной конденсации (магнетронное, ионно-плазменное и атомно-ионное распыление) с управляемым потоком плазмы, сверхзвуковое «холодное» газодинамическое и микроплазменное напыление, электролитическое модифицирование наноструктурированной поверхности, лазерное прототипирование нанопозиционных порошков, контролируемая кристаллизация из аморфного состояния.

Дальнейшее развитие корпусных материалов будет происходить за счет синергетического эффекта на основе новых научных знаний физики прочности, пластичности, материаловедения, физико-химических процессов сварки и нанотехнологий. Это путь перспективного сотрудничества.

Поступила в редакцию 12.04.2013