

Конструкционные материалы — важный элемент надежности и экологической безопасности инфраструктуры Арктики

И. В. Горынин, академик

ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»»

Рассмотрены новые конструкционные материалы, обеспечивающие надежность и экологическую безопасность морских арктических конструкций и магистралей для транспортировки углеводородов. Показана высокая эффективность сочетания фундаментальных исследований с прикладными. Новые технологии и соответствующее переоснащение отечественных металлургических предприятий обеспечили отказ от импортных поставок и изготовление всей линейки арктических конструкций только из отечественных материалов. Рассмотрены дальнейшие пути создания перспективных материалов для Арктики.

Ключевые слова: Арктика, запасы и ресурсы, суда-газовозы, нефтегазодобывающие платформы, промысловые и магистральные трубопроводы, хладостойкие материалы, надежность сварных конструкций.

Арктика чрезвычайно богата практически всеми видами природных ресурсов. Такие потенциальные возможности должны эффективно реализовываться, обеспечивая достойное качество жизни населения и экономическое развитие общества и государства. Поэтому не случайно была определена тема «Научно-технические проблемы освоения Арктики» для Общего собрания Российской академии наук 16 декабря 2014 г., в ходе которого было заслушано 12 докладов, широко охватывающих все проблемы начиная с международного сотрудничества в Арктике и до арктической медицины.

В пределах материковой части Арктики располагаются уникальные запасы и прогнозные ресурсы медно-никелевых руд, олова, платиноидов, агрохимических руд, редких металлов и редкоземельных элементов, крупные запасы золота, алмазов, вольфрама, ртути, черных металлов и оптического сырья [1]. Не следует забывать и о многообразных фауне и флоре, не имеющих аналогов в мире.

При численности населения менее 2,5% общего числа жителей Земли запасы энергоресурсов

Российской Федерации составляют 30% суммарных общемировых запасов. Значительная часть запасов России находится на шельфовых месторождениях Арктики, где сосредоточено около 13% мировых запасов нефти и до 30% газоконденсатных месторождений. На рис. 1 приведены наиболее крупные месторождения углеводородов. Изучением проблем добычи полезных ископаемых и состояния экосистемы Арктики занимаются как многие научные организации РАН, так и отраслевые научно-производственные организации других ведомств [2]. Доля России в мировых стратегических запасах энергоресурсов Арктики составляет до 60% [3]. Естественно, что проблема добычи полезных ископаемых должна решаться без повреждения хрупкой арктической экосистемы, от целостности которой зависит температурный и водный баланс планеты.

Для освоения нефтегазовых месторождений континентального шельфа России требуется большой ряд морских и прибрежных сооружений, решающих две основные задачи:

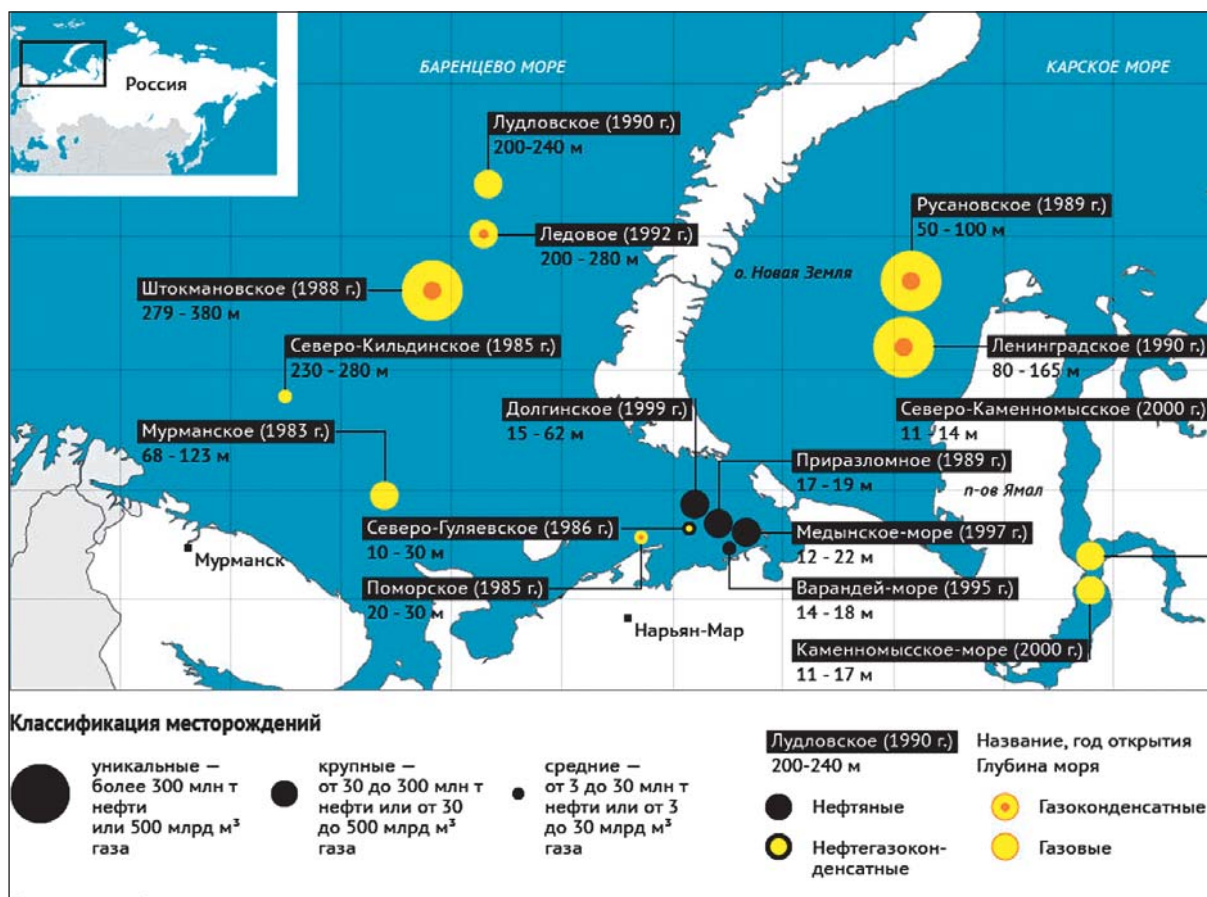


Рис. 1. Углеводородный потенциал российского арктического шельфа (© 2011, РИА Новости, Инфографика. Денис Крюков)

- обеспечение круглогодичной эксплуатации Северного морского пути за счет создания современных танкеров, судов-газовозов сжиженного природного газа (СПГ) и мощных ледоколов;
 - безопасная и эффективная добыча и транспортировка углеводородов нефтегазодобывающими платформами, промысловыми и магистральными трубопроводами, обслуживаемыми судами, глубоководными необитаемыми хранилищами и комплексами.
- Основным элементом транспортной инфраструктуры, несомненно, являются мощные атомные ледоколы, обеспечивающие надежную круглогодичную эксплуатацию Северного морского пути. Планируется строительство в течение 30 лет более 150 судов арктического плавания, 10 атомных ледоколов, 30 ледовых платформ для добычи углеводородов.
- Проблемы экологической безопасности Арктики и в первую очередь ее шельфа тесно связаны с обеспечением высокой эксплуатационной надежности морских крупномасштабных сварных конструкций. Условия эксплуатации этих конструкций крайне тяжелые:
- температура эксплуатации до -55°C ;
 - цикличность нагрузки конструкции:
 - от ледовой нагрузки — до 10^7 циклов в год;
 - от ветроволновой нагрузки — 10^8 циклов в год;
 - длительное коррозионное воздействие и коррозионно-эрозийный износ в условиях сезонного повышения солености льда;
 - чрезвычайно высокий объем сварных соединений: например, на морской ледостойкой платформе «Приразломная» протяженность сварных швов достигает 10 км.
- С позиций науки о материалах создание конструкционных материалов, обеспечивающих высокую надежность при экстремально жестких условиях эксплуатации, является серьезной задачей. Поэтому оно шло поэтапно и было тесно связано с развитием конструирования и строительством объектов морской арктической техники.
- Лидером работ по созданию хладостойких материалов с 50-х годов прошлого столетия стал государственный научный центр ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (ЦНИИ КМ «Прометей»). В своей работе этот творческий коллектив

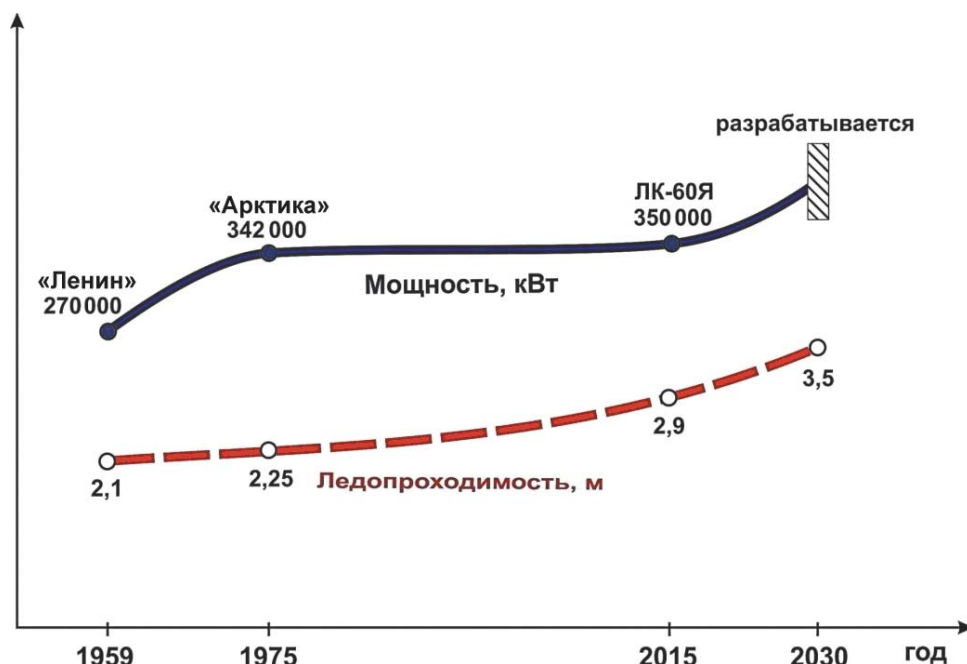


Рис. 2. Изменение мощности и ледопроежимости атомного ледокольного флота России

основывался на теориях научных школ, развитых в институте при создании свариваемых высокопрочных конструкционных сталей:

- на теории легирования улучшаемой высокопрочной свариваемой стали, обеспечивающей оптимальную структуру с высокой сопротивляемостью хрупким разрушениям;
- на теории вязко-хрупких разрушений сварных корпусных сталей, которая развилась в современную линейную механику разрушения материалов;
- на создании сварочных материалов и процессов для сварки высокопрочных корпусных сталей, обеспечивающих строительство объектов арктической морской техники.

Характерной чертой стиля работы научной школы института является тесное сочетание фундаментальных исследований с прикладными, что обеспечивает высокую результативность исследований.

Практически все арктические конструкции изготовлены из конструкционных материалов, разработанных институтом. Это серия высокопрочных свариваемых сталей для судов ледового плавания, ледоколов, морских конструкций для разведки и добычи углеводородов, многие из которых нашли применение в проектах плавучих буровых установок типа «Шельф», «Каспий», в корпусах атомных ледоколов «50 лет Победы», «Таймыр» и «Вайгач» (рис. 2). Для решения проблемы усиленного коррозионно-эрозионного износа в условиях льдов повышенной солености разработаны специальные

двуслойные (плакированные) стали, не имевшие мировых аналогов [4].

На перспективу до 2030 г. оцененный спрос на конструкционные стали для арктических конструкций составляет более 9,5 млн т хладостойких свариваемых сталей [3; 13]. Если учесть планируемые объемы строительства морских конструкций, особенно нефтегазодобывающих платформ, необходимым требованием в современных условиях является снижение стоимости конструкционных материалов. При этом комплекс физических, химических и механических свойств должен сохраняться на требуемом уровне.

В отличие от ряда машиностроительных отраслей для применения в арктических морских конструкциях были предложены материалы только отечественного производства.

Разработанные принципы впервые для практики российских предприятий легли в основу массового внедрения инновационных технологий термомеханической обработки в 2004—2010 гг. Это обеспечило разработку нового поколения низкоуглеродистых хладостойких судостроительных сталей взамен традиционных дорогостоящих технологий.

Для создания новых конструкционных материалов был организован консорциум, в состав которого при лидирующей роли ЦНИИ КМ «Прометей» входили основные заводы-изготовители: Череповецкий металлургический комбинат ПАО «Северсталь», ООО «ОМЗ-Спецсталь», научно-исследовательские

Таблица 1. Основные характеристики хладостойких корпусных сталей

Марка стали	Толщина, мм	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, не менее	Работа удара при испытании ударным изгибом KV ⁻⁶⁰ , Дж, не менее
FW	10—70	235	40
F32W		315	50
F36W		355	50
F40W		390	50
F460W		460	80
F500W		500	80
F620W		620	80
F690W		690	80
F500W ^{arc40}	10—50	500	80
F620W ^{arc40}		620	80
F690W ^{arc40}		690	80

Примечание. Обозначения в марке стали F500W^{arc40}: F — категория хладостойкости, работа удара при -60°C; 500 — гарантированный предел текучести, МПа, не менее; W — гарантия свариваемости и отсутствия разрушений в направлениях толщины и удлинения не менее 35% при испытании образцов в этом направлении; ^{arc40} — класс применения в арктических конструкциях (аналогично и для прочих марок).

и проектные организации, в том числе ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина», ФГБН «Институт металлургии и металловедения им. А. А. Байкова РАН», Российский морской регистр судоходства и др. После введения в эксплуатацию на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» нового автоматизированного стана «5000» в 2009 г. серия новых хладостойких сталей (табл. 1) была освоена и на этом комбинате.

В результате выполненных работ выпущен новый Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52927-2008 «Прокат стальной для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности» и внедрены в отечественной промышленности новые технологии производства высококачественных конструкционных сталей.

Все это позволило развернуть на судостроительных заводах широкое строительство морских арктических конструкций и магистральных трубопроводов.

Крупнейшим объектом внедрения новых сталей и сварочных материалов стала морская ледостойкая платформа для эксплуатации на нефтяном месторождении Приразломное в Печорском море — циклопических размеров сварная конструкция общей массой чуть менее 120 тыс. т с суммарной протяженностью сварных швов около

10 тыс. м. Высокая устойчивость новых сталей при технологических переделах (гибке, правке, резке и сварке) позволила получить высококачественную конструкцию, которая в соответствии с оценкой сопротивлению воздействиям низких температур, морской воды, ветроволновым и циклическим нагрузкам, несомненно, обеспечит ее надежную эксплуатацию и экологическую безопасность на весь срок службы (более 30 лет). В 2014 г. приступили к эксплуатации платформы и транспортировке добытых там углеводородов.

На ОАО «Адмиралтейские верфи» построено и передано в эксплуатацию научно-экспедиционное судно «Академик Трёшников». Новый флагман научно-экспедиционного флота предназначен для обеспечения деятельности Российской антарктической экспедиции. Судно сочетает функции ледокола, танкера-сухогруза, пассажирского судна и научно-исследовательской базы, имеет усиленный ледовый корпус.

В октябре-декабре 2012 г. на Выборгском судостроительном заводе заложены три ледокола проекта 21900М, строительство которых будет осуществляться в кооперации с компанией «ArctechHelsinkiShipyard». Ледоколы будут способны преодолевать льды толщиной до 1,5 м и предназначены для проводки и буксировки крупнотоннажных судов, тушения пожаров на плавучих объектах, помощи судам, терпящим бедствие, перевозки грузов.



Рис. 3. Объекты внедрения хладостойких сталей: а – морская ледостойкая платформа «Приразломная», б – самоподъемная полупогружная буровая установка «Арктическая»

На этом же заводе в декабре 2012 г. принято в эксплуатацию головное судно серии многофункциональных судов снабжения добывающих платформ «Витус Беринг». По данным пресс-службы ОАО «Совкомфлот», суда серии «Витус Беринг» на сегодня одни из лучших в мире в своем классе. Конструкция судов и их оборудование позволяют осуществлять круглогодичную доставку на нефтяные добывающие платформы персонала, необходимого снабжения и расходных материалов.

В августе 2012 г. принято решение о строительстве на Балтийском заводе серии из трех самых больших и мощных атомных ледоколов в мире ЛК-60 проекта 22220 водоизмещением 33,54 тыс. т каждый. Такие ледоколы будут способны в одиночку проводить в Арктике танкеры водоизмещением до 70 тыс. т и впервые смогут преодолевать с постоянной скоростью трехметровые льды.

К настоящему времени отечественная металлургическая промышленность полностью обеспечивает производство хладостойкого листового проката для строительства буровых платформ, самоподъемных буровых установок и ряда инфраструктурных объектов Арктики (рис. 3).

Одним из достижений научных, проектных и промышленных предприятий России является существенное повышение надежности арктических магистральных систем для транспортировки углеводородов [5—10]. Основным способствующим этому научным решением является создание

наноструктурированных высококачественных трубных сталей категорий прочности К60, К65, К70, Х70, Х80, Х90, Х100 для труб диаметром до 1420 мм с толщиной стенки от 15 до 40 мм с высокой коррозионной и механической прочностью.

Материалы предыдущих поколений, как отечественные, так и импортные, даже при эксплуатации в условиях средней полосы России имели большую аварийность. Именно поэтому новое поколение наноструктурированных материалов [11; 12] сразу нашло большое практическое применение. Создана и начала эксплуатироваться система газопроводов «Бованенково — Ухта», нефтепроводы «Восточная Сибирь — Тихий океан», «Сахалин — Хабаровск — Владивосток» и ряд других трубопроводных систем с высокой степенью надежности.

Таким образом, применение нового поколения материалов, в том числе и наноструктурированных, решило две задачи:

- резкого повышения надежности и экологической безопасности морских арктических конструкций;
- отказа от импорта высококачественных конструкционных сталей для сварных морских арктических конструкций.

Признанием значимости этих разработок является ряд государственных премий и научных наград участникам этих работ.

Освоение Арктики как хозяйственного региона с особыми климатическими условиями постепенно набирает силу. Безусловно, будет расти

и потребность в новых видах морской техники и, следовательно, новых конструкционных материалах.

Основными направлениями исследований по созданию научно-технического задела будет широкое использование нанотехнологий в конструкционных машиностроительных материалах. Развиваемые автоматизированные глубоководные комплексы по добыче углеводородов определяют также использование титановых сплавов, но значительно более дешевых, чем существующие. Все более широкое применение получают и полимерные композиционные материалы.

Литература

1. Природные ресурсы Арктики: Справка // РИА Новости. — 2010. — 15 апр.
2. Максимов В. М., Тупышев М. К., Пронюшкина С. М., Кульпин Л. Г. Некоторые проблемы экологической и промышленной безопасности природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 60—67.
3. Аналитические материалы ОАО «ОМК» и ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» к совещанию по взаимодействию предприятий нефтегазового комплекса со смежными отраслями промышленности при председателе Комитета Государственной Думы ФС РФ по энергетике, 20 ноября 2013 г.
4. По пути созидания: В 2 т. / Под ред. И. В. Горынина. — СПб.: Изд. ГНЦ РФ ЦНИИ КМ «Прометей», 1999.
5. Schwinn V., Schuetz W., Fluess P., Bauer J. Prospects and state of the art of TMCP steel plates for structural and linepipe applications // Proceedings of the International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials THERMEC 2006 (Vancouver, Canada, July 4—8 2006). — [S. l.]: Trans Tech Publications, Switzerland, 2007. — P. 4726—4731. — (Materials Science Forum; Vols. 539—543).
6. Asahi H., Hara T., Tsuru E. et al. The metallurgical design of high-strength steels, and development of X120 UOE linepipe // 4-th International Conference on Pipeline Technology (Ostend, Belgium, 9—13 May 2004). — Vol. 2. — [S. l.], 2004. — P. 851—871.
7. Хайстеркамп Ф., Хулка К., Матросов Ю. И. и др. Ниобийсодержащие низколегированные стали. — М.: СП Интермет Инжиниринг, 1999. — 94 с.
8. Луценко А. Н., Малышевский В. А., Морозов Ю. Д. и др. Технологические принципы формирования структуры и свойств штрипсовой стали категории прочности Х70-Х80 // Сб. докл. междунар. конф. «Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов» (г. Москва, 12—13 февраля 2008 г., ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина»). — М., 2008. — С. 48—55.
9. Шига С., Аманок К., Хатомура Т. и др. Мелкозернистая феррито-бейнитная сталь классов Х70 и Х80 для газопроводов, эксплуатируемых при низких температурах // Стали для газопроводных труб и фитингов: Тр. конф. / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1985. — С. 140—152.
10. Пумпянский Д. А., Пышминцев И. Ю., Фарбер В. М. Методы упрочнения трубных сталей // Сталь. — 2005. — № 7. — С. 67—74.
11. Горынин И. В., Рыбин В. В., Малышевский В. А. и др. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях // Вопр. материаловедения. — 2008. — № 2 (54). — С. 7—19.
12. Горынин И. В., Хлусова Е. И. Наноструктурированные стали для освоения месторождений шельфа Северного Ледовитого океана // Вестн. РАН. — 2010. — № 12. — С. 1069—1075.
13. Алексахин А. А., Половинкин В. Н. Современное состояние и перспективы развития ледового судостроения и судоходства // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1 (17). — С. 18—30.