



# **СОВРЕМЕННЫЕ ХЛАДОСТОЙКИЕ СТАЛИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО СУДОСТРОЕНИЯ**

**Докладчик - СЫЧ ОЛЬГА ВАСИЛЬЕВНА,  
доктор технических наук, начальник сектора**



21 мая 2025 г.

Проблемы экологической безопасности Арктики тесно связаны с обеспечением высокой эксплуатационной надежности крупномасштабных сварных конструкций:

- температура эксплуатации до  $-40\dots-50^{\circ}\text{C}$ ;
- цикличность нагрузки конструкций (от ледовой нагрузки – до  $10^7$  циклов в год, от ветроволновой нагрузки – до  $10^8$  в год);
- длительное коррозионное воздействие и коррозионно-эрозионный износ;
- чрезвычайно большой объем сварных соединений.

Создание хладостойких материалов, обеспечивающих высокую надежность в экстремальных условиях эксплуатации, является серьезной задачей, оно шло поэтапно и было тесно связано с развитием конструирования и строительством объектов сложной морской техники арктического применения.

**В КОНЦЕ 1990-х гг. БЫЛО НАЧАТО ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ:**



«Приразломная» –  $T_d = -45^{\circ}\text{C}$



«Арктическая» –  $T_d = -35^{\circ}\text{C}$

Основными материалами для строительства арктических конструкций являются низкоуглеродистые свариваемые хладостойкие стали повышенной и высокой прочности, особенностью которых является **наличие вязко-хрупкого температурного перехода**.

Это обуславливает потенциальную опасность хрупких разрушений при снижении температуры, которая должна быть полностью исключена из-за тяжелых экономических и экологических последствий.

## Хрупкие разрушения сложных сварных конструкций :



Хрупкое разрушение палубы танкера «Индига» при ледовой проводке **при -24°C**



Хрупкое разрушение сварной конструкции из импортной стали S690QL после сварки **на стапеле**

## **ЛИСТОВОЙ ПРОКАТ ИЗ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ОБЛАДАЕТ УНИКАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ:**

- необходимая прочность и пластичность;
- высокая хладостойкость;
- плотное волокнистое строение излома технологических проб;
- изотропность свойств в различных направлениях;
- сопротивление хрупким разрушениям при статических, циклических и динамических нагружениях;
- хорошая свариваемость, в том числе в монтажных условиях;
- коррозионная стойкость и коррозионно-механическая прочность в морской воде;
- технологичность при изготовлении конструкций (сварке, гибке, штамповке)

**ОСНОВНОЕ ТРЕБОВАНИЕ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА –  
ВЫСОКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ХРУПКИМ РАЗРУШЕНИЯМ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

# «БАЗОВЫЕ» НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ ХЛАДОСТОЙКИЕ СТАЛИ КАТЕГОРИЙ D, E, F



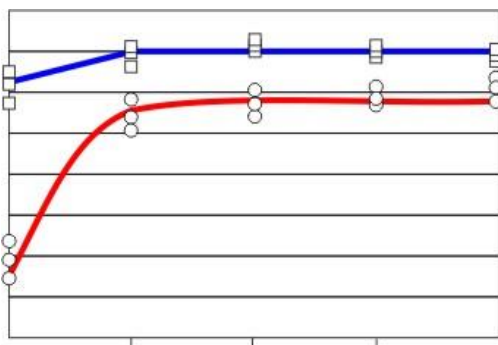
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»



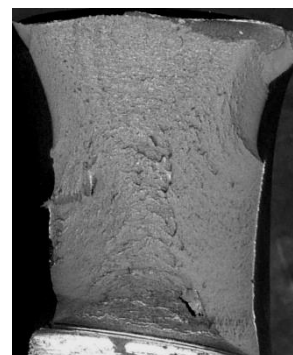
Марка стали	Максимальная толщина, мм	Композиция легирования	Предел текучести, МПа	Работа удара, KV, Дж	Относительное сужение в направлении толщины $Z_z$ , %	Параметр трещиностойкости при сварке, $R_{cm}$ , %	Содержание серы, %
			Не менее			Не более	
(D, E) F	70	C-Mn-V-Nb	235	40	35	Сэкв ≤ 0,34	0,005
D, E) F32			315	50		Сэкв ≤ 0,36	
(D, E) F36	60	C-Mn-Ni-(Cu)-V-Nb	355	50		0,22	
(D, E) F40			390	50		0,22	
(D, E) F420	50	C-Mn-Ni-Cu-(Cr)-V-Nb	420	80		0,22	
(D, E) F460			460	80		0,22	
(D, E) F500	70	C-Cr-Ni-Cu-Mo-V-(Nb)	500	80		0,24	

Примечание: (D, E) F500 – D, E, F (категория **хладостойкости**, работа удара при **-20, -40 -60 °C** соответственно), 500 (гарантированный предел текучести, МПа, не менее)

## ГАРАНТИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ «БАЗОВЫХ» ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ



Работа удара для соответствующей категории хладостойкости:  
D – минус 20 °C,  
E – минус 40 °C,  
F – минус 60 °C

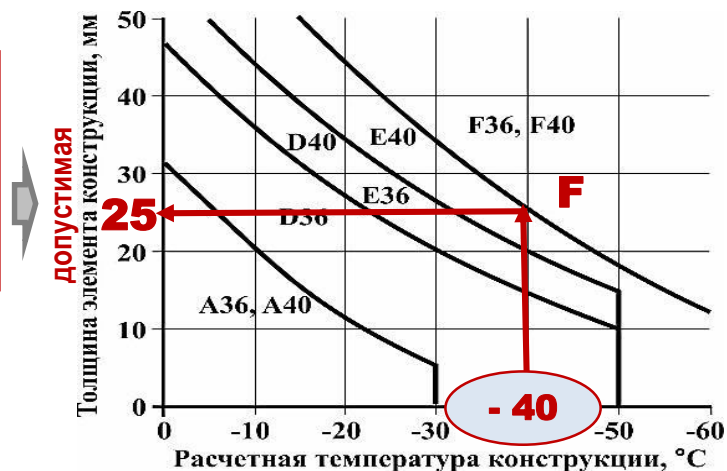


Вязкий вид излома полнотолщинных проб

НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТОК БЫЛ СОЗДАН **НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ** НА ПОСТАВКУ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ - **ГОСТ Р 52927-2008**

В последние годы **возросла потребность в новых видах специализированной морской техники арктического применения**: универсальных атомных и дизель-электрических ледоколов, судов ледового плавания, ледокольных судов обеспечения, модернизированных атомных плавучих энергоблоков, многофункциональных научно-экспедиционных судов ледового класса, ледостойких морских стационарных и самодвижущихся исследовательских платформ, морских ледостойких терминалов и платформ.

Хладостойкие судостроительные стали **категорий D, E, F** по ГОСТ Р 52927-2008, обеспечивают гарантированное отсутствие хрупких разрушений по результатам испытаний на ударный изгиб (KV) при температуре -20, -40 и -60 °C **в ограниченной области толщин**.



## ЛЕДОКОЛ «ЛИДЕР»



Для строительства потребовались стали с гарантией отсутствия хрупких разрушений при температуре **до минус 50 °C толщиной до 50...70 мм**

Возникла необходимость в создании хладостойких судостроительных сталей, которые позволили бы их применять **без ограничений** для любых конструктивных элементов до минимальной (расчетной) температуры материала  $T_D$ . Такие стали с гарантированными характеристиками работоспособности получили название **стали с индексом «Arc»**.

В 2012 г. требования к ним были внесены в «Правила...» Российского морского регистра судоходства, а позднее в Национальный стандарт РФ - **ГОСТ Р 52927-2015**.

# ИДЕОЛОГИЯ СИСТЕМЫ НАЗНАЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ХЛАДОСТОЙКИМ СТАЛЯМ С ИНДЕКСОМ «ARC»

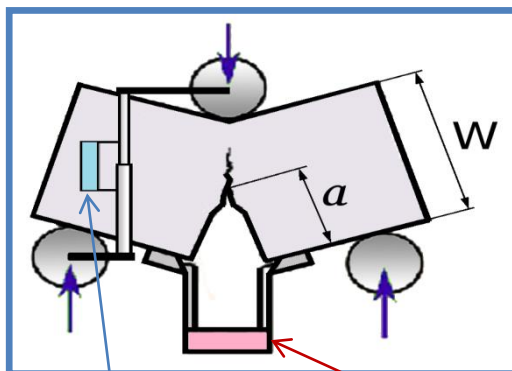


НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»



**Для гарантированного отсутствия хрупких разрушений** в стали с индексом «Arc» необходимо одновременное выполнение требований к следующим характеристикам работоспособности:

- температуре вязко-хрупкого перехода  $T_{кб}$ ;
- температуре нулевой пластичности **NDT**;
- критическому раскрытию вершины трещины  $(CTOD)_{\text{материала}} \geq (CTOD)_{\text{по расчету}}$  для основного металла и зоны термического влияния сварных соединений, **определяемых на крупногабаритных (полнотолщинных) пробах.**



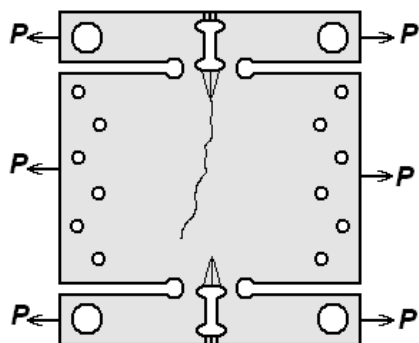
Датчик перемещений ( $\Delta$ )

Датчик раскрытия трещины ( $V$ )

## СТУПЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ 1:

**Предотвращение старта хрупкого разрушения от технологических дефектов и эксплуатационных повреждений**  
 $(CTOD)_{\text{материал}} \geq (CTOD)_{\text{расчет}}$

Для основного металла и зоны термического влияния сварных соединений



## СТУПЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ 2:

**Обеспечение торможения магистрального хрупкого разрушения основным металлом**

$$T_{\text{arrest}} \leq T_{\text{design}}$$

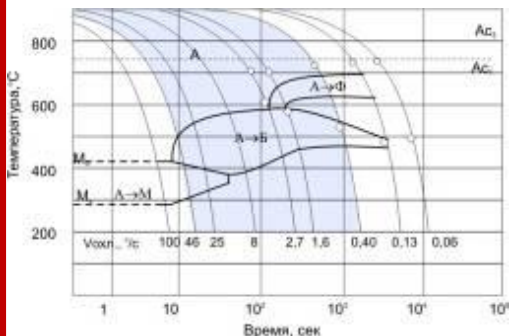
Только для основного металла

# НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ АРКТИКИ

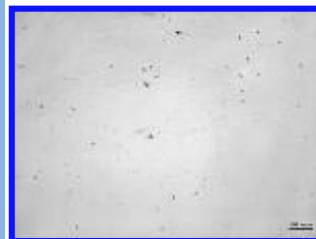
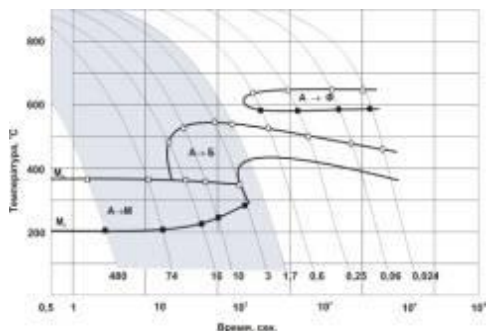
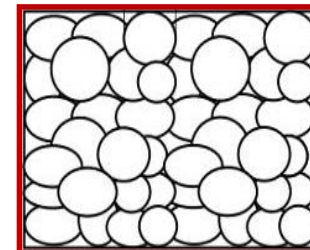
1. **ВЫБОР ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА** стали с широкой областью формирования **близких по морфологическому типу структур**

2. **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА** (по неметаллическим включениям, вредным примесям, макроструктуре) за счет применения эффективных технологий выплавки, внепечной обработки и разливки стали

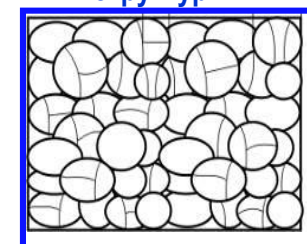
3. **РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**



Измельчение зеренной структуры



Измельчение зеренной и субзеренной структуры



## ВВЕДЕНИЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОКАТНОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

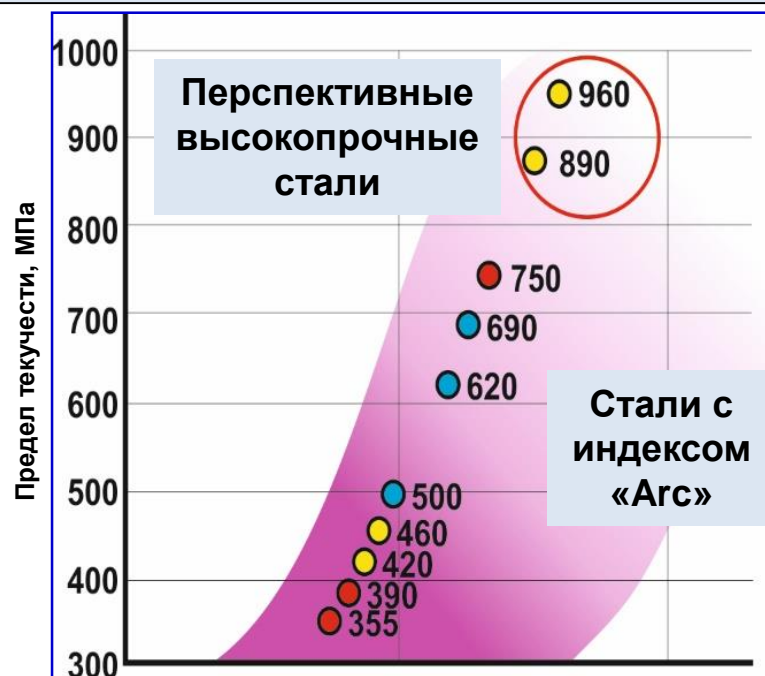
ОСНОВНЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ: ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»; ПАО «ММК»; АО «АЭМ-ТЕХНОЛОГИИ» «АЭМ-СПЕЦСТАЛЬ» ПО КООПЕРАЦИИ С ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»; АО «ВМЗ»; АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»



ПРОИЗВОДИТЕЛИ «ARC»-СТАЛЕЙ С ДЕЙСТВУЮЩИМ СВИДЕТЕЛЬСТВОМ О ПРИЗНАНИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ, ВЫДАННЫМ РОССИЙСКИМ МОРСКИМ РЕГИСТРОМ СУДОХОДСТВА:  
ПАО «ММК», ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»



РАЗРАБОТКА, ОСВОЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ШИРОКОГО СПЕКТРА ПРОЧНОСТИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ



# СОВРЕМЕННЫЕ ХЛАДОСТОЙКИЕ СТАЛИ, В ТОМ ЧИСЛЕ С ИНДЕКСОМ «ARC», ОСВОЕННЫЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ФГУП «ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ»



Уровень прочности	Максимальная толщина проката по ГОСТ Р 52927-2023, мм	Категория хладостойкости	Максимальная освоенная толщина проката, мм
315	D, E (+Z35) – 100, F – 70	D, E (+Z35), F	70
355	D, E (+Z35) – 100, F – 70	D, E(+Z35), F	100
	50	Arc	50
390	D, E (+Z35) – 100, F – 70	D, E(+Z35), F	100
	50	Arc	50
420	D, E (+Z35) – 100, F – 70	D, E(+Z35), F	60
	100	D, E(+Z35), F	100
	50	Arc	50
460	D, E (+Z35) – 100, F – 70	D, E(+Z35), F	60
	100	D, E(+Z35), F	100
	50	Arc	50
500	D, E (+Z35) – 100, F – 80, Arc - 70	D, E(+Z35), F, Arc	70
620	D, E (+Z35), F – 70, Arc - 50	D, E(+Z35), F, Arc	60
690	D, E (+Z35) - 70, F, Arc - 50	D, E(+Z35), F, Arc	50
750	40	D, E(+Z35)	40
890	40	D, E(+Z35)	40
960	40		40

РАЗРАБОТАННЫЕ СТАЛИ ВНЕСЕНЫ В НОВУЮ РЕДАКЦИЮ ГОСТ Р 52927-2023

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА ПОЗВОЛИЛО ОБЕСПЕЧИТЬ СТРОИТЕЛЬСТВО СОВРЕМЕННОЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ АРКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

АТОМНЫЕ ЛЕДОКОЛЫ ПР. 22220



АТОМНЫЙ ЛЕДОКОЛ «ЛИДЕР»



Стали с гарантированной работоспособностью используются для строительства серии крупнейших в мире атомных ледоколов проекта 22220, самого мощного в мире ледокола «Лидер», модернизированного атомного плавучего энергоблока проекта 20871, судна атомно-технологического обслуживания проекта 22770

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ПЛАВУЧИЙ ЭНЕРГОБЛОК (ПР. 20871)



СУДНО АТОМНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ (ПР. 22770)



**ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА РАЗРАБОТАННЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ  
ПОЗВОЛЯЮТ ОБЕСПЕЧИТЬ СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ  
ПОТРЕБНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СЛОЖНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**



**Создание новых сталей с индексом «Arc» является огромным прорывом в развитии хладостойких материалов для экстремальных условий эксплуатации.**

**В настоящее время российская металлургическая промышленность полностью способна обеспечить производство и поставки хладостойкого листового проката улучшенного качества для строительства современной специализированной морской техники, а также ряда инфраструктурных объектов Арктики.**

**Применение новых «Arc»-сталей в различных отраслях промышленности будет способствовать повышению конкурентоспособности отечественной металлопродукции.**



# Спасибо за внимание

Российская Федерация, 191015,  
Санкт-Петербург,  
ул. Шпалерная, д. 49  
Тел.: (812) 274-37-96  
Факс: (812) 710-37-56  
E-mail: [mail@crism.ru](mailto:mail@crism.ru)  
[www.crism-prometey.ru](http://www.crism-prometey.ru)

