

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Крюков Вадим Николаевич
Должность: Проректор по образовательной деятельности и молодежной политике
Дата подписания: 23.07.2026 17:48:31
Уникальный программный ключ:
1b0adb7fd710f6a0705d90c58682bd0c5f2f25b2

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Запорожский государственный университет им. Н. М. Федоровского»
ЗГУ

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по дисциплине

«СПЕЦГЛАВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ»

Факультет: ГТФ

Направление подготовки: 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»

Направленность (профиль): «Металлургические машины и оборудование»

Уровень образования: бакалавриат

Кафедра «Металлургии, машин и оборудования»
наименование кафедры

Разработчик ФОС:

К.т.н., доцент

(должность, степень, ученое звание)

(подпись)

Е.В. Лаговская

(ФИО)

Оценочные материалы по дисциплине рассмотрены и одобрены на заседании кафедры, протокол № 11 от « 10 » 06 2026 г.

И.о. заведующего кафедрой к.т.н., доцент Лаговская Е.В.

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами образовательной программы

Таблица 1 – Компетенции и индикаторы их достижения

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения
УК-5: Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах	УК-5.1: Учитывает при профессиональном и социальном общении историческое наследие и социально-культурные традиции различных социальных групп, включая философские и этнические учения
ОПК-12: Способен обеспечивать повышение надежности технологических машин и оборудования на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации	ОПК-12.1: Обеспечивают и заданные показатели надежности на этапах проектирования

Таблица 2 – Паспорт фонда оценочных средств

Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Формируемая компетенция	Наименование оценочного средства	Показатели оценки
Особенности эксплуатации оборудования при низких температурах. Эксплуатации оборудования в агрессивных средах.	ОПК-5 ОПК-12	Список литературных источников по тематике, тестовые задания	Составление систематизированного списка использованных источников, решение теста
Механические свойства и методы механических испытаний при низких температурах. Физико-химические свойства металлов при низких температурах. Методы повышения конструкционной прочности хладостойких материалов	ОПК-5 ОПК-12	Список литературных источников по тематике, тестовые задания	Составление систематизированного списка использованных источников, решение теста
Хладноломкость материалов. Трещиностойкость и оценка несущей способности материалов	ОПК-5 ОПК-12	Список литературных источников по тематике, тестовые	Составление систематизированного списка использованных источников, решение теста

		задания	
Углеродистые и низколегированные хладостойкие стали для Севера и Сибири. Стали для работы при криогенных температурах. Коррозионностойкие сплавы	ОПК-5 ОПК-12	Список литературных источников по тематике, тестовые задания	Составление систематизированного списка использованных источников, решение теста
Зачет	ОПК-5 ОПК-12	Решение всех тестовых заданий по темам	Решение всех тестовых заданий по темам

2. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие процесс формирования компетенций

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, представлены в виде технологической карты дисциплины (таблица 3).

Таблица 3 – Технологическая карта

	Наименование оценочного средства	Сроки выполнения	Шкала оценивания	Критерии оценивания
<i>Промежуточная аттестация в 8 семестре в форме «Зачет»</i>				
	Тестовые задания	В течение обучения по дисциплине	от 0 до 5 баллов	Зачет/Незачет
ИТОГО:		-	___ баллов	-

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие процесс формирования компетенций в ходе освоения образовательной программы

УК-5 (восприятие межкультурного разнообразия общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах — применительно к развитию северных территорий, освоению Арктики, криогенным технологиям и экологической этике материалов).

Уровень 1. Базовый (проверка основных понятий) – 10 вопросов

1. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При освоении газовых месторождений полуострова Ямал коренные жители (ненцы) выразили обеспокоенность безопасностью трубопроводов, проложенных по тундре. Инженер объясняет, что трубы изготовлены из специальной хладостойкой стали. Какое исторически сложившееся свойство обычных сталей делает их опасными для использования на Севере без специального легирования?

А) Высокая теплопроводность

- Б) Склонность к хрупкому разрушению при отрицательных температурах (хладноломкость)
 В) Высокая плотность
 Г) Способность к намагничиванию

Ответ: Б.

Обоснование: В социально-историческом контексте освоения Сибири и Крайнего Севера одной из главных причин техногенных аварий (разрывы газопроводов, разрушения мостов и техники) была хладноломкость обычных углеродистых сталей. При понижении температуры металл переходит из вязкого состояния в хрупкое, что приводило к катастрофическим разрушениям, наносившим ущерб традиционному природопользованию коренных малочисленных народов. Учет этого явления — этическая обязанность инженера, работающего в Арктике.

2. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между историческим этапом развития материаловедения и социально-экономическим контекстом освоения холодных регионов:

Этап развития	Социально-исторический контекст
1. Массовое применение сталей типа Ст3 без контроля хладостойкости	А. Строительство заводов СПГ на Ямале и Сахалине (XXI век)
2. Введение обязательного контроля ударной вязкости KCV при -60°C	Б. Аварии танкеров типа «Либерти» и газопровода в Башкортостане
3. Разработка криогенных аустенитных сталей (12X18H10T)	В. Первые пятилетки, индустриализация без учета климатических рисков
4. Широкое внедрение 9% никелевой стали для резервуаров СПГ	Г. Космическая и криогенная гонка СССР и США (1960-70-е гг.)

Ответ: 1-В, 2-Б, 3-Г, 4-А.

3. Задание открытого типа с развернутым ответом

При проектировании мемориала погибшим в экспедициях по освоению Северного морского пути архитектор предложил использовать кортеновскую сталь (атмосферостойкую), которая покрывается слоем благородной ржавчины. Местные жители воспринимают ржавчину как признак разрушения и требуют заменить материал на нержавеющий. Объясните с этической и философской точки зрения, почему архитектор выбрал именно эту сталь, и как следует выстроить диалог с сообществом.

Ответ:

Архитектор руководствовался философией сохранения памяти через метафору «времени и стойкости». Кортеновская сталь под воздействием агрессивной среды (солёный туман, холод) формирует плотный слой патины, которая защищает металл от дальнейшего коррозионного разрушения, символизируя стойкость перед суровой природой. С точки зрения материаловедения, это не деградация, а создание защитного барьера.

Диалог с сообществом: Необходимо уважать культурное восприятие жителей. Инженеру следует доступно объяснить разницу между «разрушающей» (слоистой) ржавчиной и «защитной» патиной, используя аналогии с культурным опытом (например, патина на старинных медных предметах как признак долговечности). Возможно компромиссное решение — создание просветительской таблички с описанием механизма защиты металла.

4. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

В международном проекте «Восток-Запад» (стыковка европейской и азиатской газотранспортных систем) участвуют инженеры из Германии, Китая и России. Возник спор о методике испытаний трубной стали на трещиностойкость. Какие факторы межкультурной инженерной коммуникации нужно учесть для успешной реализации проекта?

1. Различие в национальных стандартах (DIN, GB, ГОСТ) на методы механических испытаний.
2. Разные философские подходы к безопасности: европейский ALARP (разумно низкий риск) против российского принципа абсолютного запаса.
3. Языковые барьеры в терминологии разрушения («brittle fracture» vs «хладноломкость»).
4. Необходимость использования только метрической системы единиц.
5. Разные климатические условия стран-участниц, влияющие на опыт эксплуатации.

Ответ: 1, 2, 3, 5.

Обоснование:

6. Национальные стандарты имеют разные методики (образцы, скорости нагружения), что требует гармонизации через ISO.
7. Разница в философии безопасности (Германия — статистический подход, РФ — нормативный с большими запасами) отражает историко-культурное различие школ инженерного мышления.
8. Терминологические несоответствия могут привести к неверному выбору марки стали (например, «хладостойкая» и «cryogenic» — разные диапазоны температур).
9. Опыт эксплуатации формирует предубеждения: китайские инженеры могут не учитывать эффект вибрации мерзлых грунтов, а российские — переоценивать риск лавинной коррозии во влажном климате.

5. Задание закрытого типа на установление последовательности

Расположите события в хронологической последовательности, отражающей эволюцию этического подхода к выбору материалов для северной инфраструктуры:

- А) Принятие Киотского протокола (учет углеродного следа металлургии)
- Б) Катастрофа танкеров «Либерти» (сварные суда разламывались в Атлантике)
- В) Внедрение концепции ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление) в добывающие компании
- Г) Массовое применение хладостойких микролегированных сталей для магистральных газопроводов (X70, X80)
- Д) Учет интересов коренных народов при экспертизе проектов в Арктике

Ответ: Б → Г → А → Д → В.

(Трагедии, технические решения, экологическая повестка, социальная ответственность, комплексный ESG).

6. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

В философском эссе об ответственности инженера приводится пример: легирование стали никелем повышает ее вязкость при -60°C , но добыча никеля в Норильске наносит колоссальный ущерб экосистеме тундры. Какая этическая дилемма здесь заложена?

- А) Технологическая (сложность выплавки).

Б) Экономическая (цена никеля на бирже).

В) Социально-экологическая (конфликт между безопасностью газопровода на Севере и здоровьем природы и людей в месте добычи легирующего элемента).

Г) Политическая (санкции на экспорт никеля).

Ответ: В.

Обоснование: Это классическая дилемма «единого блага». Хладостойкая сталь с никелем предотвращает разрывы трубопроводов на Ямале, но производство никеля вызывает кислотные дожди и вымирание лесов в Норильском промышленном районе. Инженер должен искать компромисс — либо разрабатывать альтернативные материалы без никеля, либо требовать экологически чистых технологий обогащения руды.

7. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между агрессивной средой эксплуатации металлургического оборудования и этическим риском для персонала и окружающей среды:

Агрессивная среда

Этический риск

1. Хлоридсодержащая
пластовая вода

А. Загрязнение грунтовых вод продуктами
коррозии (тяжелые металлы)

2. Сероводород (H₂S) в
нефтяном газе

Б. Риск внезапной хрупкой поломки и аварии с
человеческими жертвами

3. Атмосфера Крайнего Севера
(-50°C)

В. Выброс ядовитого газа при разгерметизации,
угроза жизням

4. Кислородсодержащая среда в
медицине

Г. Необходимость использования
биосовместимых коррозионностойких сплавов

Ответ: 1-А, 2-В, 3-Б, 4-Г.

8. Задание открытого типа с развернутым ответом

При проектировании научной станции в Антарктиде (международный проект) используется сталь 10ХСНД. Представитель азиатской делегации настаивает на замене на более дешевую местную сталь без испытаний на хладостойкость, мотивируя экономией бюджета. Сформулируйте аргументированный отказ от имени главного металловеда проекта, апеллируя к принципам глобальной инженерной этики и урокам истории.

Ответ:

Уважаемые коллеги, согласно международному кодексу инженерной этики (WFEO), первостепенная обязанность инженера — безопасность жизни людей и защита окружающей среды. Антарктида — уникальная международная территория, и любая авария здесь будет иметь политический и экологический резонанс.

Замена стали 10ХСНД, гарантированно обеспечивающей ударную вязкость $KCV > 40$ Дж/см² при -70°C, на сталь без подтвержденных испытаний недопустима. Уроки истории: разрушение сварных кораблей «Либерти» произошло именно из-за игнорирования климатического фактора. Экономия на материале не должна ставить под угрозу жизни полярников и репутацию стран-участниц. Мы можем рассмотреть альтернативы, но только после их квалификационных испытаний в аккредитованной лаборатории.

9. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

В якутском селе Оймякон (Полюс холода) выходит из строя техника из-за поломок стальных деталей. Местные жители, наблюдая это, формируют негативное отношение к «большой» промышленности. Какие просветительские и технические меры должен предложить молодой инженер для укрепления доверия?

1. Провести открытый семинар, где на простых опытах показать разницу между вязким и хрупким разрушением металла на морозе.
2. Игнорировать мнение жителей, так как техника соответствует ГОСТ.
3. Организовать поставку запчастей из низколегированных сталей с никелем, объяснив, почему это дороже, но долговечнее.
4. Предложить утеплять технику войлоком, не меняя материал.
5. Привлечь старшеклассников к проекту мониторинга температуры и ведения журнала отказов техники.

Ответ: 1, 3, 5.

Обоснование:

Межкультурная коммуникация требует уважения и просвещения.

6. Семинар снижает технофобию, показывая, что проблема в физике материалов, а не в злом умысле.
7. Поставка качественных материалов с объяснением выгоды (экономия на ремонтах) уважает право жителей на безопасный и эффективный труд.
8. Соучастие молодежи в научных наблюдениях формирует позитивный образ инженера и способствует сохранению кадров на Севере.

10. Задание закрытого типа на установление последовательности

Установите последовательность междисциплинарного анализа при выборе материала для скульптуры в общественном пространстве г. Норильска (агрессивная среда, морозы):

- А) Проведение общественных слушаний с жителями (эстетические предпочтения)
- Б) Лабораторные испытания образцов на коррозионную стойкость в солевом тумане
- В) Анализ философской концепции памятника (долговечность или запланированное старение)
- Г) Расчет ветровых и снеговых нагрузок по СП 20.13330
- Д) Итоговый выбор марки стали с учетом экологического следа ее производства

Ответ: В → Б → Г → А → Д.

(Смысл, физика среды, прочность, мнение людей, экология).

Уровень 2. Средний (анализ, расчёт, применение формул) – 10 вопросов

11. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При проектировании международного криогенного трубопровода для жидкого водорода ($t = -253^{\circ}\text{C}$) столкнулись позиции немецкой и корейской школ материаловедения. Немцы предлагают аустенитную сталь 316L, корейцы — высокомарганцовистую сталь. Какой физический параметр является общим критерием выбора для обеспечения безопасности?

- А) Предел прочности при $+20^{\circ}\text{C}$

Б) Относительное удлинение δ_5

В) Вязкость разрушения (K_{IC} или J-интеграл) при криогенной температуре

Г) Теплопроводность

Ответ: В.

Обоснование: В философии безопасности криогенных систем главным является предотвращение хрупкого, мгновенного разрушения без заметной пластической деформации. Параметры прочности (А) и пластичности (Б) при комнатной температуре не гарантируют отсутствие хладноломкости. Только вязкость разрушения K_{IC} (трещиностойкость) количественно оценивает способность металла сопротивляться развитию трещины при сверхнизких температурах, что и является предметом консенсуса всех инженерных школ.

12. Задание открытого типа с развернутым ответом

Для газопровода «Сила Сибири», пересекающего территории с вечной мерзлотой и зонами тектонических разломов, используется сталь класса прочности K65 (X80). Рассчитайте минимально допустимую работу удара KV при температуре эксплуатации -40°C , если нормативное требование для предотвращения лавинного разрушения по модели Баттелла (Battelle) требует, чтобы отношение $KV / \sigma_T \geq 0.5$ Дж/МПа, а предел текучести стали $\sigma_T = 555$ МПа.

Ответ:

Расчет: $KV_{\min} = 0.5 \cdot \sigma_T = 0.5 \text{ (Дж/МПа)} \cdot 555 \text{ (МПа)} = 277.5 \text{ Дж}$.

Философский аспект: Это требование, заложенное в СТО Газпром 2-4.1-713, отражает уроки аварии 1989 года под Уфой. Значение KV (~280 Дж на образцах Шарпи) является барьером, гарантирующим, что даже при наличии дефекта сварного шва и подвижках грунта (межкультурный фактор — уважение к сейсмической истории региона) трещина остановится, а не пробежит километры. Психоакустический эффект от такого взрыва стал частью исторической памяти народа, поэтому нормативы столь высоки.

13. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

Для международной арктической станции рассматриваются три материала: сталь 09Г2С, сталь 10ХСНД и алюминиевый сплав АМг5. Станция должна работать 25 лет без капитального ремонта. Какие факторы, помимо прочности, имеют решающее этическое значение при выборе?

1. Углеродный след производства (CO_2 на тонну металла).
2. Возможность утилизации (рециклинга) после вывода станции из эксплуатации.
3. Традиционные эстетические предпочтения дизайнеров.
4. Психологическое восприятие материала: алюминий не ржавеет и выглядит «чище» для экологов.
5. Наличие местной ремонтной базы (сварка алюминия сложнее).

Ответ: 1, 2, 5.

Обоснование:

Арктика — хрупкая экосистема. Этический выбор требует минимизации вмешательства:

6. Углеродный след алюминия (электролиз) высок, но низколегированная сталь также требует затрат. Выбор должен быть обоснован LCA-анализом (оценкой жизненного цикла).
7. Согласно принципам «голубой экономики» и международным соглашениям по Арктике, станция должна быть демонтирована без остатка. Сталь можно собрать магнитом, алюминий требует ручного труда.

8. В случае аварии ремонт должен быть выполнен силами персонала. Экзотические сплавы, требующие спецоборудования, неэтичны, так как подвергают людей риску в ожидании помощи.

14. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между методом механических испытаний при низких температурах и его значением для обеспечения социальной справедливости (безопасности для всех регионов):

Метод испытаний	Социальный смысл результата
1. Сериальные кривые ударной вязкости (KCV-T)	А. Защита от разрушения при землетрясении (циклическая вязкость)
2. Определение критической температуры хрупкости (Ткр)	Б. Равная безопасность трубопроводов в Якутии и Краснодаре
3. Испытания на малоцикловую усталость	В. Недопущение использования материалов, опасных уже при -10°C
4. Копер Шарпи с записью диаграммы	Г. Объективный количественный критерий для таможенного контроля и сертификации

Ответ: 1-Б, 2-В, 3-А, 4-Г.

15. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При сравнении японской (JIS) и российской (ГОСТ) методик определения ударной вязкости возник спор о форме надреза (U-образный vs V-образный). Русские инженеры настаивают на KCU, японцы — на KCV. Почему с точки зрения современной философии безопасности KCV считается более «честным» показателем?

А) KCV дает более высокие цифры для отчетов.

Б) Острый V-образный надрез лучше имитирует реальную трещину и жестче выявляет склонность к хладноломкости.

В) U-образный надрез требует более дорогого оборудования.

Г) KCV — это требование ВТО.

Ответ: Б.

Обоснование: Этически инженер должен использовать методы, не скрывающие риски. U-образный надрез с большим радиусом закругления (мягкий концентратор) часто не выявляет переход в хрупкое состояние для современных упрочненных сталей. V-образный надрез (острый) является более суровым тестом, приближенным к реальным условиям зарождения усталостной трещины. Гармонизация стандартов через ISO 148-1 в пользу KCV — это признание того, что завышенные «красивые» цифры KCU вводили в заблуждение и приводили к авариям.

16. Задание открытого типа с развернутым ответом

В Норильске установлен памятник «Металлургам» из титанового сплава BT1-0. Экскурсовод утверждает, что титан выбран за «вечность». С инженерной точки зрения, сравните коррозионную стойкость титана и нержавеющей стали 12X18H10T в условиях кислотных дождей Норильска (pH 3-4, наличие SO_2). Какой механизм защиты у каждого сплава, и какой из них этичнее использовать с точки зрения долговечности?

Ответ:

Механизмы защиты:

1. Сталь 12Х18Н10Т: Пассивация. На поверхности образуется тонкая пленка оксида хрома (Cr_2O_3), которая защищает металл. Но в среде с ионами хлора (Норильск — руда с хлоридами) и серной кислотой эта пленка локально разрушается, вызывая язвенную (питтинговую) коррозию. Статуя покроется точками ржавчины.
2. Титан ВТ1-0: Пассивация оксидом TiO_2 . Эта пленка химически инертна к кислотам и хлоридам при низких температурах. Титан в этой среде практически не подвержен коррозии.
Этический выбор: Для памятника, символизирующего долг перед поколениями металлургов, использование титана (несмотря на его дороговизну и сложность производства) оправдано концепцией «вечного наследия» (философия перманентности). Нержавеющая сталь потребует периодической реставрации, что будет воспринято как забвение памяти.

17. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

При расследовании причин разрушения моста в Скандинавии зимой выяснилось, что сталь плавилась из руды с высоким содержанием фосфора. Какие исторические и этические аспекты связаны с загрязнением стали фосфором и серой?

1. Фосфор вызывает хладноломкость, что стало причиной запрета «томасо-чугуна» для ответственных конструкций еще в XIX веке.
2. Удаление фосфора требует использования извести, что увеличивает углеродный след.
3. Местные жители винят «проклятие земли», так как руда была местной.
4. Этика инженера требует отбраковки плавки, даже если это экономически невыгодно металлургическому заводу.
5. Психологически общество всегда ищет техногенные причины, а не культурные.

Ответ: 1, 4.

Обоснование:

6. Исторически аварии мостов в Европе в конце 19 века привели к пониманию вреда фосфора. Томасовский процесс позволял перерабатывать фосфористые руды, но металл шел только на неответственные конструкции. Использование такого металла для моста — нарушение исторически сложившихся правил безопасности.
7. Здесь заложен этический конфликт: начальник цеха мог пропустить плавку, чтобы не срывать план. Инженерный долг — не допустить опасный металл до потребителя, защищая жизнь людей (принцип предосторожности).

18. Задание закрытого типа на установление последовательности

Установите хронологию развития представлений о хладноломкости в контексте освоения Севера:

- А) Формулировка понятия «порог хладноломкости» и связь с размером зерна феррита
- Б) Эмпирический отказ от чугуна для ответственных деталей нарт и оружия народами Сибири
- В) Введение в стандарты РФ обязательного определения KCV при -60°C для «северного исполнения»
- Г) Открытие явления вязко-хрупкого перехода в ОЦК-металлах (А.Ф. Иоффе)
- Д) Разработка теории дислокаций, объяснившей роль примесей внедрения в охрупчивании

Ответ: Б → Г → А → Д → В.

(Сначала практика народов, затем физика явления, затем критерии, затем теория, затем норма).

19. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между металлом и культурно-исторической эпохой, в которой его свойства впервые были критически переосмыслены для холодного климата:

Металл / Сплав	Исторический контекст
1. Ковкий чугун (ковкий)	А. Неудачная замена бронзы на чугун для пушек в северных крепостях (XVII в.)
2. Титановый сплав BT5-1	Б. Обшивка атомных подводных лодок, способных всплывать во льдах Арктики (1960-е)
3. Сталь Гадфильда (110Г13Л)	В. Траки танков Т-34, не ломавшиеся под Москвой в морозы 1941 года
4. Алюминиевый сплав Д16	Г. Строительство дирижаблей и самолетов для полярных экспедиций (1920-30-е)

Ответ: 1-А, 2-Б, 3-В, 4-Г.

20. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

В научно-популярном фильме «Металлы под ударом» показан опыт: образец стали с крупным зерном разрушается от удара молотка на морозе, а мелкозернистый — нет. Студент-гуманитарий спрашивает: «Неужели размер зерна влияет на судьбу газопровода?» Какой математический закон описывает эту зависимость, обосновывая этический принцип контроля качества?

А) Закон Гука ($\sigma = E \cdot \epsilon$)

Б) Уравнение Холла-Петча ($\sigma_T = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d}$)

В) Правило Грасгофа

Г) Формула Эйлера для стержня

Ответ: Б.

Обоснование: Уравнение Холла-Петча связывает предел текучести и температуру хрупко-вязкого перехода с размером зерна d . Измельчение зерна повышает прочность и одновременно сдвигает порог хладноломкости вниз. С философской точки зрения это означает, что «судьба» конструкции не фатальна, а управляема: контролируя микроструктуру (диаметр зерна), инженер этически обязан обеспечить безопасность на Севере.

Уровень 3. Высокий (комплексный анализ, синтез, доказательства) – 5 вопросов

21. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При обсуждении глобального потепления и деградации вечной мерзлоты инженеры спорят: стоит ли переходить на стали с еще большим запасом по хладостойкости (до -100°C) для Аляскинского

нефтепровода, если сейчас температуры растут? Какая этическая и философская дилемма здесь скрыта?

А) Техническая: такие стали еще не изобретены.

Б) Парадокс предотвращения: инвестируя в защиту от холода, который уходит, мы можем не успеть подготовиться к новым угрозам (просадка грунта, увеличение амплитуды подвижек).

В) Экономическая: цена стали с 9% Ni слишком высока.

Г) Политическая: Канада запрещает экспорт никеля.

Ответ: Б.

Обоснование: Это «парадокс Митча» (или этическая ловушка прогнозирования). Ориентируясь на исторические минимумы температур (-62°C), мы можем создать систему, нечувствительную к холоду, но уязвимую к новым типам деформаций, вызванным потеплением (неравномерное таяние, термокарст). Этика устойчивого развития требует от инженера не ретроспективного, а прогностического анализа рисков: возможно, важнее сейчас не увеличивать вязкость, а проектировать компенсаторы подвижек.

22. Задание открытого типа с развернутым ответом

Коренные народы Чукотки обратились в суд, требуя запретить эксплуатацию старого резервуара ГСМ, так как он покрыт ржавчиной и, по их мнению, скоро потечет. Экспертиза показала, что сталь 09Г2С имеет поверхностную коррозию, но толщина стенки далека от критической.

Смоделируйте диалог эксперта-металловеда с представителем общины, основанный на принципах патернализма и доказательного диалога (evidence-based dialogue).

Ответ:

Эксперт: «Уважаемый старейшина, я понимаю ваш страх. Ржавчина для любого человека — знак болезни металла, как сыпь на коже. Но давайте посмотрим на это вместе через микроскоп и ультразвуковой толщиномер».

(Демонстрирует): «Видите, рыжий слой — это чешуйки окалины. Но под ними — чистый, серебристый металл. Толщиномер показывает 9 мм, как у нового. Сталь 09Г2С — это особый «северный» металл, в него добавлена медь, которая создает пленку, останавливающую коррозию. Это как кожа кита, которая толстая только снаружи».

Но: «Наша инженерная этика не позволяет нам просто сказать "все хорошо" и уйти. Мы поняли, что вид ржавчины вас пугает. Поэтому мы предлагаем компромисс: мы не будем рисковать и покрасим резервуар специальной краской, которая дышит, и установим датчик, который предупредит за год до того, как стенка станет тонкой. Это наше обещание безопасности».

23. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

Советский Союз экспортировал в страны Юго-Восточной Азии станки из стали 45, которые отлично работали во Вьетнаме, но разрушались в Монголии. Сейчас РФ поставляет технику в Индию. Какие межкультурные металлургические ошибки могли быть допущены?

1. Игнорирование того факта, что порог хладноломкости стали 45 находится около -10°C , и для Монголии нужна легированная сталь.
2. Переоценка квалификации монгольских механиков (человеческий фактор).
3. Предположение, что «раз Азия — значит жарко», без учета резко континентального климата Монголии.
4. Использование европейской классификации сталей (EN) вместо ГОСТ.
5. Вера в то, что сталь 45 универсальна, как философия «единой мировой технологии».

Ответ: 1, 3, 5.

Обоснование:

6. Сталь 45 — среднеуглеродистая, не хладостойкая. В Монголии (-40°C) она становится хрупкой.
7. Культурный стереотип: «Азия — это тропики». Монголия и север Китая имеют экстремально холодные зимы, что требует «северного исполнения» по ГОСТ 15150.
8. Технократический универсализм — опасная философская иллюзия, что хорошо работающее в одном культурно-климатическом контексте будет работать везде. Инженерия должна быть контекстуальной (contextual engineering).

24. Задание закрытого типа на установление последовательности

Восстановите последовательность аргументации при защите диплома «Этические аспекты выбора материала для международного термоядерного реактора ИТЭР»:

- А) Сравнение углеродного следа производства аустенитной стали 316LN и бериллия
- Б) Формулировка дилеммы: бериллий токсичен при добыче, но улучшает параметры плазмы
- В) Вывод о приоритете защиты населения от аварии (in-vessel safety) над токсичностью производства, с требованием строгого контроля отходов
- Г) Анализ нормативных баз стран-участниц (РФ, ЕС, США, Китая) по обращению с токсичными материалами
- Д) Оценка долговременных рисков захоронения активированных деталей

Ответ: Б → Г → А → Д → В.

(Проблема, законы, экология сейчас, экология потом, синтез-решение).

25. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

В фантастическом романе описан мир, где городов на поверхности нет, а все заводы спрятаны под лед. Какую реальную сталь, разработанную для криогенных температур, автор мог бы описать как «металл, который становится только крепче, когда лед сжимает его»?

- А) Сталь СтЗсп
- Б) Высокомарганцовистая аустенитная сталь (Fe-Mn-Al-C)
- В) Латунь Л63
- Г) Инструментальная сталь У8

Ответ: Б.

Обоснование: Философия сосуществования с холодом, а не борьбы с ним, отражена в свойствах аустенитных сталей. В отличие от ОЦК-сталей (СтЗ), у которых при охлаждении резко падает вязкость и растет предел текучести (опасность хрупкого срыва), некоторые аустенитные Fe-Mn-Al сплавы сохраняют высокую вязкость и даже демонстрируют TWIP/TRIP-эффекты (повышение пластичности при деформации). Лед, сжимающий конструкцию, вызывает наклеп, делая сталь прочнее без риска разлома — это метафора симбиоза с агрессивной средой, а не дорогостоящей защиты от нее.

ОПК-12 (обеспечение повышения надежности технологических машин и оборудования на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации).

Уровень 1. Базовый (проверка основных понятий) – 10 вопросов

1. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При проектировании привода конвейера для угольного разреза в Якутии инженер выбирает марку стали для вала-шестерни. Механические свойства стали должны гарантировать отсутствие

хрупкого разрушения при -50°C . Какой параметр, определяемый при испытаниях на ударный изгиб, является основным критерием хладостойкости?

А) Твердость по Бринеллю (НВ)

Б) Ударная вязкость KCV (или KV) при минимальной температуре эксплуатации

В) Предел прочности при растяжении ($\sigma_{\text{в}}$)

Г) Относительное сужение (ψ)

Ответ: Б.

Обоснование: Хладостойкость — это способность материала сопротивляться хрупкому разрушению при низких температурах. Количественной мерой служит работа разрушения образца с острым надрезом (ударная вязкость KCV/KV). Согласно ГОСТ 9454-78 и правилам проектирования северной техники, именно значение KCV при заданной отрицательной температуре (например, $\text{KCV}^{-50} \geq 30 \text{ Дж/см}^2$) является нормируемым критерием. Твердость и прочность не отражают склонность к вязко-хрупкому переходу.

2. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между этапом жизненного цикла металлургической машины и металловедческим решением, обеспечивающим ее надежность в агрессивной среде:

Этап жизненного цикла	Металловедческое решение
1. Проектирование	А. Контроль режима термообработки (закалка + высокий отпуск) для получения сорбитной структуры
2. Изготовление	Б. Выбор марки стали с учетом водородного показателя (рН) технологической среды
3. Эксплуатация	В. Мониторинг коррозионного износа методом ультразвуковой толщинометрии
4. Ремонт	Г. Применение аустенитных сварочных материалов для наплавки без последующей термообработки

Ответ: 1-Б, 2-А, 3-В, 4-Г.

3. Задание открытого типа с развернутым ответом

На обогатительной фабрике в Норильске ролики конвейера, изготовленные из стали 45, покрываются язвами (питтингом) и трещинами уже через 3 месяца эксплуатации. Сталь контактирует с пульпой, содержащей хлориды и сульфаты. Объясните механизм ускоренного коррозионно-механического изнашивания и предложите марку сплава для повышения надежности.

Ответ:

Механизм: Хлорид-ионы (Cl^-) и сульфат-ионы (SO_4^{2-}) в пульпе действуют как активаторы коррозии. На поверхности стали 45, не имеющей легирующих элементов для пассивации, образуется рыхлая, несплошная пленка продуктов коррозии. Одновременно ролик испытывает циклические контактные нагрузки. Трещины коррозионной усталости зарождаются в питтингах (коррозионных язвах), которые являются концентраторами напряжений. Процесс идет лавинообразно: коррозия облегчает усталость, а усталость разрушает пассивный слой. Предложение: Заменить сталь 45 на коррозионностойкую мартенситную сталь 40Х13 (после

закалки и низкого отпуска) или, если требуется высокая вязкость, на аустенитную сталь 12X18H10T. Для компромисса по цене можно применить низколегированную сталь с медью и хромом (10XCHД), обладающую повышенной атмосферной и жидкостной коррозионной стойкостью.

4. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

При анализе причин хрупкого разрушения сварного корпуса редуктора экскаватора, работающего при -45°C , обнаружено, что излом носит кристаллический блестящий характер и проходит по зоне термического влияния (ЗТВ). Какие металлургические факторы могли снизить трещиностойкость соединения?

1. Образование крупнозернистой видманштеттовой структуры в ЗТВ из-за перегрева при сварке.
2. Повышенное содержание серы и фосфора в основном металле (сталь 09Г2С).
3. Недостаточная погонная энергия сварки, приведшая к закалке на мартенсит.
4. Использование аустенитных электродов.
5. Отсутствие предварительного подогрева перед сваркой при температуре окружающей среды -10°C .

Ответ: 1, 5.

Обоснование:

Хрупкое разрушение в ЗТВ указывает на структурную чувствительность к надрезу.

6. Перегрев (длительное пребывание при $T > 1100^{\circ}\text{C}$) вызывает рост аустенитного зерна, а последующее быстрое охлаждение формирует видманштеттов феррит — грубую игольчатую структуру с низкой ударной вязкостью.
7. Сварка без подогрева на морозе резко увеличивает скорость охлаждения, что способствует образованию закалочных структур (бейнит/мартенсит) в ЗТВ стали 09Г2С, снижая KCV. Пункт 3 (малая погонная энергия) ведет к закалке, но в сочетании с п.5 эффект усиливается. Однако в первую очередь проверяют именно технологию подогрева.

5. Задание закрытого типа на установление последовательности

Расположите стадии развития отказа штока гидроцилиндра скраповоза из-за коррозионно-усталостного механизма в правильной последовательности:

- А) Рост магистральной трещины и долом оставшегося сечения
- Б) Адсорбция хлорид-ионов на поверхности хромового покрытия штока
- В) Циклическое расклинивание устья микротрещины продуктами коррозии (эффект Ребиндера)
- Г) Локальное разрушение пассивной пленки (питтинг) в зоне концентрации напряжений (галтель)
- Д) Зарождение усталостной микротрещины от дна коррозионной язвы

Ответ: Б → Г → Д → В → А.

(Ионы осели, пленка лопнула, появилась ямка, от ямки пошла трещина, расклинилась и сломалась).

6. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

Инженер-конструктор проектирует резервуар для хранения жидкого аммиака при температуре -33°C . Он выбирает между низколегированной сталью 09Г2С и криогенной сталью ОН6 (6% Ni). Чем руководствуются при окончательном выборе в пользу никелевой стали, согласно СТО и международным стандартам (API 620)?

- А) Более низкой стоимостью легированной стали.

Б) Гарантированным сохранением высокой ударной вязкости (KCV) при температурах ниже -40°C, где у 09Г2С наступает резкий спад вязкости.

В) Более высокой теплопроводностью никелевой стали.

Г) Лучшей свариваемостью без подогрева.

Ответ: Б.

Обоснование: Низколегированные стали ферритно-перлитного класса (09Г2С) имеют так называемый «порог хладноломкости». При температурах ниже -30...-40°C их ударная вязкость падает практически до нуля. Легирование никелем (5-9%) сдвигает порог хладноломкости в область значительно более низких температур (до -100...-196°C), что обеспечивает надежную вязкую работу резервуара при рабочей температуре с учетом возможных отклонений режима.

7. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между видом коррозионного разрушения и способом его предотвращения на стадии металловедческого проектирования:

Вид коррозионного разрушения	Метод предотвращения
1. Межкристаллитная коррозия (МКК) сварных швов	А. Легирование титаном или ниобием (стабилизация) или снижение содержания углерода
2. Питтинговая (язвенная) коррозия	Б. Увеличение содержания хрома (>18%) и введение молибдена (Mo)
3. Сероводородное растрескивание под напряжением (SSC)	В. Снижение твердости металла (≤ 22 HRC) и контроль неметаллических включений
4. Контактная коррозия	Г. Подбор пар металлов с близкими электрохимическими потенциалами

Ответ: 1-А, 2-Б, 3-В, 4-Г.

8. Задание открытого типа с развернутым ответом

В цехе по производству серной кислоты насос перекачивает кислоту концентрацией 93% при температуре 60°C. Корпус насоса из серого чугуна СЧ20 разрушился через 2 недели. Предложите металловедческое решение для замены материала корпуса, обеспечивающее межремонтный интервал не менее 1 года. Обоснуйте свой выбор.

Ответ:

Причина разрушения: Концентрированная серная кислота при температуре 60°C активно взаимодействует с чугуном, особенно по графитовым включениям, где развивается язвенная коррозия. Продукты коррозии (сульфаты железа) рыхлые и не защищают металл.

Решение: Заменить серый чугун на высококремнистый чугун ЧС15 (ферросилид, 15% Si) или на сплав на основе никеля (Хастеллой С, до 16% Mo, 16% Cr).

Обоснование: Высококремнистый чугун (ГОСТ 7769-82) стоек в концентрированной серной кислоте при повышенных температурах благодаря формированию на поверхности плотной пленки диоксида кремния (SiO₂), которая экранирует матрицу от агрессивной среды. Это экономичное решение для насосов кислот.

9. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

Для повышения надежности трубопровода подачи кислой смолки (фракция после пиролиза, $t = 120^{\circ}\text{C}$, содержит нафтеновые кислоты) инженер выбирает материал. Какие стали или сплавы из перечня пригодны для данной агрессивной среды?

1. Сталь 20.
2. Сталь 12X18H10T.
3. Сталь 08X22H6T (аустенитно-ферритная).
4. Сталь 10Г2.
5. Сплав ХН65МВ (Хастеллой).

Ответ: 2, 3, 5.

Обоснование:

Нафтеновые кислоты при высокой температуре вызывают быстрое разрушение углеродистых и низколегированных сталей (п.1, п.4).

6. Сталь 12X18H10T обладает достаточным содержанием хрома и никеля для сопротивления кислотной коррозии до 150°C .
7. Аустенитно-ферритная сталь 08X22H6T имеет повышенное содержание хрома (22%), что обеспечивает стойкость к питтингу в кислой среде.
8. Сплав ХН65МВ (типа Хастеллой С) — специальный коррозионностойкий сплав на никелевой основе, созданный для работы в самых агрессивных кислотных средах при высоких температурах. Выбор одной из сталей зависит от экономической целесообразности и точного химического состава среды.

10. Задание закрытого типа на установление последовательности

Установите правильную последовательность действий инженера-металловеда при расследовании аварийного разрушения крепежа (болтов) фланцевого соединения паропровода:

- А) Химический анализ материала болтов на соответствие марке стали по ГОСТ
- Б) Визуальный осмотр излома и определение макрохарактера разрушения (усталостный, хрупкий, вязкий)
- В) Измерение твердости и микротвердости структурных составляющих
- Г) Металлографический анализ микроструктуры (выявление карбидной сетки, обезуглероживания)
- Д) Составление заключения о причине разрушения и разработка рекомендаций по замене марки стали или режима термообработки

Ответ: Б → А → В → Г → Д.

(Сначала смотрим излом, потом химия — та ли сталь, потом мехсвойства, потом структура, потом вывод).

Уровень 2. Средний (анализ, расчёт, применение формул) – 10 вопросов

11. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

Рассчитывая на прочность вал горнорудного комбайна для условий Крайнего Севера, инженер определил коэффициент запаса по пределу текучести $n_T = 2.5$. Однако экспертиза требует расчета

по критериям механики разрушения. Какой параметр материала должен быть подставлен в формулу для критической длины трещины $l_{кр} = (K_{IC} / \sigma)^2 / \pi$?

А) Ударная вязкость KCU

Б) Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} (трещиностойкость)

В) Твердость по Виккерсу HV

Г) Предел выносливости σ_{-1}

Ответ: Б.

Обоснование: Для высокопрочных сталей и условий низких температур классический расчет по пределу текучести недостаточен, так как хрупкое разрушение может произойти при напряжениях ниже σ_T из-за наличия микротрещин. K_{IC} — это силовой критерий механики разрушения, характеризующий способность материала сопротивляться стагиванию и росту трещины. Именно его значение подставляется в уравнение Гриффитса-Ирвина для оценки допустимого размера дефекта.

12. Задание открытого типа с развернутым ответом

Для изготовления обечайки реактора гидрокрекинга ($T = 450^\circ\text{C}$, среда — водород под давлением) используется хромолибденованадиевая сталь 15X5M. Рассчитайте, во сколько раз увеличится скорость ползучести стали, если вместо проектной температуры 450°C кратковременно произойдет заброс до 480°C . Энергия активации ползучести $Q = 270$ кДж/моль. Оцените риск для надежности оборудования.

Ответ:

Скорость установившейся ползучести описывается уравнением Аррениуса: $\varepsilon' = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT)$.

Отношение скоростей при двух температурах:

$$\varepsilon'(T_2) / \varepsilon'(T_1) = \exp[Q/R \cdot (1/T_1 - 1/T_2)].$$

Данные: $Q = 270\,000$ Дж/моль, $R = 8.314$ Дж/(моль·К). $T_1 = 450^\circ\text{C} = 723$ К, $T_2 = 480^\circ\text{C} = 753$ К.

Расчет показателя экспоненты:

$$(1/723 - 1/753) = (753 - 723) / (723 \cdot 753) = 30 / 544419 \approx 5.51 \cdot 10^{-5}.$$

$$Q/R = 270000 / 8.314 \approx 32475 \text{ К}.$$

$$\text{Произведение: } 32475 \cdot 5.51 \cdot 10^{-5} \approx 1.79.$$

$$\text{Отношение скоростей: } e^{1.79} \approx 6.0 \text{ раз}.$$

Оценка риска: Повышение температуры всего на 30°C увеличило скорость накопления деформации ползучести в 6 раз. Это приведет к ускоренной выборке ресурса (срока службы) реактора и может вызвать преждевременное разрушение по механизму водородного растрескивания из-за разрыва защитной оксидной пленки.

13. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

При металлографическом анализе образца сварного соединения трубопровода из стали 09Г2С, эксплуатируемого на Севере, в зоне сплавления обнаружена прослойка мартенсита твердостью 380 HV. Какие технологические меры на стадии сварки предотвратили бы образование этой хрупкой фазы?

1. Предварительный подогрев стыка до $120\text{--}150^\circ\text{C}$.
2. Увеличение скорости сварки (уменьшение погонной энергии).
3. Применение сварочных материалов с пониженным содержанием водорода.
4. Замена ручной дуговой сварки на автоматическую под флюсом с высокой погонной энергией.
5. Обязательная послесварочная термообработка (отпуск).

Ответ: 1, 4.

Обоснование:

Мартенсит в ЗТВ образуется при переохлаждении аустенита с высокой скоростью.

6. Предварительный подогрев снижает градиент температур и скорость охлаждения, смещая распад аустенита в бейнитную или ферритно-перлитную область.
7. Автоматическая сварка под флюсом (или с большой погонной энергией) увеличивает время пребывания металла выше точки $A_{с3}$ и замедляет остывание, что естественным путем исключает закалку.

Пункт 2 (малая энергия) усугубил бы закалку. Пункт 3 (водород) важен для холодных трещин, но не отменяет мартенсит. Пункт 5 (отпуск) исправляет последствия, но технологически проще не допустить закалку.

14. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между типом криогенного оборудования и требуемым классом стали по ударной вязкости при сверхнизких температурах:

Оборудование (Рабочая температура)	Рекомендуемый класс стали
1. Резервуар СПГ (-162°C)	А. Аустенитная сталь 12Х18Н10Т ($KCV > 60$ Дж/см ² при -196°C)
2. Трубопровод жидкого кислорода (-183°C)	Б. Аустенитная сталь 03Х20Н16АГ6 (криогенная аустенитная)
3. Насос жидкого водорода (-253°C)	В. Никелевая сталь 0Н9 (9% Ni)
4. Магистральный газопровод (-40°C)	Г. Низколегированная сталь класса прочности К60 (Х70) с $KCV^{-60} \geq 100$ Дж/см ²

Ответ: 1-В, 2-А, 3-Б, 4-Г.

15. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

Для повышения надежности ножей холодной резки арматурной стали ($t = -20^\circ\text{C}$) предложено заменить сталь 6ХВ2С на порошковую быстрорежущую сталь 10Р6М5-МП. Какое структурное преимущество обеспечивает порошковая металлургия, напрямую влияющее на трещиностойкость?

- А) Более низкая стоимость за счет экономии вольфрама.
- Б) Исключительно аустенитная структура матрицы.
- В) Высокая дисперсность и равномерное распределение карбидной фазы (отсутствие карбидной неоднородности).
- Г) Повышенная электропроводность.

Ответ: В.

Обоснование: В традиционной литой стали 6ХВ2С размер карбидных скоплений (строчек) может достигать десятков микрон, и эти скопления служат концентраторами напряжений и очагами зарождения трещин, особенно при ударных нагрузках на холоде. Технология распыления порошка и горячего изостатического прессования (ГИП) позволяет получить мелкодисперсные (1–3 мкм)

карбиды, равномерно распределенные в объеме. Отсутствие грубых карбидных строчек многократно повышает вязкость разрушения и износостойкость.

16. Задание открытого типа с развернутым ответом

На нефтеперерабатывающем заводе теплообменник из углеродистой стали 20 подвергается коррозии со скоростью 0.3 мм/год со стороны охлаждающей воды, содержащей хлориды. Инженер предлагает заменить его на теплообменник из аустенитной стали 12X18H10T. Однако эксперты предупреждают о риске коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Объясните механизм КРН аустенитных сталей в хлоридсодержащей среде и предложите альтернативный материал.

Ответ:

Механизм КРН: Аустенитные нержавеющие стали, несмотря на высокую общую коррозионную стойкость, чрезвычайно чувствительны к хлоридному коррозионному растрескиванию (Cl-SCC). Механизм включает локальное разрушение пассивной пленки ионами Cl^- , адсорбцию хлоридов на ювенильной поверхности и анодное растворение металла в устье микротрещины, которая распространяется по границам зерен или транскристаллитно под действием растягивающих напряжений (включая остаточные). Температура выше 60°C резко ускоряет процесс. Альтернативный материал: Вместо стали 12X18H10T следует применить дуплексную (аустенитно-ферритную) сталь, например 08X22H6T, или более дешевую низколегированную сталь с повышенной чистотой по примесям, либо использовать сталь 10X17H13M2T с молибденом.

17. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

При испытаниях на сероводородное растрескивание (HIC-тест) по стандарту NACE TM0284 в стали для газопровода обнаружены внутренние расслоения (блистеринг). Какие металлургические факторы ответственны за низкую стойкость к водородному воздействию?

1. Вытянутые сульфидные включения (MnS) типа II.
2. Крупное действительное зерно аустенита (балл 4-5).
3. Высокое содержание неметаллических включений (оксидов и сульфидов), являющихся ловушками для атомарного водорода.
4. Наличие остаточного аустенита в структуре.
5. Низкая твердость (менее 180 HB).

Ответ: 1, 3.

Обоснование:

Водородное расслоение (HIC) возникает, когда атомарный водород, проникающий в сталь при коррозии в сероводородной среде, рекомбинирует в молекулярный на границе раздела «включение-матрица». Вытянутые пластинчатые сульфиды марганца (MnS) — идеальные коллекторы для скопления водорода. Давление газа разрывает металл по этим включениям. Следовательно, снижение содержания серы до ультранизких значений ($\leq 0.002\%$) и глобуляризация оставшихся сульфидов (модифицирование кальцием) являются ключевыми мерами для обеспечения HIC-стойкости.

18. Задание закрытого типа на установление последовательности

Восстановите алгоритм металловедческой экспертизы при выборе материала для новой технологической линии, работающей в условиях одновременного воздействия абразивного износа и кислотной среды ($\text{pH}=2$):

А) Проведение ускоренных лабораторных испытаний образцов-кандидатов на коррозионно-механическое изнашивание

- Б) Анализ химического состава и температуры технологической среды, определение класса агрессивности
- В) Ранжирование сплавов по критерию «цена / (коррозионная стойкость + износостойкость)» с учетом ресурса
- Г) Металлографический анализ поверхности после испытаний (выявление микротрещин, питтингов, слоя наклепа)
- Д) Предварительный выбор группы сплавов (дуплексные стали, сплавы на основе никеля, керамика) по диаграммам Шеффлера и справочникам коррозионной стойкости

Ответ: Б → Д → А → Г → В.

(Среда, кандидаты, тесты, микроструктура после тестов, экономика).

19. Задание закрытого типа на установление соответствия

Установите соответствие между маркой хладостойкой стали и основным легирующим элементом (или технологическим приемом), который обеспечивает низкий порог хладноломкости:

Марка стали	Ключевой элемент хладостойкости
1. 09Г2С	А. Высокое содержание никеля (9%)
2. 10ХСНД	Б. Никель и медь (повышение вязкости феррита)
3. 0Н9 (9% Ni)	В. Марганец и кремний (измельчение зерна, снижение $T_{кр}$)
4. 03Х20Н16АГ6	Г. Стабильная аустенитная структура (ГЦК-решетка)

Ответ: 1-В, 2-Б, 3-А, 4-Г.

20. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

Для вала центробежного компрессора, подающего коксовый газ (содержит H_2S и влагу), используется сталь 40ХФА с твердостью 28–32 HRC. Инженер предлагает упрочнить вал до 38–42 HRC для повышения износостойкости. Почему главный металлург запрещает это делать?

- А) Сталь 40ХФА не принимает закалку выше 35 HRC.
- Б) С повышением твердости резко возрастает чувствительность стали к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением (SSC).
- В) Повышение твердости приведет к растрескиванию при шлифовке.
- Г) Высокая твердость несовместима с работой в подшипниках скольжения.

Ответ: Б.

Обоснование: Согласно стандарту NACE MR0175/ISO 15156, для углеродистых и низколегированных сталей, работающих в средах, содержащих сероводород, существует жесткое ограничение по максимальной твердости: не более 22 HRC для большинства сталей. Для стали 40ХФА предел может быть чуть выше, но 42 HRC — это зона чрезвычайно высокого риска водородного охрупчивания и SSC. Мартенсит высокой твердости находится в структурно-напряженном состоянии и обладает минимальной пластичностью, что делает его беззащитным перед водородом.

Уровень 3. Высокий (комплексный анализ, синтез, доказательства) – 5 вопросов

21. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

При экспертизе разрушения штока парового молота (сталь 40ХН2МА) обнаружено, что очаг разрушения — неметаллическое включение глинозема (Al_2O_3) размером 45 мкм, расположенное на глубине 0.2 мм от поверхности. Шток работал при температуре окружающей среды $-20^{\circ}C$. Каков механизм влияния температуры на переход от безопасного состояния к разрушению при таком дефекте?

- А) Понижение температуры не влияет на концентрацию напряжений у включения.
- Б) При $-20^{\circ}C$ предел текучести стали вырос, и локальные напряжения у включения превысили микротвердость феррита, чего не было при $+20^{\circ}C$.
- В) При $-20^{\circ}C$ глинозем становится хрупким и сам растрескивается.
- Г) Масло густеет и создает дополнительное давление.

Ответ: Б.

Обоснование: У охрупчивающихся ОЦК-сталей (к которым относится улучшаемая 40ХН2МА) при понижении температуры предел текучести σ_T резко возрастает, в то время как вязкость разрушения K_{IC} падает. Концентратор напряжений (включение Al_2O_3) создает локальное повышение напряжений ($\sigma_{лок} \approx 2-3 \cdot \sigma_{ном}$). При $+20^{\circ}C$ это превышение «рассасывается» локальной пластической деформацией (текучестью) вокруг включения. При $-20^{\circ}C$ возросший σ_T не позволяет матрице деформироваться, напряжение на границе включения достигает критического значения, и происходит скол (микроскол) — зарождение трещины без видимой пластической деформации.

22. Задание открытого типа с развернутым ответом

Для сосуда, работающего под давлением в условиях Крайнего Севера, расчетом на прочность определена толщина стенки 20 мм из стали 09Г2С. Однако экспертиза требует провести расчет на сопротивление хрупкому разрушению по критерию «температурного запаса» ($\Delta T = T_{экспл} - T_{кр}$). Объясните, что такое $T_{кр}$, как она определяется по результатам ударных испытаний (кривые KCV-T), и какой запас по температуре считается достаточным для остановки трещины согласно СП 36.13330?

Ответ:

$T_{кр}$ (критическая температура хрупкости) — это температура, при которой ударная вязкость KCV падает ниже определенного нормативного значения (обычно 30 Дж/см² или $KCV \geq 0.5$ мм для образцов с V-надрезом), и характер разрушения меняется с вязкого на хрупкий. Она определяется экспериментально путем построения серийной кривой KCV в зависимости от температуры испытаний.

Согласно СП 36.13330 (Магистральные трубопроводы) и ГОСТ 32579, для обеспечения гарантированной остановки вязкой трещины необходимо, чтобы температура эксплуатации (минимальная температура стенки) была как минимум на $30-60^{\circ}C$ выше критической температуры хрупкости (т.е. $\Delta T \geq +30^{\circ}C$). Если запас меньше, необходимо либо понизить $T_{кр}$ заменой стали на более хладостойкую, либо увеличить толщину стенки для снижения номинальных напряжений, либо ввести дополнительные защитные меры (теплоизоляция).

23. Задание комбинированного типа с выбором нескольких вариантов ответа из предложенных и развернутым обоснованием выбора

При испытаниях опытной плавки стали для арктических ледоколов (класс Arc9) получена структура: ферритная матрица + 15% верхнего бейнита + мартенситно-аустенитные островки (МА-составляющая). Какие утверждения о влиянии МА-составляющей на надежность верны?

1. МА-составляющая повышает прочность, но является концентратором напряжений и снижает сопротивление хрупкому разрушению (KCV).
2. МА-составляющая образуется при высоком отпуске (650°C).
3. Для повышения хладостойкости необходимо стремиться к уменьшению объемной доли и диспергированию МА-составляющей за счет ускоренного охлаждения после прокатки.
4. МА-составляющая полезна, так как блокирует движение дислокаций, не влияя на трещиностойкость.
5. Наличие МА-фазы увеличивает порог хладноломкости на 20–40°C.

Ответ: 1, 3, 5.

Обоснование:

МА-составляющая — это твердые (высокоуглеродистые) островки мартенсита с прослойками остаточного аустенита, образующиеся при термической обработке с ускоренным охлаждением (ТМО).

6. Верно: Из-за высокой твердости и отличия модуля упругости МА-фаза служит очагом зарождения микротрещин при ударе.
7. Верно: Технология контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением (УКО) направлена именно на измельчение и глобуляризацию МА-островков.
8. Верно: Каждые 5–10% грубой МА-фазы могут повысить критическую температуру вязко-хрупкого перехода на 20–40°C, что недопустимо для арктического класса стали.

24. Задание закрытого типа на установление последовательности

Установите правильную последовательность действий при разработке технических условий (ТУ) на новую марку хладостойкой стали для сварных конструкций, эксплуатируемых при -60°C:

- А) Нормирование химического состава (C, Mn, Ni, V, Nb, Al, P, S) и углеродного эквивалента
- Б) Определение гарантированных значений KCV⁻⁶⁰ и KCV⁻⁴⁰ на образцах после моделирования цикла сварки (ЗТВ)
- В) Проведение опытной выплавки и прокатки листов, изготовление сварных проб
- Г) Согласование ТУ с головной материаловедческой организацией (ЦНИИ КМ «Прометей») и заказчиком
- Д) Назначение режимов термической обработки (нормализация, отпуск или закалка+отпуск)

Ответ: А → В → Д → Б → Г.

(Сначала гипотетический состав, потом опытный металл и термообработка, потом главный тест — сварка и KCV, потом утверждение).

25. Задание комбинированного типа с выбором одного верного ответа из четырех предложенных и обоснованием выбора

Современные нано-модифицированные стали с карбонитридным упрочнением (V, Nb, Ti) используются в магистральных газопроводах. Какой фундаментальный механизм обеспечивает одновременное повышение и прочности, и хладостойкости в этих сталях, решая классический конфликт «прочность-вязкость»?

- А) Наклеп при экспандировании труб.
- Б) Термодинамически неравновесная структура нижнего бейнита.
- В) Дисперсионное твердение с одновременным измельчением зерна за счет сдерживания рекристаллизации аустенита карбонитридами.
- Г) Повышенное содержание углерода.

Ответ: В.

Обоснование: Конфликт «прочность-вязкость» заключается в том, что обычные методы

упрочнения (повышение C, закалка на мартенсит) снижают вязкость. Наноразмерные частицы карбонитридов (Nb(CN), TiN, VN) решают эту проблему двойным действием: 1) Они закрепляют границы зерен аустенита при контролируемой прокатке, препятствуя их росту, что приводит к формированию сверхмелкого действительного зерна (балл 11–13) — основного фактора хладостойкости (см. уравнение Холла-Петча). 2) Эти же частицы когерентно выделяются в феррите при охлаждении, обеспечивая дисперсионное упрочнение без существенного вреда для пластичности, так как не создают дальнодействующих полей напряжений, опасных для скола.