ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Методы повышения прочностных и коррозионных свойств деталей оборудования.

Докладчик:
Руководитель ДСМ ООО «ИТ-Сервис», к.т.н.
Чистопольцева Елена Александровна

Способы защиты от коррозии

Причины коррозии промыслового оборудования:

- Высокая температура и давление в скважине;
- Наличие агрессивных сред (водной фазы, солей, сероводорода, углекислого газа);
- Механическое воздействие составляющих сред на поверхность металла;
- Электрохимические процессы между различными металлами.

Основные методы защиты промыслового оборудования:

- Защита химическими реагентами: ингибиторами коррозии, ингибиторами солеотложений, бактерицидами;
- Защитные покрытия: эпоксидно-полимерные, термодиффузионные, азотирование;
- Катодная защита;
- Материалы повышенной устойчивости;
- Коррозионно-стойкая наплавка.

Эффективность каждого способа зависит от конкретных условий эксплуатации оборудования, состава рабочей среды и экономических возможностей предприятия. Выбор оптимального метода должен основываться на тщательном анализе ситуации и учитывать технические характеристики используемого оборудования.

Комплексный подход к защите оборудования позволит существенно повысить надежность работы оборудования, продлить сроки его эксплуатации и минимизировать затраты на обслуживание и ремонт.

Ингибиторы коррозии

Ингибиторами называют вещества, способные замедлять или предотвращать процесс коррозии металлов. Они вводятся непосредственно в рабочую среду, образуя защитную пленку на поверхности металла. Ингибиторы делятся на следующие группы:

Адсорбционные — адсорбируются на поверхности металла, создавая защитный слой.

Пленкообразующие — образуют плотную пленку, препятствующую контакту металла с агрессивной средой.

Пассивирующие — вызывают образование пассивной пленки окислов на поверхности металла.

Преимущества: высокая эффективность, простота введения, совместимость с большинством рабочих жидкостей.

Недостатки: необходимость постоянного контроля концентрации ингибитора, риск снижения эффективности при изменении условий среды.

Защитное покрытие

Покрытие поверхностей специальными материалами также эффективно защищает оборудование от коррозии. Покрытия бывают следующих видов:

Лакокрасочные покрытия — применяются для внешней защиты оборудования, создают барьер против влаги и химически активных веществ.

Цинкование — метод нанесения слоя цинка на поверхность стальных изделий путем горячего погружения или гальванического метода.

Полимерные покрытия — используются различные полимеры (например, полиуретан), обладающие высокой стойкостью к механическим повреждениям и агрессивным веществам.

Преимущества: длительный срок службы, возможность ремонта покрытий, устойчивость к различным видам воздействия.

Недостатки: сложность нанесения толстых слоев покрытий, возможное появление дефектов во время эксплуатации.

Катодная защита

Метод катодной защиты основан на подключении защищаемого объекта к отрицательному полюсу внешнего источника тока либо использованием протекторов — расходуемых анодов, создающих электрохимический потенциал, смещающий нормальный потенциал стали в область, соответствующую образованию устойчивой оксидной пленки.

Преимущества: надежная защита даже при наличии повреждений основного материала, длительное действие без замены компонентов системы.

Недостатки: требует дополнительного энергоснабжения, сложно организовать защиту сложных конструкций.

Материалы повышенной устойчивости

Использование специальных сплавов и легированных сталей, содержащих хром, никель, молибден и титан, значительно повышает стойкость оборудования к воздействию коррозионных факторов. Такие материалы обладают улучшенными характеристиками по сравнению с обычными углеродистыми сталями.

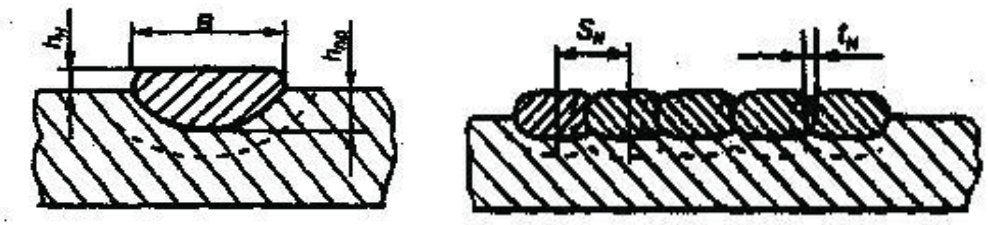
Преимущества: повышенная прочность и надежность конструкции, снижение риска аварий и поломок.

Недостатки: высокая стоимость материалов, ограниченность применимости в некоторых условиях эксплуатации.

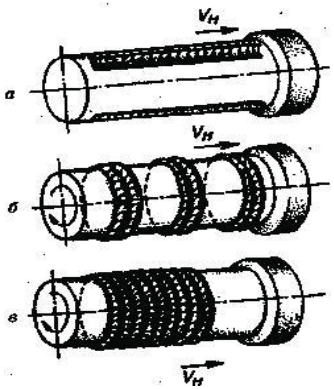
Наплавка

Наплавкой называется технологическая операция нанесения одного или нескольких слоев специального материала поверх базовой основы (матрицы) посредством сварки плавлением. Наплавляемый материал обладает высокими физико-химическими свойствами, такими как твердость, износоустойчивость и сопротивление коррозии.

Наплавочный слой образует прочное соединение с основным металлом, обеспечивая надежную работу оборудования в экстремально тяжелых условиях.



Способы наложения слоёв: *B, h, hr* – соответственно ширина валика, высота наплавки, глубина проплавления; *Sм* – шаг наплавки



Наплавка тел вращения: *а* – по образующей; *б* – по окружности; *в* – по винтовой линии

Преимущества наплавки перед другими методами защиты.

- Высокое качество соединения наплавленного слоя с основой благодаря диффузии атомов.
- Возможность точного подбора химического состава наплавочного материала для конкретных условий эксплуатации.
- Повышение прочности, коррозионной стойкости и износостойкости обрабатываемых деталей. Устойчивость к механическому истиранию и абразивным частицам.
- Экономичность и сокращение затрат на изготовление новых запчастей.

Виды наплавки металла

Существует несколько основных методов наплавки, которые различаются по типу источника энергии, способу подачи материала и условиям процесса. Наиболее распространенными методами считаются такие варианты наплавки:

- **электродуговая;**
- **вибродуговая;**
- **газопламенная;**
- **плазменная;**
- **электрошлаковая;**
- **лазерная;**
- **индукционная;**
- **электроискровая.**

Электродуговая наплавка

Это один из наиболее распространенных методов упрочнения металлических поверхностей. Способ основан на применении электрической дуги, которая плавит присадочный материал и основу, создавая прочное и однородное покрытие.

Преимущества::

1) Высокая производительность. Метод позволяет наносить толстые слои покрытия за один проход, значительно ускоряя процесс.

2) Разнообразие применяемых материалов. Можно использовать разные виды присадочных материалов, в том числе порошки и проволоки на основе углеродистых и легированных сталей, никелевых и кобальтовых сплавов.

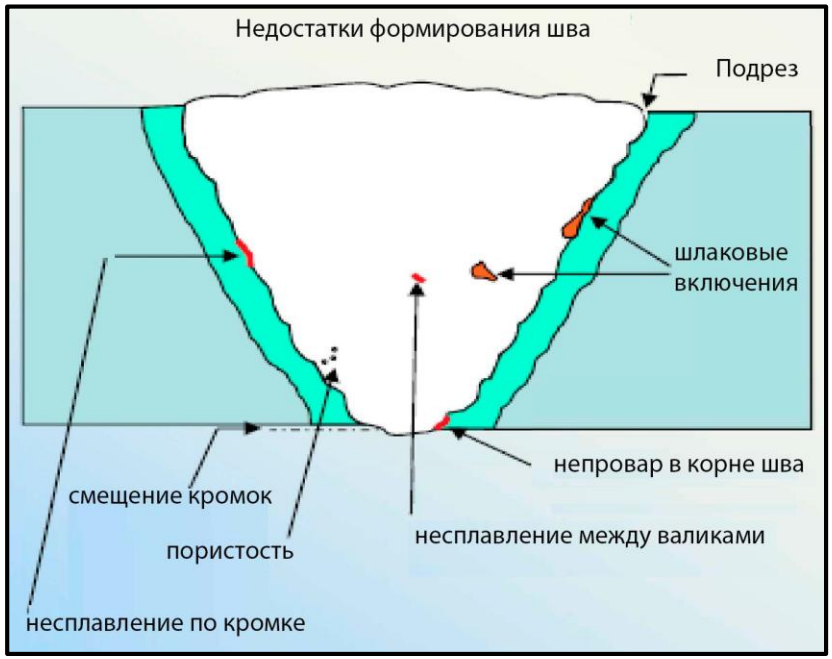
3) Глубокое проплавление. За счет высокой температуры дуги достигается надежное сцепление покрытия с основной поверхностью.

4) Экономичность. Метод позволяет восстановить изношенные детали, продлевая срок их службы без необходимости замены на новые.

Варианты электродуговой наплавки;

- Ручной метод;
- Полуавтоматическая электродуговая наплавка;
- Автоматическая электродуговая наплавка.

Дефекты сварных швов



•**Наружные дефекты**. Проявляются на поверхности шва и обнаруживаются при тщательном визуальном осмотре или измерительными приборами:

- подрезы — углубления вдоль края шва;
- наплывы — излишки металла шва на поверхности основного металла;
- кратеры — углубления на поверхности шва;
- прожоги — сквозные отверстия в металле.

•**Внутренние дефекты**. Находятся внутри шва или области нагрева, их обнаружение требует использования специализированных методов неразрушающего контроля:

- поры — пустоты внутри шва;
- трещины — разрывы металла;
- свищи — сквозные отверстия, соединяющие внутреннюю и внешнюю поверхность шва;
- посторонние включения — наличие в структуре шва примесей шлака, грязи и т.д..

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Формирование структуры сварных соединений. Свойства металла шва. Особенности коррозионно-механического разрушения сварных соединений при эксплуатации в средах высокой агрессивности.

Докладчик:
Руководитель ДСМ ООО «ИТ-Сервис», к.т.н.
Чистопольцева Елена Александровна

Схема строения сварного соединения

Сварка является одним из основных технологических процессов изготовления и упрочнения деталей и строительных конструкций. Сварка это процесс неразъемного соединения деталей местным сплавлением при молекулярном или атомном взаимодействии металлов.

Основной характеристикой свариваемости является отсутствие холодных или горячих трещин при сварке.

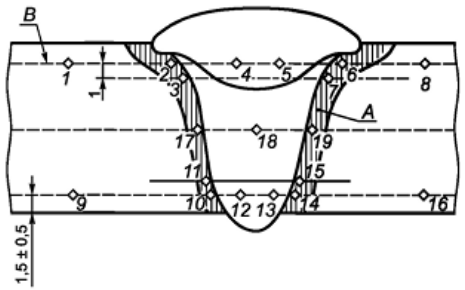
Обычно при сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей ставится задача получения пластичного сварного соединения, и в частности металла ЗТВ.

Для достижения необходимого комплекса свойств, включая стойкость к растрескиванию технологию сварки и сварочные материалы подбирают специально. Сварочные работы выполняются в соответствии с действующими правилами и стандартами по согласованию между потребителем и производителем. По требованию потребителя производитель должен предоставить технические условия на выполнение сварочных работ и квалификационную документацию на технологию сварки.

Требования к сварным швам ISO 15156/ГОСТ 53678-2009

Твердость основного металла и сварных швов, а также зон термического влияния играет важную роль в стойкости к растрескиванию углеродистых и низколегированных сталей. Регулирование твердости может быть достаточным средством достижения стойкости к SSC. Процессы, происходящие при сварке углеродистых и низколегированных сталей, влияют на их чувствительность к растрескиванию.

Размеры в миллиметрах

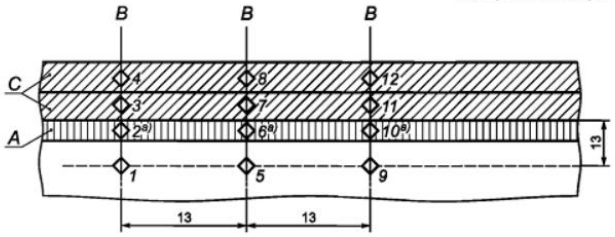


A — зона термического влияния (видимая после травления); *B* — линии обследования

Отпечатки *2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 17 и 19* должны полностью находиться в пределах зоны термического влияния и располагаться как можно ближе к линии сплавления. Верхнюю линию обследования следует располагать таким образом, чтобы отпечатки *2* и *6* совместились с зоной термического влияния конечного прохода или изменением профиля линии сплавления, соответствующей конечному проходу

Рисунок 2 — Метод обследования стыкового сварного шва для измерения твердости по Виккерсу

Размеры в миллиметрах



A — зона термического влияния шва (видимая после травления); *B* — линии вдавливаний при анализе твердости (с *1* по *12*); *C* — слой наплавления (видимый после травления).

[a] С помощью методов измерения твердости по Виккерсу или Роквеллу (шкала № 15) отпечатки *2, 6* и *10* должны полностью располагаться в зоне термического влияния и как можно ближе, но не ближе чем 1 мм от линии сплавления между наплавленным слоем и HAZ.

Метод измерения твердости по Роквеллу (шкала *C*) можно использовать в соответствии с требованиями 7.3.3.2. Отпечатки HRC в зоне HAZ должны располагаться в пределах 2 мм от границы сплавления

Рисунок 6 — Сварка наплавлением

*Выдержка из ГОСТ 53678-2009

Методика измерения твердости	Места измерения твердости для аттестации технологии сварки	Ед. твердости, не более
HV10 или HV5 по Виккерсу или HRN 15 по Роквеллу	Корень шва: Основной металл, металл HAZ и корня шва в соответствии с рисунками 2,3 или 4	250HV 70.6 HRN
	Основной металл, металл и HAZ для сварки наплавлением в соответствии с рисунком 6, см. также A2.1.5, перечисление b)	250HV 70.6 HRN
HV10 или HV5 по Виккерсу или HRN 15 по Роквеллу	Верхняя часть шва: Основной металл, металл HAZ и металл верхней части вне зоны HAZ в соответствии с рисунком 2 или 4	275 HV[a)] 73,0 HRN 15
HRV по РОквеллу (см. 7.3.3.2)	Как показано на рисунке 5	22 HRC
	Основной металл, металл и HAZ для сварки напылением в соответствии с рисунком 6, см также A2.1.5. перечисление b)	22 HRC

a) Максимальное значение должно быть 250 HV или 70,6 HRN 15, если:
- пользователь оборудования не установил альтернативные пределы твердости верхней части сварного шва;
- основной материал(ы) не имеет толщину выше 9 мм;
- на верхнюю часть сварного шва непосредственно действует сероводородсодержащая среда;
- удалению водорода препятствует, например, катодная защита.

*Выдержка из ГОСТ 53678-2009

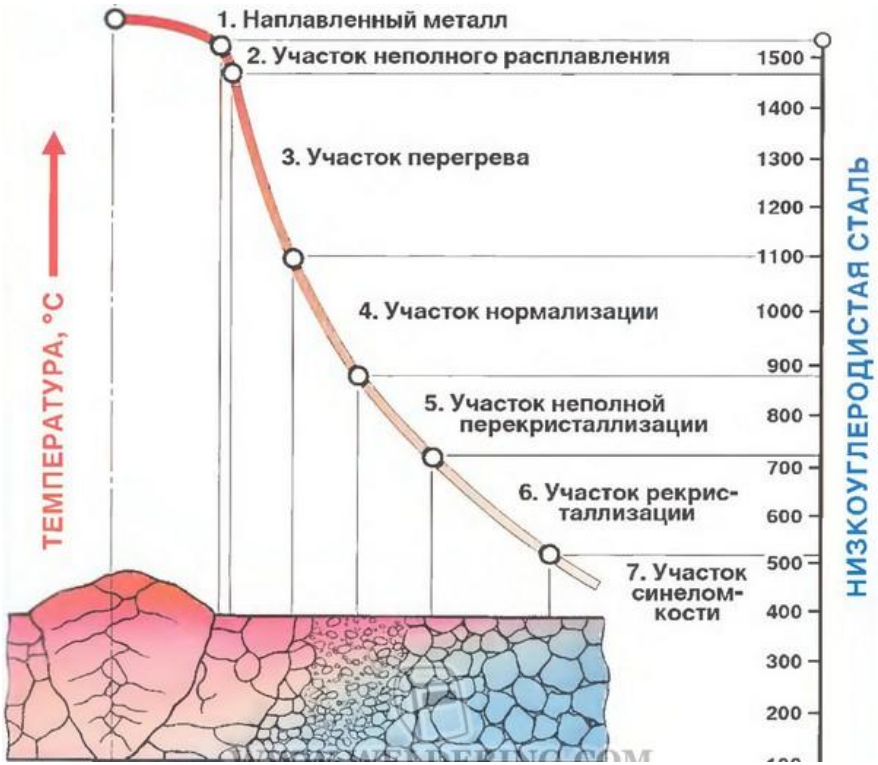
Таблица B.1 — Лабораторные испытания SSC для эксплуатации в среде, содержащей сероводород

Область применения	Тип испытания[a), b), h)]	Приложенное напряжение[c), d)]	Среда	Парциальное давление H_2S	Критерии приемки	Примечание
Специфическое применение или зоны SSC 1 и SSC 2 (рисунок 1)	UT	≥ 90 % AYS	5 % масс. NaCl + 0,4 % масс. CH_3COONa, pH регулируется до требуемого значения с помощью HCl или NaOH[e)]	Соответствует предполагаемому применению или области SSC	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Конкретное применение или менее жесткие условия[f)]
	FPB[i)] или CR					Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	
Все области SSC по рисунку 1	UT FPB[i)] или CR	≥ 80 % AYS	Среда A по [18] (5 % масс. NaCl + 0,5 % масс. CH_3COOH)	100 кПа в соответствии с [19]	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	

a) Типы испытаний:
- UT (одноосное растяжение) — испытание в соответствии с [18] (метод A);
- FPB (изгиб в четырех точках) — испытание в соответствии с [19] (приложение 2);
- CR (разрезное кольцо) — испытание в соответствии с [18] (метод C);
- DCB (двухконсольная балка) — испытание в соответствии с [18] (метод D);
- - если целесообразно, могут быть использованы другие образцы для испытаний, включающие компоненты в натуральную величину. Их использование возможно при наличии договоренности между покупателем и поставщиком.
- ь) **Испытания FPB, CR или UT являются предпочтительными для оценки сварных соединений деталей (см. 7.3 и 7.4). Сварные образцы: обычно образцы для испытаний берут в направлении, поперечном сварному шву' испытание следует проводить при фактическом пределе текучести основного металла**.
- c) Для тех случаев применения, когда гарантируют низкий уровень рабочих напряжений конструкций, напряжение при испытании можно понизить до уровня максимального рабочего напряжения конструкции. В таких случаях критерии испытаний и приемки результатов должны быть согласованы с пользователем оборудования. Такое согласование должно быть документально зафиксировано.
- d) AYS — фактический предел текучести материала в его окончательной форме при температуре испытаний. AYS должен быть равен значению Rp0i2, указанному в технической характеристике изделия.
- e) Для целей испытаний SSC при определенном уровне pH значение pH во время испытаний следует контролировать с точностью ± 0,1 pH.
- f) Испытание в условиях, перечисленных в таблице B.2, обеспечивает оценку для использования в рассматриваемой зоне.
- g) В особых случаях для заготовок крупного сечения или сечения сложной формы испытания DCB могут быть использованы для обоснования проектных разработок, опирающихся на механику разрушения.
- h) Типы испытаний не обязательно являются эквивалентными, и их результаты могут быть не сопоставимы.
- i)Если выполняют оценку стойкости к SOHIC и/или SZC (см. 7.2.2), следует выполнять требования данной таблицы и B.4

Структура сварного соединения

Термический цикл сварки



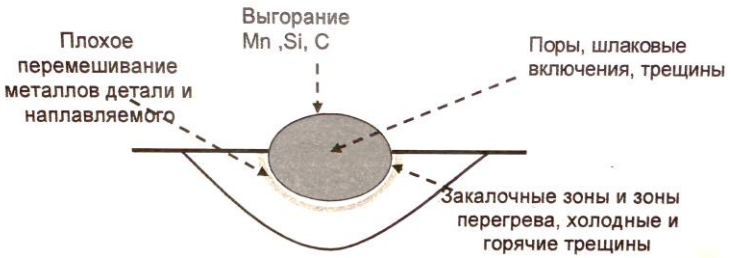
Свойства сварного соединения определяются характером тепловых воздействия на металл в околошовных зонах.

Степень проплавления свариваемых кромок

Вид сварного соединения	Свариваемая сталь	Степень проплавления (%) при сварке			
		ручной дуговой	автоматической под флюсом	наплавке ленточным электродом	электрошлаковой
Наплавка валика	Перлитная Аустенитная	15—40 25—50	25—50 35—60	8—20 15—25	— —
Однослойные стыковые соединения	Перлитная Аустенитная	20—40 30—50	25—50 40—60	— —	20—40 30—50
Корневые швы многослойных стыковых и тавровых соединений	Перлитная Аустенитная	25—50 35—50	35—60 40—70	— —	— —

В зоне термического влияния могут быть участки:
- старения (200-300 ºС)
- отпуска (250-650 ºС)
- неполной рекристаллизации (700-870 ºС)
- нормализации (840 -1000 ºС)
- перегрева (1000-1250 ºС)
- околошовный участок, примыкающий к линии сплавления (1250 -1600 ºС)

Возможные дефекты в сварном шве



При сварке возможны два случая предельных случая:
- резкая закалка при быстром охлаждении околошовной зоны;
- перегрев при медленном охлаждении и образование крупных зерен.

Особенности процесса сварки разнородных сталей

Изменение состава и образование промежуточных слоев при сплавлении

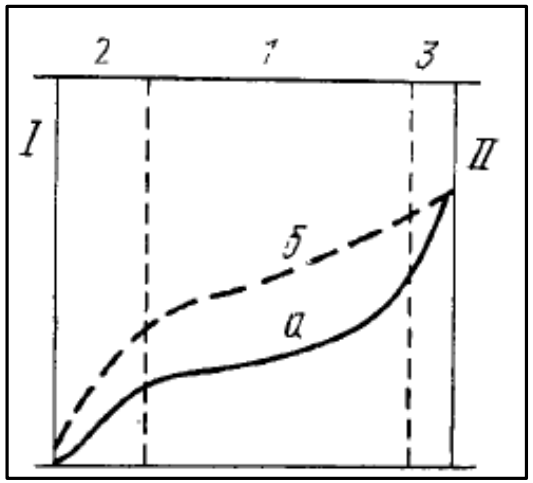
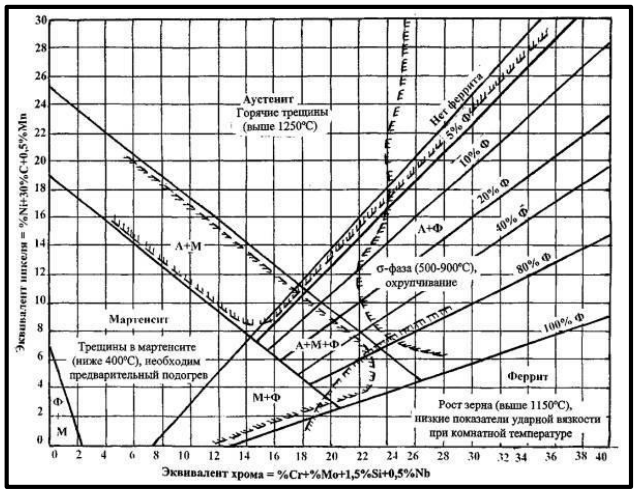


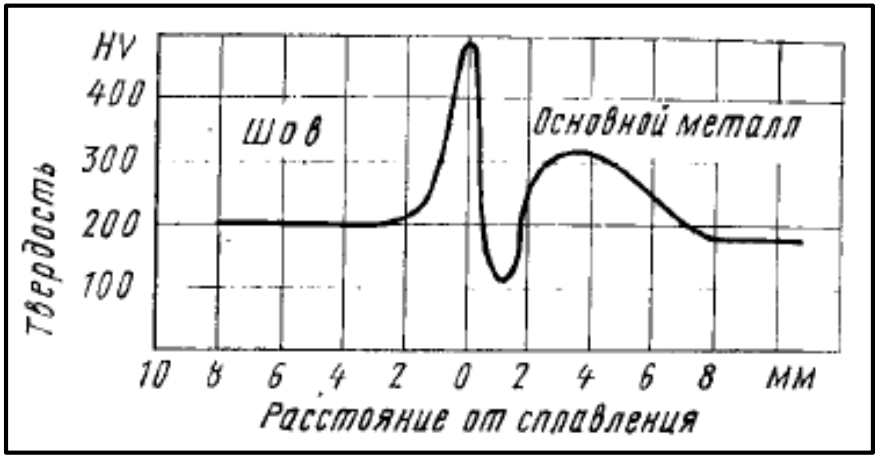
Диаграмма Шеффлера



Кинетика микроструктурных изменений разнородных металлов в сварном шве



Твердость на участке сплавления стали 30ХМА с 08Х18Н10



Влияние легирующих элементов на величину обезуглероженного слоя

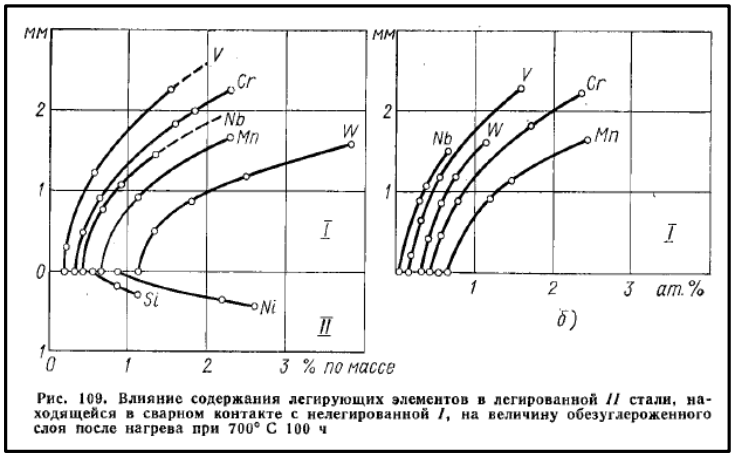
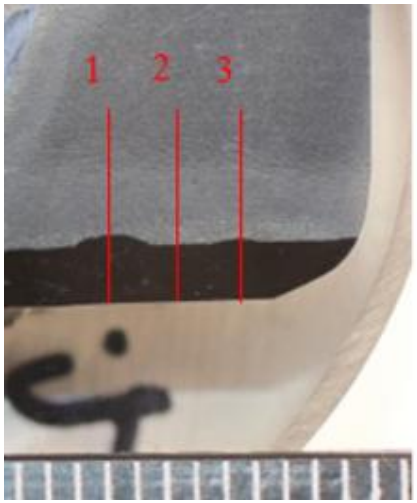


Рис. 109. Влияние содержания легирующих элементов в легированной *II* стали, находящейся в сварном контакте с нелегированной *I*, на величину обезуглероженного слоя после нагрева при 700° С 100 ч

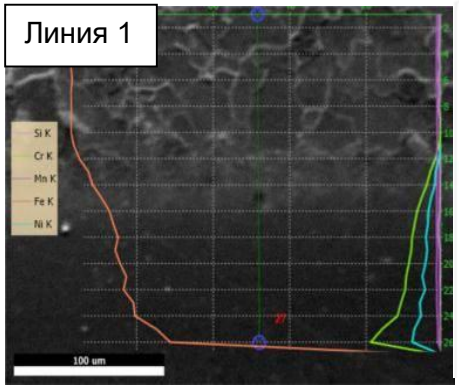


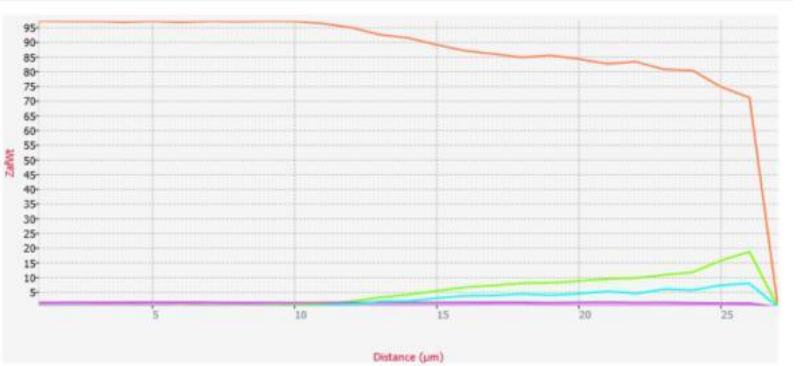
Рис. 110. Влияние относительного легирования Me/C стали на величину обезуглероженного слоя в нелегированной стали после нагрева при 700° С 100 ч

Химический состав переходной зоны от наплавки к основному металлу

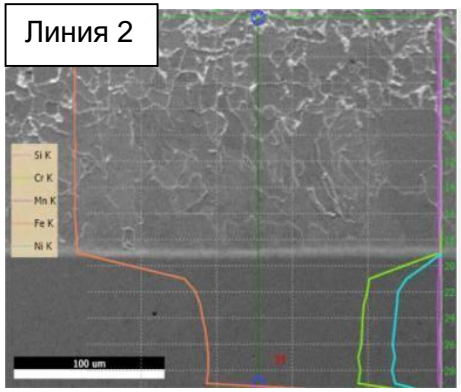


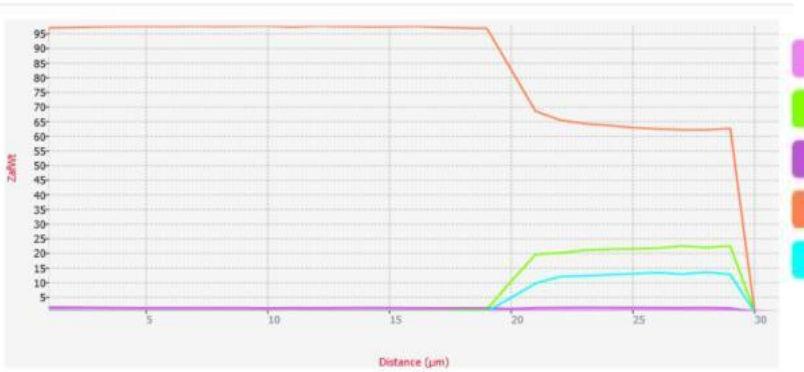
Линия 1



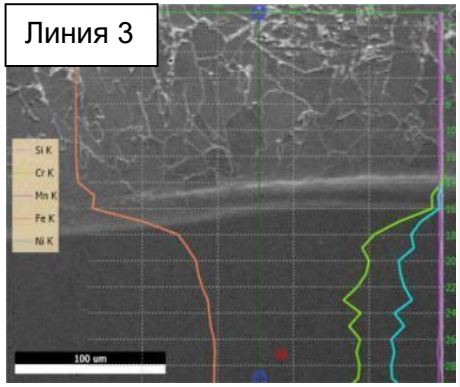


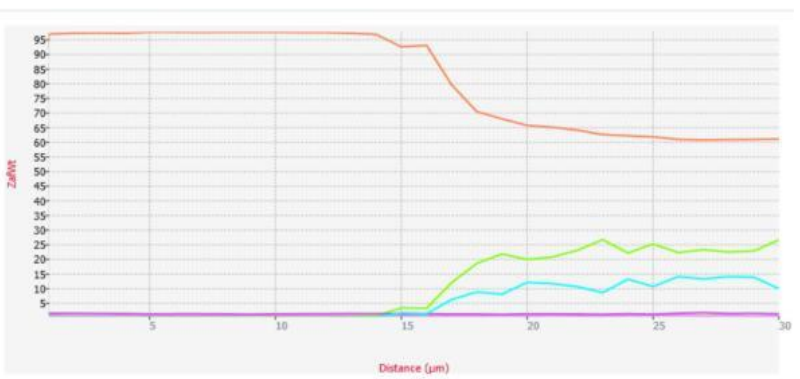
Линия 2



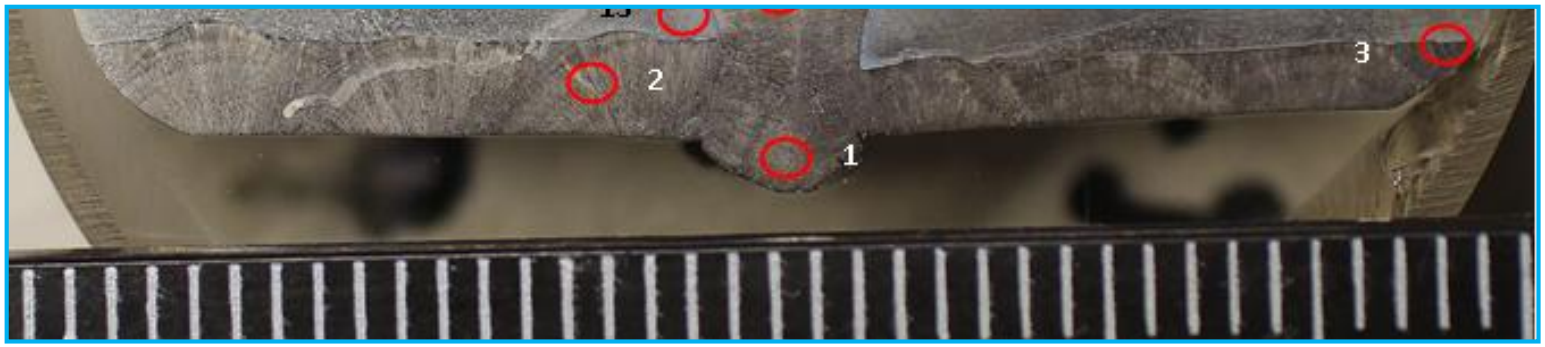


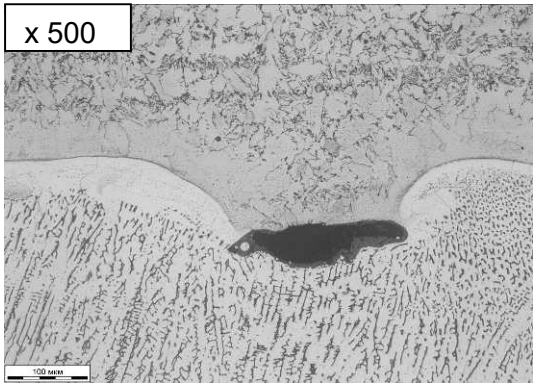
Линия 3

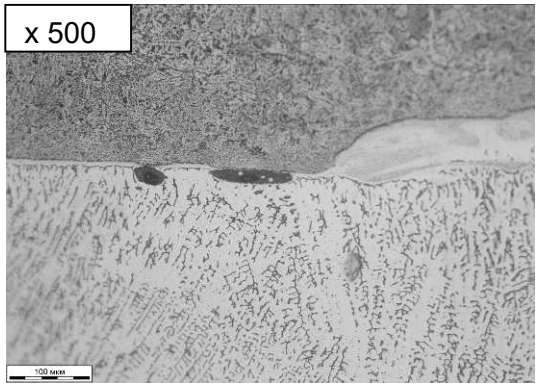


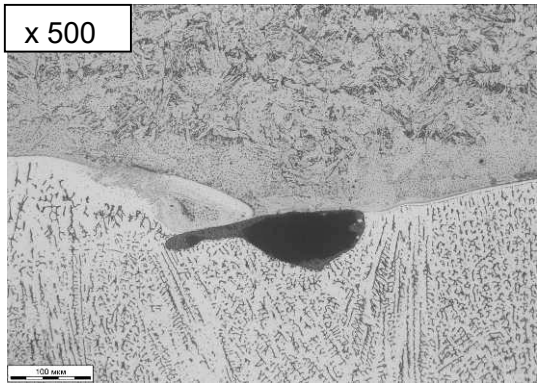


Дефекты наплавки

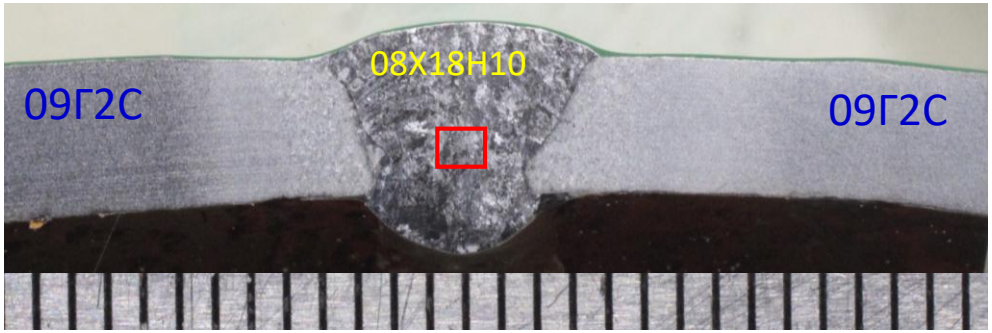






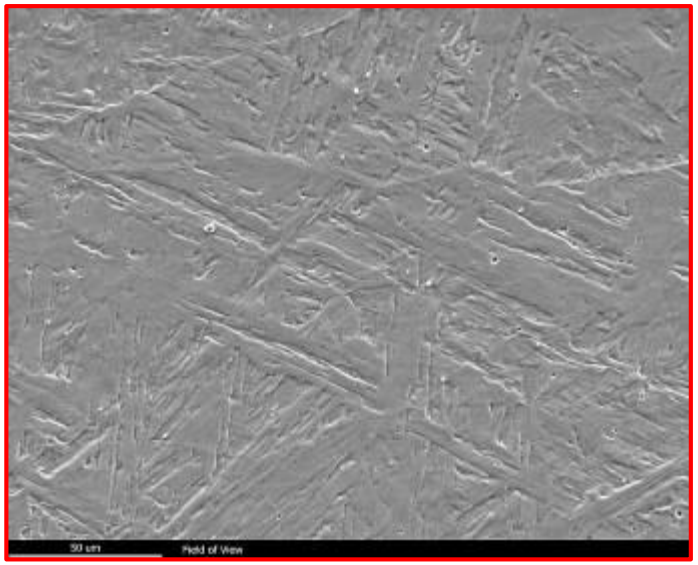


Сварное соединение 09Г2С+08Х18Н10



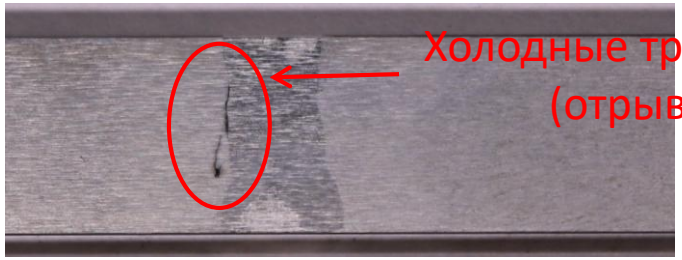


Твердость HV ^{200}, кг/мм^2 (HRC)									
Область измерения	Наружная поверхность			Центральная область			Внутренняя Поверхность		
Сварное соединение	395,1 (40)	417,3 (42)	401,9 (41)	404,6 (41)	407,4 (41)	413,0 (42)	386,0 (39)	397,8 (41)	392,5 (40)



№	Массовая концентрация элементов, %				
	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
1	1,11	1,95	12,65	5,59	Ост.

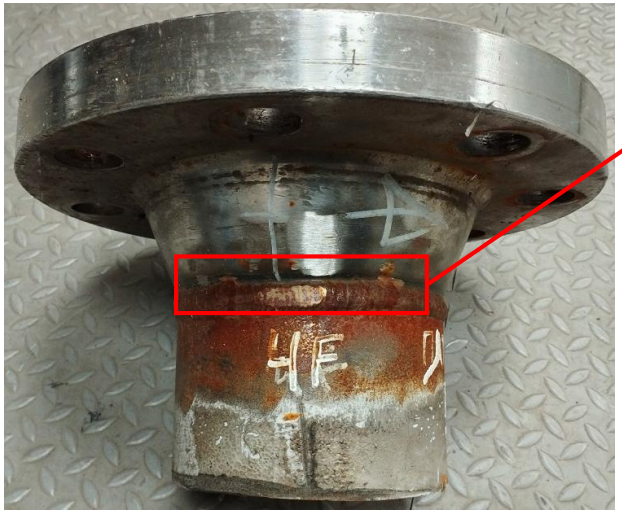
Дефекты в сварном шве



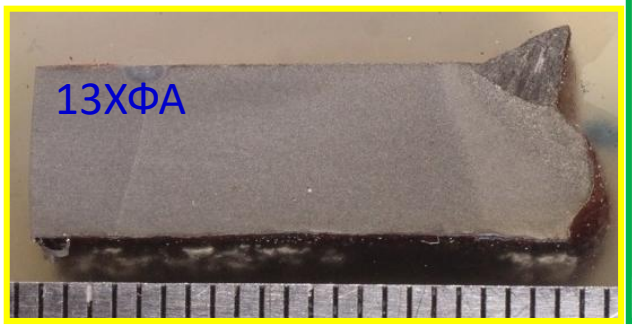
Образец после испытания на статический изгиб



Сварное соединение разнородными материалами

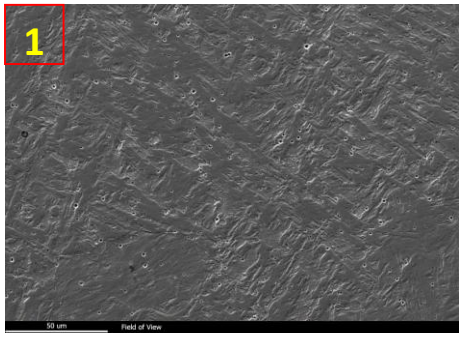


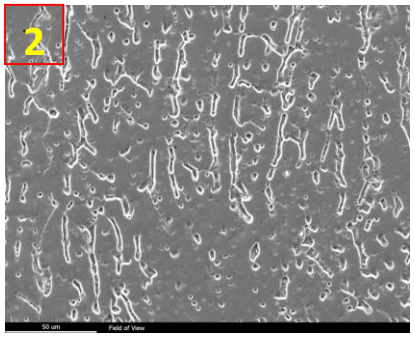


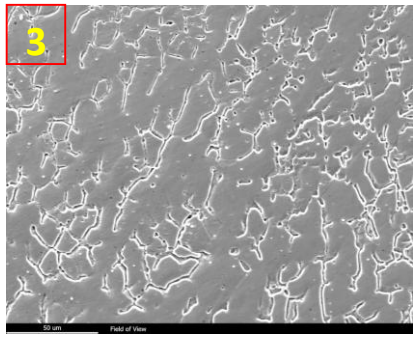




Твердость HV ^{200}, кг/мм^2 (HRC/HRB)												
Область измерения	Облицовочный слой (обл.1)				Заполняющий слой (обл.2)			Корневой слой (обл.3)				
Сварное соединение	397,8 (40)	404,6 (41)	438,3 (44)	361,5 (37)	207,9 (94)	210,4 (95)	215,7 (96)	225,1 (97)	221,7 (97)	210,9 (95)	222,3 (97)	233,9 (99)

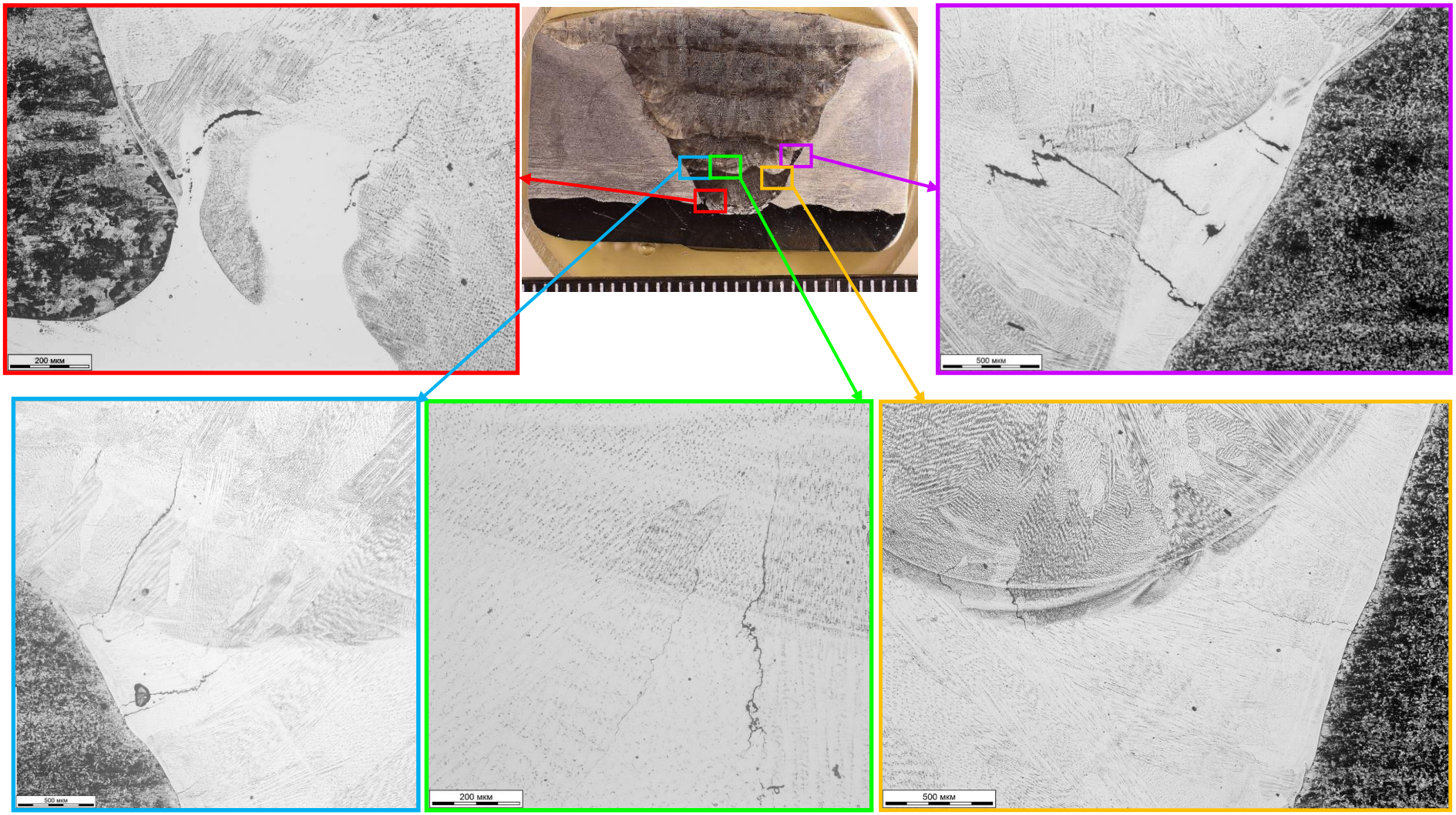






№	Массовая концентрация элементов, %					
	Si	Mo	Cr	Mn	Ni	Fe
1	0,70	-	7,10	1,00	3,70	Ост.
2	1,07	0,42	19,20	0,97	9,34	Ост.
3	1,07	0,74	18,92	0,74	9,31	Ост.

Вид дефектов в сварном соединении



ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Основные механизмы коррозионного разрушения деталей оборудования. Способы повышения коррозионной стойкости материалов. Виды коррозионных испытаний

Докладчик:
Руководитель ДСМ ООО «ИТ-Сервис», к.т.н.
Чистопольцева Елена Александровна

Механизм протекания углекислотной коррозии

Схема развития язвенной CO2 коррозии

Образование угольной кислоты

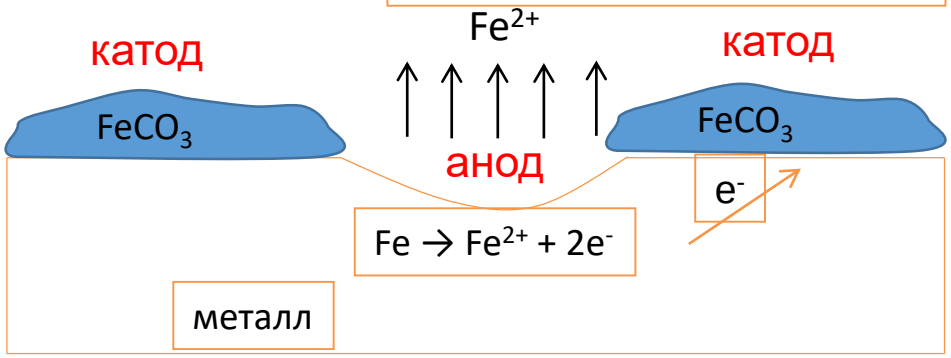
$CO_{2(газ)} + H_2O_{(жидк)} \leftrightarrow H_2CO_{3(жидк.)}$

$Fe^{2+} + CO_2^{3-} \rightarrow FeCO_3$

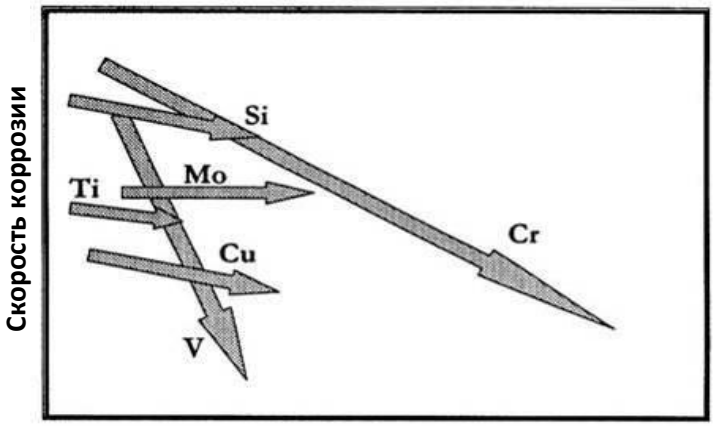
$2H_2CO_3 + 2e^- \rightarrow H_2 + 2HCO_3^-$

$2HCO_3 + 2e^- \rightarrow H_2 + 2CO_3^{2-}$

$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$



Влияние легирующих элементов



(Микро) легирующая добавка

Повышение минерализации увеличивает вероятность протекания язвенной коррозии

pH 5.5-6.5

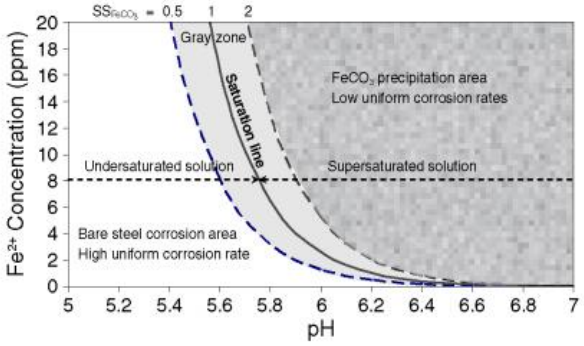


FIGURE 11. *Calculated pH effect on solubility of $FeCO_3$ and the "gray zone" at T = 80°C, p_{CO_2} = 0.53 bar, [NaCl] = 1 wt%.*

pCO2 < 2bar

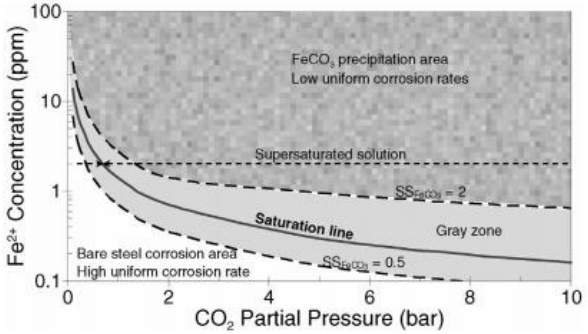


FIGURE 13. *Calculated effect of CO_2 partial pressure on solubility of $FeCO_3$ and the "gray zone" at T = 80°C, pH 6.0, [NaCl] = 1 wt%.*

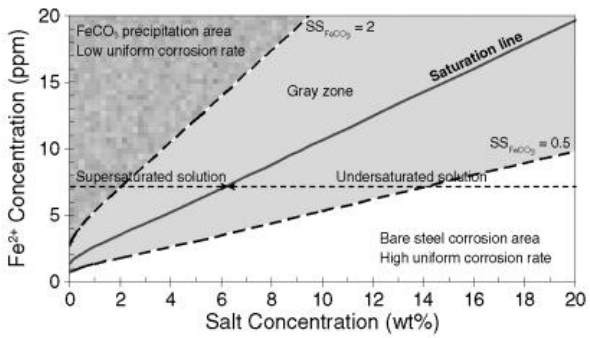


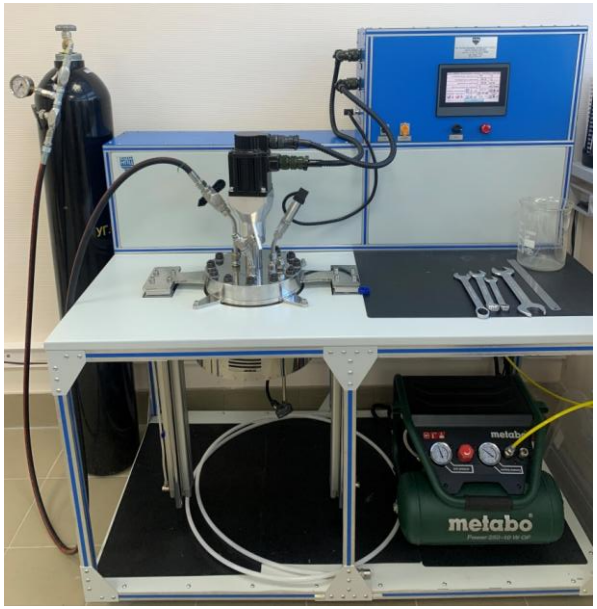
FIGURE 14. *Salt effect on the "gray zone" width at T = 80°C, p_{CO_2} = 0.53 bar, pH 6.0, [NaCl] = 1 wt%.*

Результаты лабораторных испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

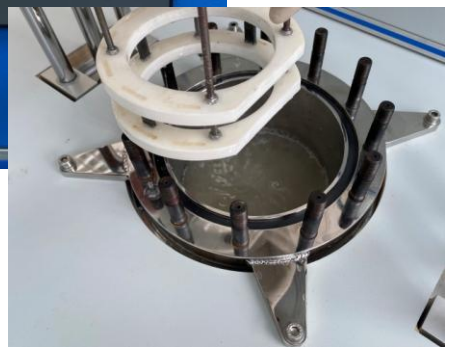
Химический состав исследуемых сталей

Марки стали	Содержание элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	S	P
09Г2С	0,13	0,66	1,36	0,03	0,10	0,16	0,02	<0,01	0,01	0,006	0,011
20	0,20	0,18	0,50	0,06	0,08	0,011	0,03	<0,01	0,029	0,002	0,003
45Г	0,45	0,25	0,97	0,26	0,24	0,23	-	-	0,02	-	-
30ХГМА	0,30	0,21	0,95	0,78	0,096	0,17	0,30	0,004	0,022	0,005	0,007
30ХМА	0,29	0,29	0,51	0,89	0,185	0,20	0,15	<0,01	0,033	0,006	0,012
05ХФА	0,05	0,31	0,66	0,64	0,065	0,14	0,02	0,06	0,034	0,004	0,006
13ХФА	0,15	0,24	0,58	0,58	0,091	0,17	0,02	0,05	0,03	0,004	0,011
18Х1МФБ	0,18	0,28	0,59	1,01	0,14	0,19	0,15	0,07	0,04	0,009	0,007
18Х3МФБ	0,17	0,25	0,57	2,55	0,06	0,01	0,12	0,06	0,029	0,005	0,011
05Х5М	0,07	0,45	0,43	4,46	0,13	0,18	0,25	<0,01	0,04	0,005	0,003
Cr9	0,13	0,57	0,54	8,35	0,11	0,04	0,92	-	-	0,002	0,009
20Х13	0,19	0,33	0,34	12,20	0,25	0,11	-	0,02	-	0,004	0,020
316L	0,06	0,58	1,28	16,6	10,5	0,40	2,12	0,056	<0.01	0,012	0,033

Вид автоклавной установки для проведения испытаний



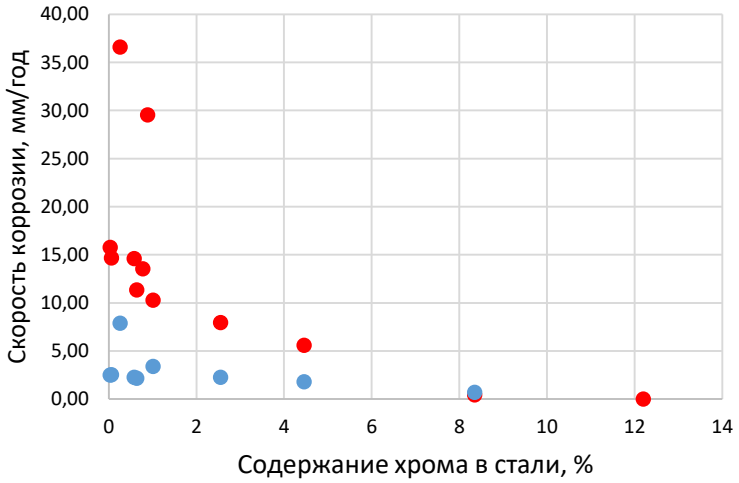


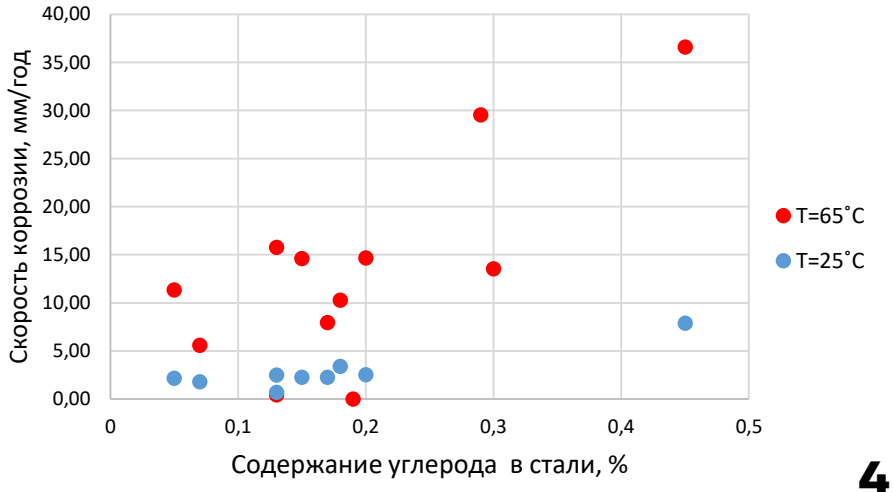


Результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

Объект испытания	P CO_2, атм	25 г/л NaCl+25 г/л $CaCl_2$, 25°C				25 г/л NaCl +25 г/л $CaCl_2$, 65°C				25 г/л NaCl +25 г/л $CaCl_2$+10 мг/л Na_2S, 65°C	
		24ч	48ч	72ч	900 об/мин	24ч.	72ч.	500 об/мин	900 об/мин	24ч	72ч
Материалы для системы добывающих скважин и погружного оборудования											
N80Q (45Г)	40	7,90				36,59					
30ХМА (г/к)						29,55	18,73				
30ХГМА (з+о)						13,55					
18ХМФБ (зав.)		3,41				10,30	7,27				
18Х3МФБ (зав.)		2,27				7,94		13,40			
05Х5М (лаб.)		1,80		1,02		5,58	3,16	6,26			
9Cr1Mo		0,93				0,45					
20Х13				0,06		0	0,02			0,10	0,07
AISI 316L		0				0	0	0	0		
Материалы для трубопроводов											
09Г2С	40	2,48	2,08		8,51	15,77	13,74		38,74	1,75	1,63
20 (зав.)		2,52				14,67					
13ХФА (зав.)		2,27				14,62					
05ХФА (зав)		2,18				11,36	5,93				

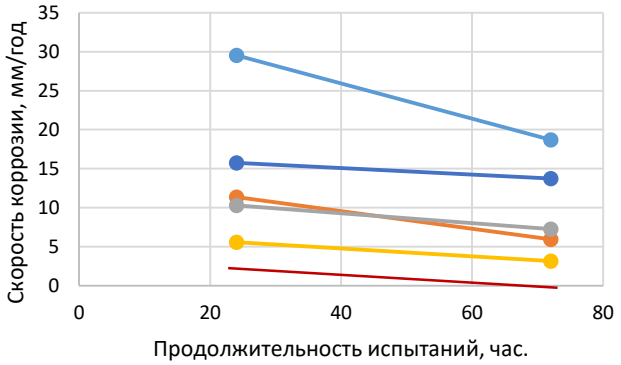
Влияние хрома и углерода на скорость общей коррозии в CO_2-содержащей среде

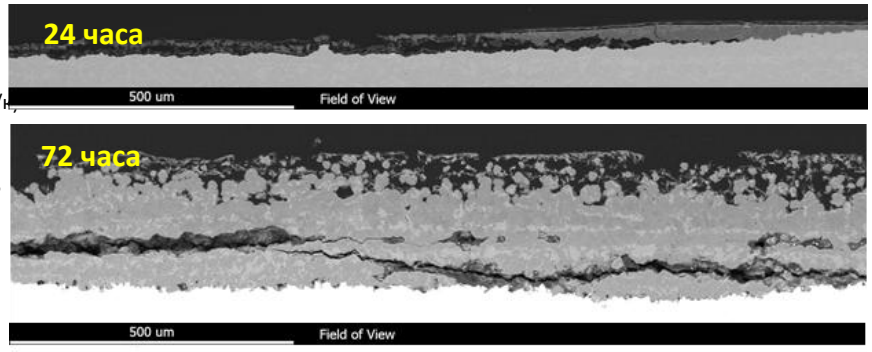




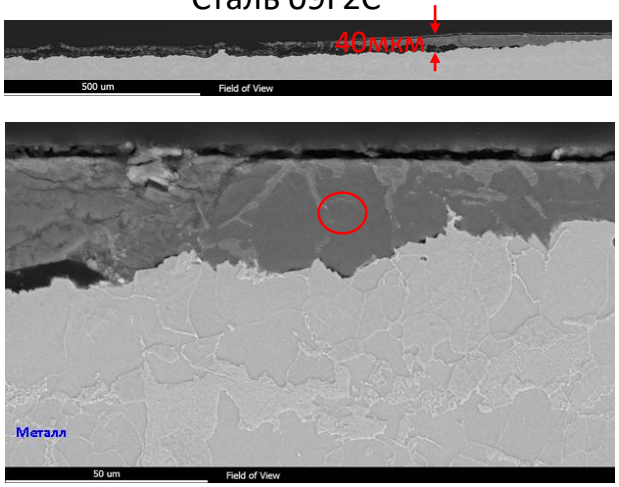
Результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

Влияние продолжительности испытаний на скорость коррозии стали 09Г2С в среде 25 г/л NaCl+25 г/л CaCl2 при T=65˚C, $P_{парц}$ CO_2 = 40 атм

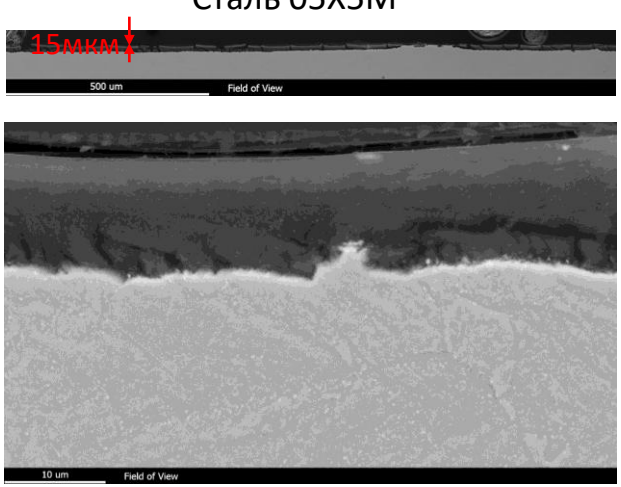




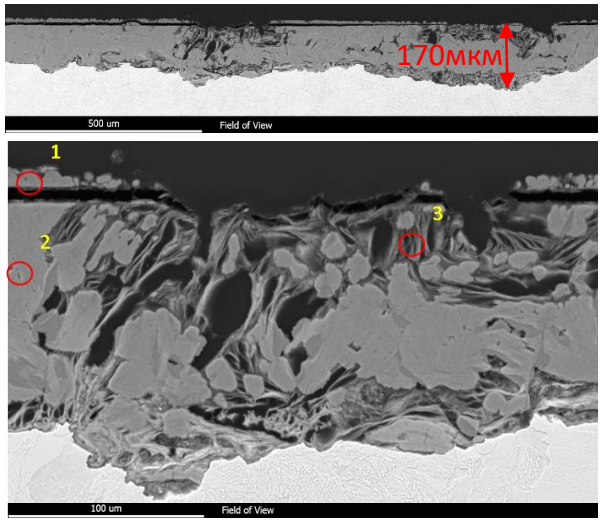
Сталь 09Г2С



Сталь 05Х5М



Сталь 45Г1



Массовая концентрация элементов, %						
C	O	S	Cl	Ca	Mn	Fe
32,28	20,55	00,62	00,90	05,63	01,49	Ост.

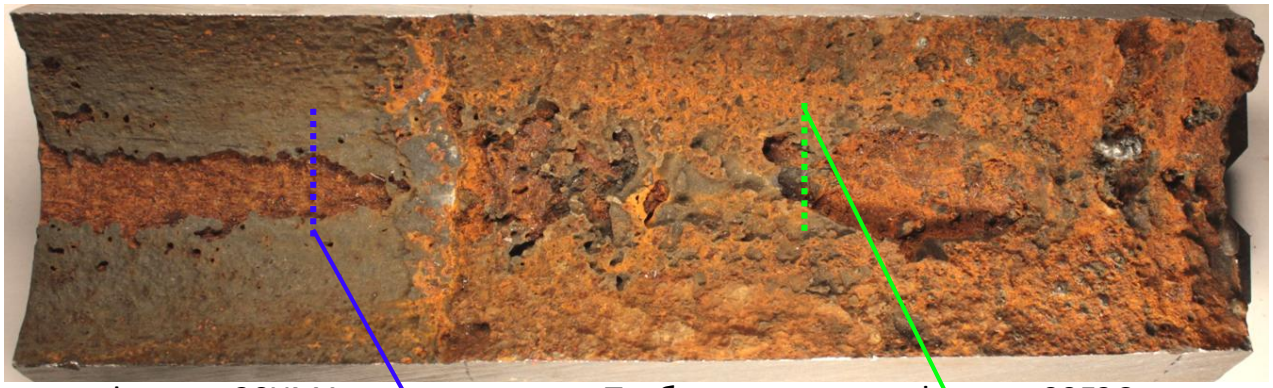
Массовая концентрация элементов, %							
C	O	Al	Mo	Cl	Ca	Cr	Fe
20,78	30,30	00,50	03,64	00,92	04,60	34,63	Ост..

	Массовая концентрация элементов, %							
	C	O	Al	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe
1	08,33	35,17	00,33	-	27,67	-	-	Ост.
2	07,55	28,33	00,52	-	15,94	01,14	01,30	Ост.
3	43,53	09,89	00,78	00,79	01,51	02,20	02,48	Ост.

Основные результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

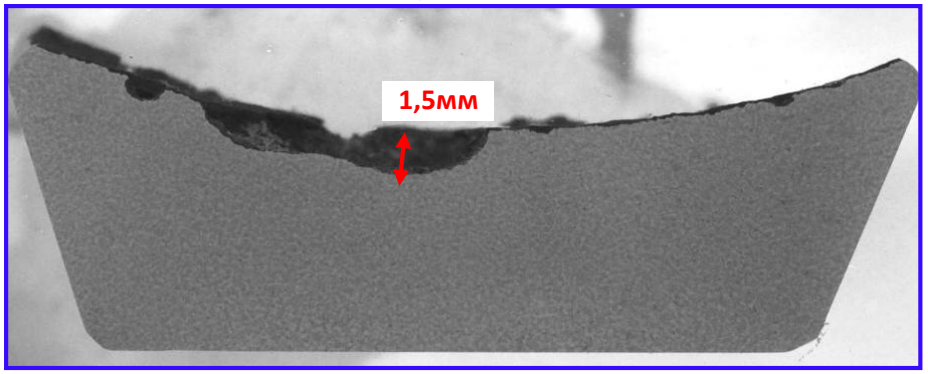
- Увеличение продолжительности экспозиции приводит к снижению скорости коррозии хромистых сталей за счет формирования защитного слоя продуктов коррозии;
- Повышение содержания хрома в стали уменьшает скорость углекислотной коррозии;
- Повышение температуры модельной среды ускоряет коррозионные процессы;
- В ходе испытаний показано, что строение слоя продуктов коррозии зависит от химического состава стали – наличие в составе стали хрома и молибдена оказывает влияние на формирование основного слоя продуктов коррозии и слоя осадочных кристаллов карбоната железа;
- При схожей микроструктуре испытываемых образцов, химический состав стали оказывает гораздо большее влияние на скорость коррозии и характер коррозионного повреждения стали;
- Продукты коррозии, образующиеся на месте растворения стали наследуют его карбидную составляющую;
- При проведении данных испытаний механическое воздействие среды на продукты коррозии и эффекты с этим связанные не моделировались. Вероятно с этим связано образование осадочных слоев карбоната железа;
- При увеличении скорости потока модельной среды повышает скорость общей коррозии. Чем выше содержание хрома в стали, тем меньше влияние потока.

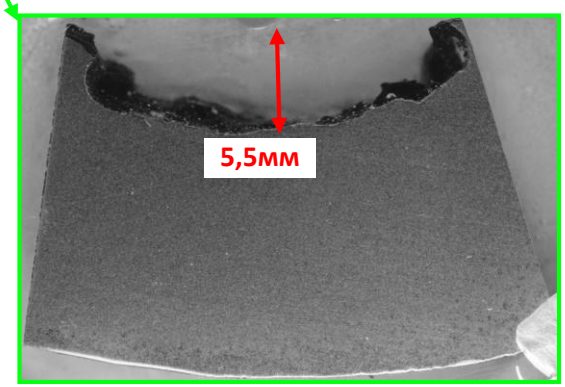
Углекислотная коррозия как основная причина преждевременного разрушения элементов обвязки скважины ОАО «Газпром добыча Уренгой»



Фланец 30ХМА

Трубная вставка на фланец 09Г2С





Условия эксплуатации

P, МПа	55
T раб, °C	105
Обводненность, %	1
Мольное содержание CO2, моль %	0,92

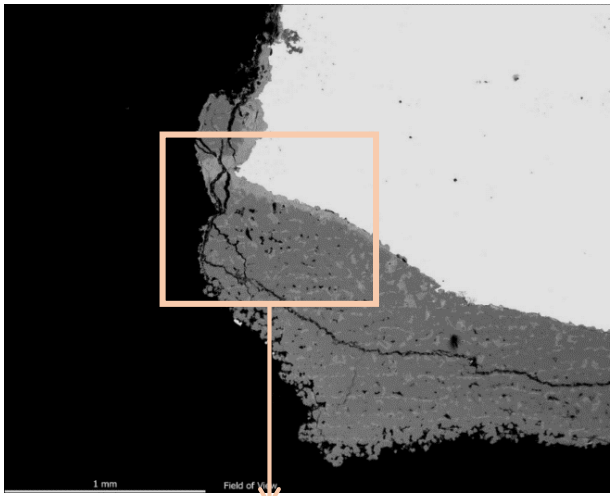
Характеристики металла элементов обвязки

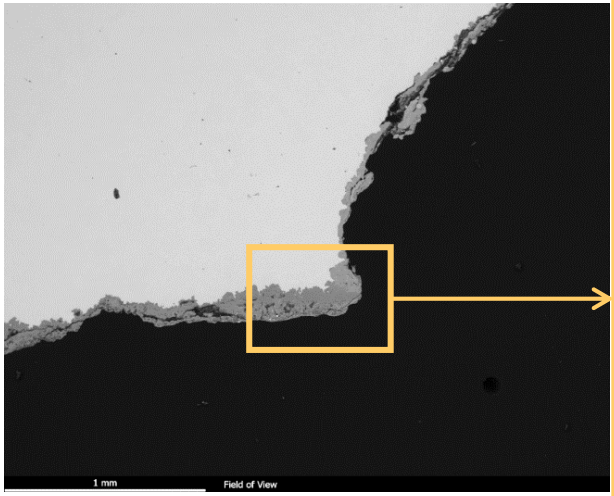
Объект	Химический состав исследованных объектов. Содержание элементов, %													Результаты измерения твердости
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	W	Ti	Al	Mo	S	P	HRB, ед.
Трубная вставка, Сталь 09Г2С	0,10	0,70	1,46	0,08	0,03	0,16	0,01	-	0,007	0,02	-	0,012	0,005	78,0-78,5
Фланец, Сталь 30ХМА	0,25	0,27	0,46	0,83	0,11	0,22	0,01	<0,01	0,01	-	0,17	0,014	0,008	88,5-89,0

Углекислотная коррозия как основная причина преждевременного разрушения элементов обвязки скважины ОАО «Газпром добыча Уренгой»

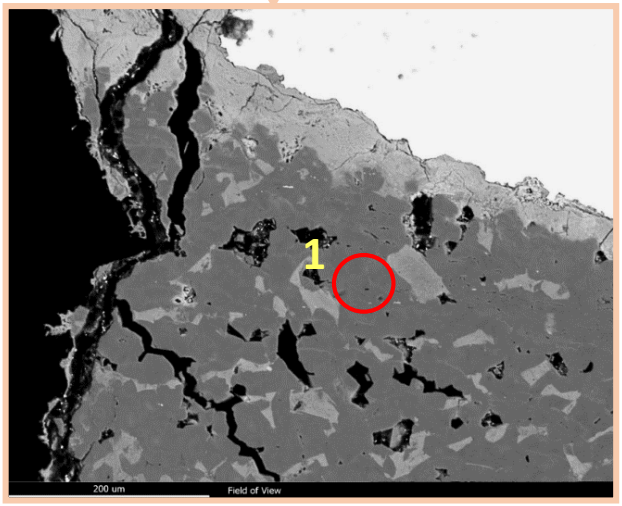
Сечение продуктов коррозии на берегах язвы трубной вставки фланца из стали 09Г2С

Сечение продуктов коррозии на берегах язвы на фланце из стали 30ХМА









	Массовая концентрация элементов, %									
	O	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Zn	Fe
1	29,75	0,56	0,32	0,06	0,28	0,12	0,11	0,59	2,20	67,54
2	30,33	-	-	-	1,17	2,54	1,80	0,64	-	63,10

Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73





Вид объектов исследования при поступлении

Вид ниппельного конца и тела трубы НКТ





Вид внутренней поверхности муфты НКТ



Вид ниппельного конца ОК







Вид корпуса ОК



Вид ниппельного конца шламоуловителя



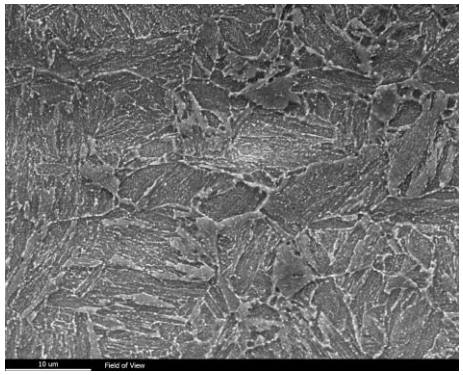


Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73

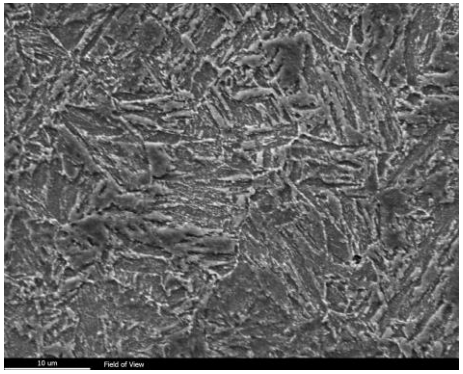
Характеристики металла сборочных единицы колонны

	Массовая доля элементов, %															Твердость
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	Nb	Co	Al	S	P	W	
Труба НКТ	0,300	0,19	0,99	0,84	0,161	0,142	0,28	0,003	0,005	<0,001	0,029	0,030	0,0029	0,009	0,009	20-24 HRC
Обратный клапан	0,411	0,25	0,73	0,96	0,029	0,018	0,003	0,0021	0,0036	0,0011	0,0032	0,030	0,012	0,0073	0,006	33-34 HRC
Шламоуловитель	0,392	0,26	0,71	0,98	0,21	0,013	0,0003	0,0014	0,0035	0,0011	0,0022	0,028	0,0067	0,0069	0,011	79-87,5 HRB
Требования ТУ 24.20.12.120-343-00186619-2018																
30ХГМА	0,27 -0,32	0,17-0,37	0,70-1,10	0,80-1,00	≤0,25	≤0,30	0,30-0,40	-	-	-	-	0,020-0,050	≤0,005	≤0,015	-	-
Требования ГОСТ 4543																
40Х	0,36 -0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,035	≤0,035	-	
Требования ГОСТ 4543																
40ХН	0,36 -0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,45-0,75	1,00-1,40	≤0,30	-	-	-	-	-	-	≤0,035	≤0,035	-	

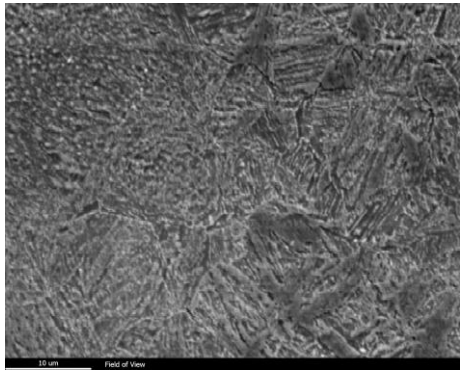
Микроструктура металла НКТ (30ХГМА)



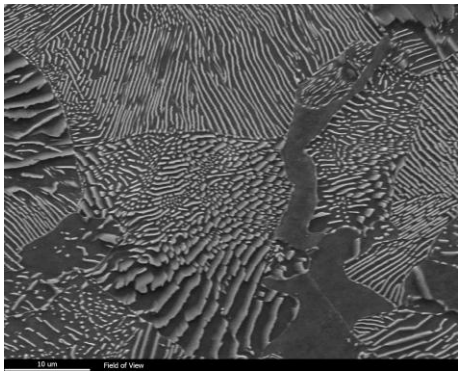
Микроструктура металла муфты НКТ (30ХГМА)



Микроструктура металла обратного клапана (40Х)



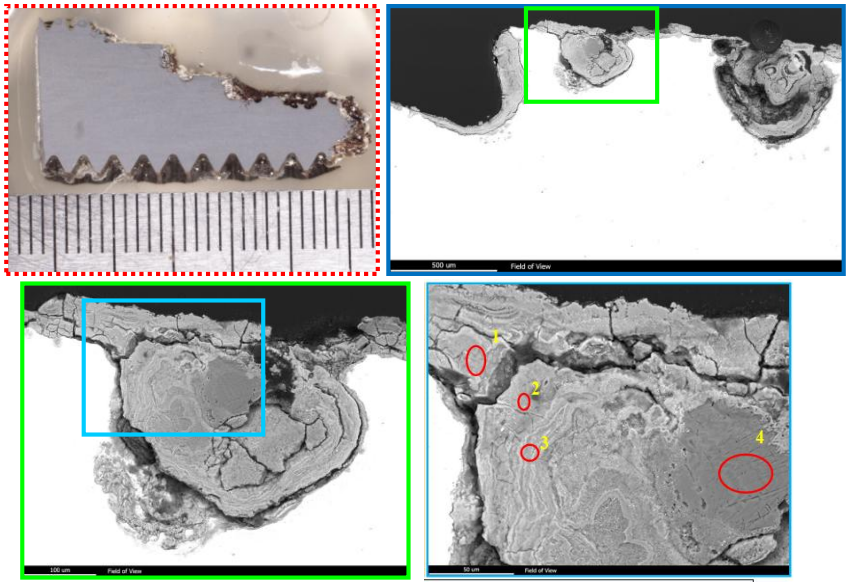
Микроструктура металла Шламоуловителя (40ХН)



Рентгенофазовым анализом установлено, что отложения на внутренней поверхности обратного клапана представлены оксидами (Fe_3O_4), гидроксидами железа ($FeO(OH)_3$, $FeO(OH)$), а также карбоната кальция минерального происхождения ($CaCO_3$)

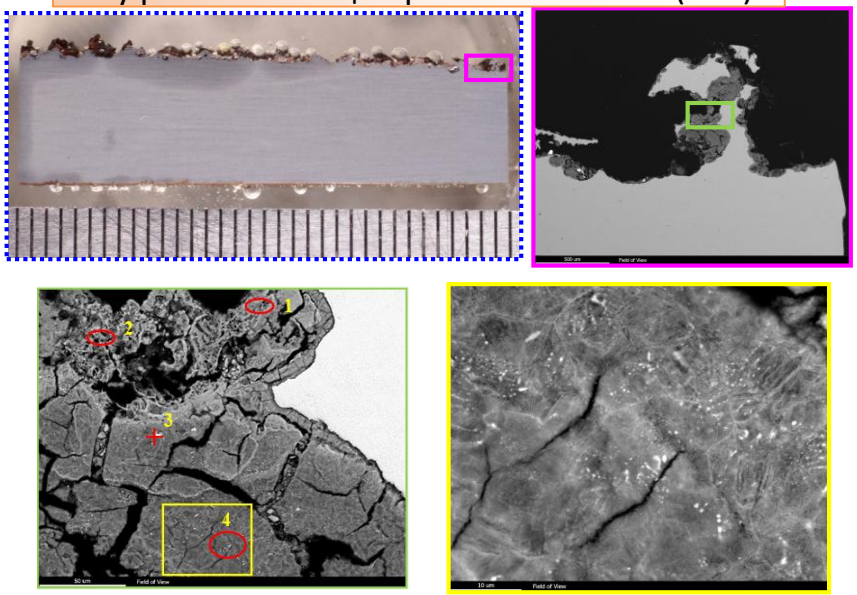
Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73

Ниппельный конец обратного клапана (40Х)



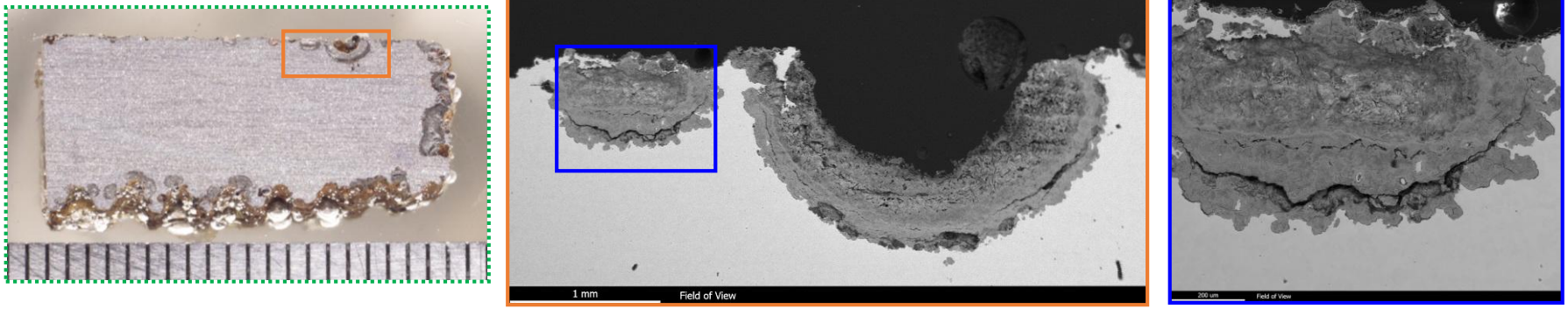
	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Si	Ca	S	Cl	Mg	Mn	Cr	Fe
1	6,36	23,43	1,12	0,36	0,92	1,95	-	0,29	2,49	Ост.
2	5,81	24,23	1,29	-	1,17	4,08	-	0,21	3,86	Ост.
3	5,97	25,13	1,55	-	1,36	1,52	-	0,26	2,83	Ост.
4	8,51	38,75	-	43,56	-	-	0,86	-	-	Ост.

Муфтовый конец обратного клапана (40Х)



	Массовая концентрация элементов, %											
	C	O	Al	Mg	Si	Ca	S	Cl	Mn	Cr	Cu	Fe
1	8,23	21,88	-	-	0,51	1,27	0,34	1,81	0,32	1,16	-	Ост.
2	14,95	18,61	-	-	-	0,91	0,61	3,55	-	0,31	-	Ост.
3	6,80	12,44	6,23	3,92	-	1,79	0,50	0,58	4,37	1,35	21,39	Ост.
4	16,94	17,13	-	0,96	2,06	3,43	-	1,92	0,71	6,85	-	Ост.

Шламоуловитель (40ХН)

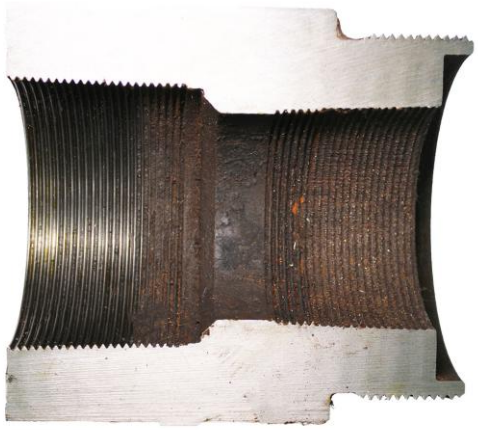


Оценка причин разрушения резьбового соединения пакера

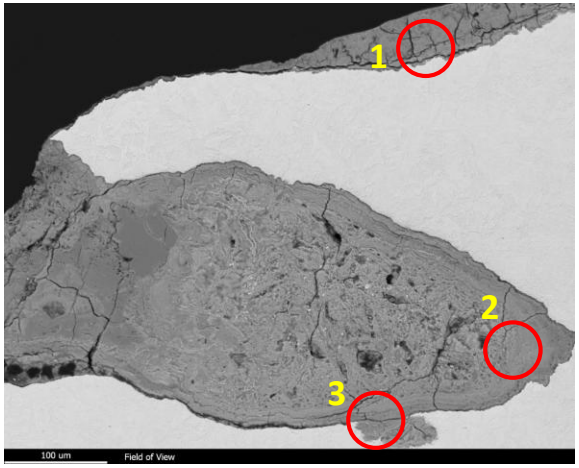
Химический состав пакера

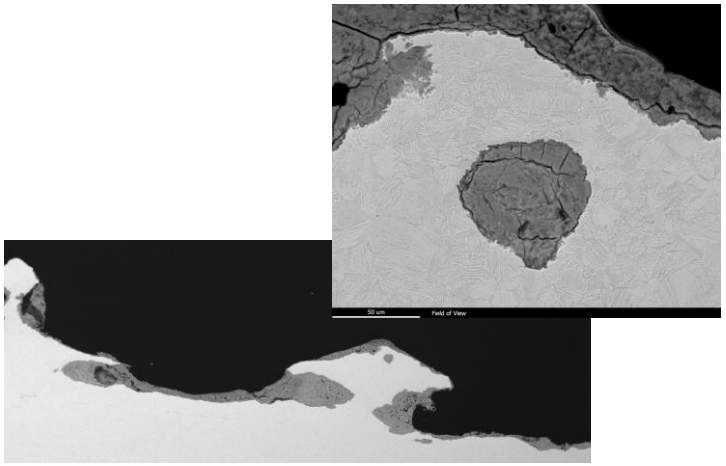
Пакер	Химический состав, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	P	S
	0,379	0,25	0,58	0,89	0,118	0,013	0,015	0,198	0,004	0,0085	0,0094
Требования ГОСТ 4543-16											
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1	<0,3	-	-	<0,3	-	<0,035	<0,035





Твердость металла находится в диапазоне 29,5 – 32,0 HRC





Область измерения	Содержание химических элементов, вес. %										
	C	Si	O	Mn	Na	Cl	Cr	Fe	Ca	K	S
1	9.05	-	27.81	-	1.05	-	-	61.38	0.71	-	-
2	5.54	0.38	23.97	0.48	-	-	2.47	65.68	0.32	0.22	0.95
3	6.59	0.44	21.76	0.46	-	3.64	1.24	65.03	-	-	-



Локальная коррозия

Преждевременный выход из строя резьбового соединения пакера при эксплуатации произошло по причине коррозионно – эрозионного разрушения резьбы, вследствие низкой герметичности межниппельного пространства и попадания коррозионно-агрессивного флюида в межвитковое пространство с последующим ускоренным разрушением металла резьбы по механизму углекислотной коррозии.

Коррозия в H_2S-содержащих средах

НТД на внутрискважинное оборудование

ГОСТ ISO 10432-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Скважинный предохранительный клапан с оснасткой. Общие технические требования

ГОСТ ISO 14310-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Пакеры и мостовые пробки. Общие технические требования

ГОСТ ISO 16070-2015 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Оправки установочные и посадочные ниппели. Общие технические требования

НТД на фонтанное устьевое оборудование

API Spes 6A Технические условия на устьевое и фонтанное оборудование

ГОСТ Р 51365-2009 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для бурения и добычи. Оборудование устья скважины и фонтанное устьевое оборудование. Общие технические требования

NACE MR01—75/ ISO 15156 Требования к материалам для нефтяного оборудования, стойким к сульфидному растрескиванию. Стандарт устанавливает требования к материалам для оборудования, описывает допустимые пределы содержания элементов в материалах, а также методы испытаний, классификацию материалов и области их применения в зависимости от условий эксплуатации.

Критерии в соответствии с NACE MR0175/ISO 15156-2 (ГОСТ Р 53678-09

В **ISO 15156-2** сероводородсодержащие среды по агрессивности делят на 4 основные зоны, где: **0 зона** – полное отсутствие агрессивности в отношении коррозионного растрескивания, а **3 зона** – высокая опасность растрескивания. Положительные результаты полученные при испытании в одной зоне, распространяются на другие зоны уровнем ниже.

Таким образом, испытание на SSC в **зоне 3** (среда А) является наиболее жестким, но при этом универсальным.

Если материал изделия успешно прошел испытания в среде А (условия согласно таблицы В.1), то данное изделие обладает высокой стойкостью к растрескиванию практически во всех сероводородсодержащих условиях.

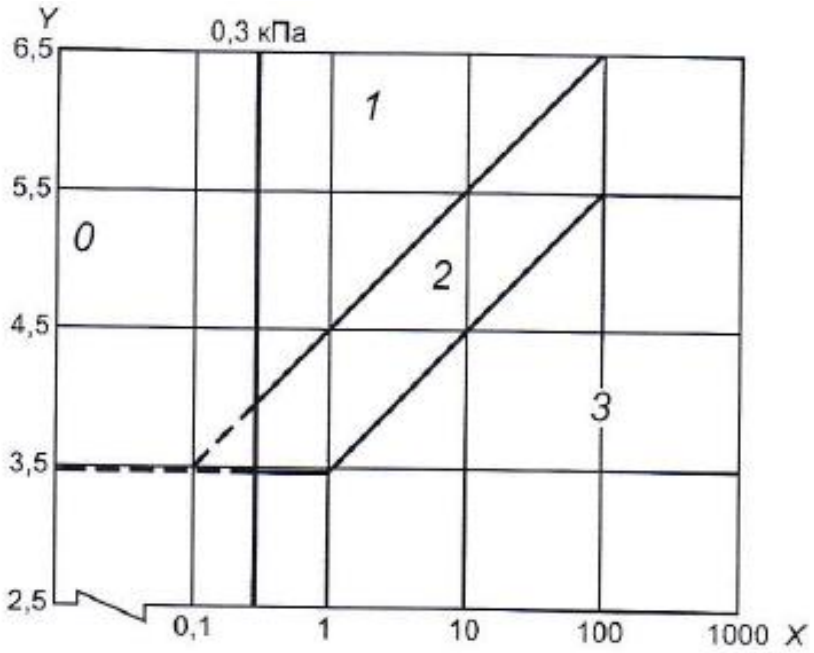


Таблица В.1 — Лабораторные испытания SSC для эксплуатации в среде, содержащей сероводород

Область применения	Тип испытания[a), b), h)]	Приложенное напряжение[c), d)]	Среда	Парциальное давление H_2S	Критерии приемки	Примечание
Специфическое применение или зоны SSC 1 и SSC 2 (рисунок 1)	UT	≥ 90 % AYS	5 % масс. NaCl + 0,4 % масс. CH_3COONa, pH регулируется до требуемого значения с помощью HCl или NaOH[e)]	Соответствует предполагаемому применению или области SSC	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Конкретное применение или менее жесткие условия[f)]
	FPB[i)] или CR					Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	
Все области SSC по рисунку 1	UT FPB[i)] или CR	≥ 80 % AYS	Среда А по [18] (5 % масс. NaCl + 0,5 % масс. CH_3COOH)	100 кПа в соответствии с [19]	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	

[a)] Типы испытаний:
- UT (одноосное растяжение) — испытание в соответствии с [18] (метод A);
- FPB (изгиб в четырех точках) — испытание в соответствии с [19] (приложение 2);
- CR (разрезное кольцо) — испытание в соответствии с [18] (метод C);
- DCB (двухконсольная балка) — испытание в соответствии с [18] (метод D);

Основные виды коррозионного разрушения нефтегазового оборудования в сероводородсодержащих средах

- Сплошная равномерная коррозия. ОК (общая коррозия).

- Растрескивание металла без воздействия приложенных или остаточных растягивающих напряжений. HIC (hydrogen-induced cracking) или ВР (водородное растрескивание);

- Растрескивание металла под воздействием приложенных или остаточных растягивающих напряжений. SSC (sulfide stress cracking) или СКРН (сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением);

Основные параметры увеличивающие склонность формирования HIC :

1) С точки зрения материала:
- прочность/твердость стали;
- загрязненность неметаллическими включениями;
- ликвационная неоднородность (осевая ликвация, полосчатость).

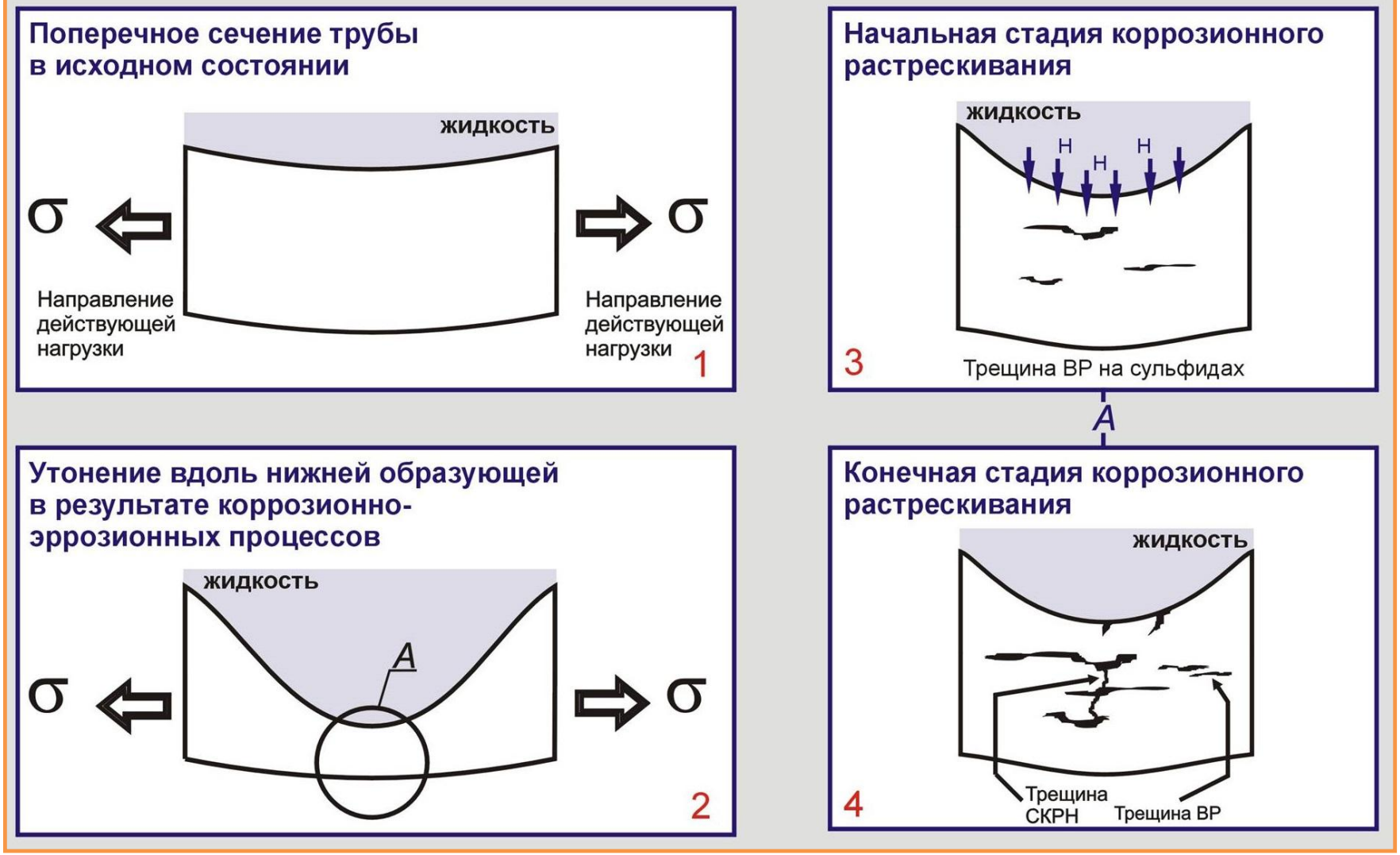
2) С точки зрения среды:
- обводненность;
- pH среды;
- парциальное давление H_2S.

Основные параметры увеличивающие склонность формирования SSC:

1) С точки зрения материала:
- прочность/твердость стали;
- загрязненность неметаллическими включениями;
- наличие в микроструктуре фаз/зерен, выступающих в роли концентраторов напряжений.

2) С точки зрения среды:
- обводненность;
- pH среды;
- парциальное давление H_2S.

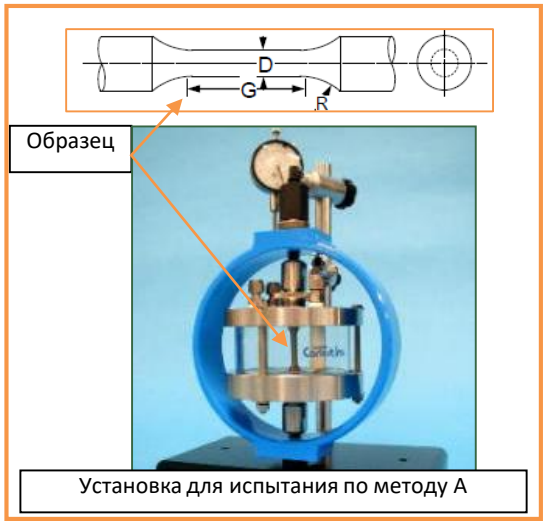
Схема развития трещин в процессе канавочной коррозии

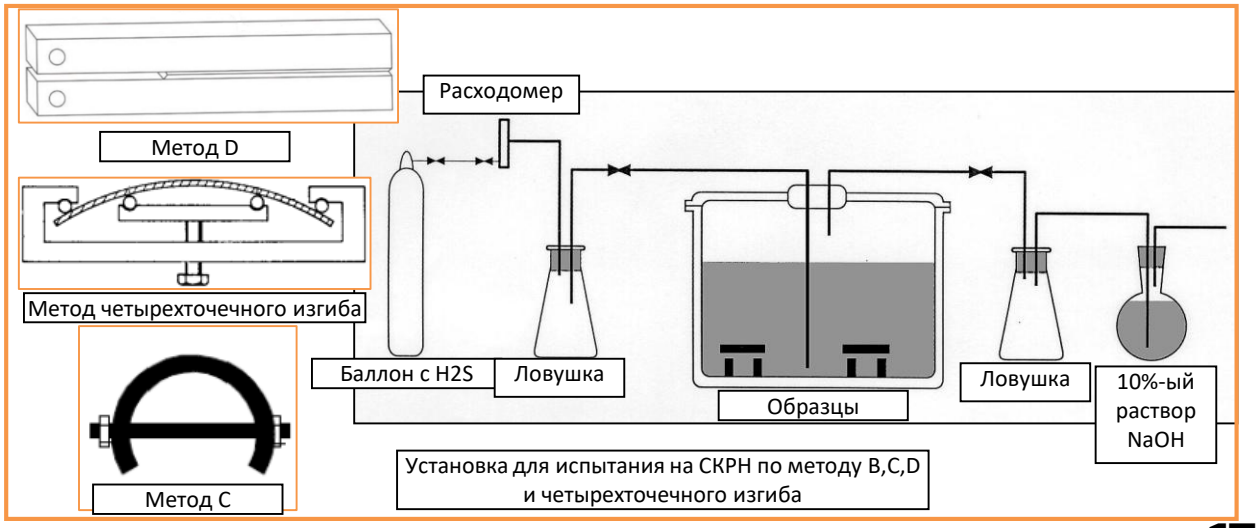


Основные принципы испытания на стойкость к СКРН по NACE TM0177

Испытания по NACE TM0177 характеризуются разнообразием методов испытания, которые заключаются в следующем:

1) Испытания по методу A, C и методу четырехточечного изгиба по ASTM G39 или NACE TM0316 аналогичны и проводятся сл. образом:
   В образце формируются напряжения, которые равняются определенному проценту от минимального или фактического предела текучести изделия. В таком состоянии образцы выдерживается одном из растворов (наиболее применяемый – раствор А, аналогичен NACE TM0284) в течение 720 часов. Если в процессе выдержки образцы не разрушились и после окончания испытания на поверхности образцов нет трещин СКРН, то данное изделие успешно прошло испытание при данном уровне напряжений (основной вид испытаний).
2) Испытания по методу B, при испытании большого количества образцов при разных уровнях деформации, можно получить статистический фактор критического напряжения (SC), при котором образец разрушится с вероятностью 50%.
3) Испытания по методу D предназначены для измерения сопротивления металлов КР, выраженного в виде фактора критической нагрузки, K_{ISSC} для СРН.



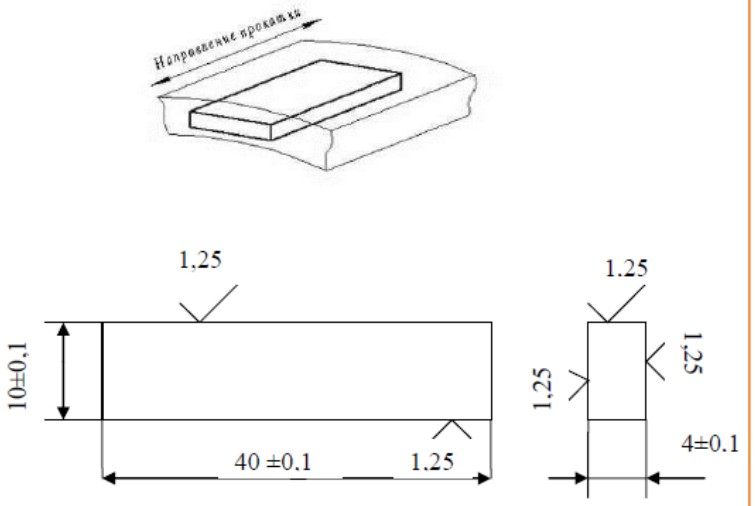


Основные принципы испытаний на стойкость к общей коррозии в H_2S –содержащей среде

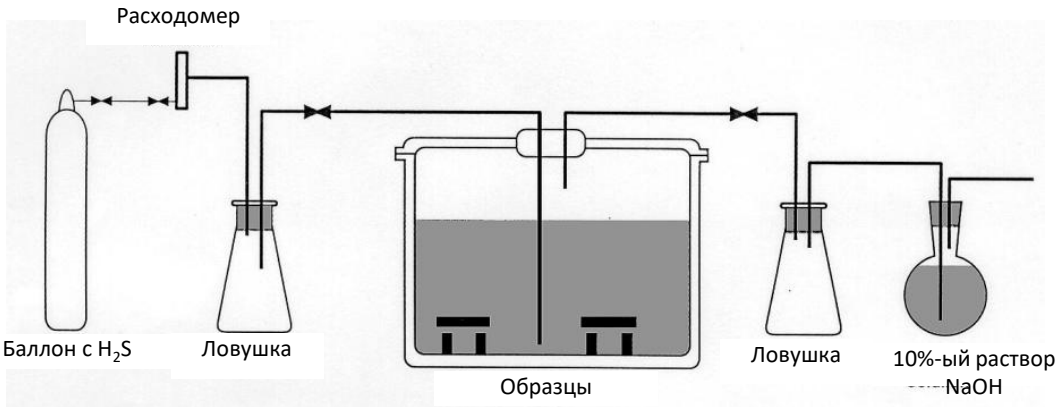
Суть испытания заключается в следующем:

1) Замеряется масса трех образцов прямоугольно сечения с размерами 40х10х4 мм, вырезанных из металла испытываемого оборудования.
2) Затем их помещают в емкость с модельной средой (дист. вода + 5% NaCl). Раствор насыщается сероводородом до необходимой концентрации, например, 350-650 ppm / мг/л и при комнатной температуре (23±2 °С) образцы выдерживаются в растворе в течение 96 часов.
3) Образцы вынимаются, высушиваются, очищаются от продуктов коррозии и взвешиваются.
4) Потеря массы образцов соотносится со временем выдержки в ёмкости и пересчитывается на год. Получаются значения скорости коррозии стали в мм/год.

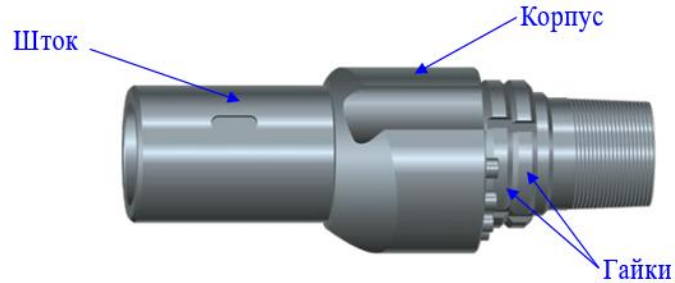
Чертеж образца на ОК и ориентация вырезки



Лабораторная установка для проведения испытаний на ОК



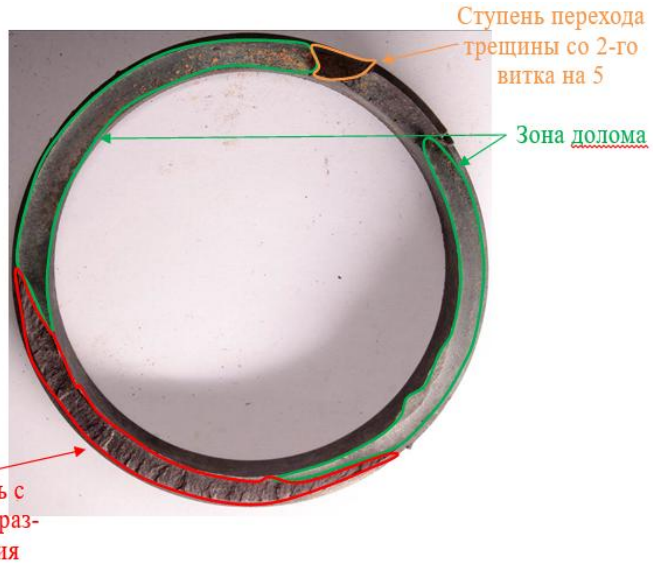
Оценка причин разрушения клапана КПЭ 2



Вид КПЭ2 при поступлении (в разобранном виде)



Шток





Корпус



Гайка

Оценка причин разрушения клапана КПЭ 2

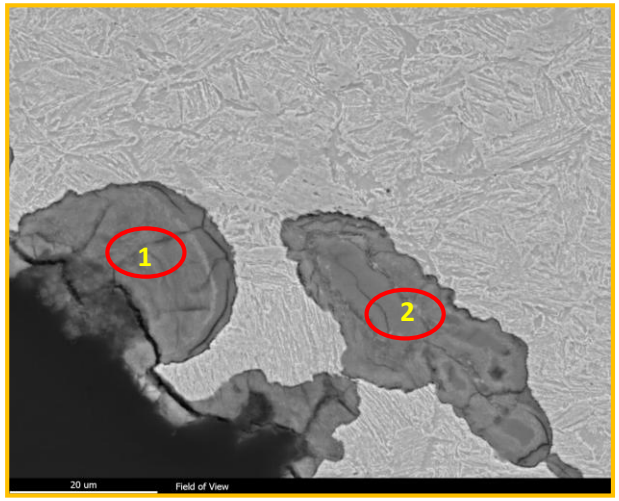
Химический состав штока КПЭ 2

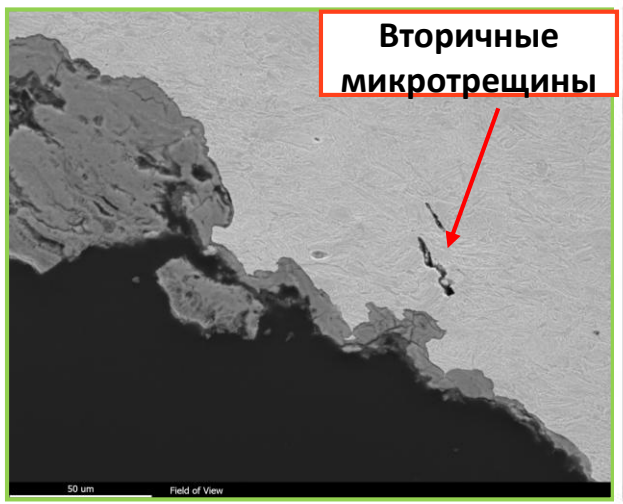
	Массовая доля элементов, %														
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	Nb	Co	Al	S	P	W
40Х	0,426	0,24	0,68	1,06	0,086	0,145	0,009	0,002	0,013	0,0012	0,011	0,033	0,0028	0,012	0,005
Требования ГОСТ 4543 для стали 40Х															
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	-	-	≤0,11	≤0,03	≤0,05	-	-	-	-	-	≤0,20

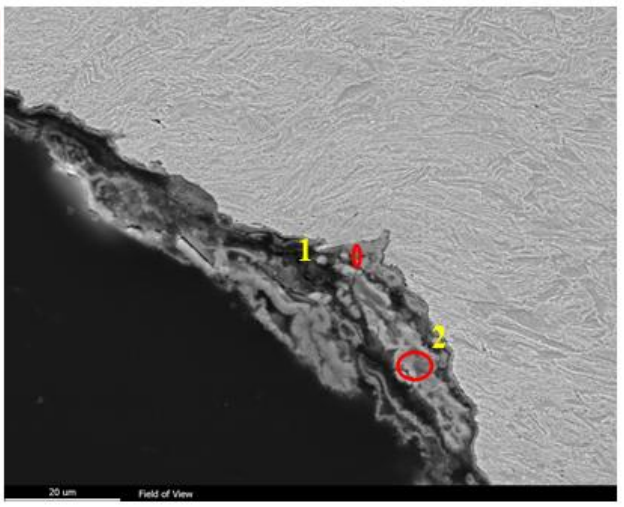
Механические свойства штока КПЭ 2

$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	KCV^{-60}, кгс•м/см^2	ДВС	HV (HRC)
1110/1090	990/990	14,0/12,5	3,0/3,0/2,7	20/20/20	326-401 (33-38)

Металлографический анализ в области очага разрушения





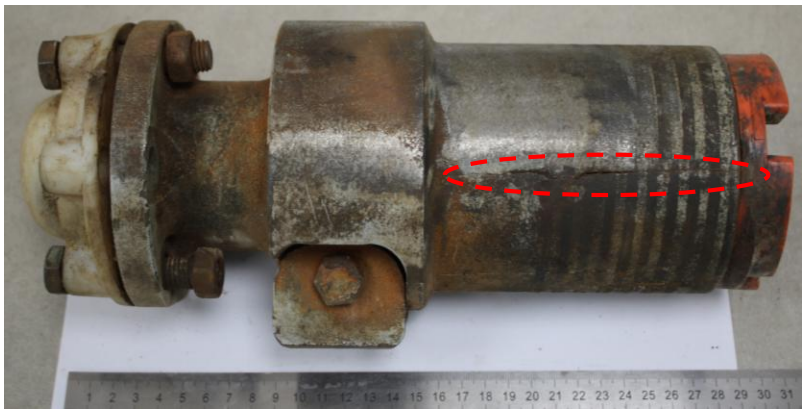


	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe
Область 1	5,45	22,34	0,97	-	0,36	0,42	0,48	3,70	0,85	Ост.
Область 2	5,61	21,17	0,53	0,51	0,37	0,46	-	2,69	0,59	Ост.

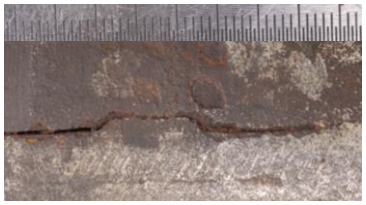
	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Na	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe
Область 1	5,39	16,52	1,06	-	1,58	0,51	0,50	1,61	0,59	Ост.
Область 2	7,67	19,12	-	0,36	0,67	0,43	0,44	1,03	0,57	Ост.

Причиной преждевременного разрушения клапана КПЭ2 в области присоединительной резьбы в нижней части является водородное коррозионное растрескивание под напряжением

Оценка причин разрушения модуль-головки ЗМГ5А-73-К1







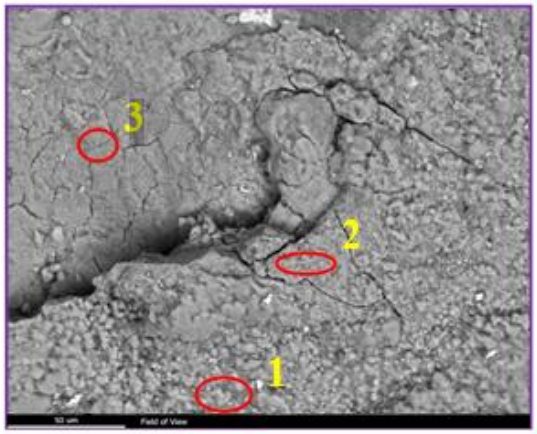


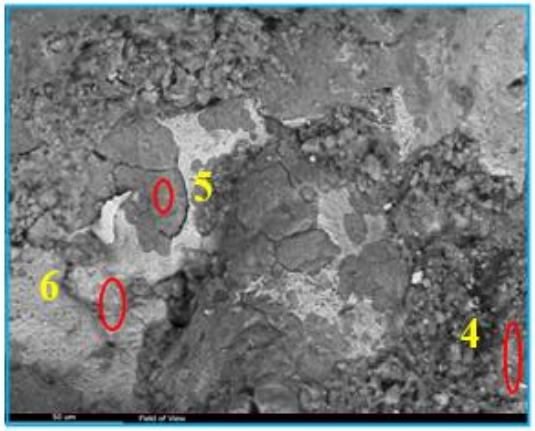
Химический состав модуль-головки

	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	V	Nb	Ti	P	S
40Х	0,425	0,29	0,74	0,97	0,029	0,0036	0,024	0,003	0,024	0,0038	0,0012	0,004	0,0076	0,0071

Механические свойства модуль-головки

$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	KCV-50, Дж/см^2	Твердость, HRC
1016-1027	927-940	14,7-17,8	68-73	29,0 -33,0

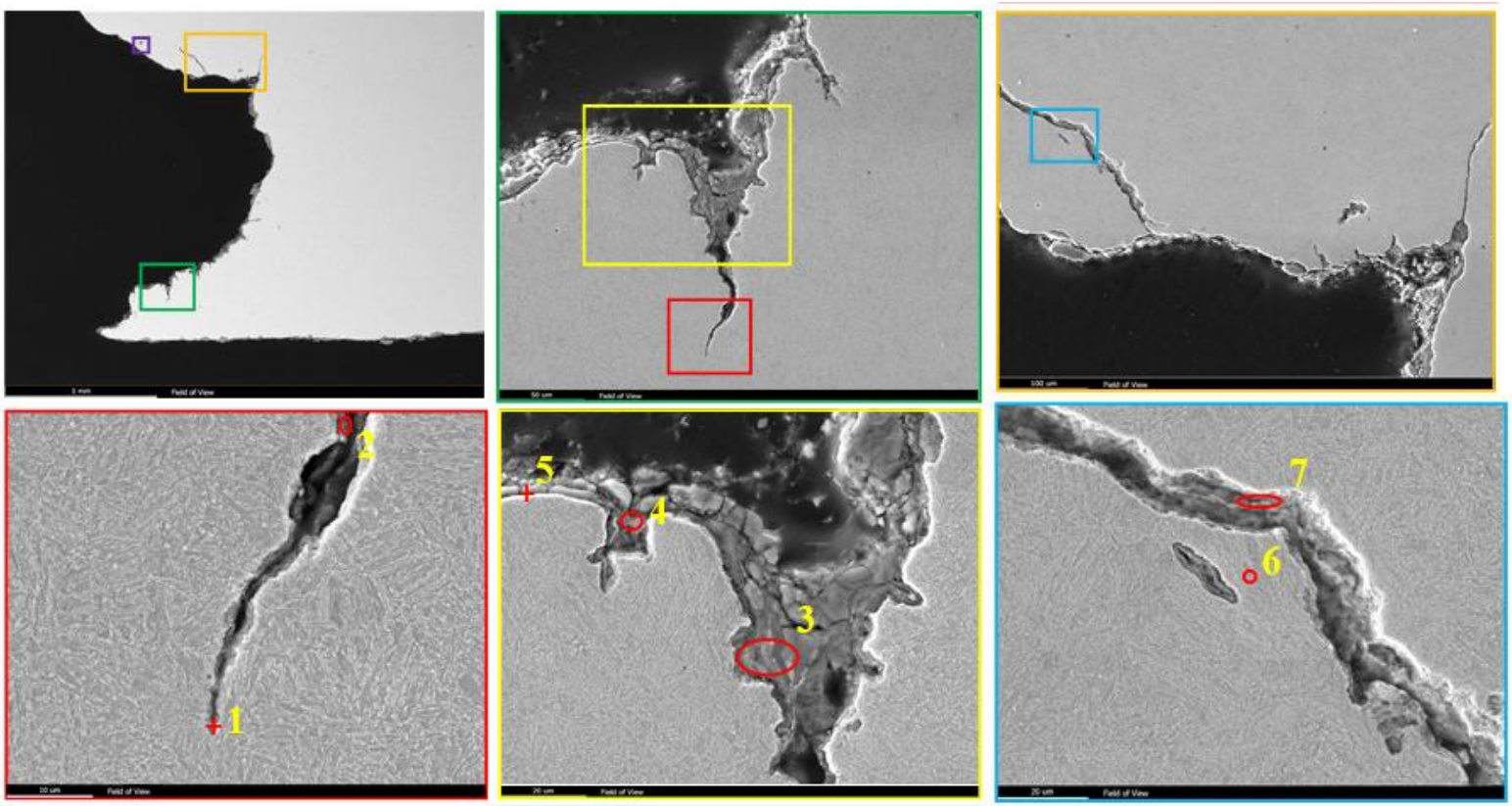




Химический состав продуктов коррозии на поверхности излома

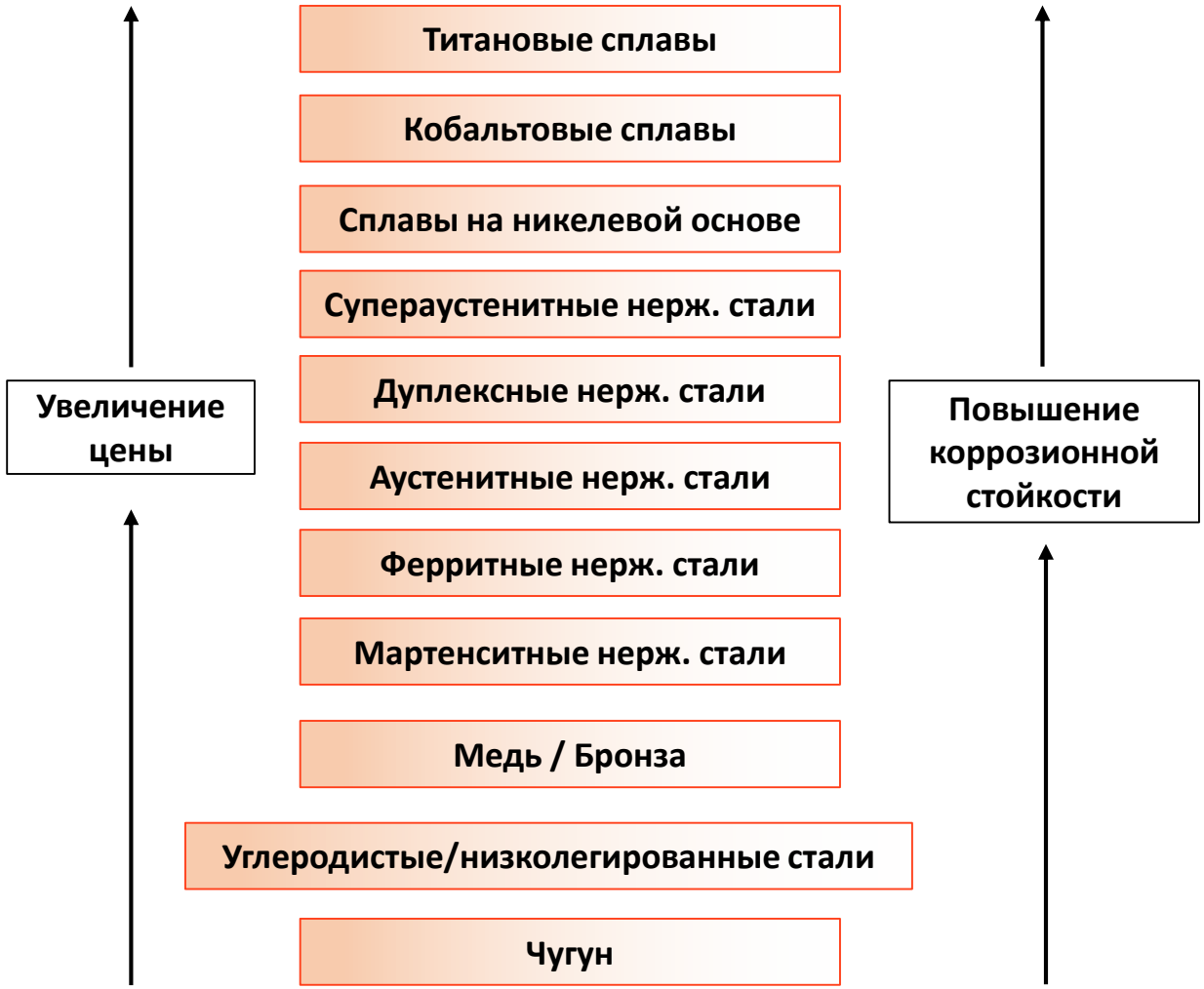
	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	Na	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe
1	15,61	33,57	00,97	00,95	01,45	01,59	01,72	00,97	43,16
2	16,32	28,90	-	00,82	01,39	01,35	03,05	01,43	46,34
3	16,05	33,85	-	00,89	01,38	01,33	02,69	01,11	42,70
4	08,25	32,67	01,47	00,61	01,98	00,98	-	-	54,04
5	04,90	27,95	01,38	00,57	01,58	01,34	-	-	62,28
6	08,15	24,25	01,54	00,68	01,83	00,68	04,66	01,28	56,93

Оценка причин разрушения модуль-головки ЗМГ5А-73-К1



	C	O	Na	Si	S	Cr	Ca	K	Mn	Zn	Fe
1	02,98	-	-	-	06,91	01,17	-	-	00,98	-	Ост.
2	08,99	01,69	-	-	02,71	01,37	-	-	01,25	-	Ост.
3	07,64	20,96	01,56	00,45	01,69	00,99	00,45	00,74	00,54	-	Ост.
4	16,49	14,39	-	-	03,29	00,62	07,83	-	00,84	02,09	Ост.
5	09,40	19,38	-	00,46	01,63	03,55	00,40	00,17	01,01	-	Ост.
6	05,05	05,11	-	-	19,41	01,11	-	-	00,54	-	Ост.
7	07,99	14,46	-	00,17	10,62	00,68	00,33	00,29	00,46	00,84	Ост.

Повышение коррозионной стойкости оборудования при применении коррозионно-стойких материалов



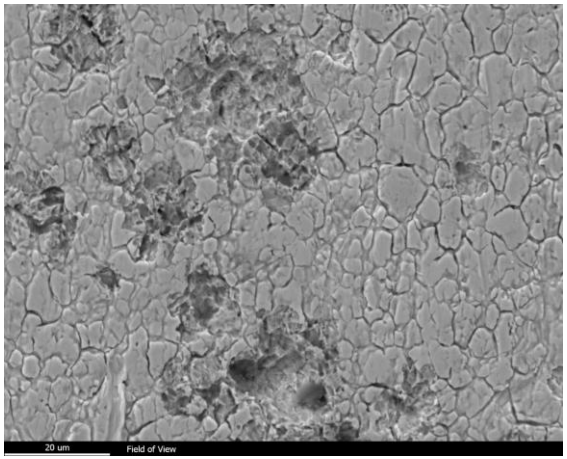
Виды коррозионных повреждений аустенитных нержавеющих сталей

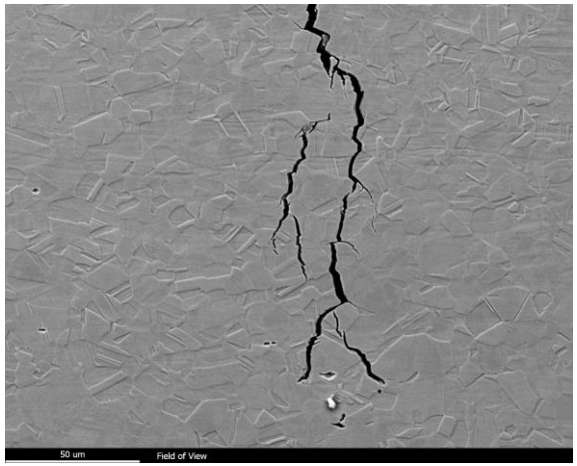
Коррозионностойкие хромоникелевые стали, которые известны как стали типа 18-10. Система Fe-Cr-Ni. Супераустенитные стали с добавлением молибдена, азота, большего количества никеля.

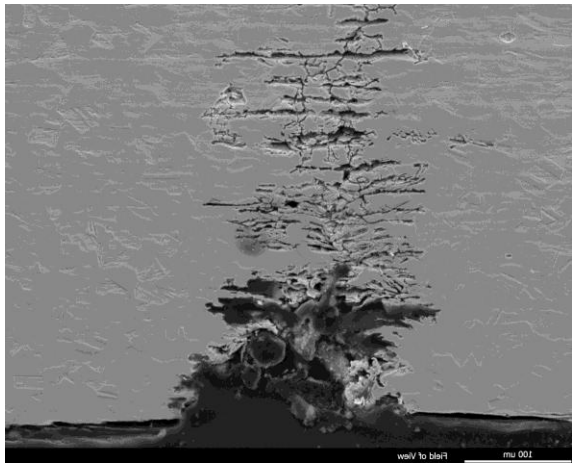
Свойства: высокая коррозионная стойкость, высокая ударная вязкость при низких температурах.

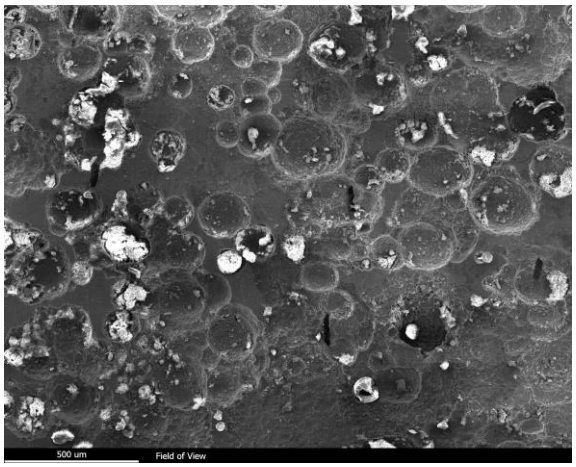
Нержавеющие стали подвержены локальным видам коррозии

- питтинг;
- щелевая коррозия;
- коррозионное растрескивание;
- хлоридное растрескивание;
- межкристаллитное растрескивание.





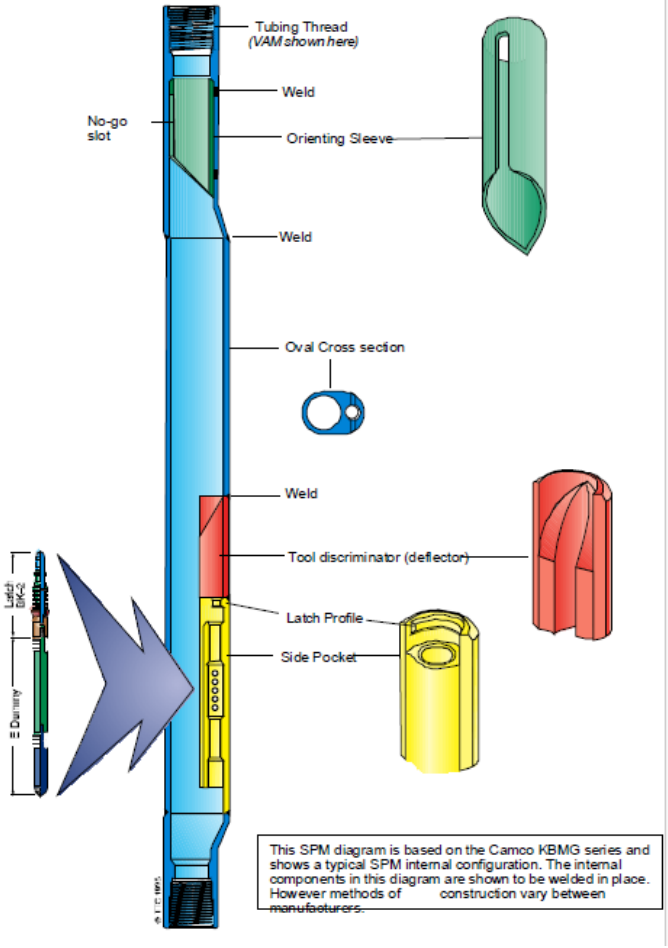




Оценка причин разрушения газлифтного клапана











Трещины перпендикулярно и параллельно приложенным нагрузкам. Продукты коррозии внутри и на внешней поверхности.

Виды коррозионных повреждений мартенситных нержавеющих сталей

Мартенситные стали (13Cr)

•Свойства: необходимые механические характеристик от L80 до Q125, высокая стойкость в CO2 среде.

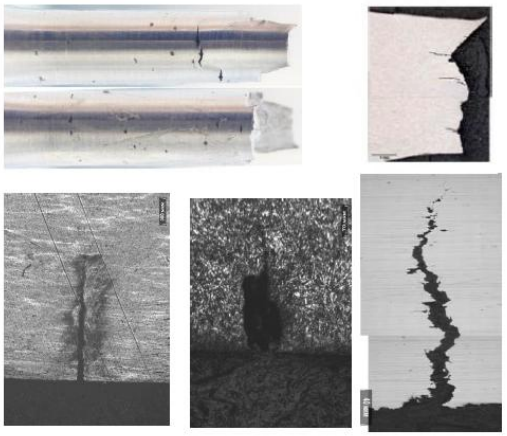
•Проблемы: имеет ограничения в H2S-средах, склонность к СКРН, требования по шероховатости и хранению, ограничения по температуре, pH.

Результаты испытаний на стойкость к SSC

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	Разрушение, час
Super Cr13	758	720 б.р.
20Х13	397	720
Cr13L	758	242
15Х13	552	204

Условия испытаний:

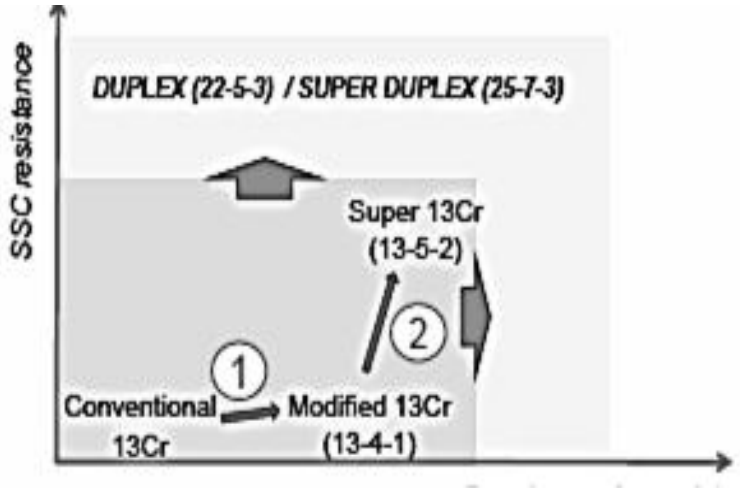
- Парциальное давление H_2S 10 кПа,
- pH 3,5;
- Нагрузка 80% от SMYS.



Мартенситные стали (Супер 13Cr)

•Свойства: необходимые механические характеристик от L80 до Q125, высокая стойкость в CO2 среде.

•Проблемы: имеет меньшие ограничения в H2S-средах по сравнению с 13 Cr, коррозионная стойкость выше , чем у 13 Cr.



Виды коррозионных повреждений высоколегированных нержавеющих сталей

Дуплексные/Супердуплексные стали

Аустенит и феррит в структуре. Система Fe-Cr-Ni-Mo-W-N. Используются в условиях, где важна коррозионная стойкость и прочность одновременно. Дуплексные стали применимы для условий, при которых возможен эрозионный износ, присутствуют сероводород и углекислый газ.

Проблемы: возможность выделения нежелательных фаз.

PREN=Cr+3,3 (Mo+0,5W)+16N.

у супердуплексных PREN больше 40



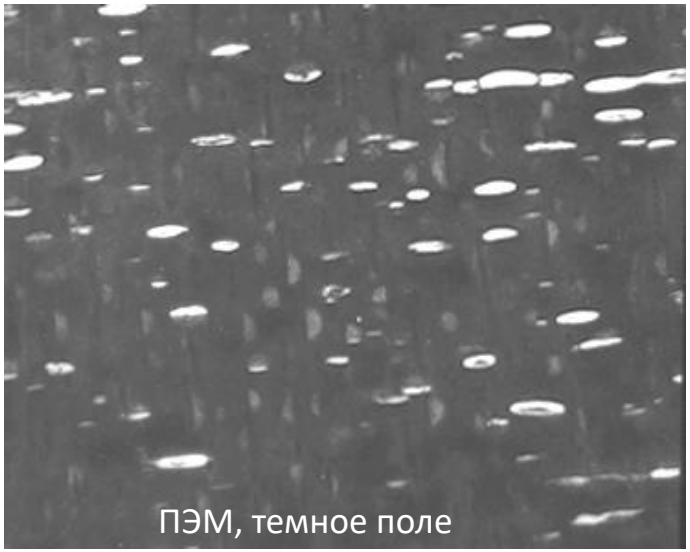
Структура стали 08Х21Н6М2Т

Дисперсионно-твердеющие стали

Упрочнение при термической обработке в результате дисперсионных выделений , за счет титана, меди, алюминия.В аустенитных, полуаустенитных, мартенситных сталях.

Свойства: Высокая прочность и коррозионная стойкость.

Проблемы: склонность к SSC с повышением прочности, сложная обрабатываемость


ПЭМ, темное поле

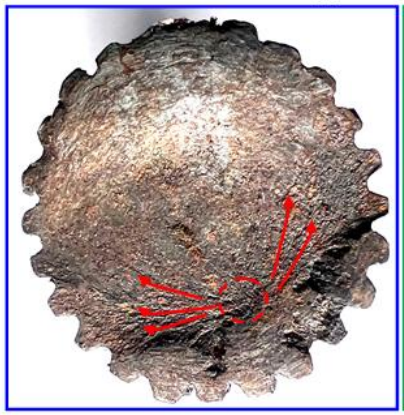
Оценка причин разрушения вала нижней секции насоса УЭЦН



Твердость:
43,5-46,0 HRC

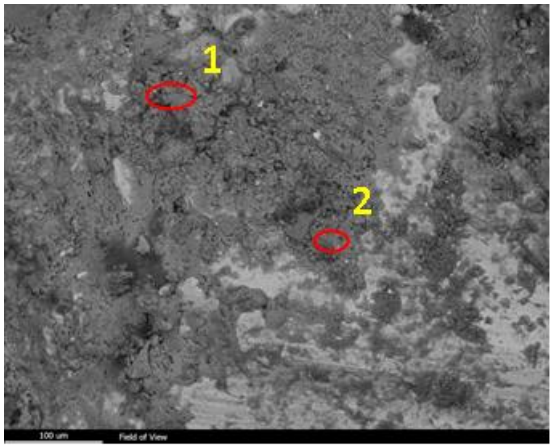
Химический состав вала

	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo[2]	Ti[1]	V[1]	Nb	Co	Al	S	P
Вал 05Х16Н4Д2Б	0,030	0,20	0,330	14,5	4,29	2,38	0,008	0,006	0,095	0,194	0,150	0,0015	0,0017	0,022





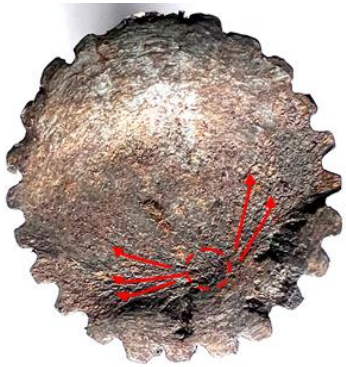




	Массовая концентрация элементов, %											
	C	O	Ni	Na	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Zn	Fe
1	05,37	21,66	-	02,10	00,63	03,08	17,42	07,29	-	-	03,22	Ост.
2	06,51	20,69	03,72	01,07	00,38	03,14	18,54	10,88	01,87	00,19	-	Ост.

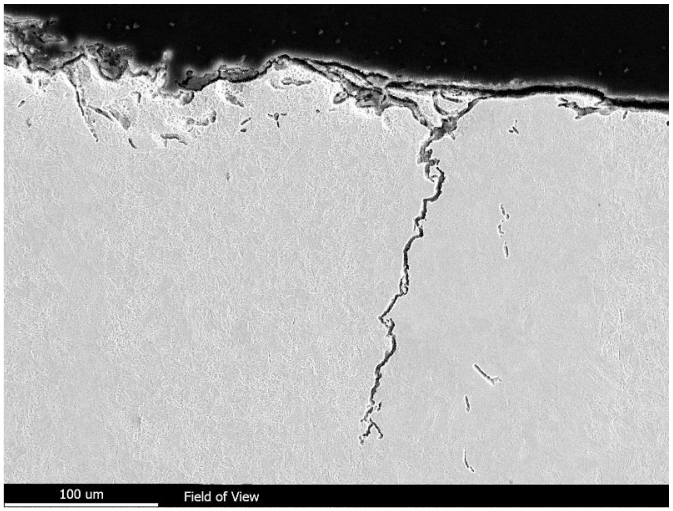
Причиной разрушения вала является коррозионное растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала УЭЦН произошло в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

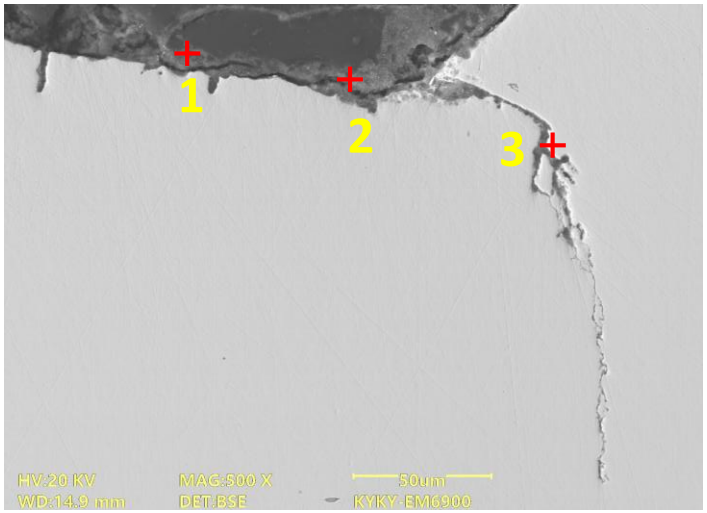
Оценка причин разрушения вала нижней секции насоса УЭЦН











	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	S	Mo	Cr	Ni	Zn	Cu	Fe
1	89,5	2,4	0,2	-	1,3	0,2	-	0,2	Ост.
2	84,1	3,0	1,1	-	1,5	0,2	2,1	0,2	Ост.
3	63,0	5,4	-	0,4	4,5	1,2	-	0,8	Ост.

Причиной разрушения вала является коррозионное растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала УЭЦН произошло в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

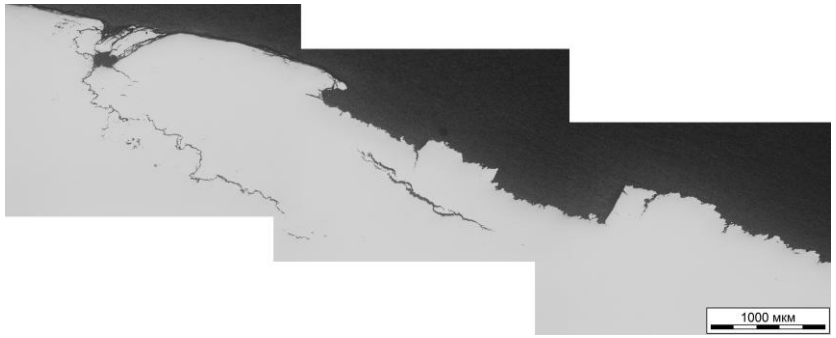
Разрушения вала УЭЦН, изготовленного из дисперсионно-твердеющей нержавеющей стали

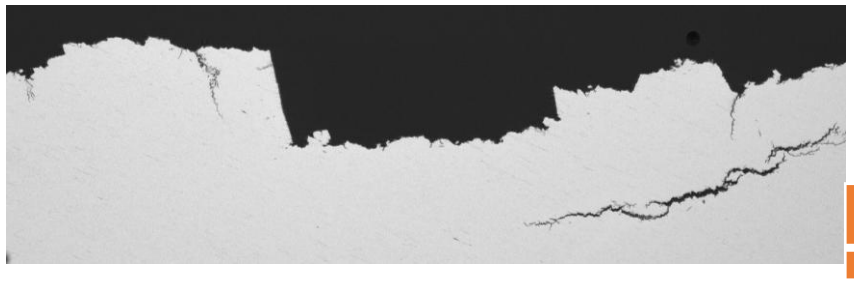


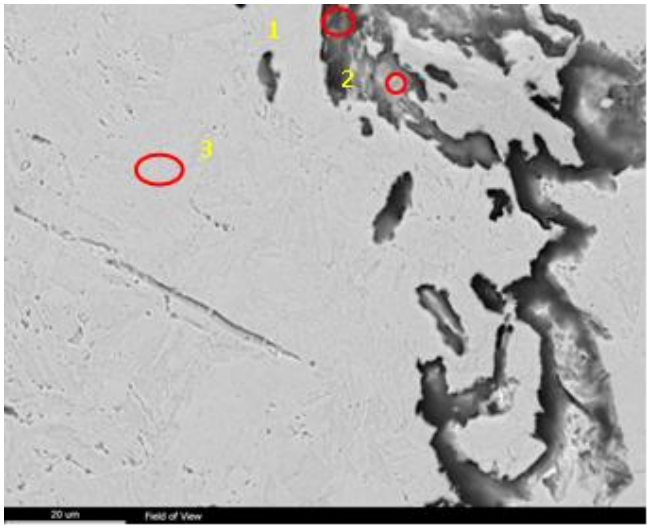
Твердость:
43,5-44,5 HRC

Химический состав вала

Вал 05Х16Н4Д2Б	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo[2]	Ti[1]	V[1]	Nb	Co	Al	S	P
	0,027	0,15	0,268	16,2	4,77	2,58	0,061	0,006	0,028	0,187	0,027	0,003	0,0025	0,015







	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	Si	S	Cl	Cr	Ni	Cu	Fe
1	35,51	10,90	0,20	3,29	0,20	10,86	3,53	2,27	31,38
2	4,04	3,68	-	2,53	0,98	18,67	6,82	3,78	58,96
3	-	-	0,37	-	-	17,37	4,76	-	77,50

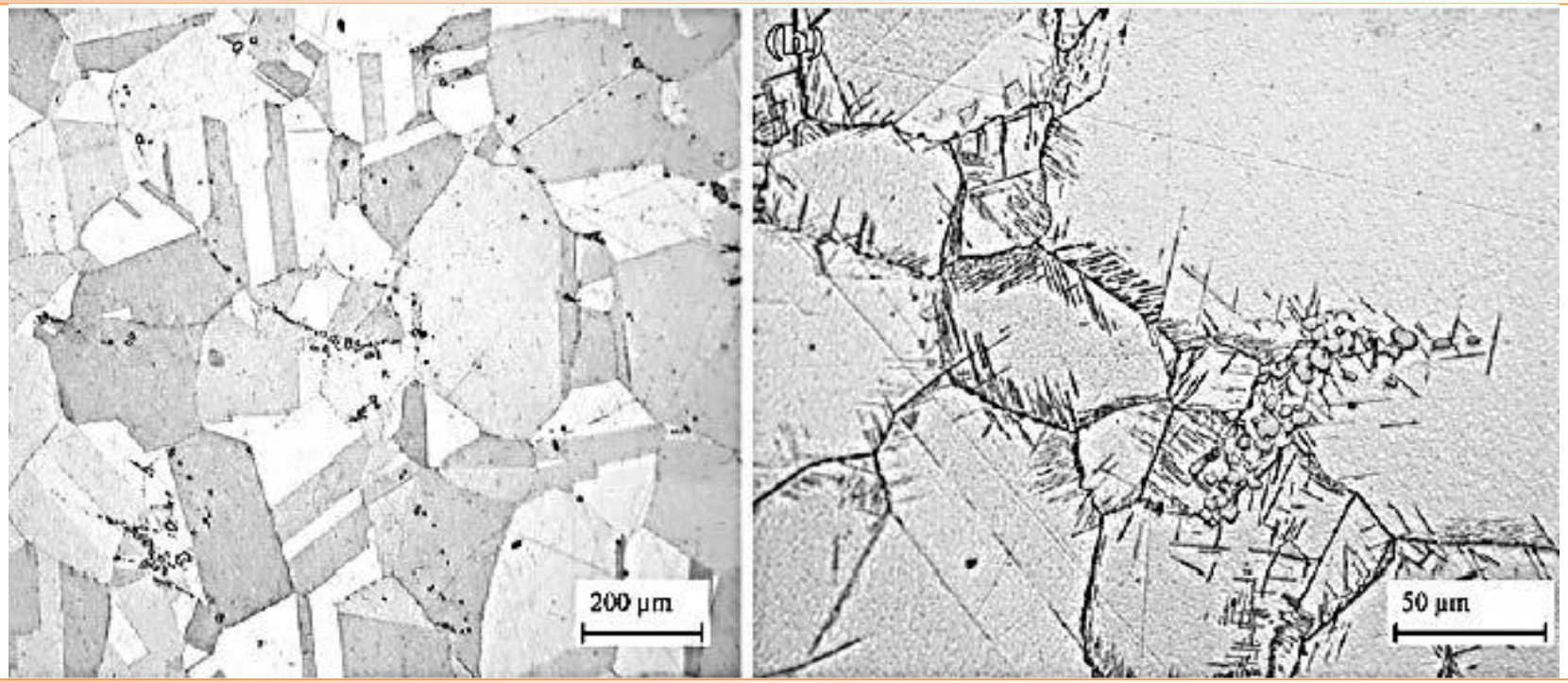
Причиной разрушения вала является коррозионно-механическое растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала ЭЦН произошло хрупко под углом 45 градусов к оси вала в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

Сплавы на никелевой основе

Имеют аустенитную структуру, немагнитны. Изначально сплавы на никелевой основе разрабатывались для применения в авиапромышленности, позже стало понятно, что они обладают стойкостью в средах с H2S, CO2, Cl, S.

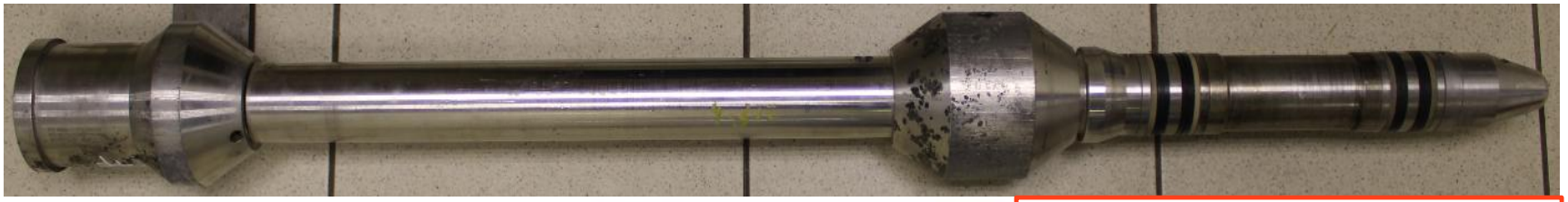
Практически ежегодно появляются все новые сплавы для их более эффективного применения.

Проблемы: возможность образования нежелательных фаз, обрабатываемость, склонность к водородному охрупчиванию



соответствующая и несоответствующая микроструктуры сплава 718 из стандарта API6A 718

Оценка причин разрушения скважинной пробки из сплава 718

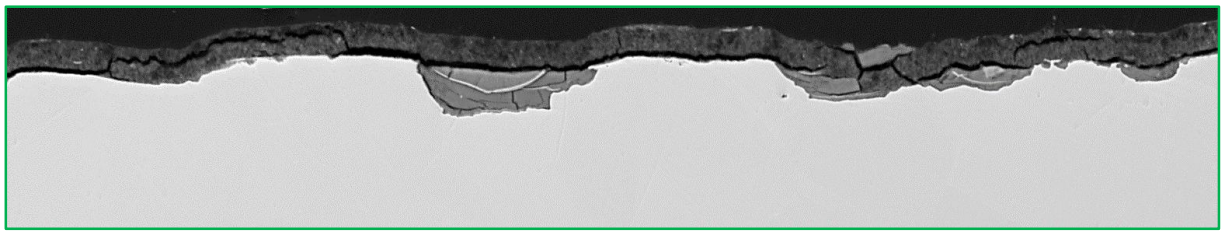


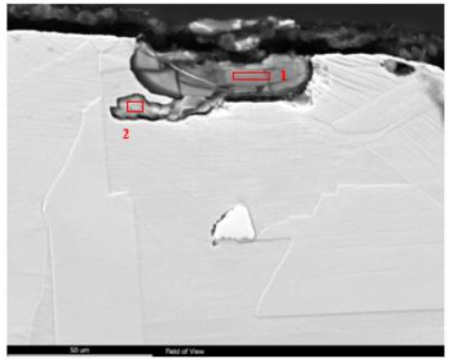






	Elements, %															
	C	O	Na	Al	Si	Nb	Mo	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	3.59	22.45	0.83	1.26	0.42	13.05	14.13	0	1.13	0.62	0.38	2.29	23.28	0	3.99	12.59
2	10.07	18.13	0	1.06	0.53	9.24	9.65	8.46	0.91	0.91	0.49	1.88	20.67	0	2.96	15.04
3	6.11	3.95	0	0.38	0	0	0	27.63	0.53	0	0	0	3.65	0.18	0.89	56.67





	Elements, %														
	C	O	Al	Si	Nb	Mo	S	Cl	K	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
1	12.70	22.04	0.43	0.52	16.15	15.12	5.08	1.02	0.87	2.77	0.09	18.94	0.20	0.55	3.52
2	6.12	10.62	0.46	0	4.41	3.22	38.51	2.86	0	2.29	0	9.21	0.07	1.95	20.37

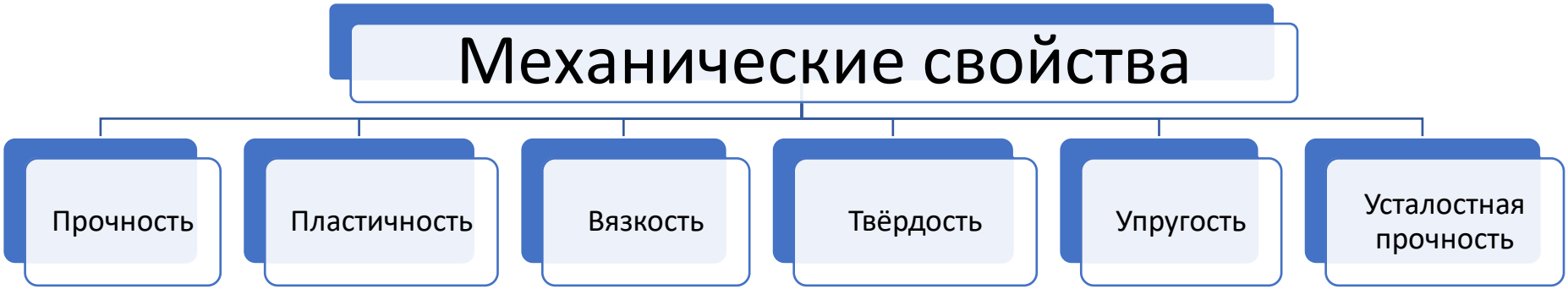
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Стандартные механические свойства: свойства, определяемые при статическом растяжении; твердость, ударная вязкость. Пути повышения прочности металлов.

Лектор:
Начальник испытательного центра, к.т.н.
Ермошкин Антон Александрович

Стандартные механические свойства.

Механические свойства материалов характеризуют их способность сопротивляться разрушению или деформации (изменению формы и размеров под действием внешних нагрузок). Эти свойства определяют конструкционную прочность материалов, их надёжность и долговечность в процессе эксплуатации элементов конструкций, деталей машин и приборов, изготовленных из этих материалов.



Механические свойства, определяемые при статическом растяжении.

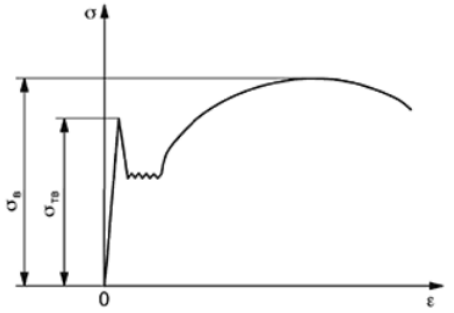


Стандарты:

- ГОСТ 1497-2023 Металлы. Методы испытаний на растяжение.
- ISO 6892-1:2019 "Металлические материалы. Испытания на растяжение. Часть 1. Метод испытания при комнатной температуре
- ASTM A 370: 24a Стандартные методы испытаний и определения для механических испытаний изделий из стали

Определяемые показатели:

- Временное сопротивление (предел прочности)
- Предел текучести (условный, физический)
- относительное удлинение
- относительное сужение



Механические свойства, определяемые при ударной вязкости.

Ударная вязкость — механическое свойство материала, которое характеризует способность поглощать энергию удара при динамических (ударных) нагрузках.

Стандарты:

- ГОСТ 9454-78 (ГОСТ 9454-2025) Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
- ISO 148-1:2016 "Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1. Метод испытания
- ASTM A 370: 24a Стандартные методы испытаний и определения для механических испытаний изделий из стали



Определяемые показатели:

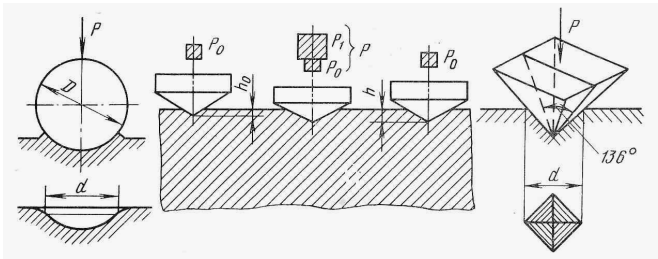
- работа удара
- ударная вязкость
- доля вязкой составляющей

Механические свойства: твердость.

Твёрдость — свойство материала сопротивляться внедрению более твёрдого тела — индентора.



Преимущества метода Бринелля:
•Позволяет быстро найти предел прочности и текучести материала.
•Более точный по сравнению с методом Роквелла при значениях твёрдости ниже 30 HRC.
•Менее критичен к чистоте подготовленной поверхности.
Недостатки метода Бринелля:
•Метод можно применять только для материалов с твёрдостью до 450 HB, если применять стальной закалённый шарик.
•При вдавливании индентора по краям отпечатка из-за выдавливания материала образуются навалы и наплывы, что затрудняет измерение как диаметра, так и глубины отпечатка.
•Неприменим для тонких образцов.



Преимущества метода Роквелла:
•Простота использования.
•Универсальность.
•Скорость.
Недостатки метода Роквелла:
•Сложности при работе с тонколистовыми материалами
•Зависимость от подготовки поверхности.
•Ограничения шкал HRC и HRB.

Преимущества метода Виккерса:
•Точность
•Универсальность — метод применим для металлов, сплавов, композитов, пластмасс.
•Широкий диапазон измерения.
•Возможность измерения небольших образцов.
•Возможность определять твёрдость отдельных слоёв.
Недостатки метода Виккерса:
•Зависимость измеряемой твёрдости от приложенной нагрузки или глубины внедрения индентора
•Необходимость хорошей пробоподготовки.
•Медленное проведение испытаний.
•Необходимость более сложного оборудования — более дорогостоящего.

Пути повышения прочности металлов.



Объёмное легирование — это метод, при котором легирующие элементы распределяются во всём объёме металла

Поверхностное легирование — метод, при котором легирующие элементы добавляются или образуются только на поверхности материала, не проникая в его объём.

Наклёп (нагартовка) — упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации.

Термической обработкой называются процессы, сущность которых заключается в нагреве и охлаждении изделий по определенным режимам, в результате чего происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

НТД на внутрискважинное оборудование

ГОСТ ISO 10432-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Скважинный предохранительный клапан с оснасткой. Общие технические требования

ГОСТ ISO 14310-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Пакеры и мостовые пробки. Общие технические требования

ГОСТ ISO 16070-2015 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Оправки установочные и посадочные ниппели. Общие технические требования

НТД на фонтанное устьевое оборудование

API Spes 6A Технические условия на устьевое и фонтанное оборудование

ГОСТ Р 51365-2009 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для бурения и добычи. Оборудование устья скважины и фонтанное устьевое оборудование. Общие технические требования

IX Научно-техническая конференция «Коррозия и управление рисками в нефтяной и газовой промышленности»
Семинар «Роль металловедения в повышении эксплуатационной надежности оборудования»

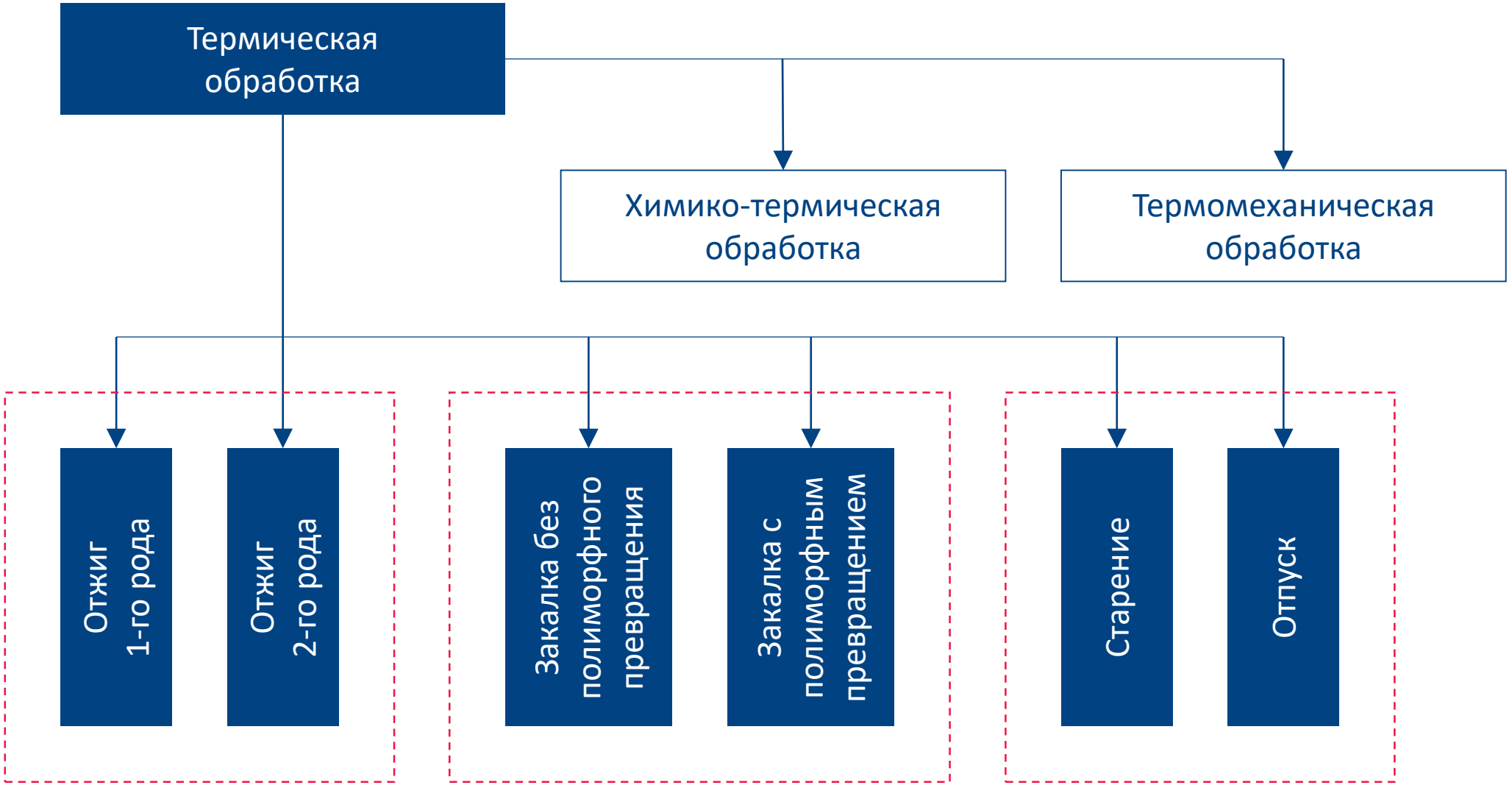
ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Связь между типом структуры и механическими свойствами

САМАРСКИЙ ПОЛИТЕХ
Опорный университет

Докладчик: Майдан Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент,
кафедра «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»
2 сентября 2025 года

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Отжиг — термическая операция, состоящая в нагреве сплава, имеющего неравновесное состояние, полученное в результате предшествовавшей обработки, и приводящая его в более равновесное состояние.

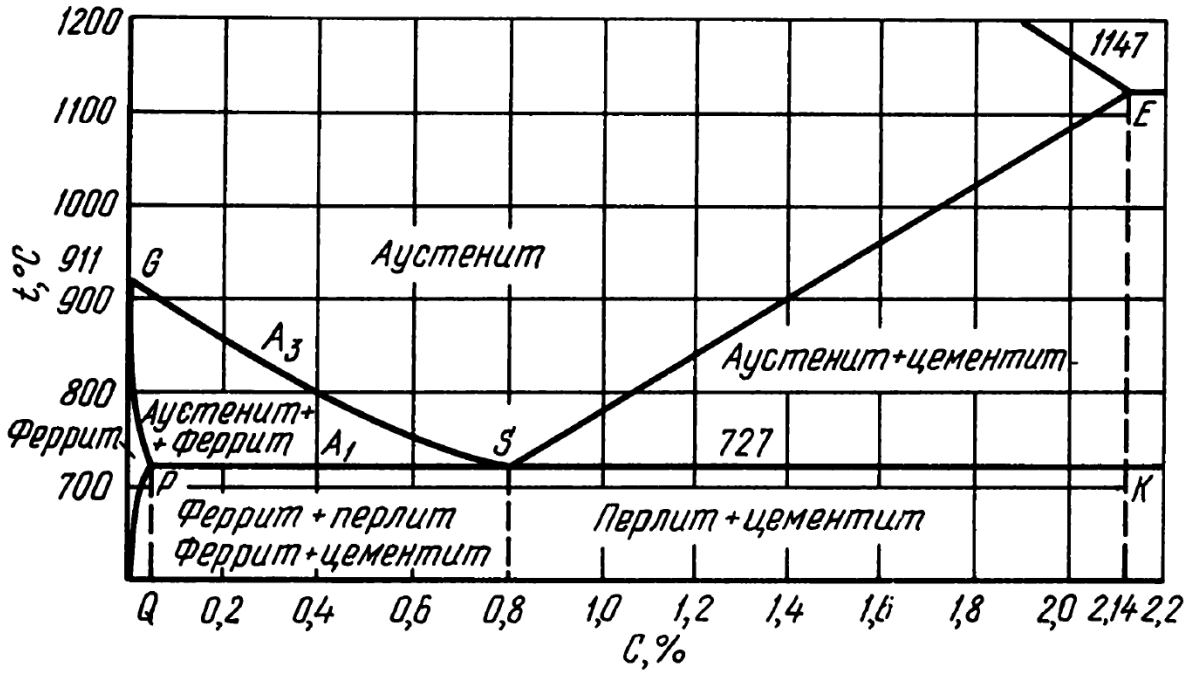
Закалка — термическая операция, состоящая в нагреве сплава выше температуры превращения с последующим быстрым охлаждением для получения структурно неравновесного состояния.

Отпуск — термическая операция, состоящая в нагреве закаленного сплава ниже температуры превращения для получения более равновесного структурного состояния.

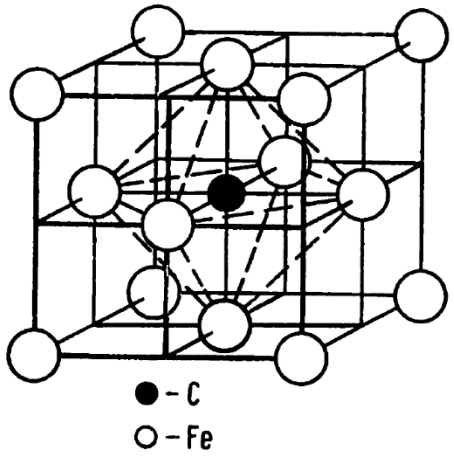
Химико-термическая обработка — нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев.

Термомеханическая или деформационно-термическая обработка — деформация и последующая термическая обработка, сохраняющая в той или иной форме результаты наклепа.

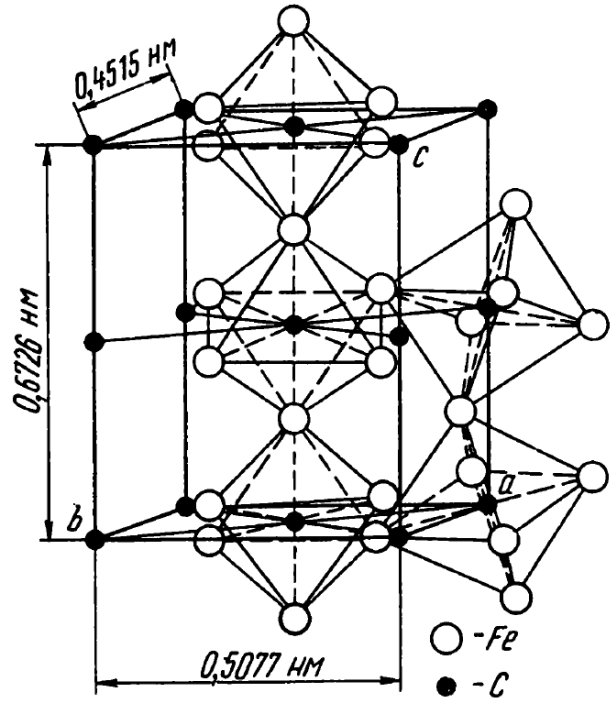
ДИАГРАММА «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»



«Стальной» участок
диаграммы «железо-углерод»



Кристаллическая
решетка аустенита



Кристаллическая
структура цементита

Твердый раствор углерода в α-железе называется ферритом, а в γ-железе — аустенитом.
Цементит — это химическое соединение углерода с железом — карбид железа Fe_3C.
Эвтектоидная смесь феррита и цементита называется перлитом.

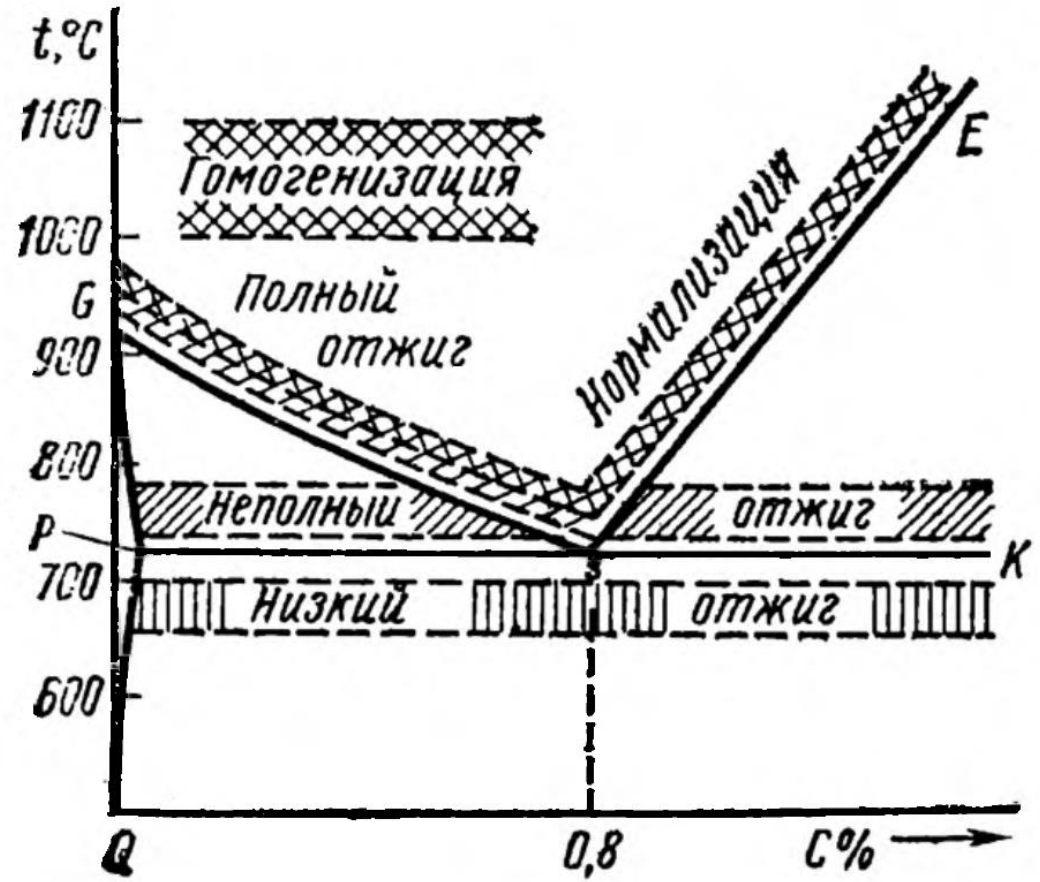
ОТЖИГ

Отжиг — нагрев стали выше температур фазовых превращений с последующим медленным охлаждением.

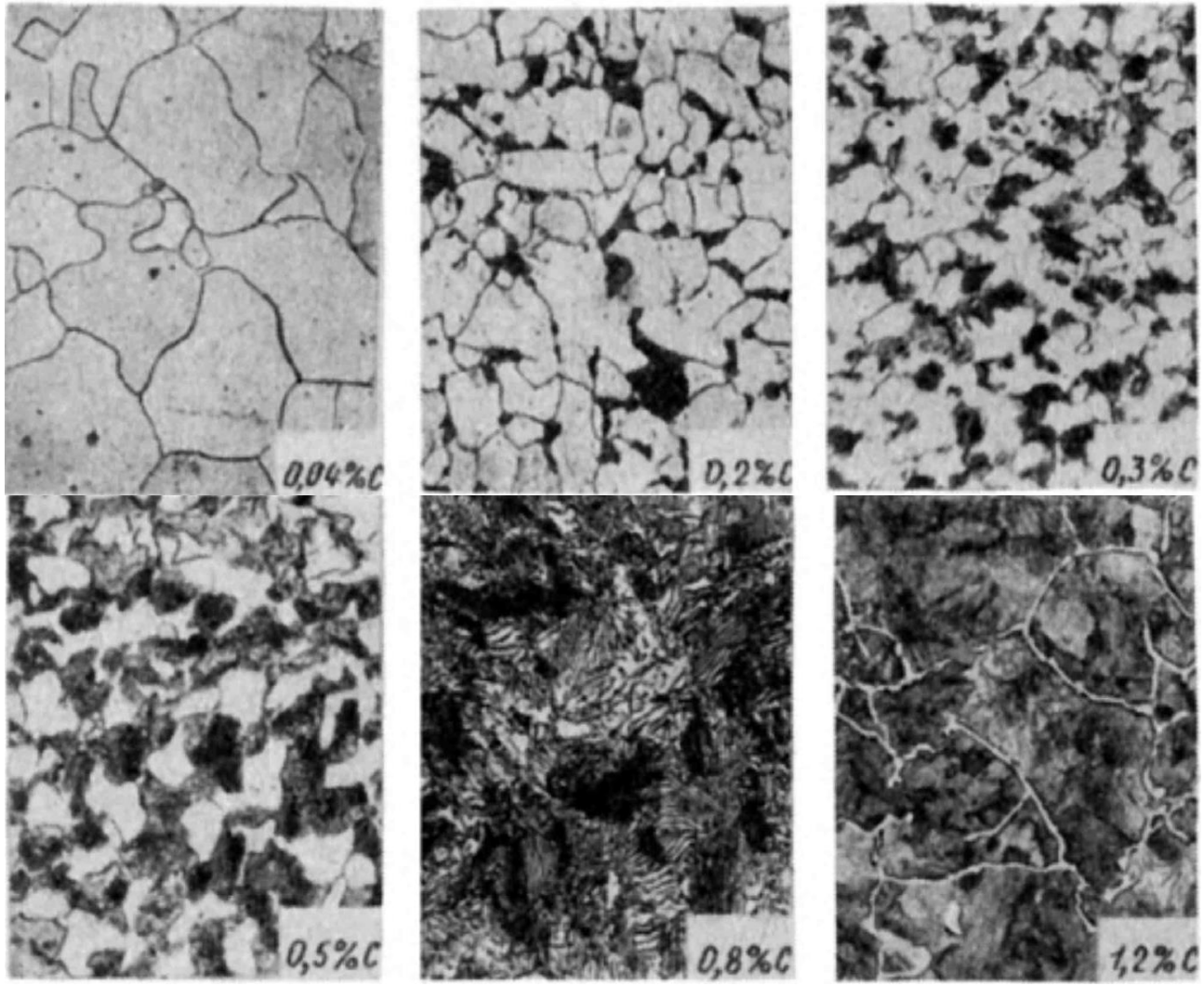
Полный отжиг — нагрев стали выше Ac_3 на 30…50 °С, выдержка при этой температуре и медленное охлаждение. При этом происходит полная перекристаллизация.

Неполный отжиг — нагрев стали выше Ac_1 (но ниже Ac_3) и медленное охлаждение. При этом происходит частичная перекристаллизация перлитной составляющей.

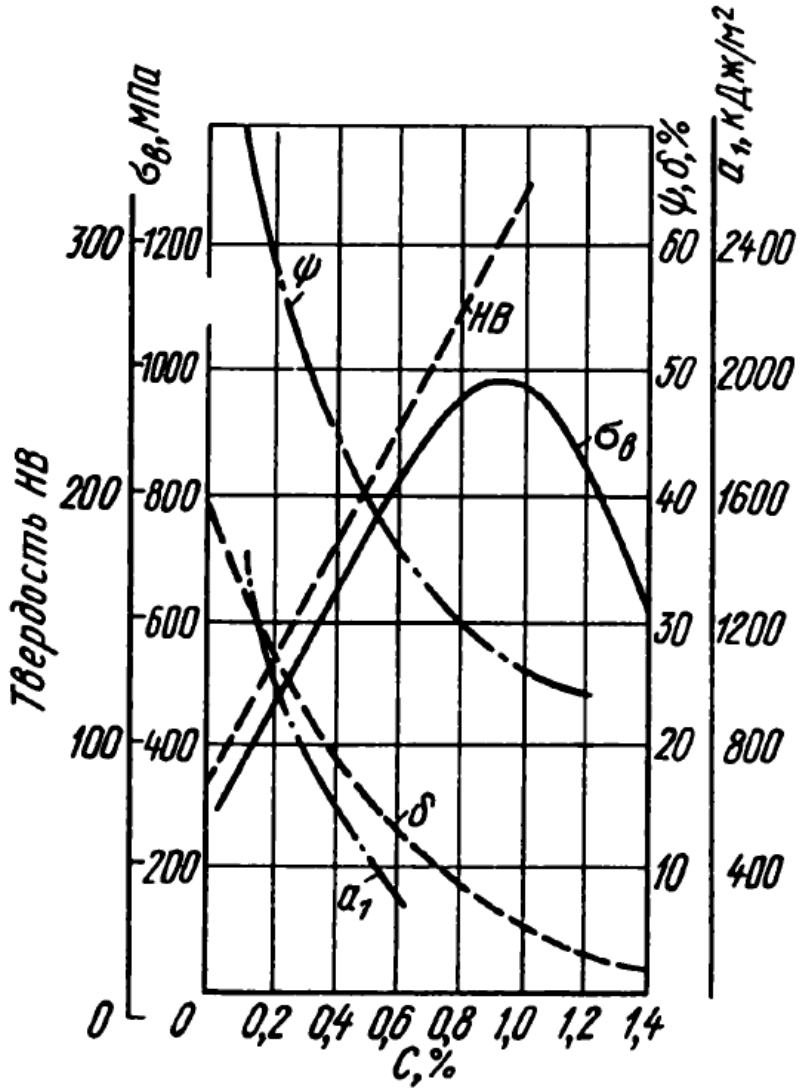
При медленном охлаждении стали приближаются к фазовому и структурному равновесию. После отжига сталь имеет низкую твердость и прочность.



Температурные интервалы различных видов отжига



Микроструктура сталей
с различным содержанием углерода

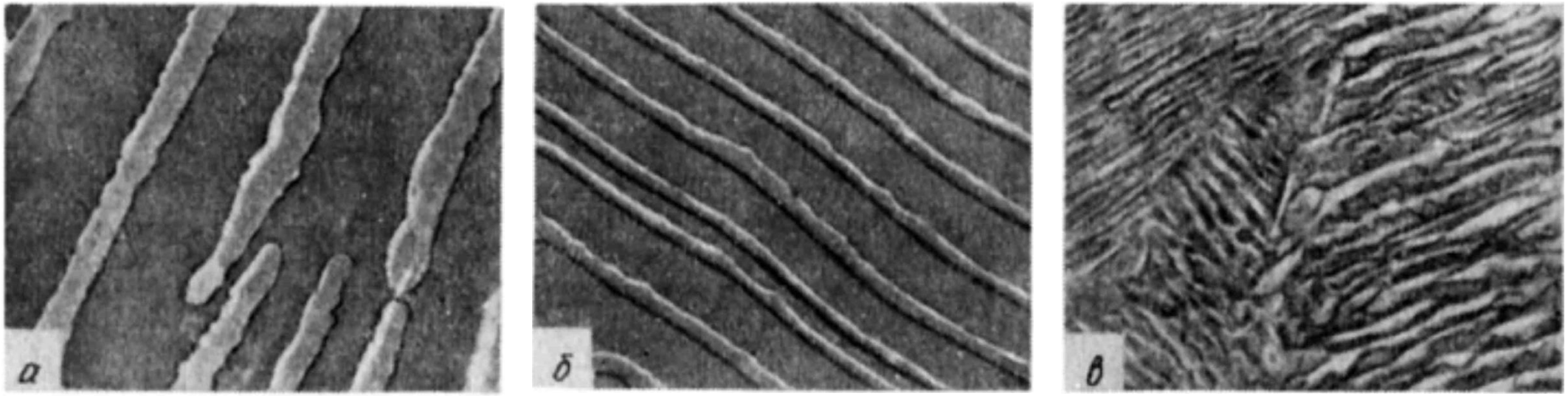


Зависимость механических свойств
от содержания углерода

НОРМАЛИЗАЦИЯ

Нормализация — нагрев доэвтектоидной стали до температуры выше Ac_3, а заэвтектоидной — выше Ac_m на 50…60 °С с последующим охлаждением на воздухе.

В результате охлаждения на воздухе распад аустенита на ферритно-цементитную смесь происходит при более низких температурах, а следовательно, повышается дисперсность смеси.



Структура эвтектоидной стали в зависимости от температуры распада ($t_{распп}$) аустенита:
а — перлит, $t_{распп}$ = 700 °С, ×7500; *б* — сорбит, $t_{распп}$ = 650 °С, ×7500;
в — троостит, $t_{распп}$ = 600 °С, ×15 000

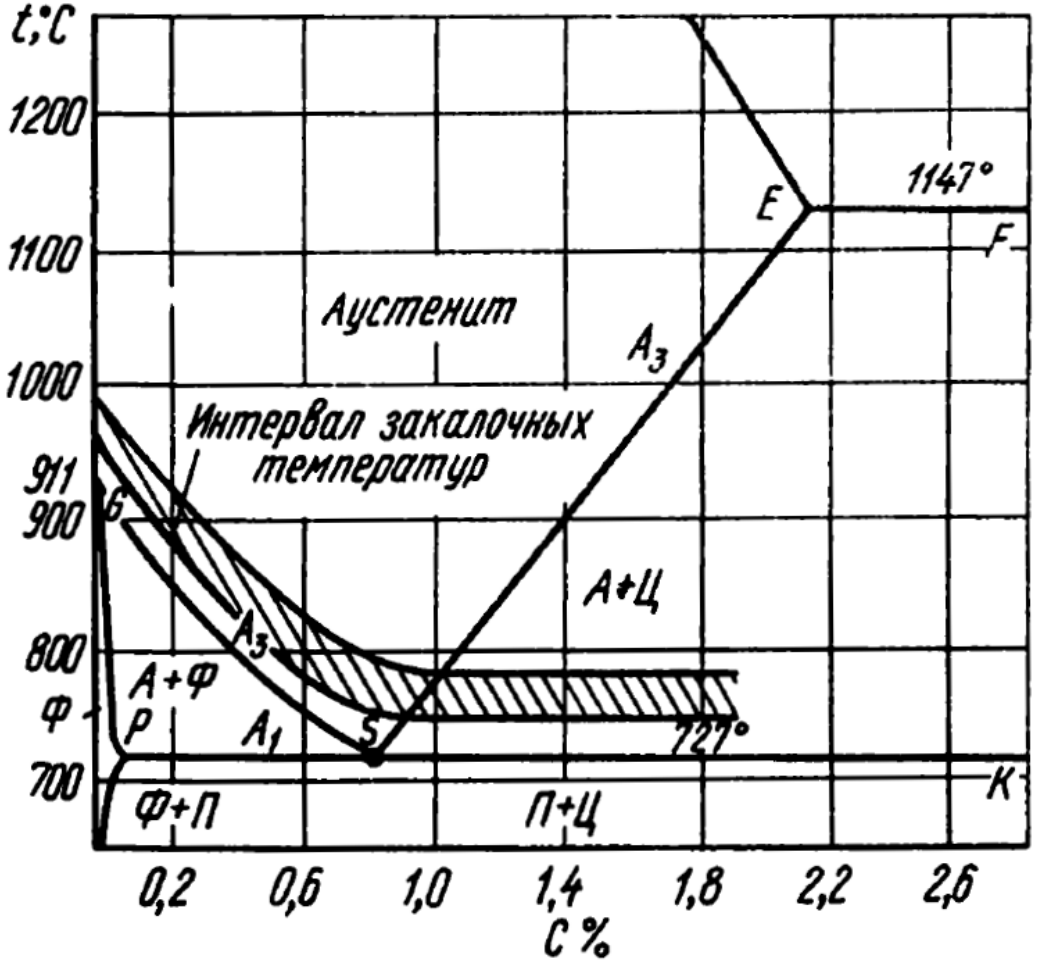
ЗАКАЛКА

Закалка — нагрев стали до температуры выше фазовых превращений, выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение со скоростью больше критической. В результате закалки из аустенита образуется неустойчивая, метастабильная структура мартенсит.

Доэвтектоидные стали для закалки следует нагревать до температуры на 30…50 °С выше Ac_3. Такая закалка называется полной.

Если доэвтектоидную сталь нагреть выше Ac_1, но ниже Ac_3, то в ее структуре после закалки наряду с мартенситом будут участки феррита. Присутствие феррита снижает твердость стали после закалки. Такая закалка называется неполной.

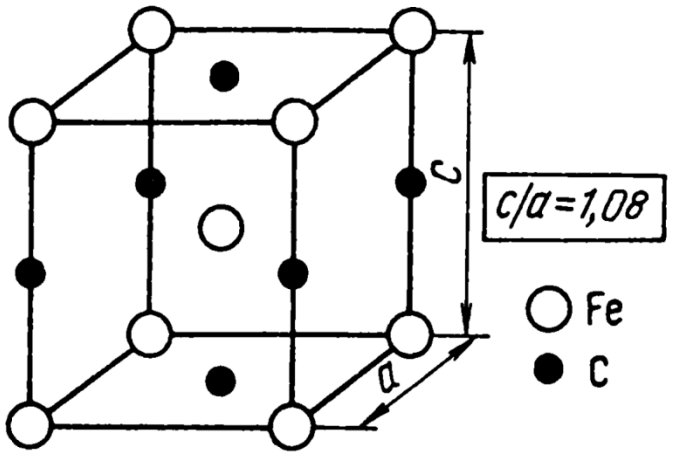
Заэвтектоидные стали нагревают для закалки на 50…70 °С выше Ac_1.



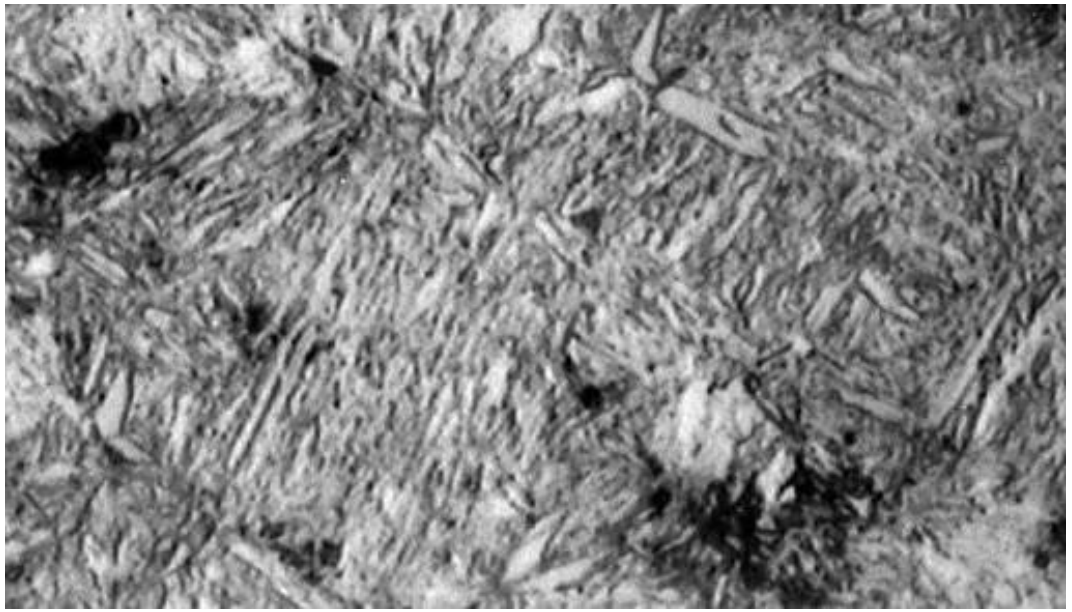
Закалочные температуры углеродистых сталей

МАРТЕНСИТ

Мартенсит — пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе.

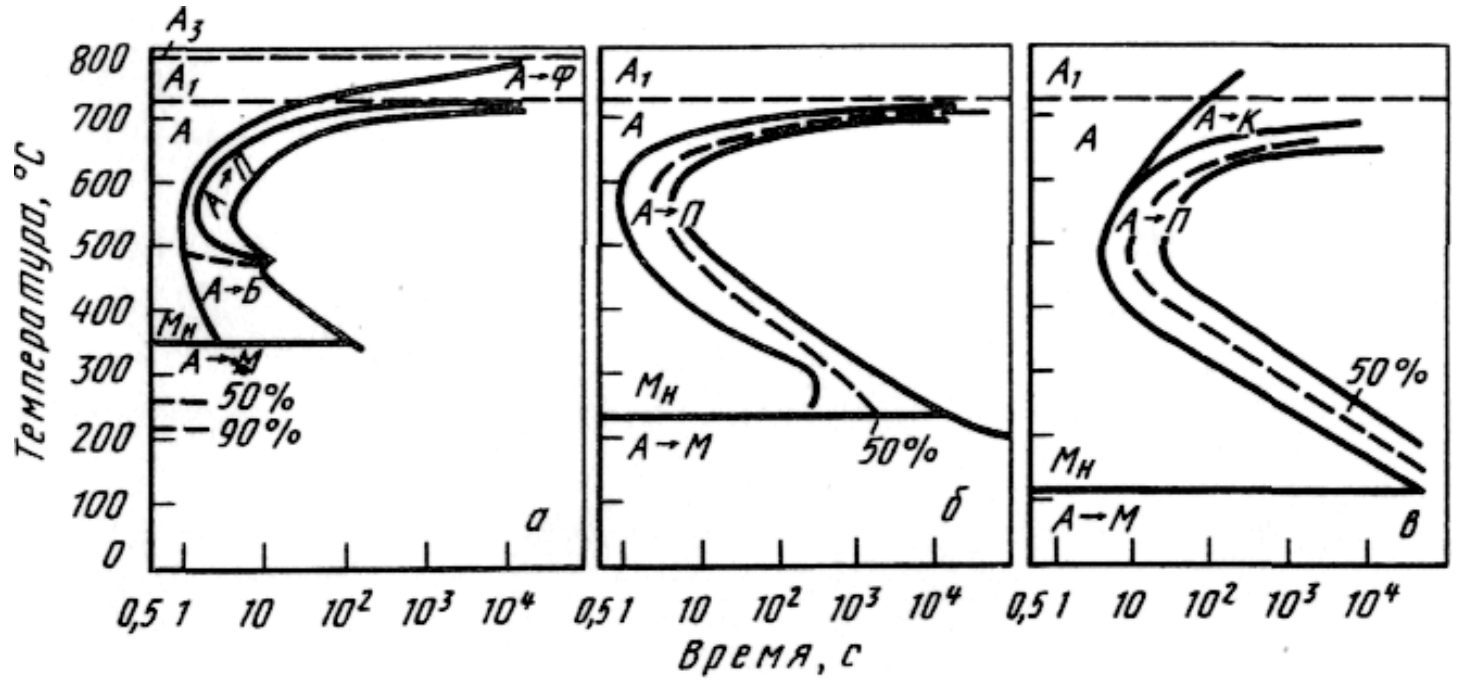


Объёмноцентрированная тетрагональная (о.ц.т.) решетка мартенсита. В реальности, даже при максимальном содержании углерода в мартенсите (около 2 %), один атом углерода приходится на четыре элементарные ячейки мартенсита.

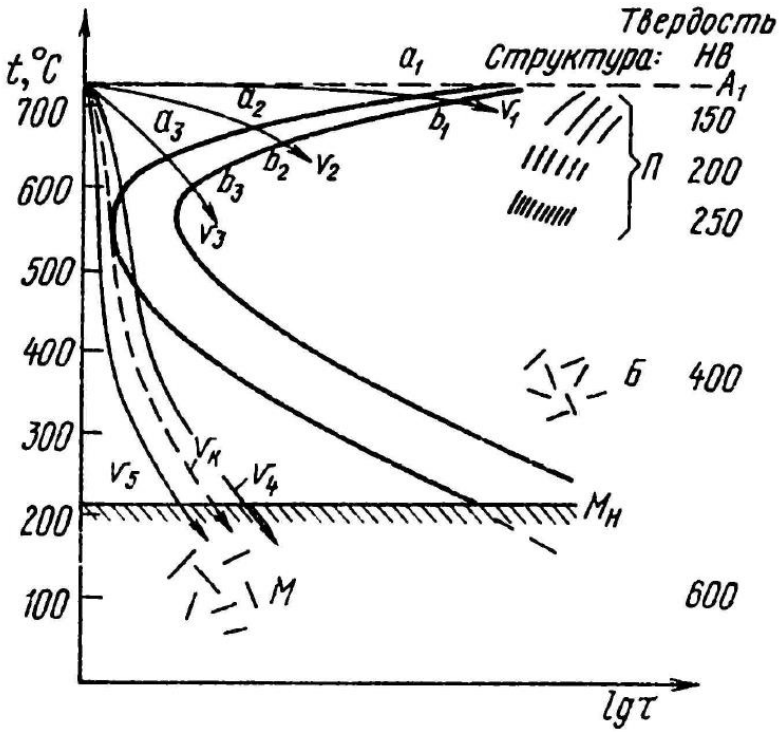


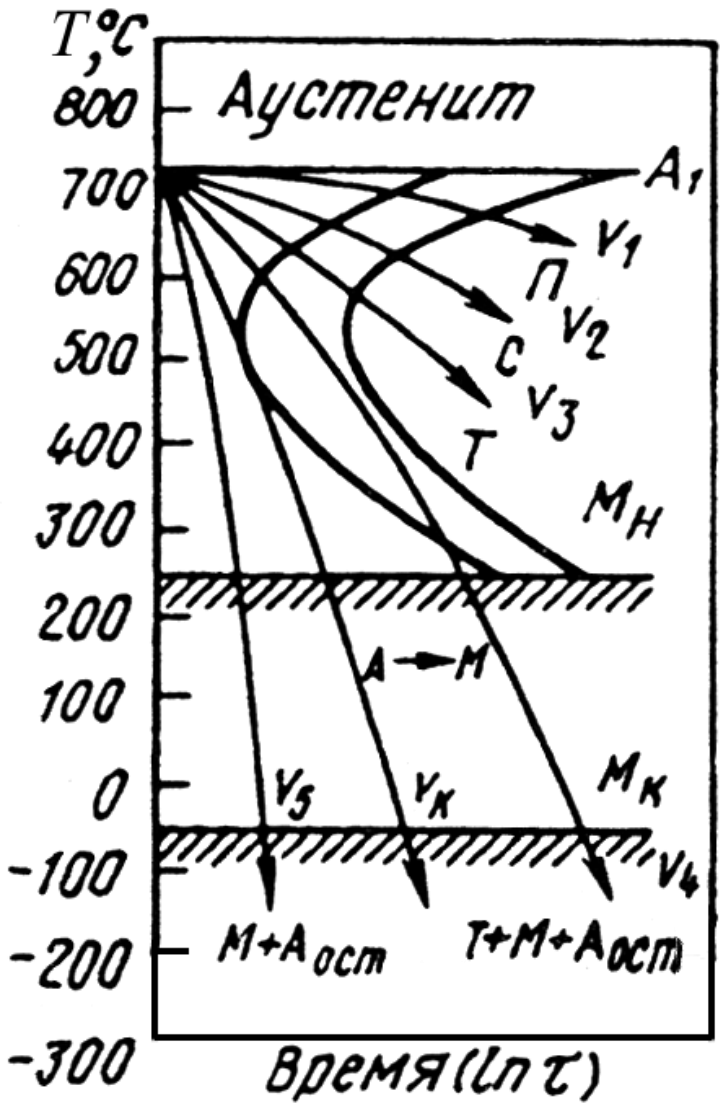
Микроструктура мартенсита

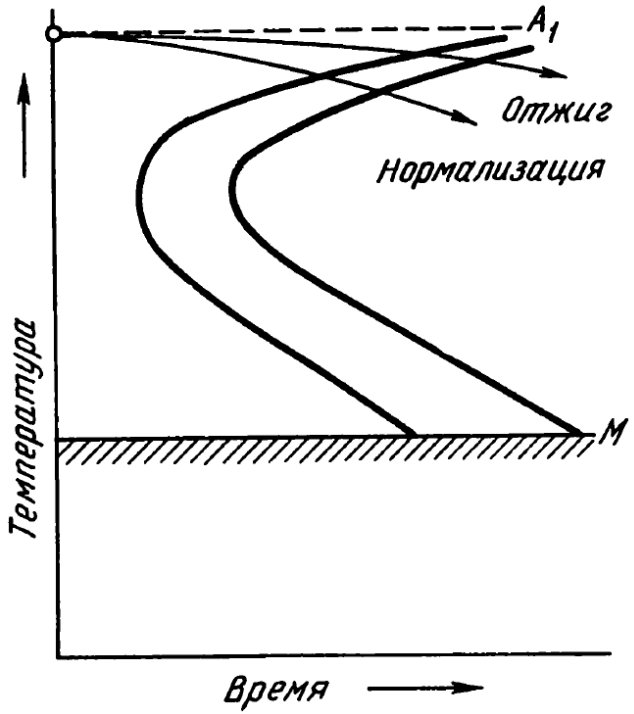
ДИАГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА



Диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита:
а — доэвтектоидная сталь 45; *б* — эвтектоидная сталь У8;
в — заэвтектоидная сталь У12

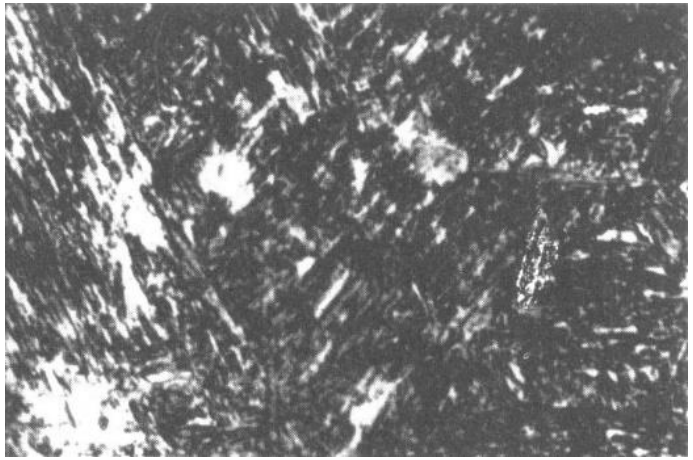




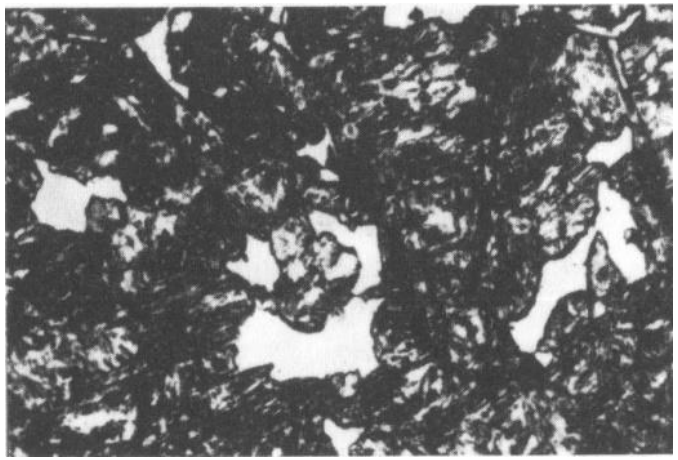


Кривые охлаждения, наложенные на диаграмму изотермического распада аустенита (0,8 % С)

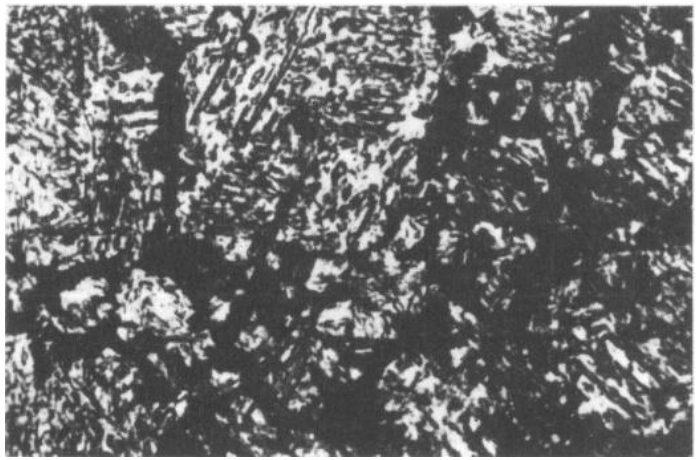
ОСНОВНЫЕ ВИДЫ БРАКА ПРИ ЗАКАЛКЕ



Перегрев. Крупноигольчатый мартенсит после закалки с завышением температуры нагрева (на 100…150°С выше температуры Ac_3). Твёрдость 650…670 НВ для стали У8 вместо 630…650 НВ. Резкое снижение ударной вязкости и пластичности.



Недогрев. Мартенсит и феррит после закалки с занижением температуры нагрева (выше температуры Ac_1, но ниже Ac_3 — неполная закалка). Твердость сильно понижена и неравномерна: 250…500 НВ в зависимости от количества феррита.



Недостаточная скорость охлаждения. Мартенсит и троостит после закалки со скоростью охлаждения ниже критической. Твердость понижена: 400...550 НВ для стали У8 вместо 630...650 НВ.

ОТПУСК

Отпуск — нагрев стали до температуры ниже Ac_1, выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение (обычно на воздухе).

Отпуск является конечной операцией термической обработки, проводится после закалки. В результате отпуска понижается твердость закаленной стали, но значительно увеличиваются пластичность и ударная вязкость.

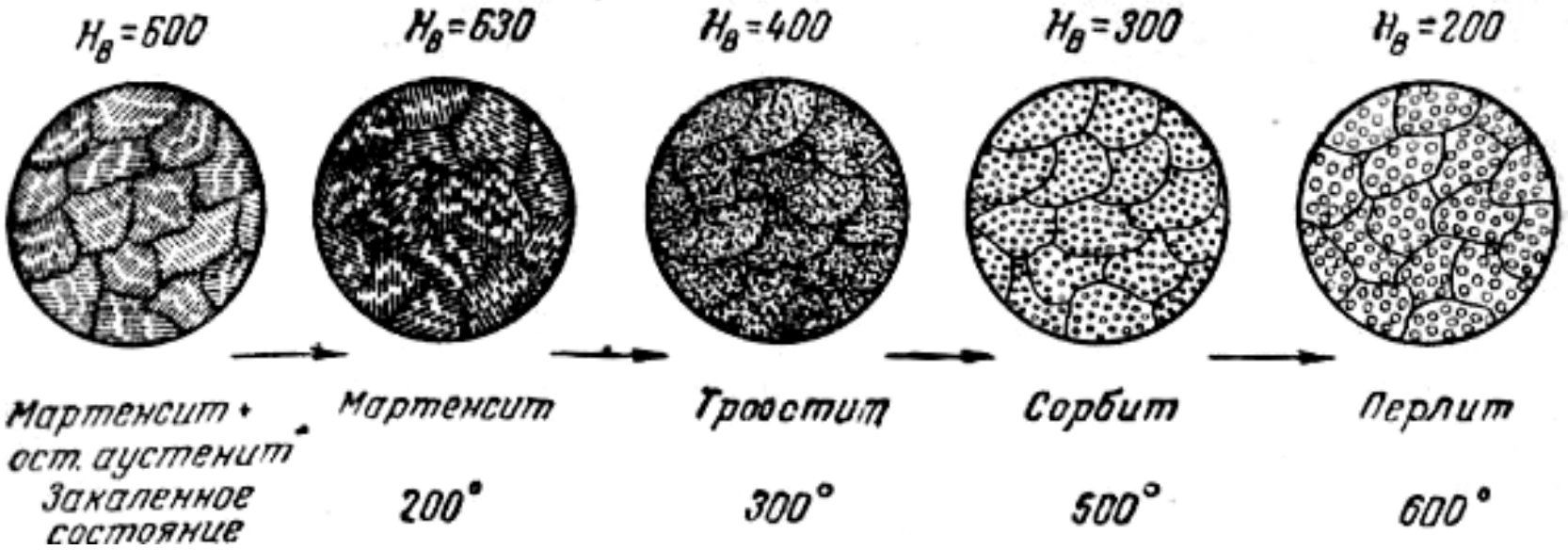
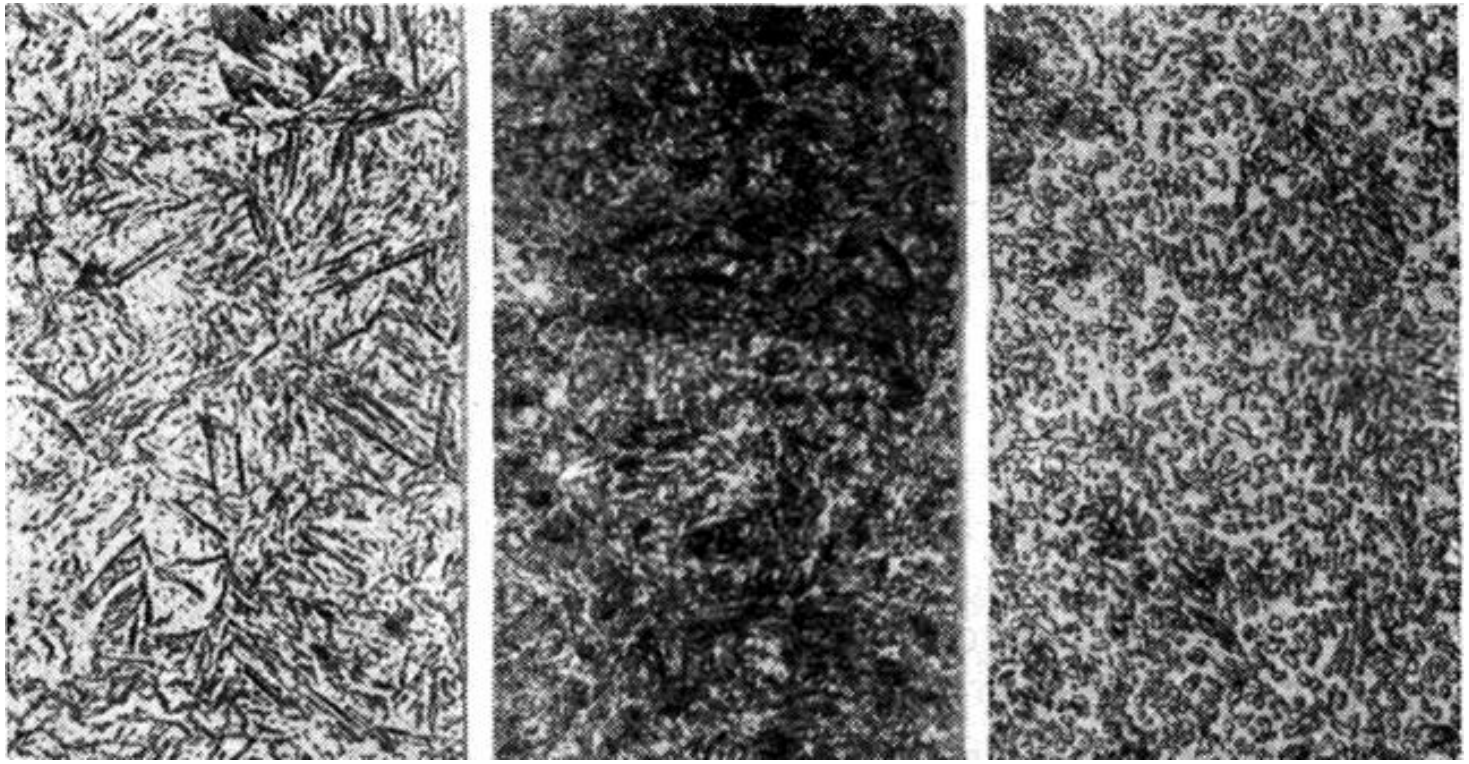
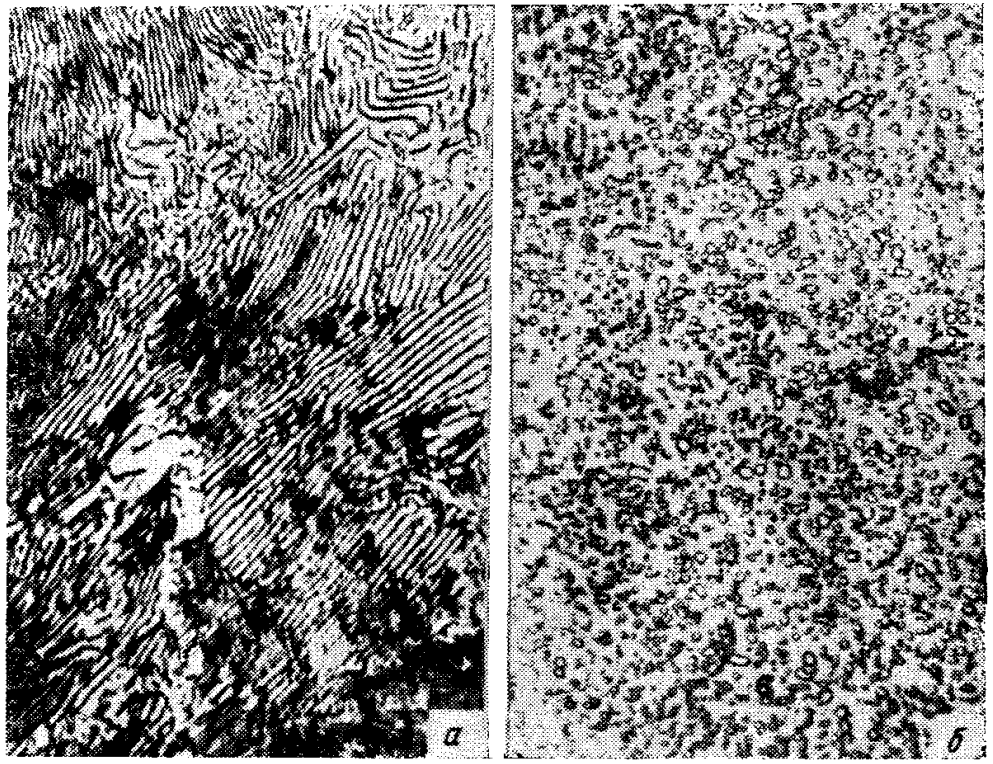


Схема структурных превращений мартенсита в стали У8 при нагреве при отпуске



Микроструктура отпущенной стали (0,6 % С), ×500:
а — мартенсит отпуска; *б* — троостит отпуска;
в — сорбит отпуска



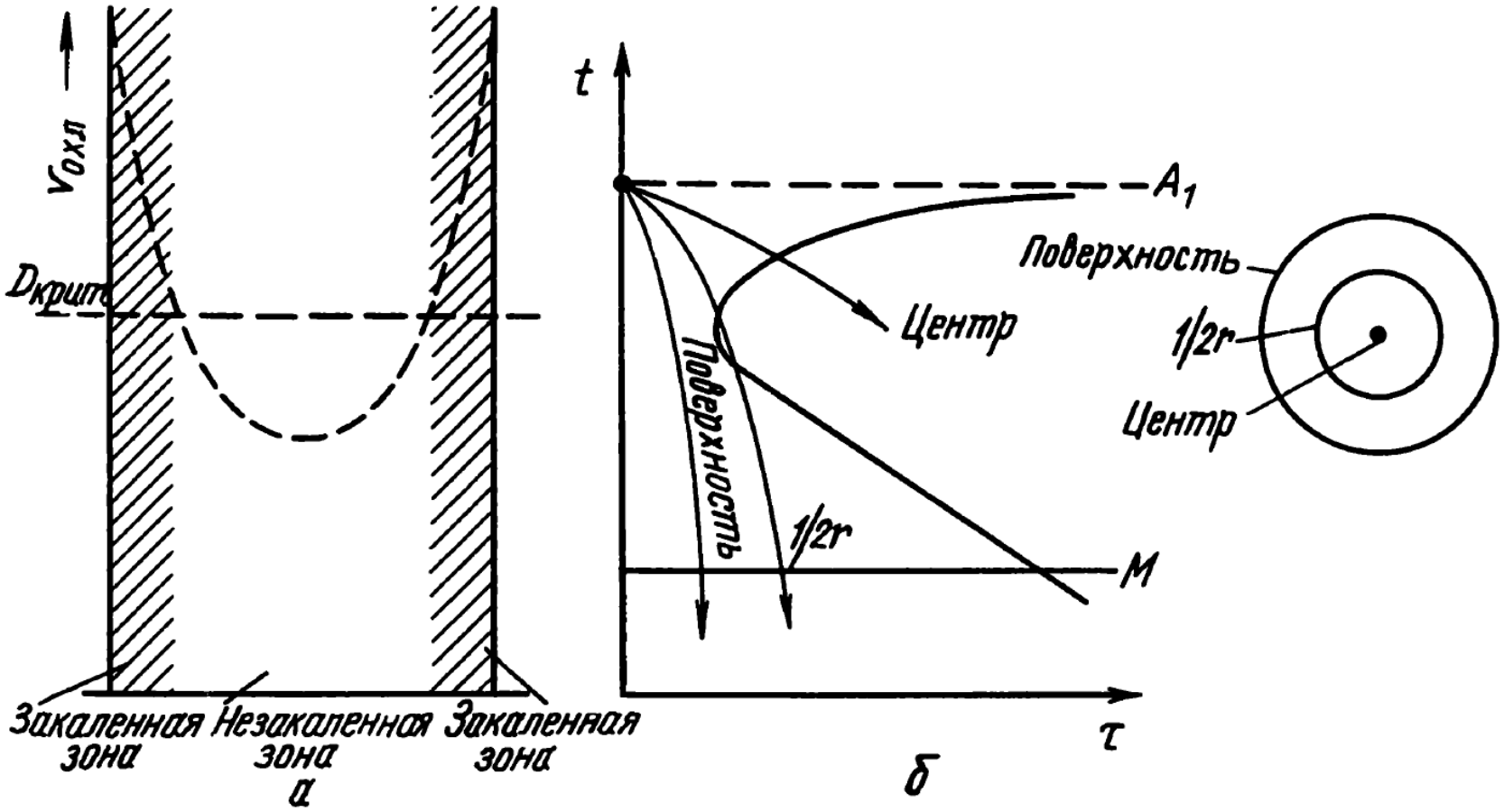
Эвтектоидная сталь (0,8 % С), ×600:
а — пластинчатый перлит;
б — зернистый перлит

ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Прокаливаемость — глубина проникновения закаленной зоны.

Несквозная прокаливаемость объясняется тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее на поверхности и медленнее в сердцевине.

Критический диаметр ($D_{кр}$) — это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе.



Несквозная прокаливаемость (*а*) и различные скорости охлаждения по сечению цилиндрической детали (*б*)

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КИНЕТИКУ РАСПАДА АУСТЕНИТА И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ

Все легирующие элементы, кроме кобальта, сдвигают диаграмму изотермического распада аустенита вправо, т.е. они увеличивают время распада аустенита.

Прокаливаемость стали находится в прямой зависимости от устойчивости переохлажденного аустенита. Чем больше сдвинута диаграмма изотермического распада аустенита вправо, тем больше прокаливаемость стали. Следовательно, все легирующие элементы, за исключением кобальта, увеличивают прокаливаемость.

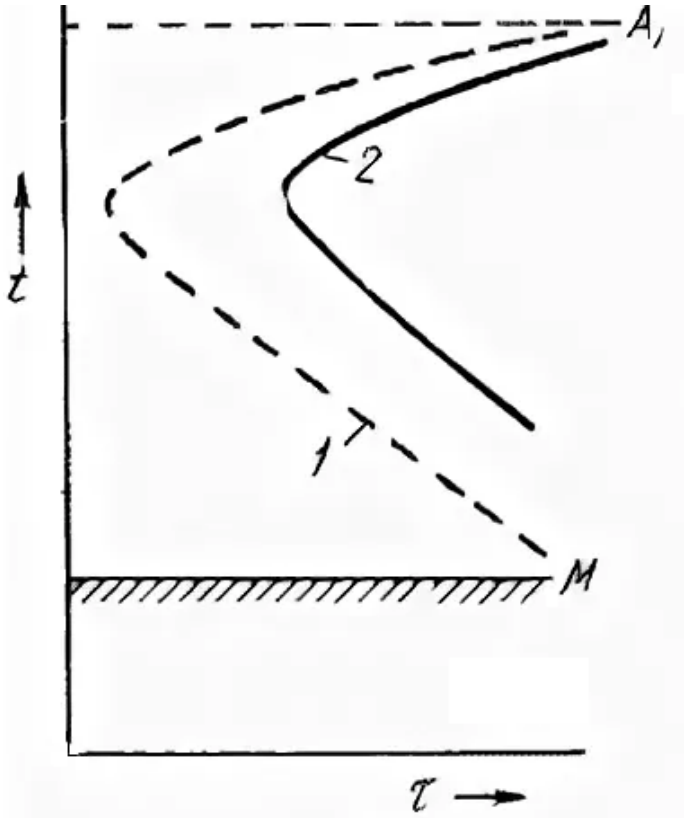


Диаграмма изотермического распада аустенита:
1 — углеродистая сталь;
2 — легированная сталь

КЛАССИФИКАЦИЯ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Нержавеющие стали в зависимости от структуры подразделяют на классы:

- Мартенситный — стали с основной структурой мартенсита;
- Мартенсито-ферритный — стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10 % феррита;
- Ферритный — стали, имеющие структуру феррита (без α↔γ превращений);
- Аустенито-мартенситный — стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах;
- Аустенито-ферритный — стали, имеющие структуру аустенита и феррита (феррита более 10 %);
- Аустенитный — стали, имеющие структуру устойчивого аустенита.

Подразделение сталей на классы по структурным признакам является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно — охлаждение на воздухе после высокотемпературного нагрева (свыше 900 °С) образцов небольших размеров.

ГОСТ 5632-2014 Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные

СТП 26.260.484-2004 Термическая обработка коррозионно-стойких сталей и сплавов на железоникелевой основе в химическом машиностроении

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

Основной режим — закалка (аустенизация):

— нагрев до 1050…1100 °С;
— выдержка 20…30 мин на 25 мм сечения (до прогрева по всему объёму);
— охлаждение быстрое, на воздухе или в воде (медленное охлаждение недопустимо, т.к. приводит к выпадению карбидов).

Результат: однородный аустенит, максимальная коррозионная стойкость, снятие напряжений.

Цель: Растворение карбидов хрома для предотвращения межкристаллитной коррозии (МКК) и снятие напряжений.

Стабилизирующий отжиг для стабилизированных сталей с титаном или ниобием:

— нагрев до 850…900 °С;
— выдержка 2…5 часов;
— охлаждение на воздухе.

Цель: Перевод углерода в стабильные карбиды титана или ниобия, защита от МКК при длительной работе при 450…800 °С.

Спасибо за внимание!

© Майдан Д.А., 2025
Электронная почта: mtm@samgtu.ru

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Основные виды металлических материалов. Классификация и маркировка углеродистых сталей. Легированные стали и сплавы, их маркировка. Дефекты стали.

Лектор:
Начальник испытательного центра, к.т.н.
Ермошкин Антон Александрович

Основные виды металлических материалов



Основные виды металлических материалов

Черные металлы – это железо и сплавы на его основе (главным образом, различные стали и чугуны), которые играют ключевую роль во всех отраслях промышленности. Благодаря своим прочностным характеристикам, доступности сырья и относительной дешевизне материалы на основе железа получили чрезвычайно широкое распространение – на них приходится свыше 90% от общего объема используемых металлов.

Цветные металлы – промышленное название группы металлов, которые, в отличие от стали и чугуна, не содержат железа, но обладают рядом уникальных свойств.



Классификация и маркировка углеродистых сталей

Классификация по химическому составу

По содержанию углерода

- низкоуглеродистые стали — до 0,3% С
- среднеуглеродистые стали — 0,3÷0,7% С
- высокоуглеродистые стали — свыше 0,7% С

По содержанию легирующих элементов

- низколегированные стали — до 5%
- среднелегированные стали — 5÷10%
- высоколегированные стали — свыше 10%.

Классификация по качеству

- Обыкновенного качества
  до 0,05% — S
  до 0,04% — P
- Качественные стали
  до 0,04% — S
  до 0,035% — P
- Высококачественные стали
  до 0,025% — S
  до 0,025% — P
- Особовысококачественные стали
  до 0,015% — S
  до 0,025% — P

Классификация и маркировка углеродистых сталей

Классификация по прочности

- Нормальной (средней) прочности
  Предел прочности 370-490 МПа
  Предел текучести 235-245 МПа
- Повышенной прочности
  Предел прочности 470-685 МПа
  Предел текучести 295-390 МПа
- Высокой прочности
  Предел прочности 685-1000 МПа
  Предел текучести 390-785 МПа

Классификация по раскислению

- Спокойные стали — раскисляют Mn, Si и Al
- Полуспокойные стали — раскисляют Mn и частично Si.
- Кипящие стали — раскисляют только Mn.

Легированные стали, их маркировка

Легированная сталь — сталь, содержащая кроме железа и углерода другие специально вводимые в её состав элементы.



Основные легирующие элементы:

Хром (Х)— увеличивает прочность и твердость без потерь пластичности, отвечает за кислотостойкость и жаростойкость;

Никель (Н) — улучшает ударную вязкость, устойчивость к окалинообразованию, термостойкость в агрессивных средах;

Кремний (С) — стабилизирует структуру, повышает пределы прочности и текучести;

Марганец (Г) — защищает от окисления, увеличивает сопротивление истиранию;

Вольфрам (В) — вводится в быстрорежущие и инструментальные марки;

Ванадий (Ф) — карбидообразующий агент, объединяясь с углеродом усиливает стойкость к истиранию, прочность, и способность противостоять напряжениям;

Молибден (М) — добавляют в быстрорежущие и жаропрочные материалы;

Титан (Т) — повышает прочность, коррозионную стойкость, жаропрочность, улучшает структуру.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали — легированные стали с минимальной массовой долей хрома 10,5% и максимальной массовой долей углерода 1,2%, устойчивые к коррозии в атмосфере и агрессивных средах.

Аустенитные	• содержат хром и никель • обладают высокой пластичностью и ударной вязкостью
Ферритные	• в состав входит хром с минимальным количеством углерода • отличаются хорошей устойчивостью к различным типам коррозии
Мартенситные	• в состав входит хром и углерод от 0,1 до 1,2% • отличаются высокой износостойкостью и устойчивостью к механическим нагрузкам

Дефекты стали

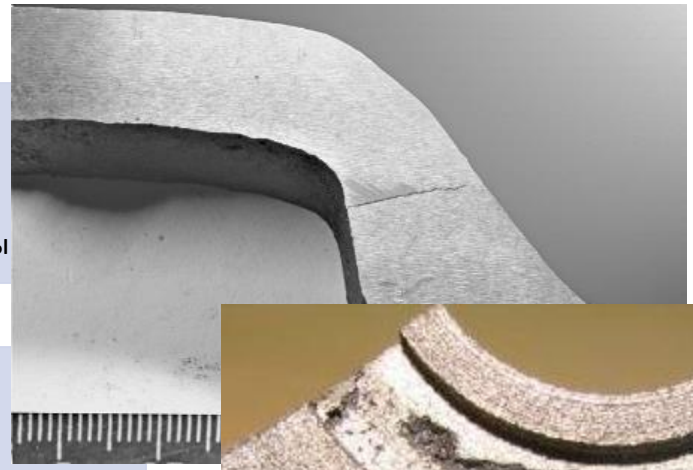
Дефекты стали — это неоднородные участки в структуре металла, которые могут влиять на его механические свойства и поведение при определённых условиях. Такие повреждения снижают прочность материала и его стойкость к различным воздействиям.



Производственно-технические (металлургические) дефекты стали характерные для корпусов фонтанной арматуры

Трещины

- Горячие трещины
- Холодные трещины
- Термические трещины
- Межкристаллические трещины



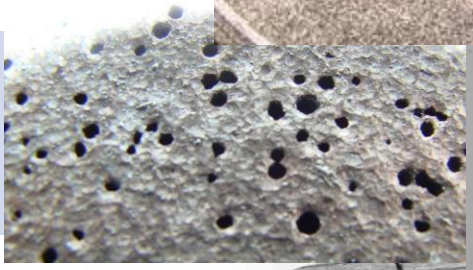
Раковины

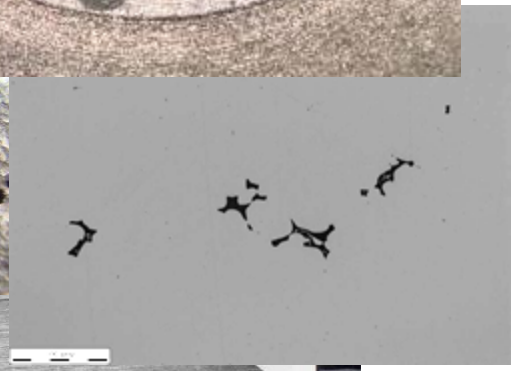
- Усадочные раковины
- Газовые раковины
- Шлаковые раковины
- и др.



Пористость

- Усадочная пористость
- Газовая пористость





Включения

- Металлические включения
- Неметаллические включения

