ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# *Повышение эксплуатационных свойств нефтепромысловых труб на основе использования бейнитных структур.*

***Выбойщик М.А.***
***vma63vma@yandex.ru***

***Тольятти***
***2025***

# Введение.

Бейниты по сравнению с другими видами структур сталей (феррит, перлит, феррито-перлит, сорбит, мартенсит и др.) обеспечивает сочетание более высоких значений прочности и пластичности.

Таблица 1. Механические свойства после улучшения (зернистый перлит) и изотермической закалки (бейнит).

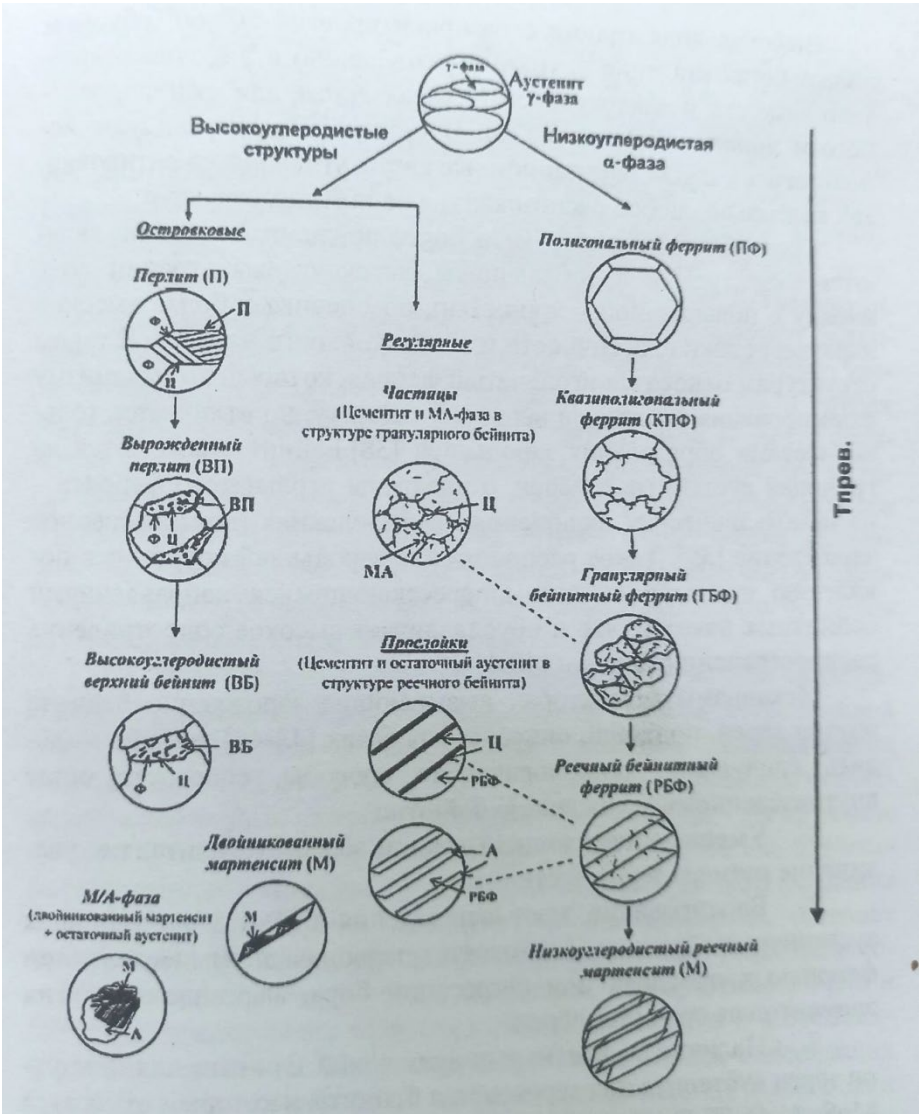
| Режимы термообработки | $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ, % | KCU, МДж/м 2 |
|---|---|---|---|---|
| Сталь 30ХГС | | | | |
| Закалка в масло + отпуск 540 С | 1100 | 850 | 11 | 0,45 |
| Изотермическая закалка, выдержка 330 С селитра | 1650 | 1300 | 20 | 0,6 |
| Сталь 40ХСНМА | | | | |
| Закалка в масло + отпуск 550 С | 11320 | 1230 | 12 | 05 |
| Изотермическая закалка, выдержка 45 мин. 300 С | 1400 | 1200 | 19 | 0,92 |

Решение вопросов:

1. Формирование бейнитных структур.
2. Обеспечение коррозионной стойкости бейнитных структур в нефтепромысловых средах.

# Формирование бейнитных структур.

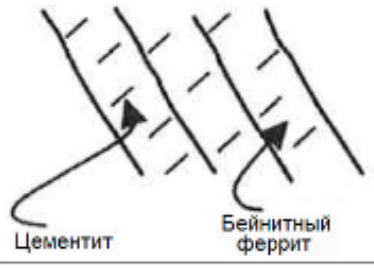
Бейнит является наиболее сложной микроструктурой стали, поскольку формируется двумя механизмами превращения аустенита: диффузионный (перлитный) и сдвиговый (мартенситный).



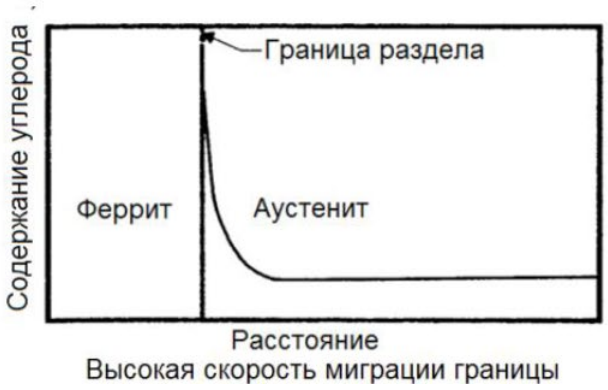

Изменение строения и структуры низкоуглеродистых низколегированных сталей при снижении температуры превращения (увеличении скорости охлаждения)
[Матросов М.Ю., Лясоцкий И.В., Кичина А.А. и др. Особенности к классификации структур низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей //Сталь. 2012. №1. С.65-74.]

# Вид и расположение второй фазы в реечном бейните в зависимости от температуры.

(классификация по И. Онори, изотермическое охлаждение )

| | | | |
|---|---|---|---|
| Верхний бейнит (UB) | Бейнит в низкоуглеродистых сталях, $B_2$ | Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек и выделившийся по границам реек цементит |  |
| Дегенеративный (недоразвитый) верхний бейнит (DUB) | Бейнит в низкоуглеродистых сталях, $B_1$ | Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек и выделившиеся по границам реек МА-составляющие (в качестве второй фазы могут выступать перлит или аустенит) |  |
| Нижний бейнит реечного типа (LLB) | Бейнит в низкоуглеродистых сталях, $B_3$ | Вытянутые частицы бейнитного феррита в форме реек с выделившимся внутри них под углом 55–60° цементитом |  |

# Механизм формирования второй фазы.



Высокая скорость миграции границы



Невысокая скорость миграции границы

Распределение углерода на границе феррита и аустенита в зависимости от скорости охлаждения: а) быстрое охлаждение и высокая скорость миграции границы; б) медленное охлаждение и низкая скорость миграции границы

Процесс формирования второй фазы можно описать на основе суперпозиции двух диффузионных потоков [Рудской А.И. Научные основы управления структурой и свойствами сталей в процессах термомеханической обработки .М.:РАН. 2019. 276 с]

Это массоперенос углерода при движении межфазной границы ($J_{\alpha\to\gamma} = (C_\gamma^{int} - C_\alpha^{int})\ V$), и поток углерода от границы в объем в аустенитной фазе ($J_d = -D_c(\partial C_\gamma/\partial x)$). Суммарный диффузионный перенос можно представить, как разность этих двух потоков:

$$_\Delta J = (C_\gamma^{int} - C_\alpha^{int})V + D_c(\partial C_\gamma/\partial x)\ .$$

где $C_\gamma^{int}$ и $C_\alpha^{int}$ – концентрация углерода в аустените и феррите вблизи границы раздела, V – скорость движения межфазных границ, $D_c$ – коэффициент диффузии углерода в аустените, $C_\gamma$ - концентрация углерода в аустените.

# Объект исследования и методы.

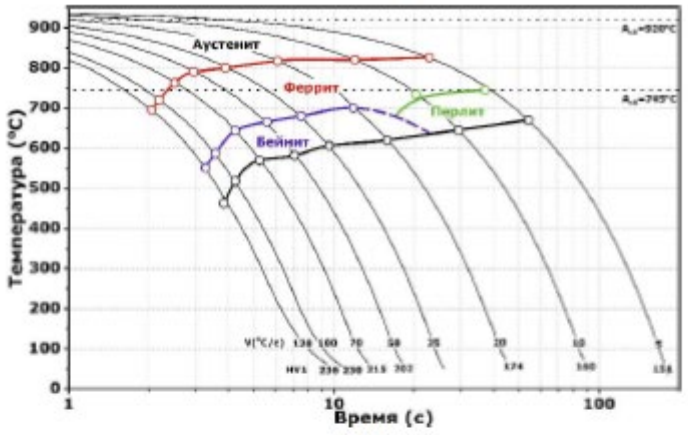
Элементный состав сталей

| Марка стали | Массовая концентрация химических элементов, % | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | Nb | V | S | P |
| 08ХФА | 0,09 | 0,20 | 0,44 | 0,52 | 0,003 | 0,12 | 0,034 | 0,11 | 0,02 | 0,088 | 0,002 | 0,011 |
| 08ХМФА | 0,05 | 0,39 | 0,39 | 0,70 | 0,190 | 0,10 | 0,057 | 0,17 | 0,011 | 0,061 | 0,004 | 0,003 |
| 05ХГБ | 0,05 | 0,22 | 0,71 | 0,61 | 0,01 | 0,08 | 0,013 | 0,18 | 0,029 | 0,003 | 0,001 | 0,006 |
| 09Г2С | 0,07 | 0,57 | 1,42 | 0,06 | 0,026 | 0,13 | 0,041 | 0,28 | - | 0,003 | 0,012 | 0,012 |

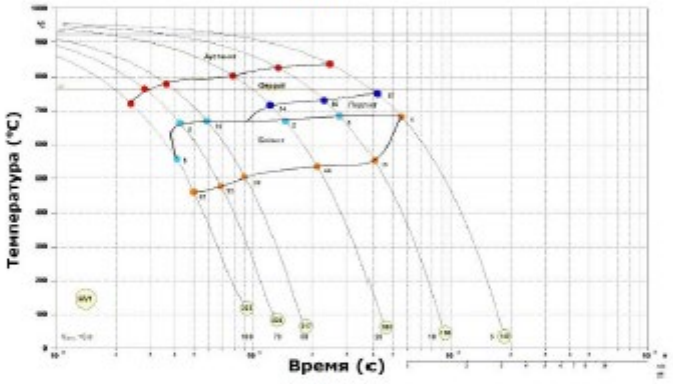
Методы исследований:

- Химический анализ;
- Металлографический анализ (световая и электронная микроскопии);
- Рентгеноструктурный анализ металла и продуктов коррозии (фазовый состав, остаточные напряжения, плотность дислокаций);
- Механические свойства (твердость, одноосное растяжение, ударная вязкость);
- Внутреннее трение;
- Коррозионные свойства (ВР, СКРН, общая и углекислотная коррозия).

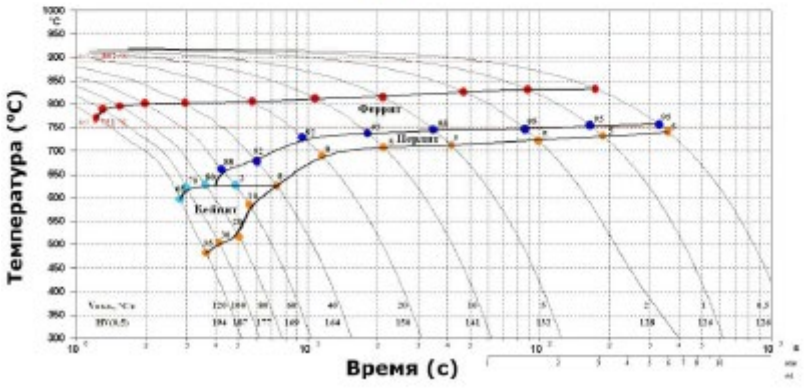
# Кинетика распада аустенита.




а)



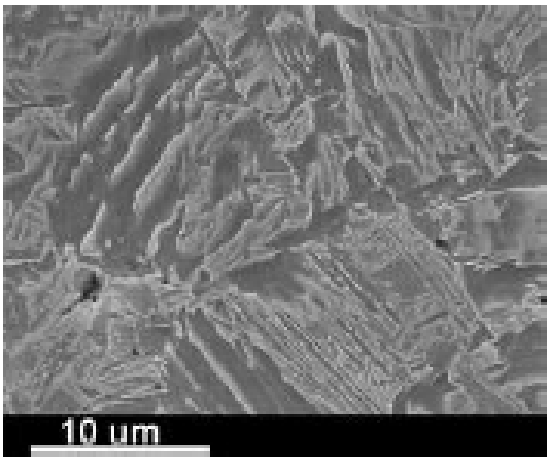

б)



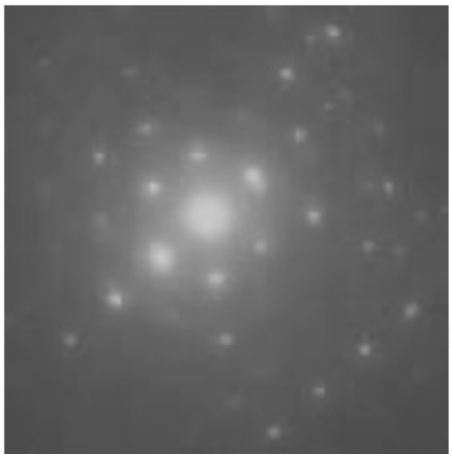

в)

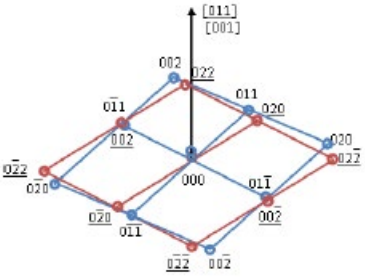
Термокинетические диаграммы распада переохлаждённого аустенита: а-сталь 08ХФА; б-сталь 08ХМФА; в-сталь 05ХГБ. Диаграммы приведены по данным центра исследовательских лабораторий АО «ВМЗ»

# Структура после закалки в воду.

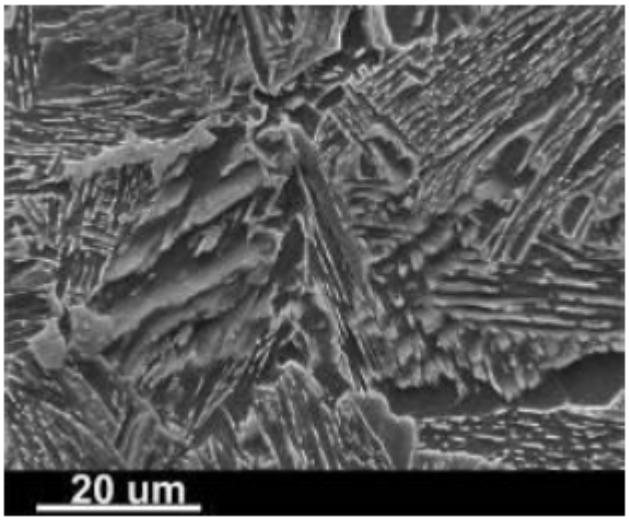


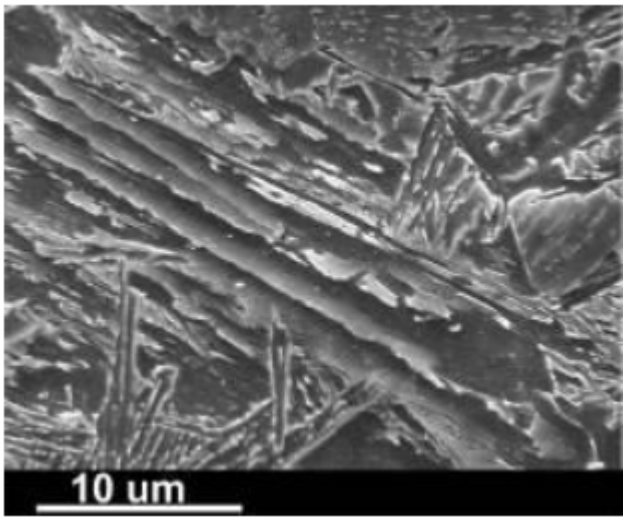




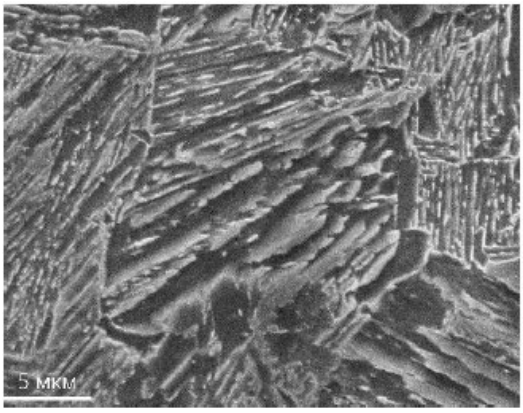

Сталь 08ХМФАзакалка в воду с 930 ˚С

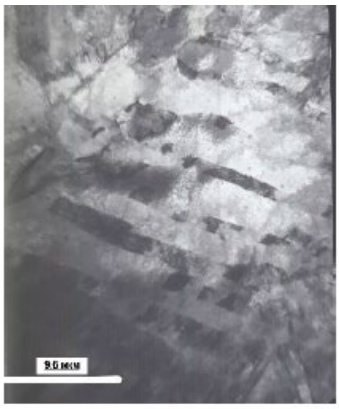


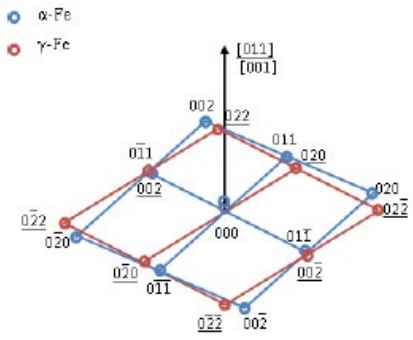

Стали 08ХФА закалка с 930˚С в 16% водный раствор NaCl.

# Структура после закалки в воду.

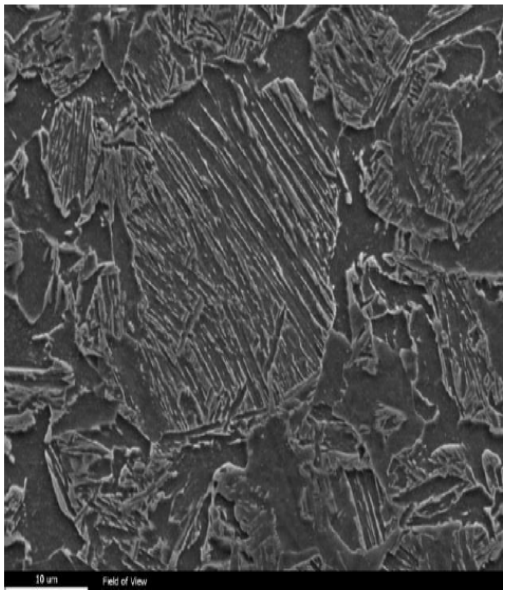






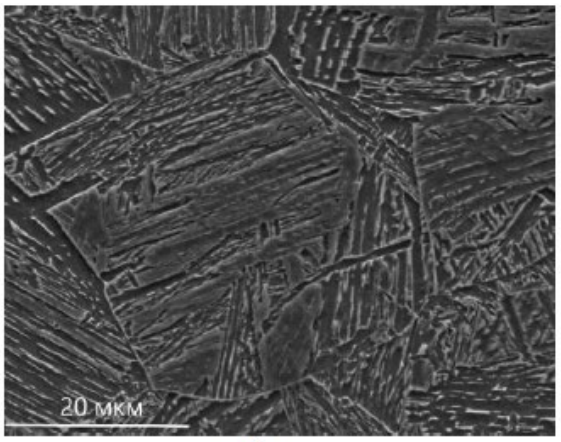

Сталь 08ХМФА закалка в воду с 930 ˚С



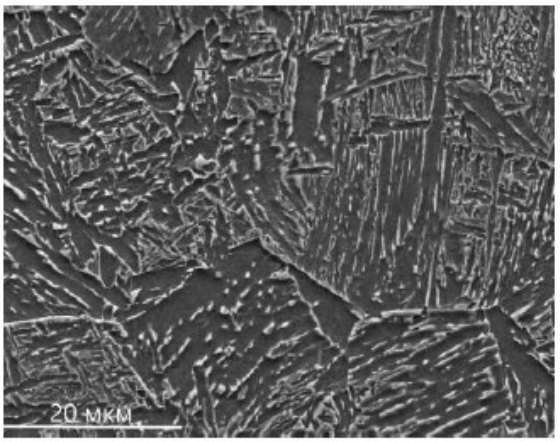



Сталь 05ХГБ закалка в воду с 920 ˚С

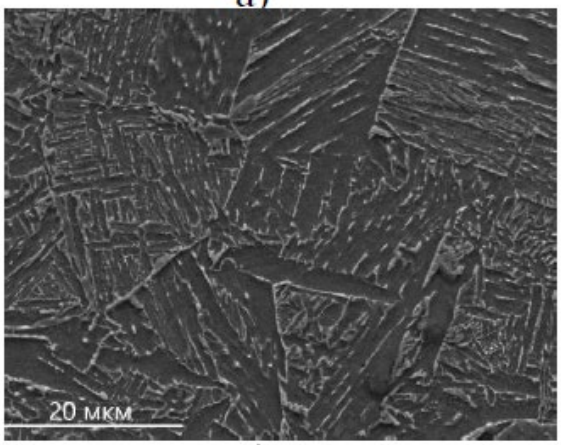
# Изменение структуры с ростом температуры



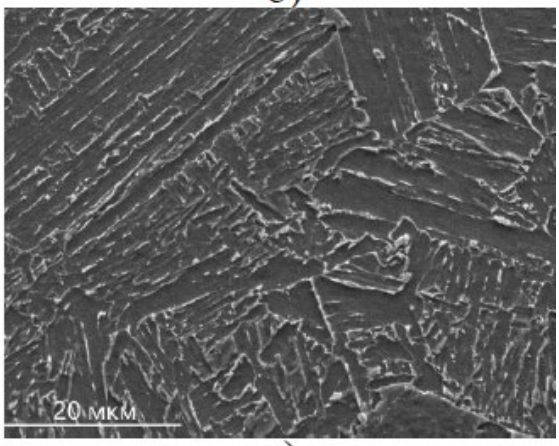

а)



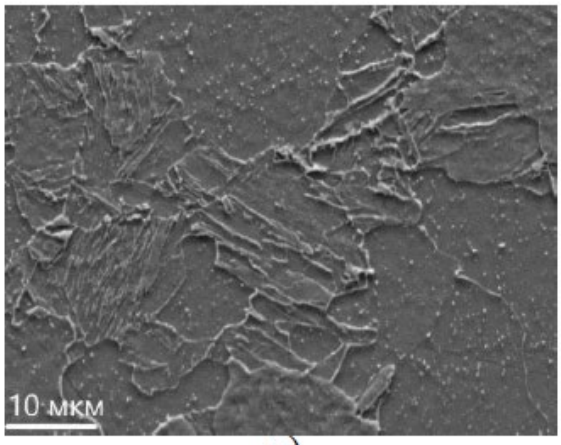

б)




в)



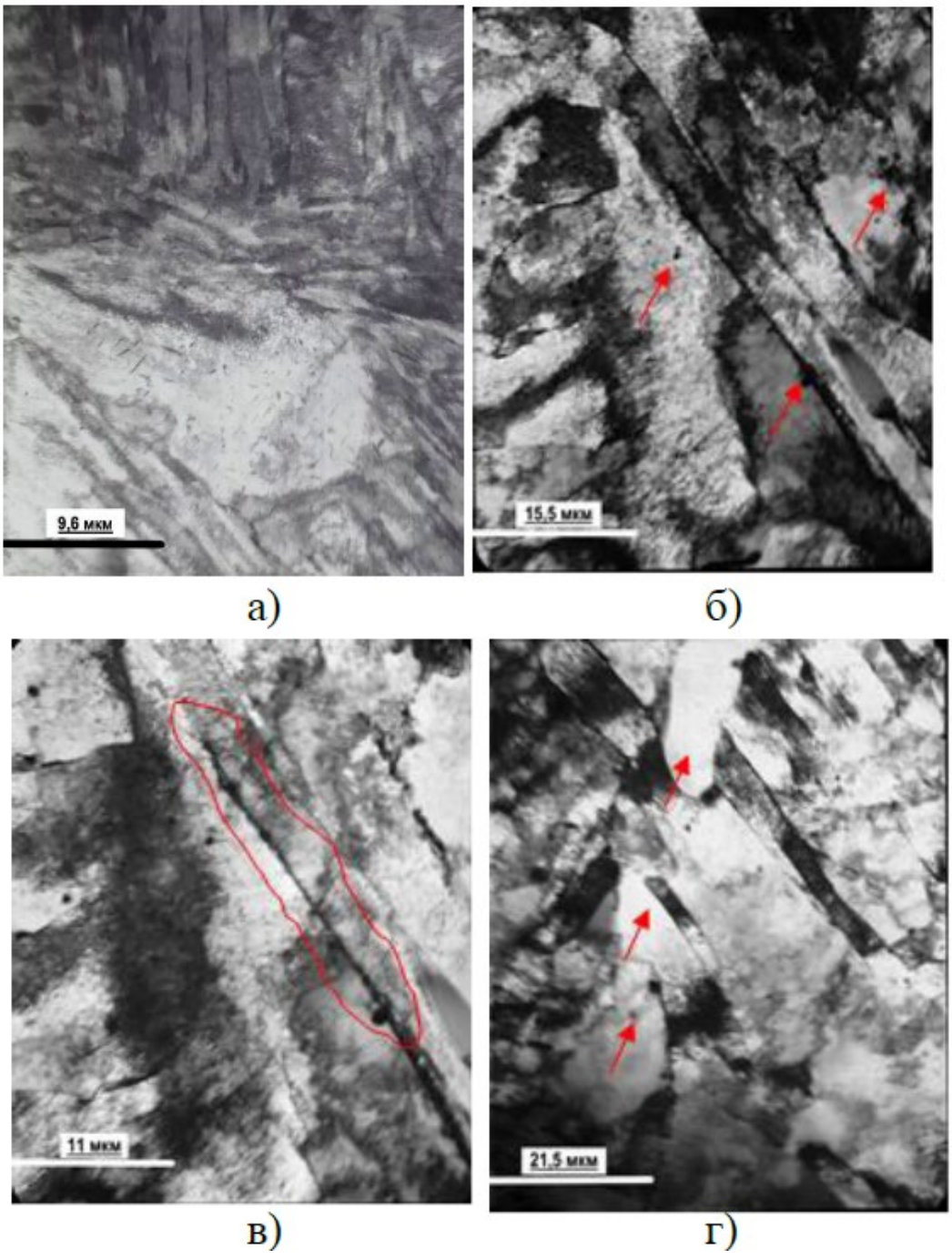

г)




д)

Сталь 08ХМФА закалка от 930˚С и отпуск при температурах:
а) 200˚С; б) 300˚С; в) 400˚С; г) 500˚С; д) 700˚С. (СЭМ)

# Изменение структуры с ростом температуры отпуска.




Сталь 08ХМФА закалка от 930˚С и отпуск при температурах:
а) 300˚С; б) 400˚С; в) 500˚С; г) 600˚С. (ПЭМ)

# Последовательность структурных превращений.

Эволюция структурного состояния реечного бескарбидного бейнита с увеличением температуры отпуска (проследовательность процессов):

— при 200˚С исчезает непревращенный аустенит;

— при отпуске 300˚С появляются первые выделения карбидов железа игольчатой формы;

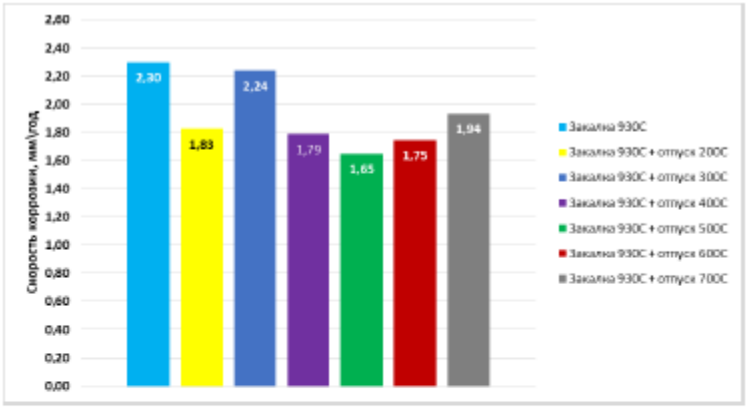
— в интервале температур 400-500˚С карбидные частицы появляются в объёме на границах реек, происходит их коалесценция и сфероидизация, появляются цепочки карбидных включений на границах бейнитных реек. Резко снижаются остаточные напряжения 3го рода, (переход углерода из кристаллической решётки в связанное состояние в виде карбидов). Развиваются процессы полигонизации: уменьшение малоугловых и рост высокоугловых границ. Плотность дислокаций остается практически неизменной;

— с температуры отпуска 600˚С основным фактором является интенсивное развитие процессов рекристализации, определяющее изменение структуры и свойств;

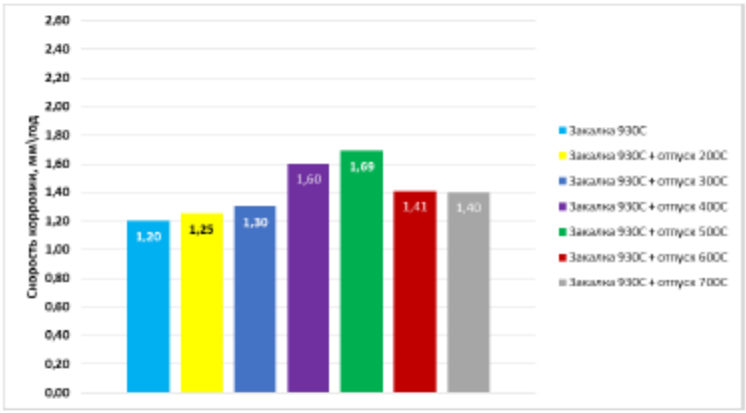
— отпуск выше 700˚С может вызвать вторичную рекристаллизацию и резкий рост зерна.

Зависимость механических свойств, остаточных напряжений и плотности дислокаций сталей 08ХФА, 08ХМФА, 05ХГБ от температуры отпуска

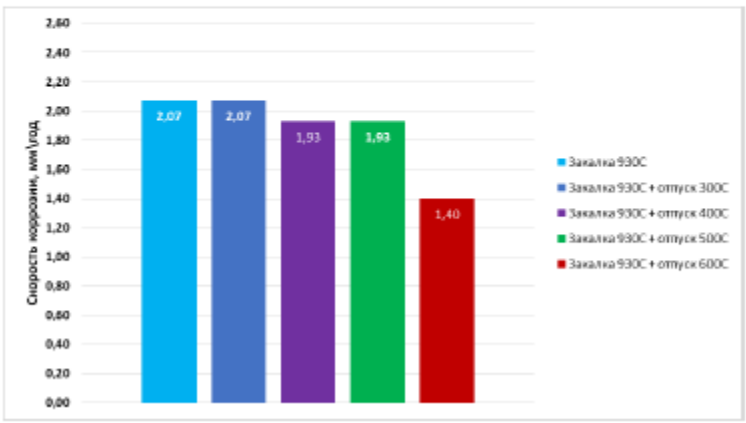
| Марка стали | Режим термообработки | $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ, % | KCV $^{-50}$ Дж/см$^2$ (ДВС) | Остаточн. напр. 3-го рода, МПа | Плотность дисл., $\rho*1014$, м$^{-2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 08ХФА | Закалка 930˚С | 830 | 740 | 22,0 | 230 (100%) | 300 | 5,1 |
| | 930˚С + отпуск 200˚С | 820 | 710 | 19,0 | 240 (100%) | 225 | 4,4 |
| | 930˚С + отпуск 300˚С | 810 | 730 | 17,5 | 240 (100%) | 220 | 4,1 |
| | 930˚С + отпуск 400˚С | 785 | 690 | 18,0 | 252 (100%) | 140 | 5,1 |
| | 930˚С + отпуск 500˚С | 710 | 645 | 18,5 | 260 (100%) | 91 | 4,7 |
| | 930˚С + отпуск 600˚С | 680 | 605 | 22,0 | 260 (100%) | 71 | 5,2 |
| | 930˚С + отпуск 700˚С | 615 | 535 | 25,0 | - | 64 | 2,8 |
| 08ХМФА | Закалка 930˚С | 775 | 700 | 19,5 | 180 (80%) | 190 | 4,0 |
| | 930˚С + отпуск 200˚С | 780 | 650 | 19,0 | 215 (100%) | 200 | 4,7 |
| | 930˚С + отпуск 300˚С | 785 | 660 | 18,0 | 200 (100%) | 180 | 4,5 |
| | 930˚С + отпуск 400˚С | 760 | 650 | 19,5 | 215 (100%) | 120 | 4,2 |
| | 930˚С + отпуск 500˚С | 710 | 635 | 20,0 | 235 (100%) | - | - |
| | 930˚С + отпуск 600˚С | 685 | 605 | 21,5 | 250 (100%) | 86 | 3,4 |
| | 930˚С + отпуск 700˚С | 590 | 520 | 23,5 | 270 (100%) | 63 | 3,6 |
| 05ХГБ | Закалка 930˚С | 605 | 490 | 29,0 | 290 (100%) | 570 | 5,4 |
| | 930˚С + отпуск 200˚С | - | - | - | - | - | - |
| | 930˚С + отпуск 300˚С | 590 | 500 | 29,0 | 315 (100%) | 460 | 4,9 |
| | 930˚С + отпуск 400˚С | 560 | 470 | 27,0 | 330 (100%) | 215 | 4,7 |
| | 930˚С + отпуск 500˚С | 530 | 430 | 28,0 | 314 (100%) | 90 | 4,5 |
| | 930˚С + отпуск 600˚С | 510 | 420 | 27,0 | 325 (100%) | 45 | 4,0 |
| | 930˚С + отпуск 700˚С | - | - | - | - | - | - |
| **Требования Газпромнефть ТТТ-01.02.04-01,** для низколегированных коррозионностойких и хладостойких труб в $CO_2$-содержащих средах (Группа 4) (бесшовные трубы) | | | | | | | |
| Группа прочности К60 | | 590-740 | ≥460 | ≥20 | - | - | - |
| **Требования ГОСТ 20295-85** (для сварных прямошовных и спиральношовных труб) | | | | | | | |
| Группа прочности К60 | | ≥588 | ≥412 | ≥16 | - | - | - |




а)

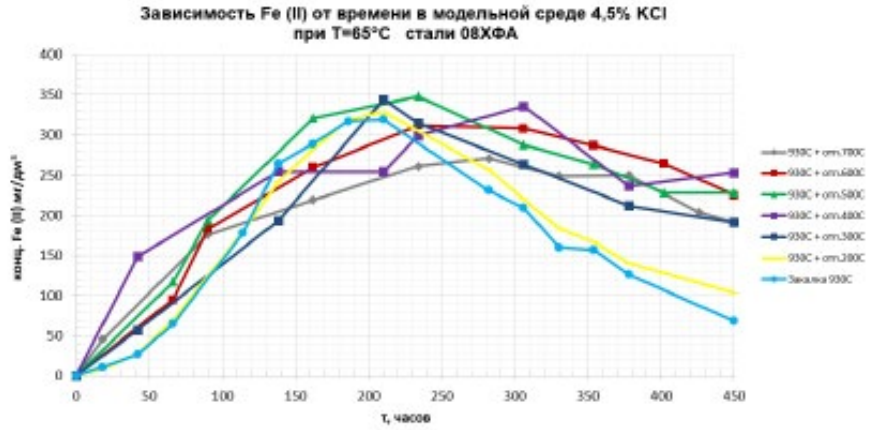



б)

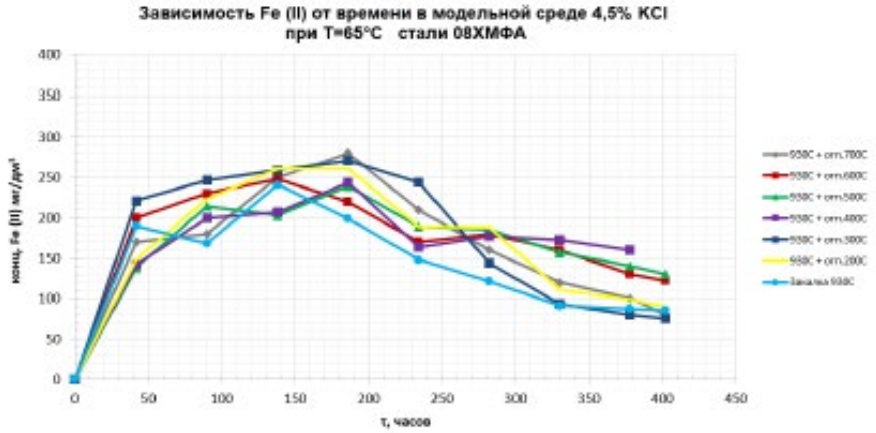



в)

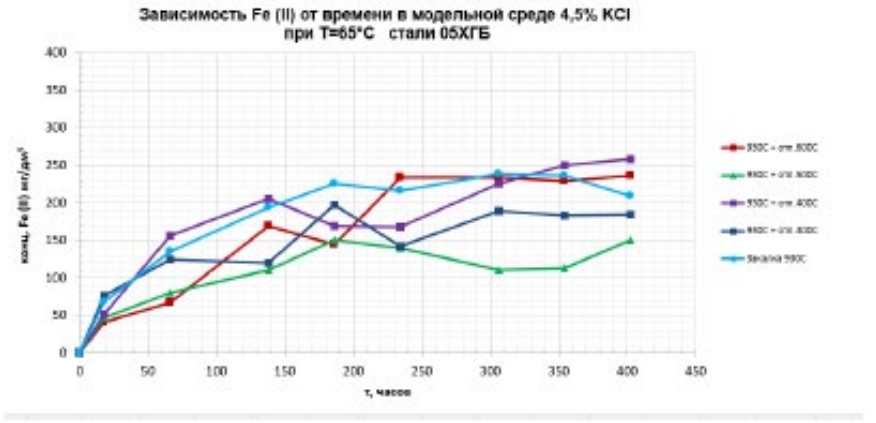
Зависимость скорости углекислотной коррозии от температуры отпуска: а) сталь 08ХФА, б) сталь 08ХМФА, в) сталь 05ХГБ




а)




б)




в)

Зависимость концентрации Fe+2 в модельной среде от времени испытаний при коррозионных испытаниях на стойкость к CO2-коррозии: а) сталь 08ХФА, б) сталь 08ХМФА, в) сталь 05ХГБ

# Производство обсадных труб из низкоуглеродистых низколегированных сталей

Результаты испытаний на растяжение

| Марка стали | Режим ТО | $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ | $\delta 5$, % | Разность $\sigma_в - \sigma_т$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 08ХМФА | Закалка 900С в воду | 875 | 755 | 0,86 | 19,0 | 120 |
| | Закалка 860С в воду | 790 | 655 | 0,83 | 20,0 | 125 |
| | Закалка 830С в воду | 740 | 555 | 0,75 | 24,0 | 185 |
| | Закалка 800С в воду | 730 | 565 | 0,78 | 22,0 | 165 |
| | Закалка 900С в воду + отпуск 500С | 745 | 680 | 0,91 | 18,0 | 65 |
| | Закалка 860С в воду + отпуск 550С | 675 | 545 | 0,81 | 23,0 | 130 |
| | Закалка 830С в воду + отпуск 500С | 655 | 520 | 0,79 | 23,0 | 135 |
| | Закалка 800С в воду + отпуск 500С | 625 | 510 | 0,82 | 26,0 | 115 |
| 09Г2С | Закалка 900С в воду | 1150 | 1030 | 0,90 | 16,5 | 120 |
| | Закалка 860С в воду | 1110 | 990 | 0,89 | 16,5 | 120 |
| | Закалка 830С в воду | 900 | 760 | 0,84 | 17,0 | 140 |
| | Закалка 800С в воду | 835 | 670 | 0,80 | 20,5 | 165 |
| | Закалка 900С в воду + отпуск 500С | 835 | 795 | 0,95 | 20,0 | 40 |
| | Закалка 860С в воду + отпуск 600С | 665 | 585 | 0,88 | 22,0 | 80 |
| | Закалка 830С в воду + отпуск 500С | 690 | 585 | 0,85 | 25,0 | 105 |
| | Закалка 800С в воду + отпуск 500С | 640 | 505 | 0,79 | 25,5 | 135 |
| 05ХГБ | Закалка 900С в воду | 690 | 520 | 0,75 | 26,0 | 170 |
| | Закалка 860С в воду | 610 | 450 | 0,74 | 30,0 | 160 |
| | Закалка 830С в воду | 605 | 455 | 0,75 | 26,0 | 150 |
| | Закалка 800С в воду | 595 | 445 | 0,75 | 28,5 | 150 |
| | Закалка 900С в воду + отпуск 500С | 575 | 485 | 0,84 | 27,0 | 90 |
| | Закалка 830С в воду + отпуск 500С | 515 | 410 | 0,80 | 25,0 | 105 |
| Требования API 5CT, гр прочности К55 | | | | | | |
| ≥ | | 655 | 379 | - | 13 | 103 |
| ≤ | | - | 552 | - | - | - |

**$\sigma_в - \sigma_т > 103$ МПа**

# Выводы

1. Прочностные свойства реечного бескарбидного бейнита практически не меняются при отпуске до 400˚С. Значительное разупрочнение начинается с 600˚С и обусловлено развитием процессов рекристаллизации.

2. Структурное состояние малоуглеродистых сталей с бейнитной закаливаемостью не влияет на их стойкость к углекислотной коррозии.

3. Для сталей со структурой реечного бескарбидного бейнита низкий и средний отпуск обеспечивают сочетание высоких значений механических свойств и коррозионной стойкости в нефтепромысловых средах.

4. Использование бейнитных структур ограничивается только техническим и научным уровнями производства.