

ФГАОУ ВО «БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Лаборатория механических свойств наноструктурных
и жаропрочных материалов

**ПРИРОДА ДЕГРАДАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОЛЗУЧЕСТИ 10%СR МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ,
ДОПОЛНИТЕЛЬНО ЛЕГИРОВАННОЙ КОБАЛЬТОМ,
ВОЛЬФРАМОМ, МЕДЬЮ И РЕНИЕМ**

Федосеева Александра Эдуардовна

канд. техн. н., с.н.с.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (№19-73-10089).

Международная научно-практическая конференция "Материаловедение,
формообразующие технологии и оборудование 2022" (ICMSSTE 2022).
16-19.05.2022 г. Ялта, Россия

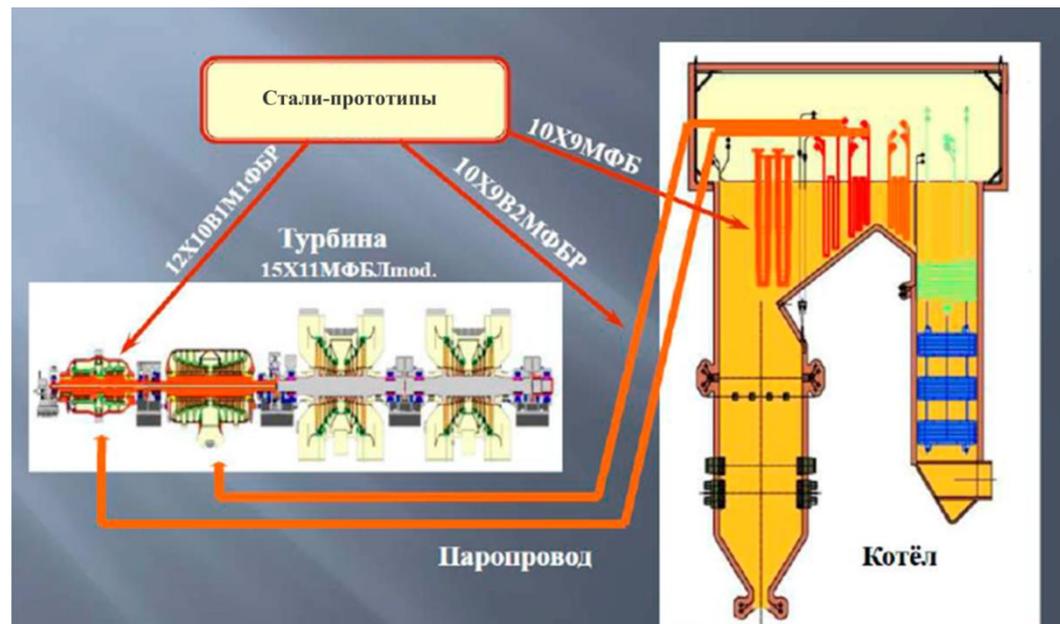


БелГУ
BELGOROD STATE
UNIVERSITY (BSU)

Актуальность

Новые Cr-содержащие 9-10% Cr стали мартенситного класса – перспективный материал для элементов котлов и паропроводов

- Новое поколение энергоблоков способно работать при ССКП пара (T=600-620°C, P=28-30 МПа, КПД до 40-45%).



Недостатки сталей-прототипов:

! Новые стали должны обеспечить:

- Неспособность работать при T > 600°C

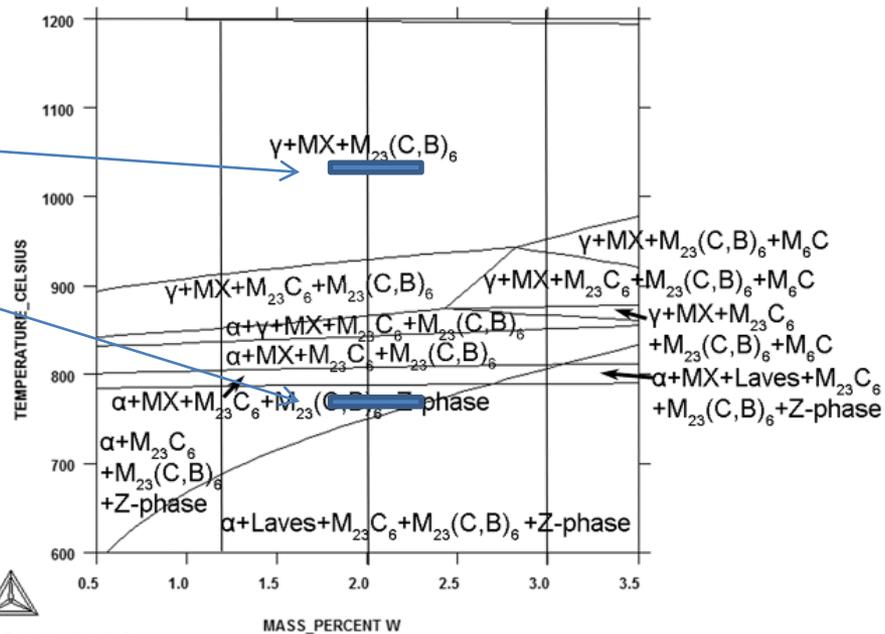
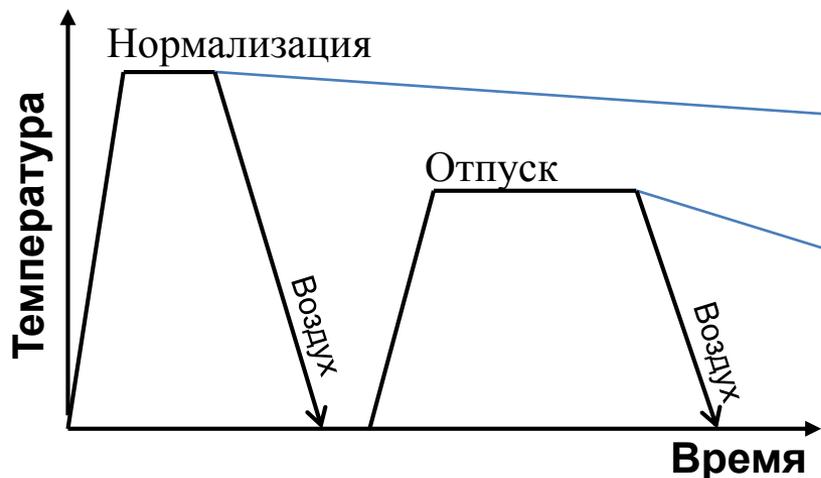
- Работоспособность выше 630°C

- Время эксплуатации << 100,000 час

- Предел ползучести более 80 МПа при 650 °C

Основным препятствием для повышения температуры эксплуатации оборудования является **высокотемпературная ползучесть жаропрочных мартенситных 9-12% Cr сталей**

Схематическая структура высокохромистых сталей

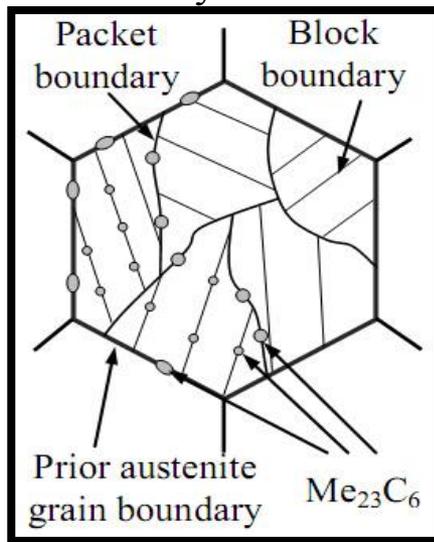


➤ **Цель настоящего исследования** – определить причины снижения сопротивления ползучести изучаемых сталей при температуре 650°C.

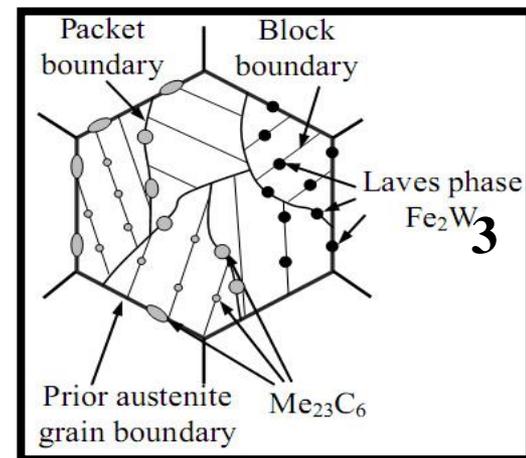
➤ **Задачи:**

- исходное состояние;
- испытания на ползучесть;
- микроструктурные исследования после ползучести.

После отпуска



После ползучести



Материалы и методики

➤ МАТЕРИАЛ

Плавка	Fe	C	Cr	Co	Mo	W	Cu	V	Nb	B	N	Si	Mn	Ni	Re
10%Cr-2W-0.8Cu-Re	bal.	0.09	9.7	3.3	0.6	2.1	0.80	0.2	0.05	0.015	0.002	0.11	0.03	0.23	0.2
10%Cr-3W-0.2Cu-Re	bal.	0.11	9.9	3.2	0.1	2.9	0.22	0.2	0.07	0.008	0.002	0.03	0.1	0.17	0.2

➤ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

(I) Нормализация с 1050°C, 1 ч, охлаждение на воздухе

(II) Отпуск при 770°C, 3 ч, охлаждение на воздухе

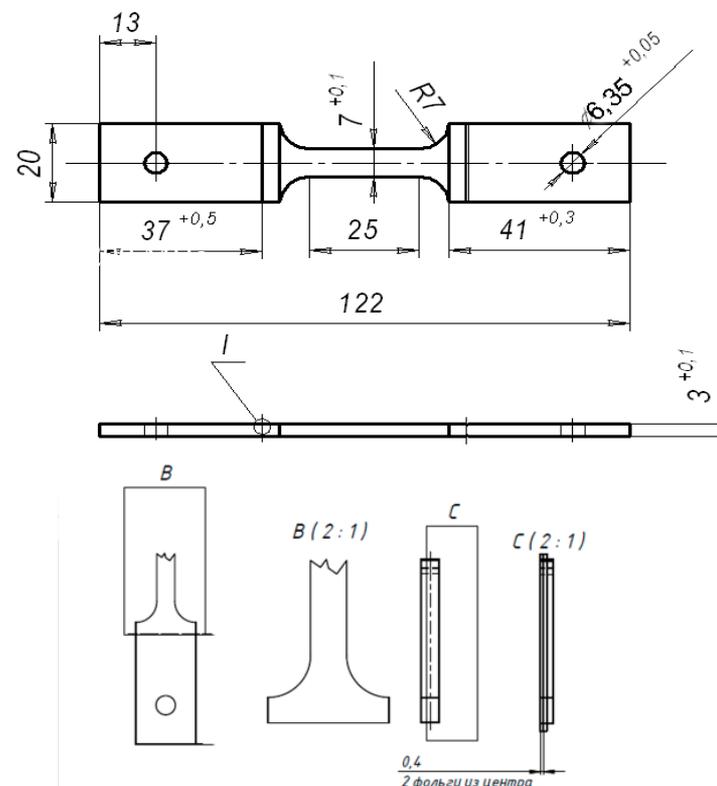
➤ ИСПЫТАНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Условия ползучести: T=650°C, приложенные напряжения от 100 до 200 МПа с шагом 20 МПа

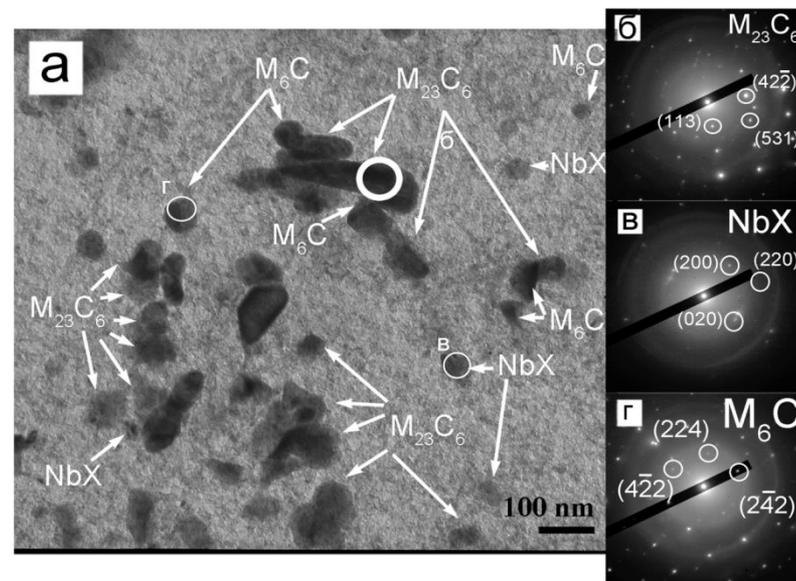
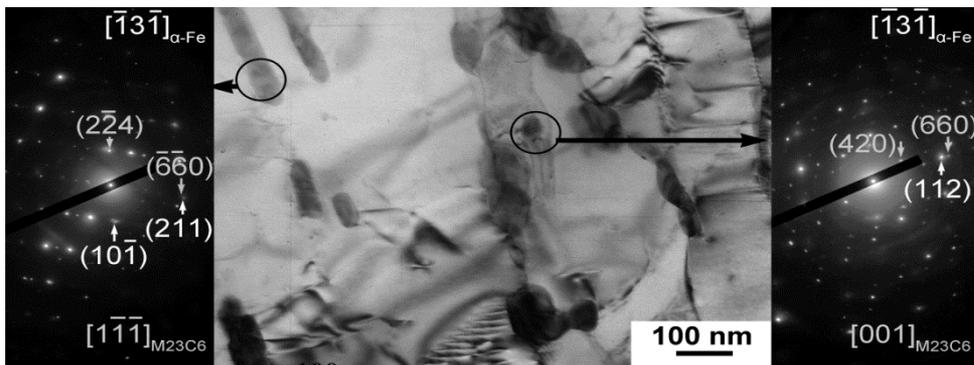
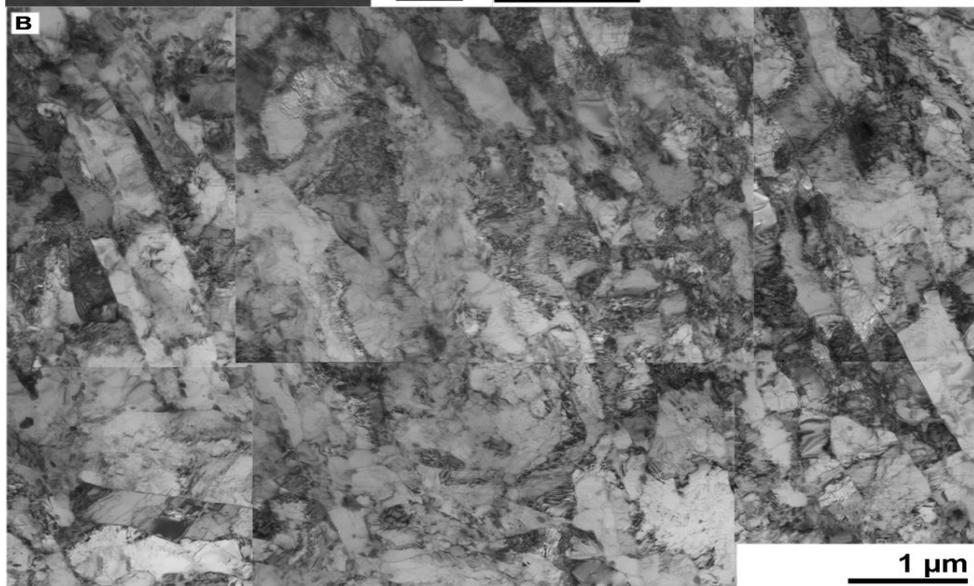
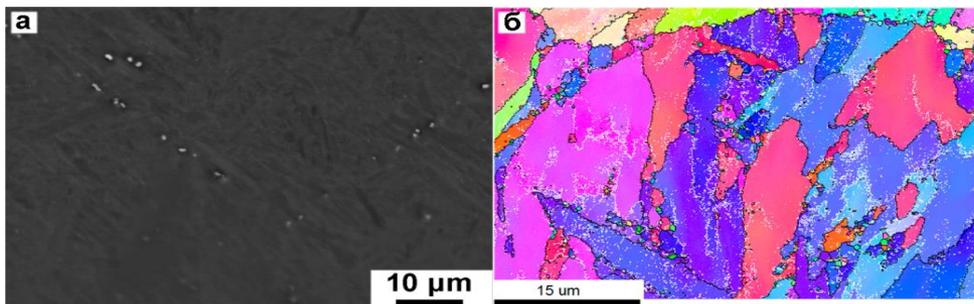
➤ ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ И СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСКОПИИ

Микроскоп JEM JEOL-2100 (ПЭМ), оснащенный энергодисперсионной приставкой INCA

Микроскопы Nova NanoSEM и Quanta 600FEG (СЭМ)

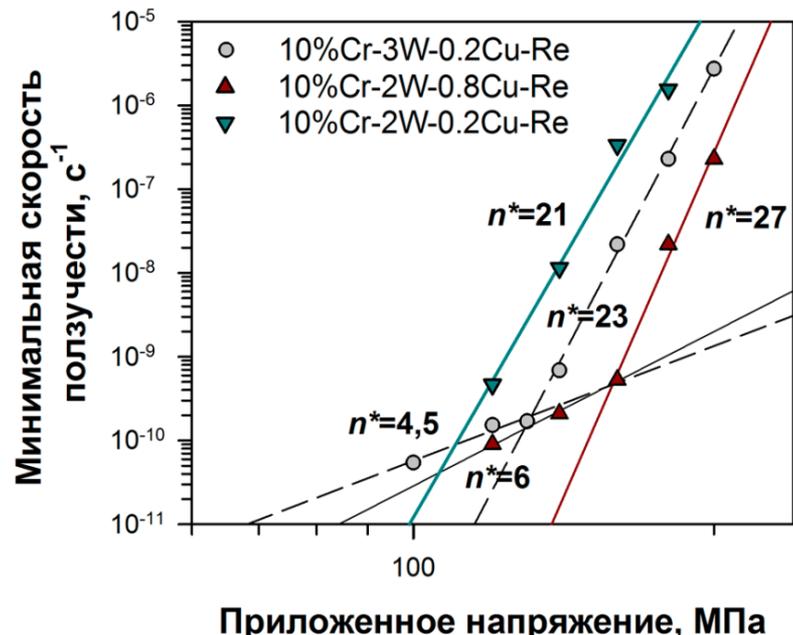
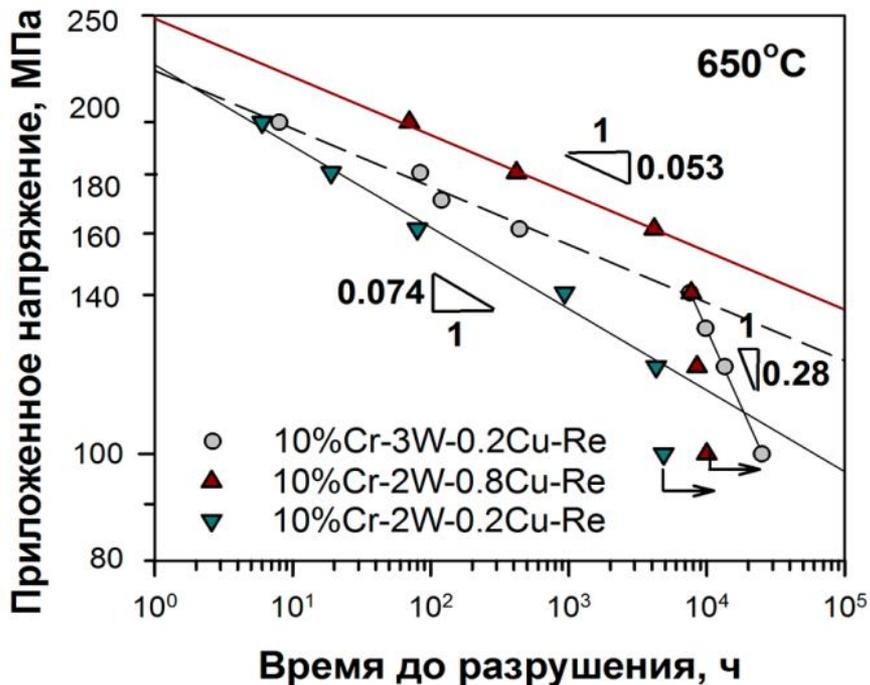


Структура после термической обработки



Параметры структуры	10%Cr-2W-0.8Cu-Re	10%Cr-3W-0.2Cu-Re
Размер ИАЗ, μм	62±5	55±5
Размер реек, нм	370±30	293±30
Плотность дислокаций, м ⁻²	1.3×10 ¹⁴	2.0×10 ¹⁴
Расстояние между ВУГ, мкм	2,06	2,53
Размер M ₂₃ C ₆ , нм	72±7	67±7
Доля M ₂₃ C ₆ , %	1.56	1.98
Размер МХ, нм	36±3	37±3
Доля МХ, %	0.056	0.078

Поведение сталей при ползучести



! Существенный прирост во времени до разрушения и снижении минимальной скорости ползучести выявлено при высоких приложенных напряжениях 200-160 МПа.

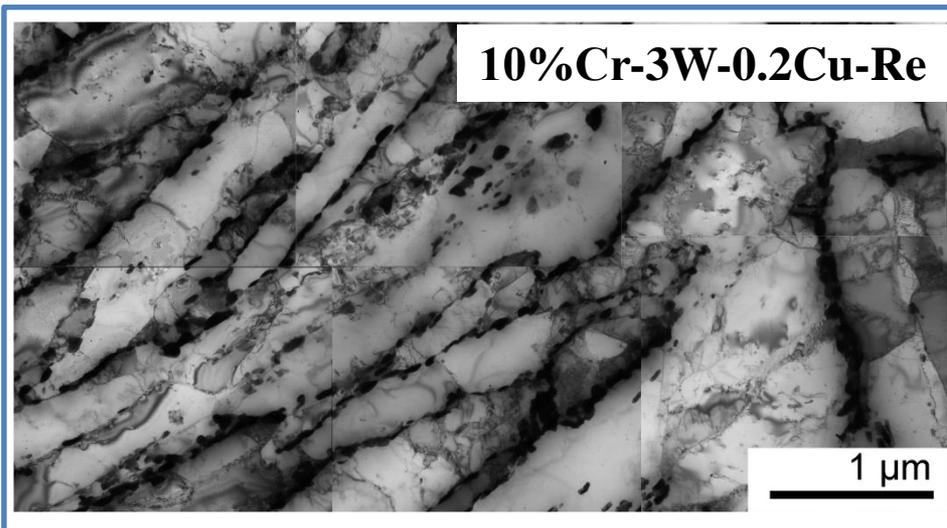
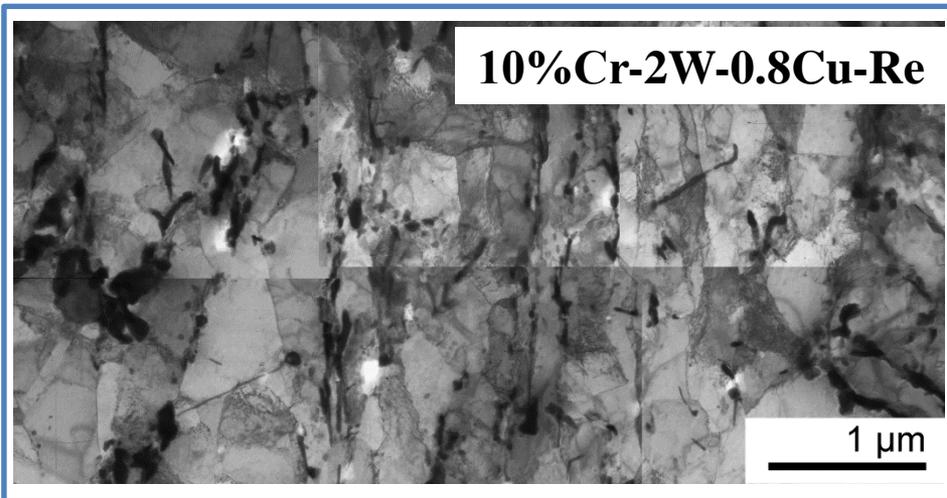
! Сталь с высоким содержанием меди демонстрирует перелом на кривой длительной прочности.

! При приложенных напряжениях ниже 140 МПа время до разрушения и минимальная скорость деформации близки для обеих сталей.

$$\dot{\epsilon}_{\min} = A \times \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

где $\dot{\epsilon}_{\min}$ - минимальная скорость ползучести,
 σ – приложенное напряжение,
 Q – энергия активации ползучести на установившейся стадии,
 R – газовая постоянная,
 T – абсолютная температура,
 A – константа,
 n^* - «кажущаяся» экспонента напряжения.

Структура после ползучести в условиях 650°C/160 МПа

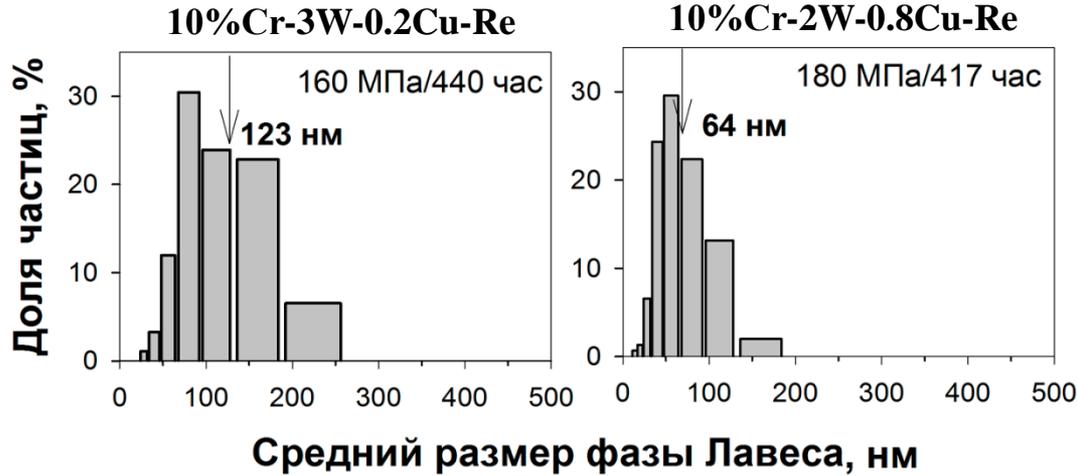


Параметры структуры	10%Cr-2W-0.8Cu-Re	10%Cr-3W-0.2Cu-Re
Размер ИАЗ, мкм	62±5	55±5
Размер реек, нм	520±30	570±30
Расстояние между ВУГ, мкм	2.27	2.55
Плотность дислокаций, м ⁻²	1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁴
Размер M ₂₃ C ₆ , нм	105±10	81±10
Масс. доля M ₂₃ C ₆ *, %	2.29	2.30
Размер NbX, нм	45±5	50±5
Масс. доля NbX*, %	0.075	0.067
Размер ф.Лавеса, нм	158±10	123±10
Масс. доля ф.Лавеса*, %	2.07	2.92
Размер «Cu» частиц, нм	97±10	-

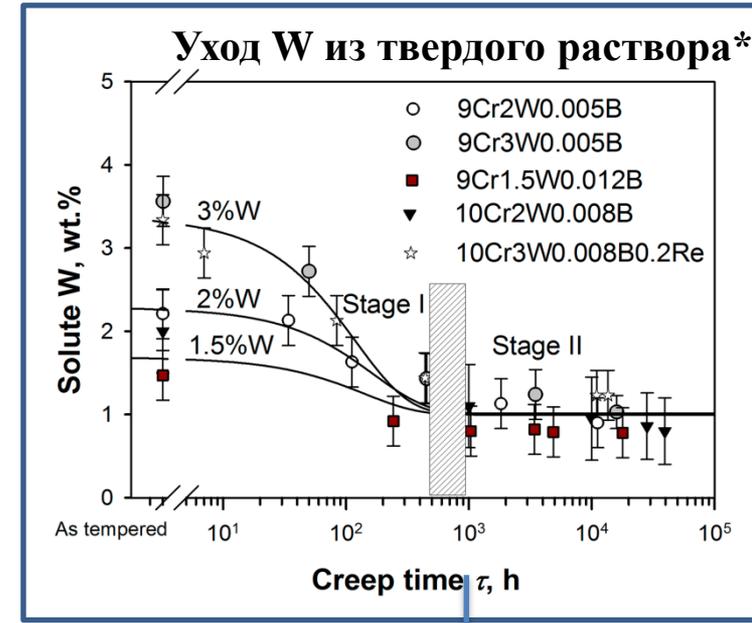
*рассчитано в программе Thermo-Calc

! Прирост во времени до разрушения в 10 раз для 10%Cr-2W-0.8Cu-Re обусловлен меньшей скоростью роста мартенситных реек и зернограничных частиц.

Влияние меди на выделение и рост частиц фазы Лавеса



! Добавление меди снижает средний размер частиц перед началом укрупнения в 2 раза



Стадия I

Стадия II

10%Cr-3W -0.2Cu-Re 200 МПа(8 ч)
180 МПа (83 ч)
160 МПа (440 ч)

140 МПа и ниже
(≥7000 час)

10%Cr-2W -0.8Cu-Re 200 МПа(70 ч)
180 МПа (417 ч)

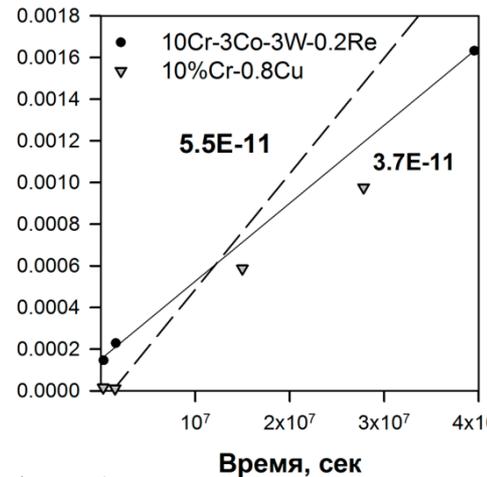
160 МПа и ниже
(≥4000 час)

! Добавление меди увеличивает скорость укрупнения частиц в 1,5 раза

Скорость укрупнения

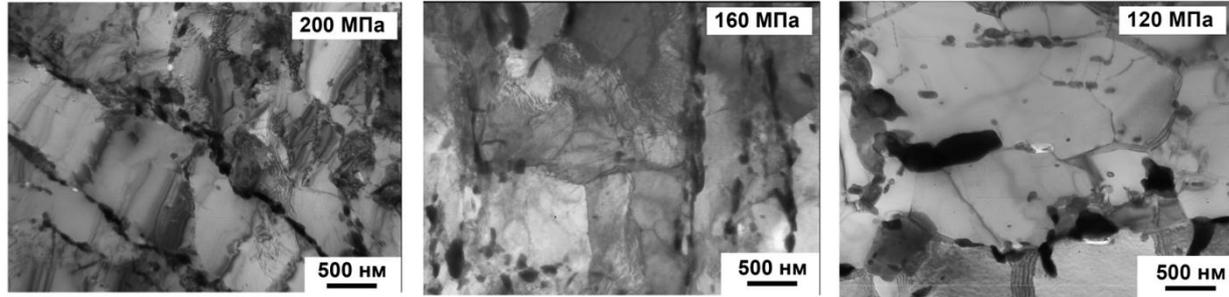
$$d^n - d_0^n = K_p(t - t_0)$$

Размер фазы Лавеса,
 $d^4 - d_0^4$, мкм⁴



где d – размер частиц за время τ ,
 d_0 – исходный размер частиц,
 K_p – постоянная скорости роста,
 τ - время, $n = 4$ (зернограничная диффузия).

Эволюция структуры и частиц вторичных фаз в процессе ползучести

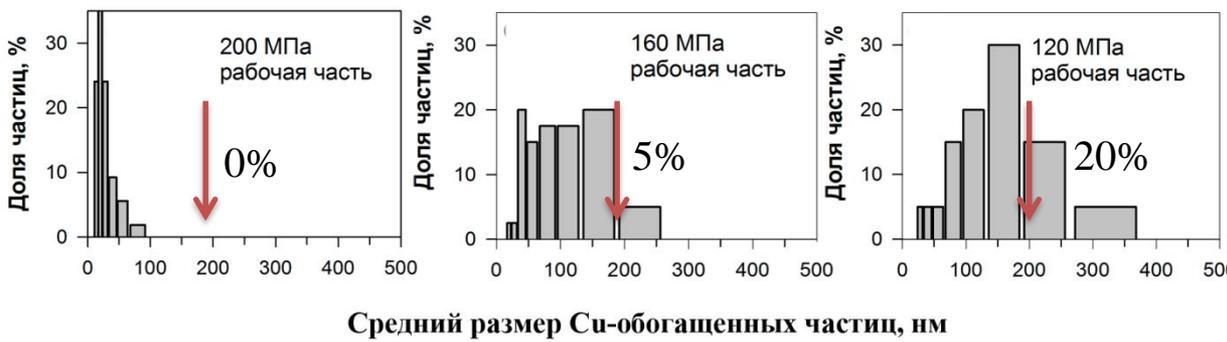
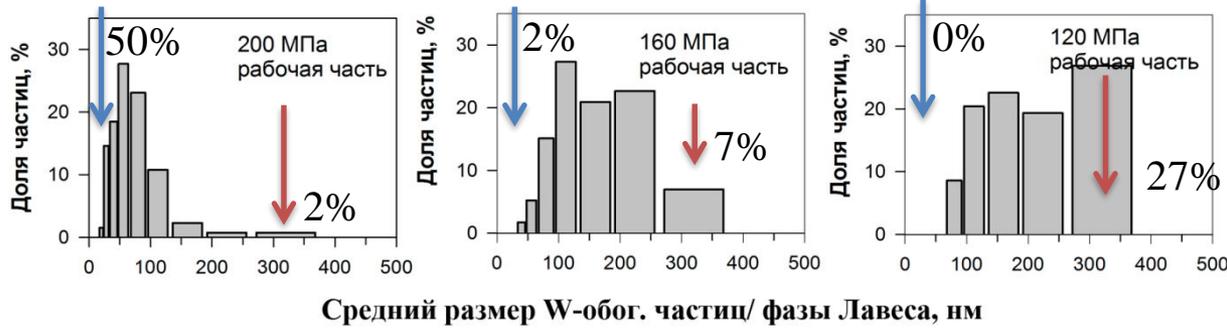


Основные изменения в стали 10%Cr-2W-0.8Cu-Re при низких приложенных напряжениях:

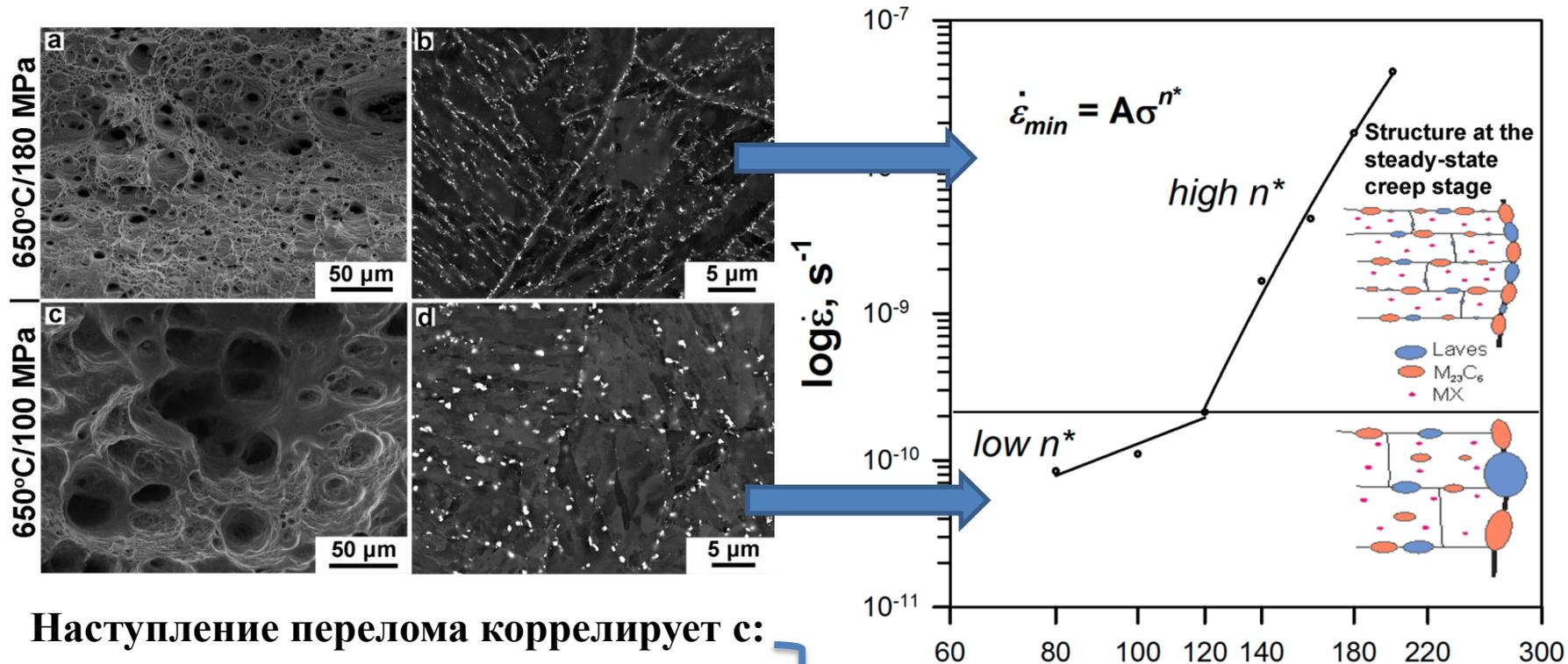
- существенное увеличение размеров рек до 1 мкм с одновременным снижением плотности дислокаций на порядок, образование крупных субзерен;

- укрупнение частиц фазы Лавеса с появлением высокой доли крупных частиц с размерами более 250 нм по ВУГ и практически полным растворением мелких частиц с размерами менее 50 нм по МУГ;

- укрупнение Cu-обогащенных частиц с появлением значительной доли крупных частиц более 200 нм.



Влияние роста фазы Лавеса на снижение сопротивления ползучести



Наступление перелома коррелирует с:

- растворением частиц фазы Лавеса по МУГ даже при сохранении мелкого размера карбидов $M_{23}C_6$
- появлением очень крупных частиц с размерами более 500 нм вдоль ВУГ

Трансформация речной структуры в субзеренную структуру

Краткие выводы

1. Существенное увеличение размеров реек, образование крупных субзерен и снижение плотности дислокаций для новой 10%Cr-0.8Cu стали в области равномерной деформации наблюдается при приложенных напряжениях ниже 160 МПа, что коррелирует с появлением перелома на кривой длительной прочности. Для 10%Cr-0.2Cu стали структура остается практически неизменной при всех приложенных напряжениях.
2. Добавление меди в состав стали приводит к снижению среднего размера частиц фазы Лавеса в 2 раза перед началом укрупнения этой фазы, однако увеличивает скорость укрупнения этих частиц в 1,5 раза в процессе ползучести.
3. Существенное укрупнение частиц фазы Лавеса с появлением высокой доли крупных частиц с размерами более 250 нм и практически полным растворением мелких частиц с размерами менее 50 нм совместно со значительным укрупнением Си-обогащенных частиц даже при сохранении карбидов $M_{23}C_6$ относительно мелкого размера вызывает рост субзерен до размеров около 1 мкм, что, в свою очередь, определяет появление перелома на кривой длительной прочности.

Спасибо за внимание!