

Разработка сталей ферритного класса для оболочек твэлов ядерных реакторов

**Б. А. Тарасов, И.И. Коновалов, М.Д. Савельев, М.С. Тарасова,
Д.П. Шорников, Н.С. Никитин**

АО «ВНИИНМ», НИЯУ МИФИ

XI Конференция по реакторному материаловедению

2019 г.

г. Димитровград



**XI КОНФЕРЕНЦИЯ ПО РЕАКТОРНОМУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ**

27–31 мая 2019 г.

Анализ условий работы твэлов ВВЭР с оксидным и БР с нитридным топливом показывает общие черты НДС оболочки твэла:

- ❖ «Несжимаемость» топлива на стадии FСMI → оболочка следует за распухающим топливом с порядком скорости деформации $\sim 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
- ❖ Газовыделение из топлива на конец кампании ($\sim 10 \text{ ат.}\%$) не превышает (15-25)% от образовавшихся ГПД

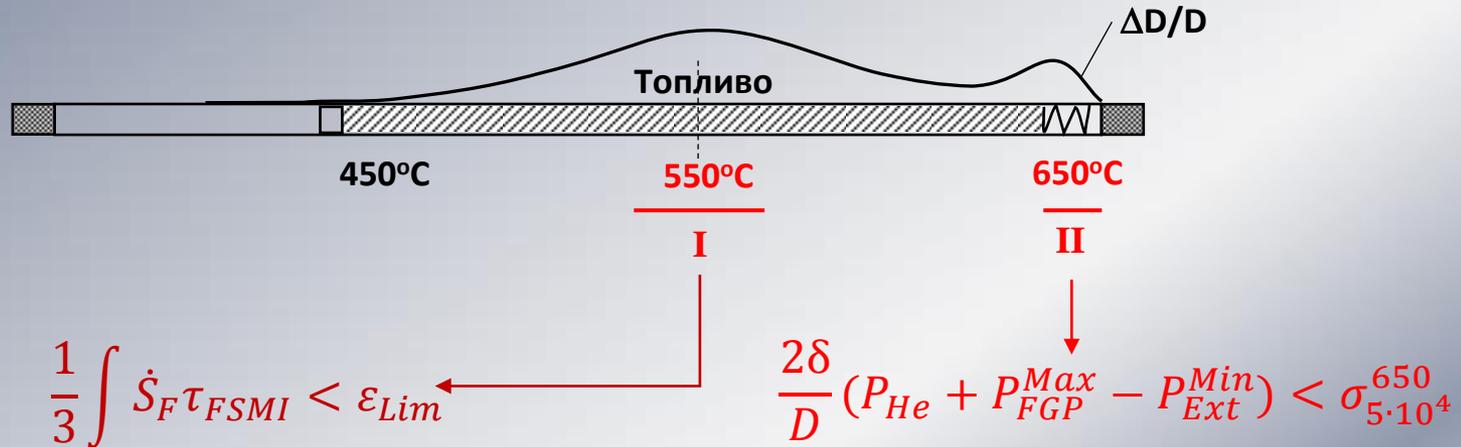
Разработка материала оболочки имеет двойное направление: «толерантное» топливо для ВВЭР и нитридный твэл БР типа «БРЕСТ» (соответственно выгорание 6 ат.% и 14 ат% соответственно)

Для обеспечения работоспособности твэла при сверхглубоких выгораниях требуется:

- Обеспечение длительной прочности в верхней горячей части топлива (давление ГПД) и обеспечение деформации ползучести в середине твэла (максимальная скорость распухания топлива)
- Коррозионная стойкость в теплоносителе
- Структурно-фазовая стабильность в напряженном состоянии при перегревах

Конкретизация требований к оболочке твэла БР с нитридным топливом приведена на следующем слайде

Критерии работоспособности нитридных твэлов БР – требования к свойствам оболочки



Для твэла $D \sim 10$ мм и толщине оболочки $\delta \sim 0,5$ мм, R -зазор топливо/оболочка $\sim 0,15$ мм
(6 - летняя кампания, $q_l^{Max} \sim 48$ кВт/м, $B^{Max} \sim 14$ ат.%)

- Предельная деформация ползучести оболочки $\varepsilon_{Lim} > 5\%$
- Оптимальное распухание оболочки на конец кампании $S = (5 - 6)\%$
- Длительная прочность оболочки $\sigma_{5 \cdot 10^4}^{650^\circ} > 20$ МПа
- Максимальное коррозионное повреждение оболочки с обеих сторон, в сумме < 100 мкм
- Структурно-фазовая стабильность оболочки при перегревах в напряженном состоянии до $\sim 720^\circ\text{C}$

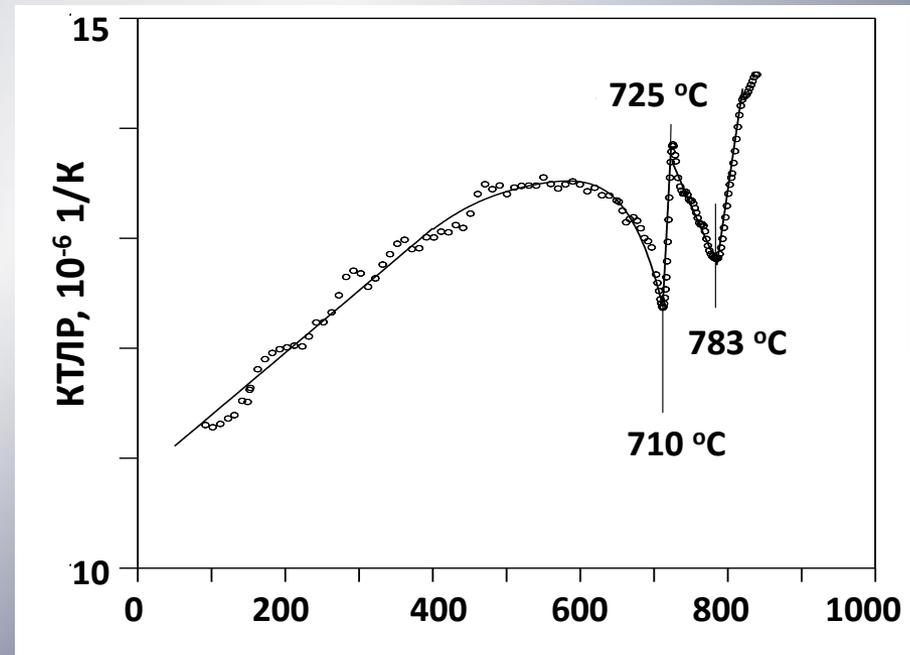
Недостатки известных материалов оболочки для БР «БРЕСТ»

Сталь	Предельная деформация ползучести	Согласование распухания топливо/обол.	Длительная прочность	Коррозия в Рb	Стабильность СФС
АНС	ДА	НЕТ	ДА	НЕТ	ДА
ФМС	ДА	НЕТ	ДА	ДА	НЕТ

Недостатки

АНС – распухание больше, чем у СНУП топлива
– присутствие Ni → низкая стойкость в Рb

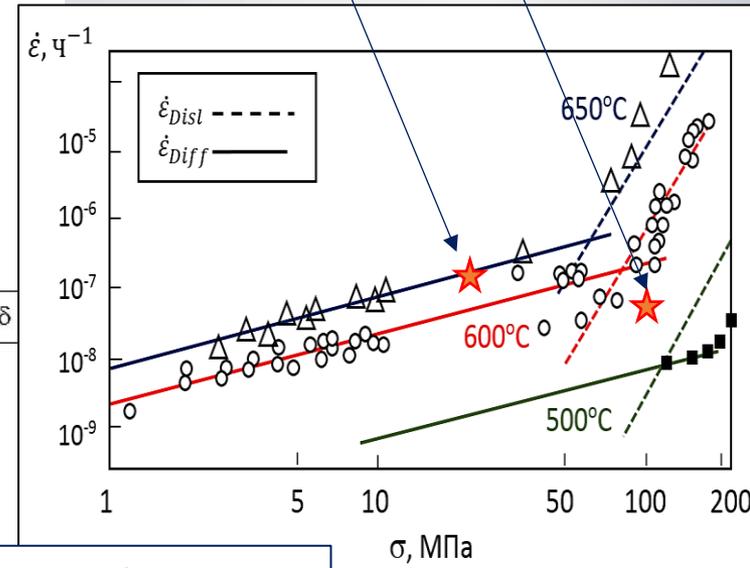
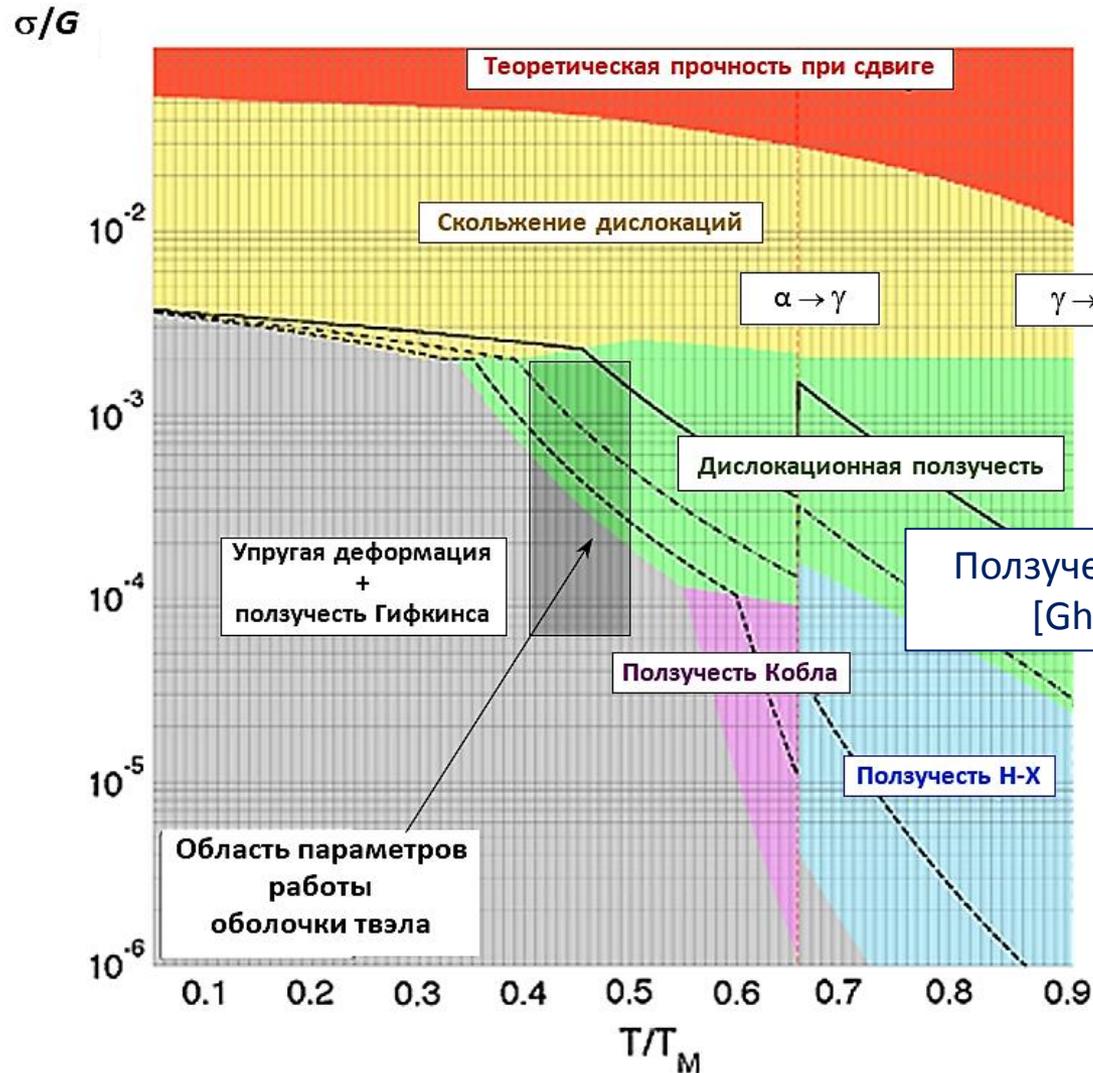
ФМС – распухание ниже, чем у СНУП топлива
– СФС нестабильность (переход в структурную и фазовую «сверхпластичность»)



Нестабильность СФС ЭП-823
[МИФИ 2014]

Стальная оболочка твэла БР в течение всей кампании будет находиться в условиях диффузионной ползучести:

элементы дислокационной ползучести – середина твэла (~100 МПа, 550 °С)
 диффузионная ползучесть – верх твэла (~ 20 МПа, 650 °С)



Ползучесть 12%Cr-стали [Ghoniem 2013]

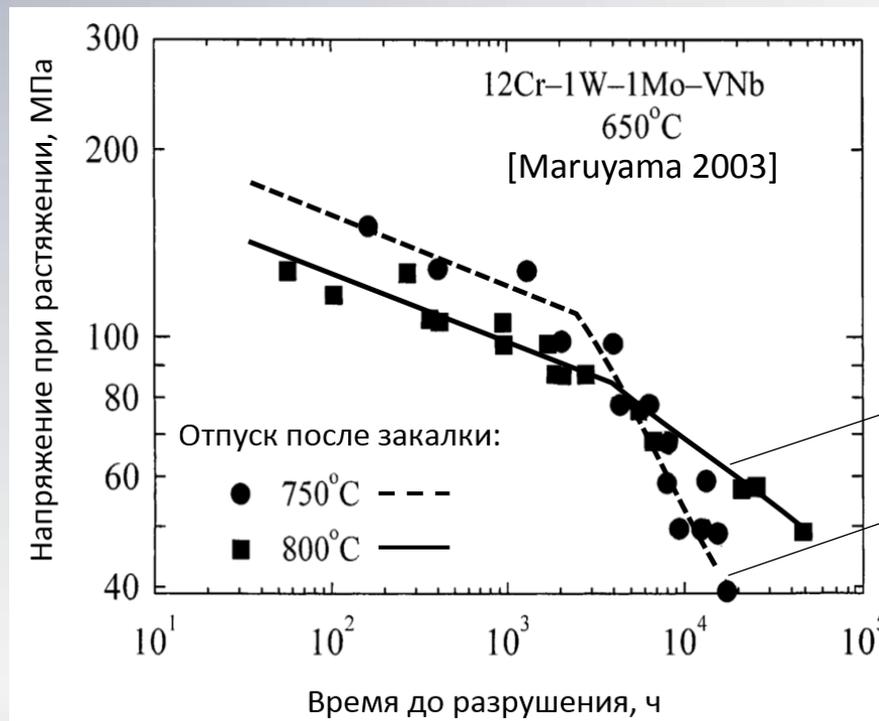
В общем виде ползучесть оболочки твэла БР определяется:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{Distl} + \dot{\epsilon}_{Diff}$$

При огрублении структуры сопротивление диффузионной ползучести (жаропрочность) возрастает, а «дислокационная» прочность падает

Очевидный факт - наилучшим сопротивлением диффузионной ползучести обладают однофазные твердые растворы с крупным зерном

Пример: Влияние СФС на длительную прочность ФМ-стали



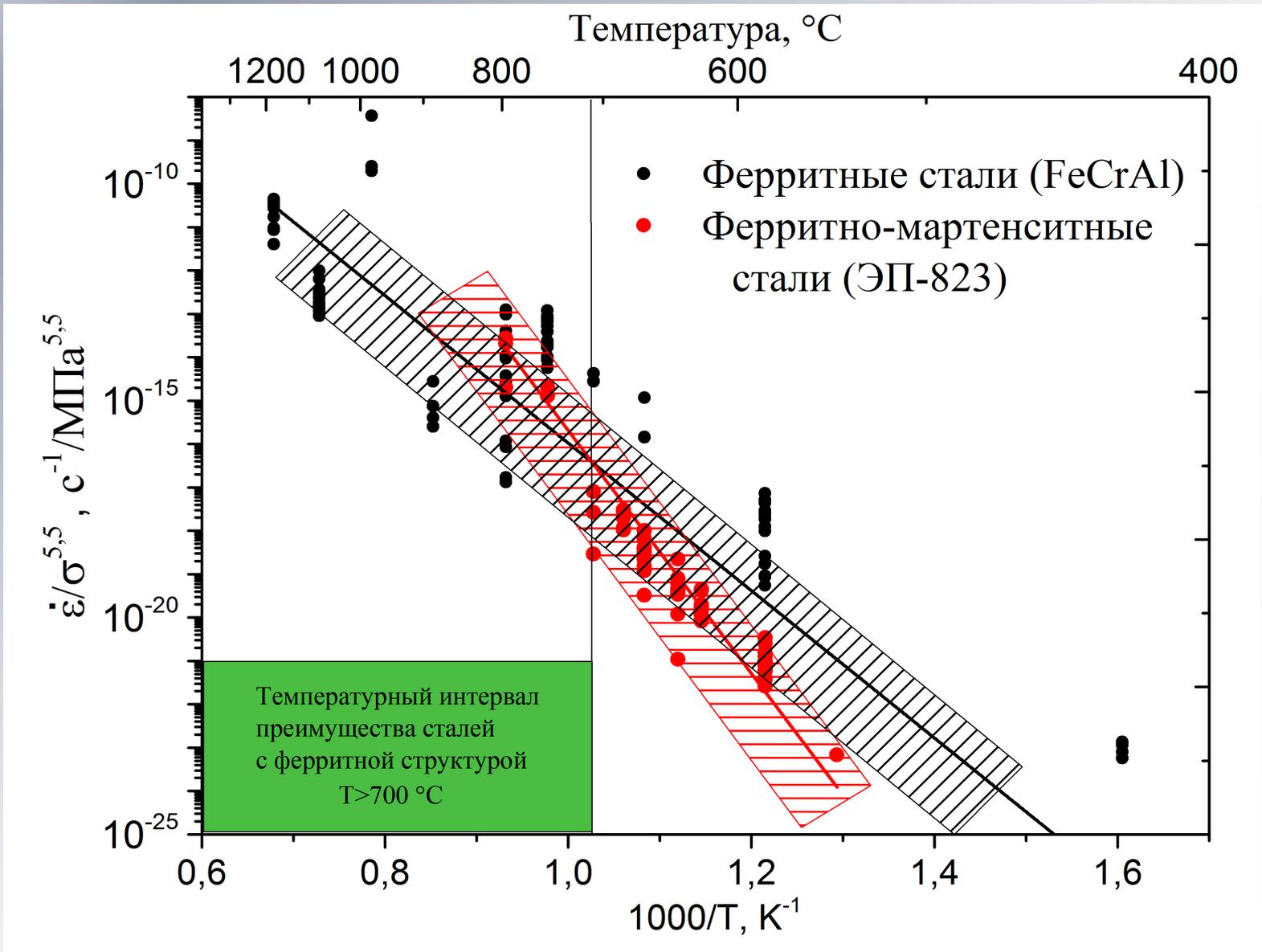
Перлит-Сорбит
(1-2) мкм

Отпущенный
мартенсит ~ 0,4 мкм

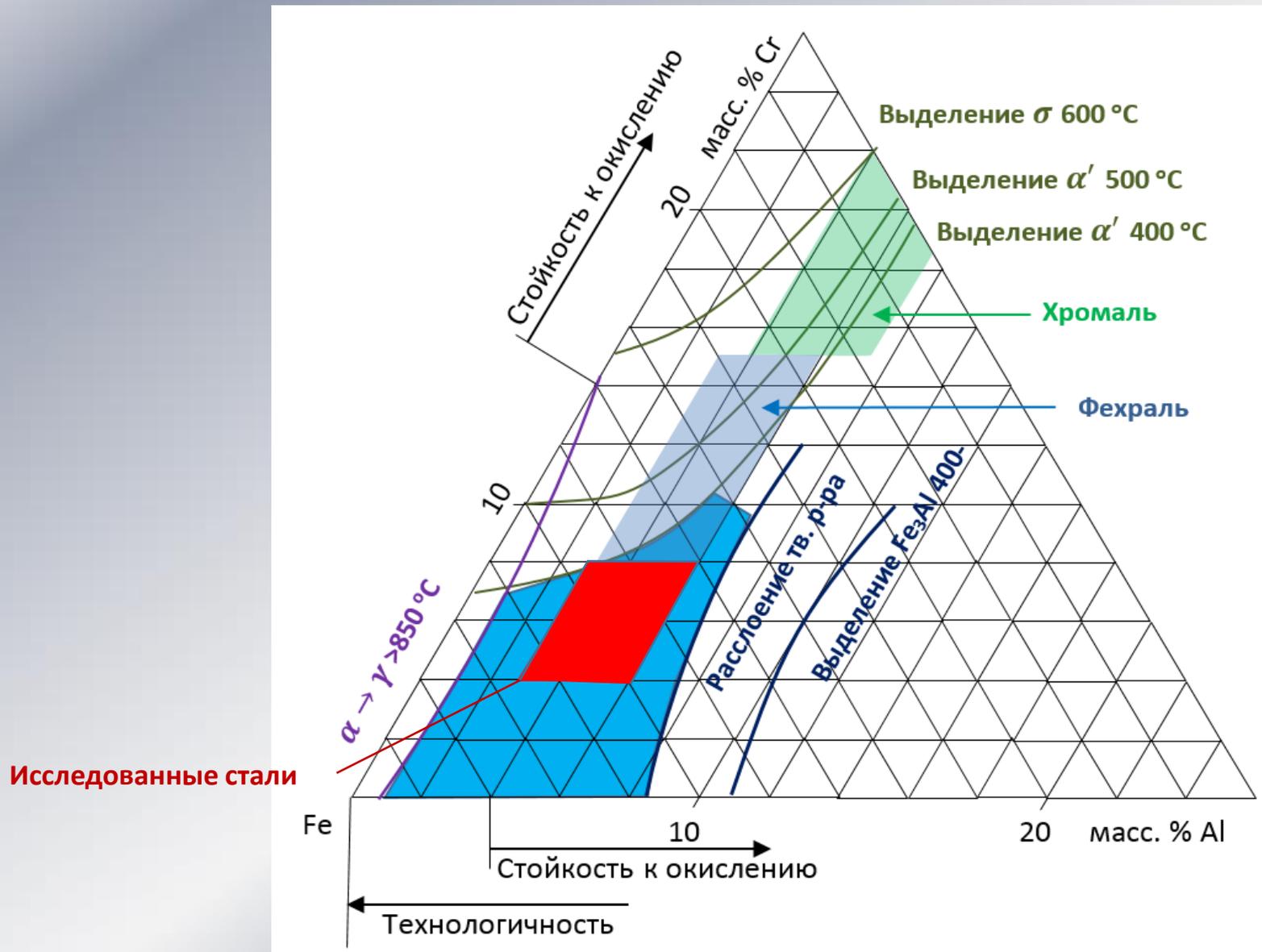
Поиск кандидатных составов проводился в однофазной области:

- ❖ Максимальная деформация ползучести и лучшая длительная прочность
- ❖ Наилучшая коррозионная стойкость
- ❖ Отсутствие структурной и фазовой «сверхпластичности»

Сравнение скорости ползучести ферритных и ферритно-мартенситных сталей



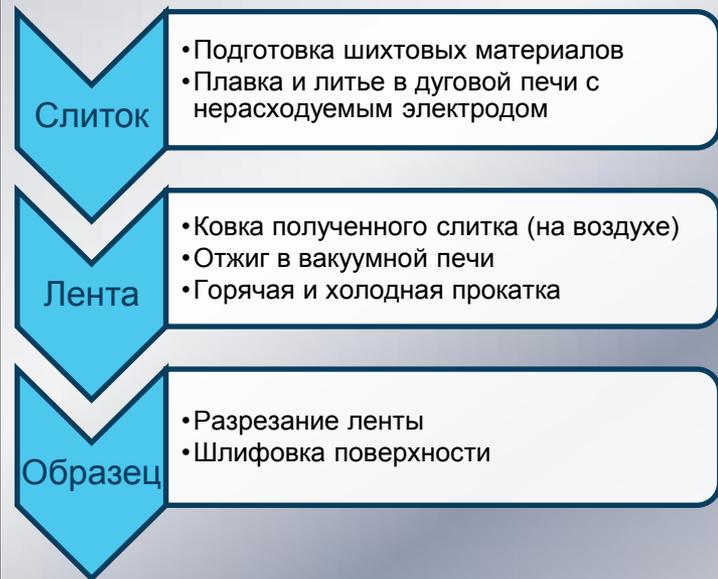
Область исследования ферритных сталей (Fe-Cr-Al-Si)



Модельные сплавы Fe-Cr-Al-Si

Cr, %	Al, %	Si, %	Прокатанные (80% х.д.)			Отжиг 450°C, 1000 ч			Отжиг 650°C, 1000 ч		
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_{tot} , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_{tot} , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_{tot} , %
8	1	-	592	617	5,1	452	499	6,6	171	314	37,6
8	2	-	659	690	5,2	453	517	8,6	211	361	39,4
8	3	-	848	905	5,4	513	582	10,3	250	396	35,9
10	1	-	684	733	4,7	505	600	10,5	176	348	43,4
10	2	-	872	899	5,1	546	625	10,5	240	408	41,7
10	3	-	829	873	4,9	582	668	10,0	282	414	40,2
10	4	-	-	-	-	523	612	9,3	320	447	39,6
12	1	-	732	769	5,2	534	625	10,0	204	345	39,9
12	2	-	888	944	4,5	586	731	10,8	247	368	40,4
12	3	-	873	929	4,9	530	780	10,1	307	447	32,1
12	4	-	870	918	4,8	517	700	10,3	341	460	37,4
14	1	-	776	820	4,9	522	739	12,3	220	370	43,9
14	2	-	831	883	5,2	510	835	11,4	260	404	41,1
14	3	-	882	935	4,5	519	858	15,9	318	444	35,7
14	4	-	826	919	4,9	419	670	10,7	356	481	38,1
8	-	1	739	803	4,8	412	772	14,3	244	399	45,5
8	-	2	759	819	4,3	425	771	19,5	309	445	34,6
8	-	3	800	931	3,6	777	806	10,5	388	502	26,4
8	-	4	946	1000	4,3	849	897	10,8	474	589	25,1
10	-	1	690	741	4,6	630	670	11,9	236	385	35,9
10	-	2	746	935	4,7	734	796	13,0	334	461	32,1
12	-	3	703	853	4,7	707	778	11,0	255	392	40,2
14	-	1				849	905	10,1	411	525	24,7
14	-	2	856	901	4,5	724	787	10,7	328	454	31,7
14	-	3	824	1003	4,5	824	950	7,5	425	546	26,5
5	2	2	725	967	4,7	825	875	12,1	453	569	32,8
5	1	3	495	888	4,6	755	802	9,0	386	514	36,9
5	1	4	784,06	983,38	4,6	871	916	10,1	447	562	31,6

Изготовление модельных сплавов



Испытания в спокойном воздухе:

- время – 60 часов;
- температура – 800 °С.

Испытания в воде:

- время – 300 часов;
- температура – 350 °С;
- давление – 16 МПа.

Испытания в паре:

- время – 72 часа;
- температура – 400 °С;
- давление – 18 МПа.

Испытания в перегретом паре:

- время – 4 час;
- температура – 1100 °С;
- давление – 0,1 МПа.

Выбор сплавов: экспресс-тест – окисление на воздухе при 800, 60 ч (всего исследовано более 30 сплавов)

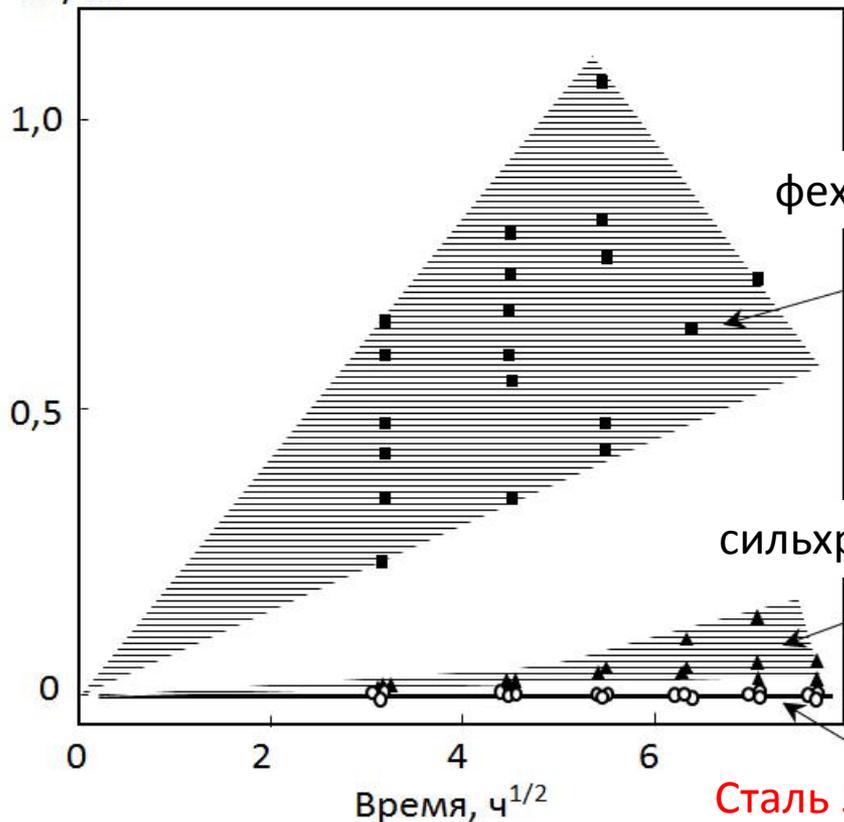


Подтверждена стойкость
фехралей

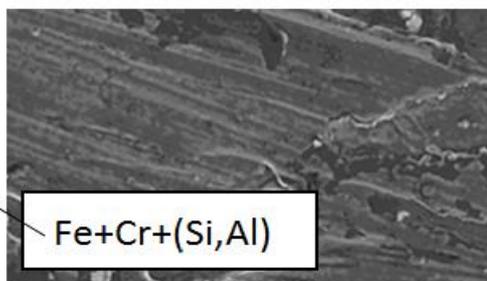
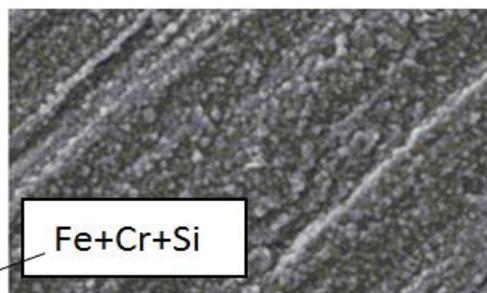
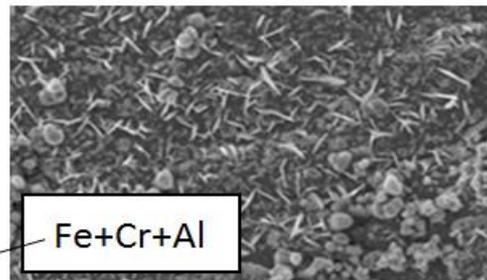
Определена однофазная
область
с высокой стойкостью:
т.н. Стали 5/5: Fe+5Cr+5(Al,Si)

Коррозия фехралей, сильхромов и стали 5/5 в воде и паре

Привес
мг/см²

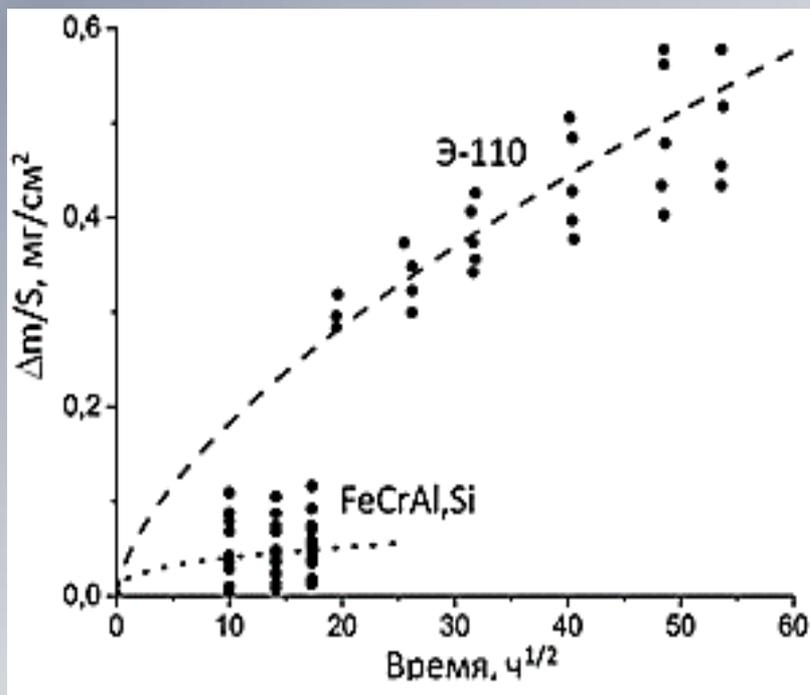


Морфология поверхности

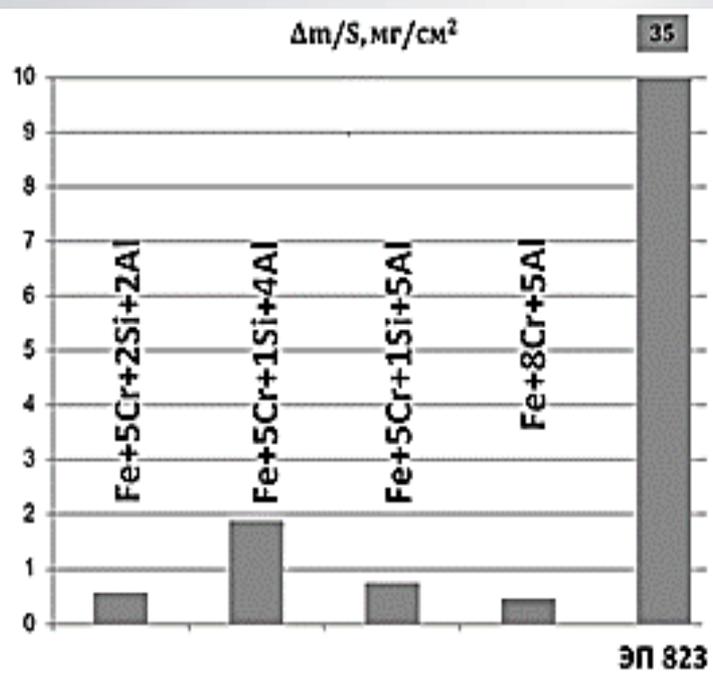


Коррозия сталей в паре 400 °С, 18 МПа

Коррозия в перегретой воде и паре



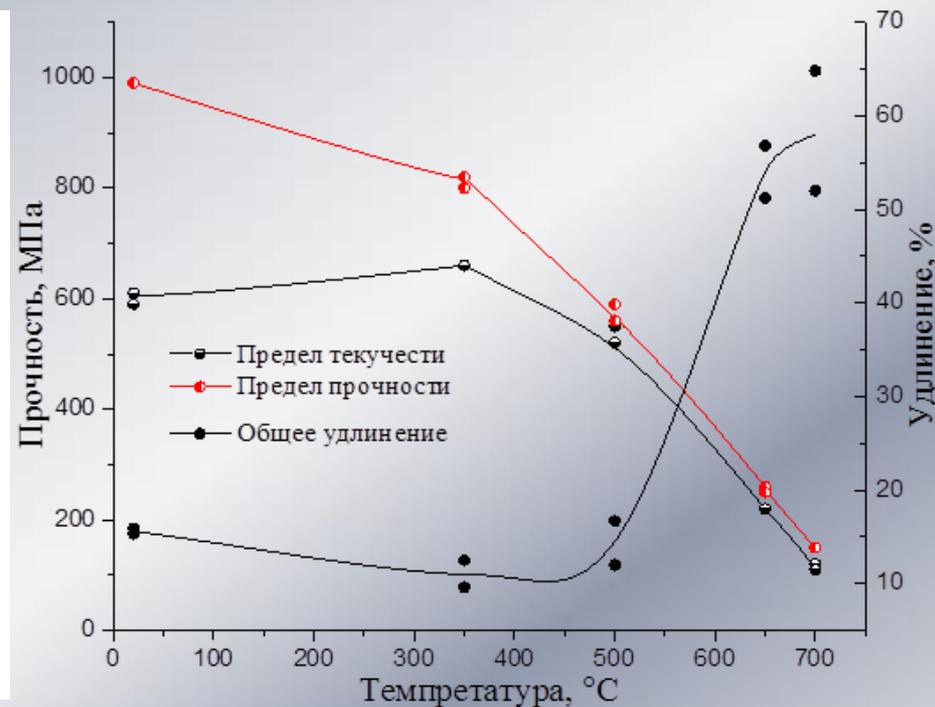
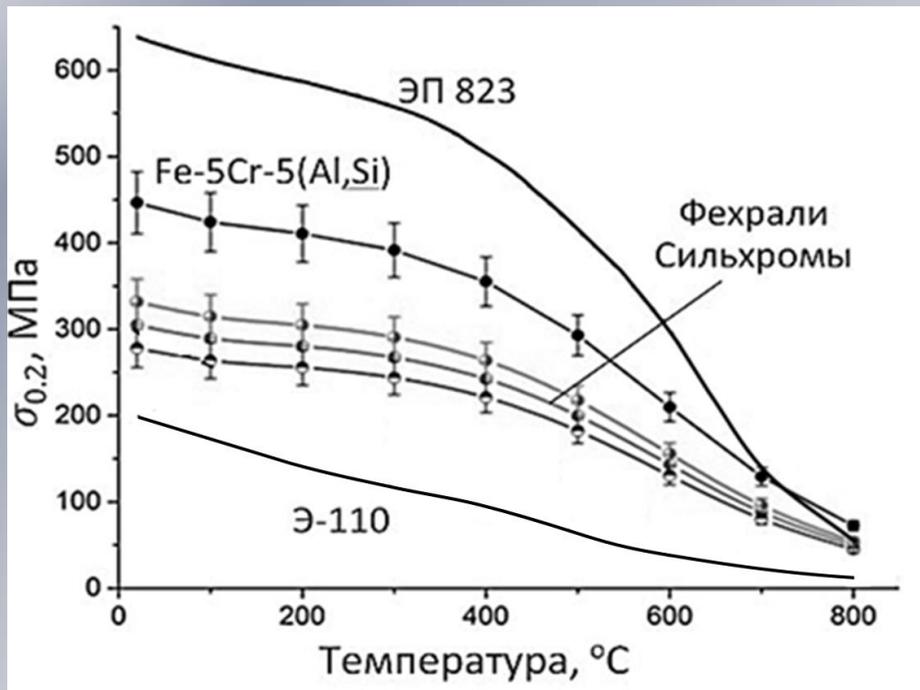
Вода 360 °C, 16 МПа



Пар 1100 °C, 0,1 МПа

Подтвержден факт, что однофазные стали обладают высокой коррозионной стойкостью

Механические свойства

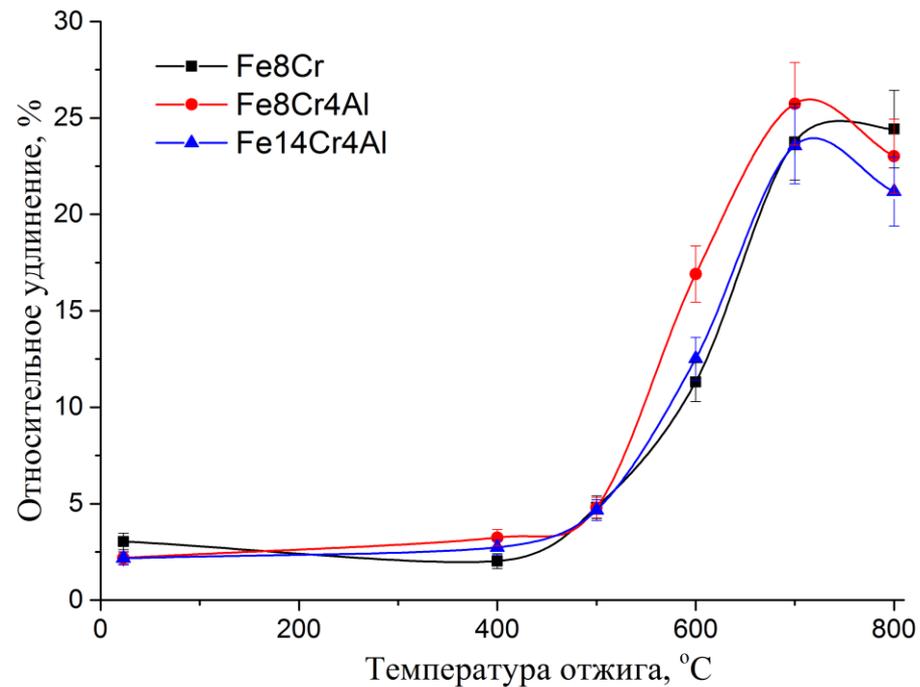
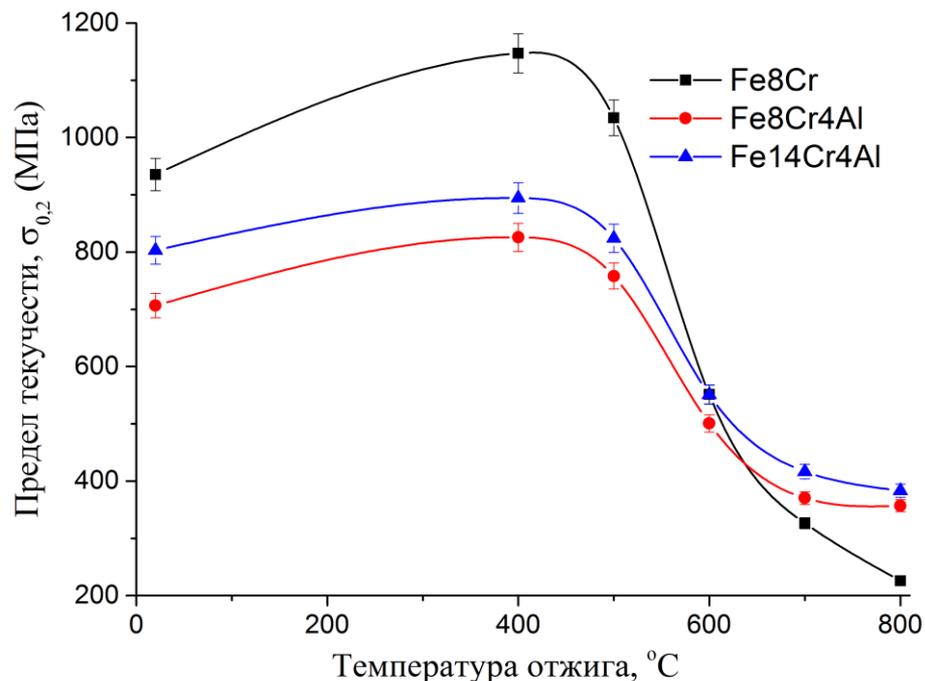


Сравнение пределов текучести

Применительно к ВВЭР, исходя из пределов текучести Э-110 и Стали 5/5, возможно снижение толщины оболочки до ~ 0,2 мм.

Повышение прочности (если требуется) возможно при дополнительном легировании.

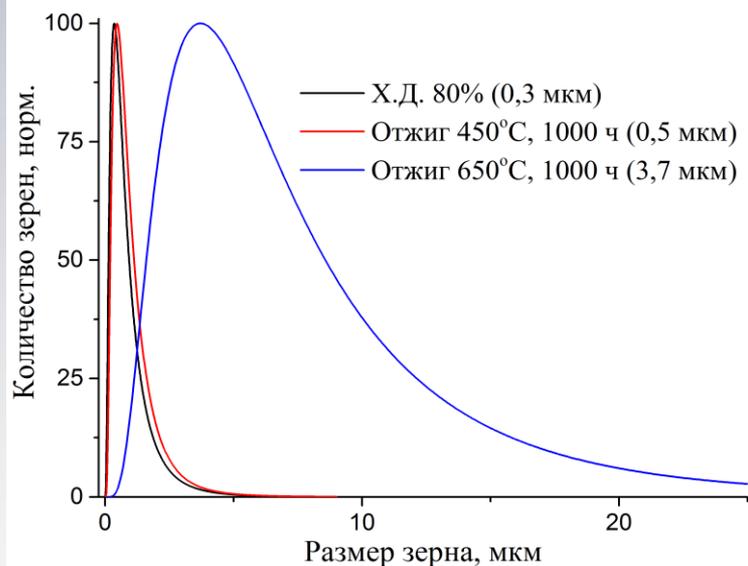
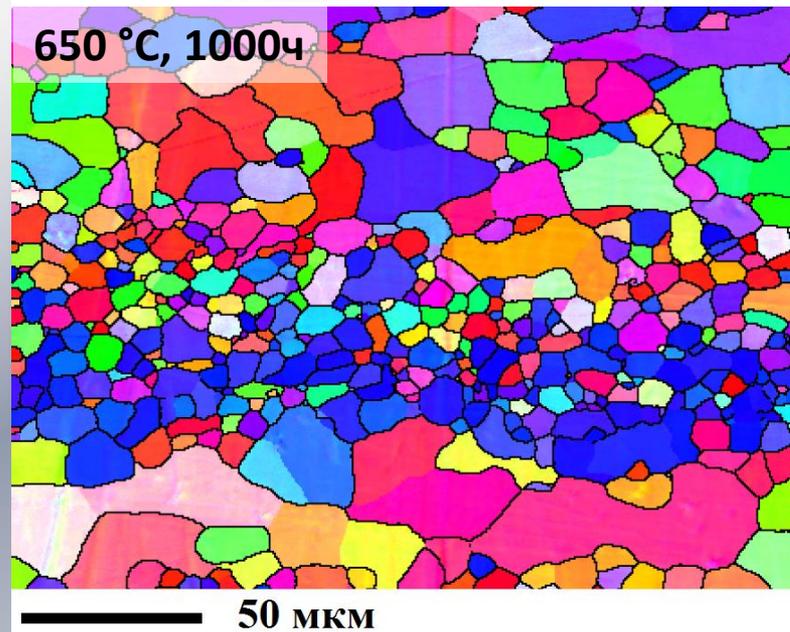
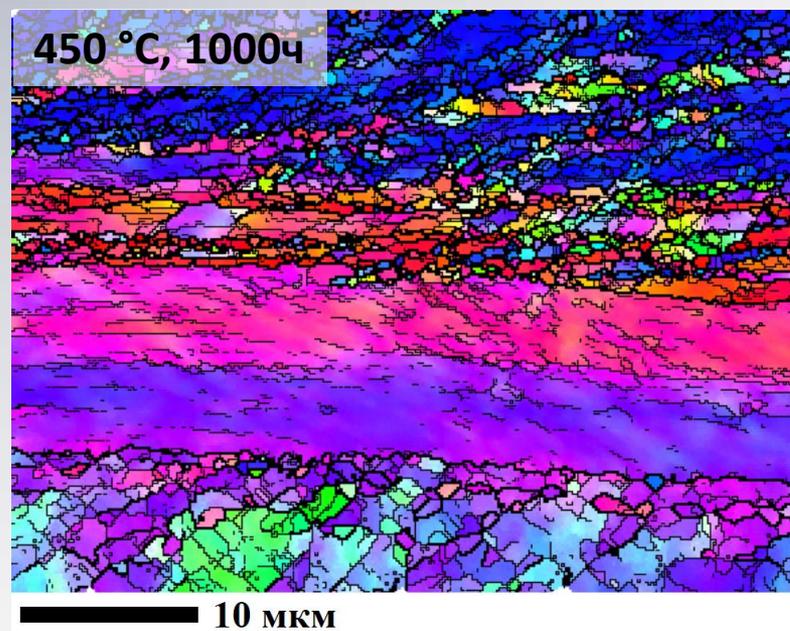
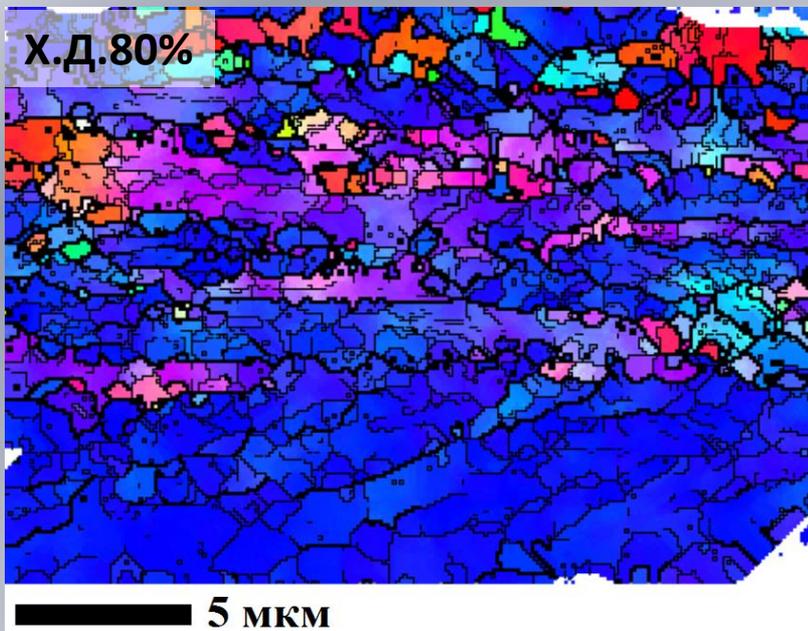
Термическая стабильность (рекристаллизация)



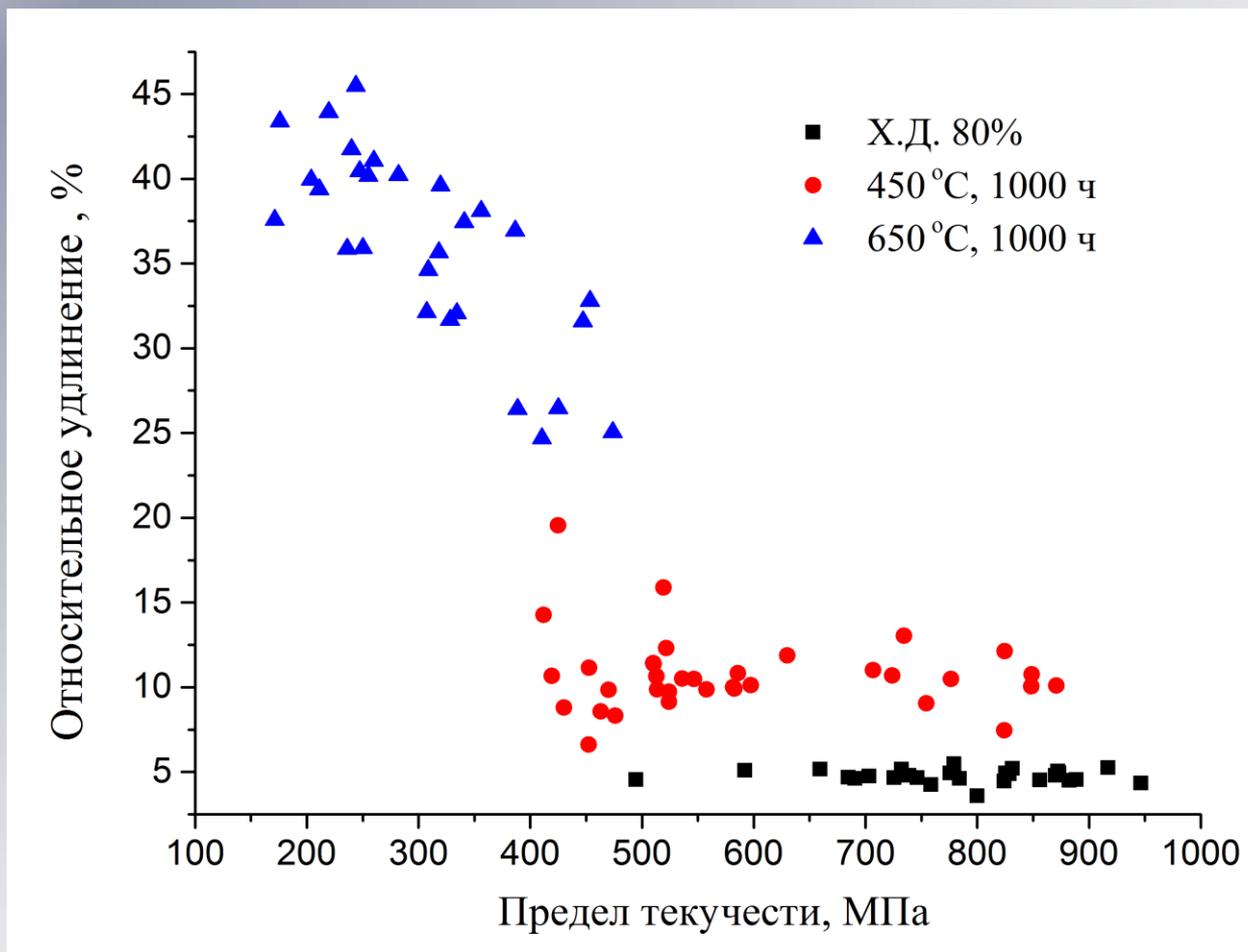
Исследование рекристаллизации:

- ❖ Исходное состояние – 80% Х.Д.
- ❖ Длительность отжига при каждой температуре 2 часа
- ❖ Температура начала вторичной рекристаллизации $>700^{\circ}\text{C}$

Термическая стабильность (рекристаллизация)



Термическая стабильность (пластичность)



Для всех исследованных составов не наблюдалось термического старения и охрупчивания!

Технологически-эксплуатационные свойства

Испытания на коррозионное растрескивание под напряжением. Насыщенный раствор $MgCl_2$, 413 К, 0,1 МПа >100 ч;

№ \ Время, обработка	300 ч., холоднодеформированные	300 ч., отожжённые
41/1		
41		
42		
43		

Проведены тесты на свариваемость (ручная аргоно-дуговая сварка пластин 50x50x1)
Полное удлинение сварных образцов ~3%.

Заключение

Обнаружен «островок» составов сталей $Fe + (4 \dots 6)\%Cr + (4 \dots 6)\%Al, Si$ однофазных в интервале от рабочей температуры до температуры плавления и сочетающих высокую стойкость к окислению (логарифмическая кинетика) с высоким уровнем механических свойств ($\sigma_{0.2} > 200$ МПа и $\delta = (30 - 40)\%$ при 650 °C).

Предложенные сплавы могут стать основой для разработки оболочечных материалов перспективных реакторов на быстрых нейтронах (типа БРЕСТ), а также реакторов на тепловых нейтронах (типа ВВЭР 3+ и СУПЕР-ВВЭР).

Завершена поисковая фаза исследований.

Показано отсутствие охрупчивания опытных сплавов при термическом старении, стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением в насыщенном растворе $MgCl_2$, а так же удовлетворительная свариваемость (удлинение сварных образцов $\sim 3\%$).