

РАЗРАБОТКА ЖАРОПРОЧНОЙ 12% ХРОМИСТОЙ СТАЛИ 16X12B2ФТaP НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С БЫСТРЫМ СПАДОМ НАВЕ- ДЕННОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ НУЖД АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

*А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, В.М. Чернов, В.В. Цвелев,
ФГУП ВНИИНМ, г. Москва; М.И. Солонин, Минатом России, г. Москва, Россия;
В.Н. Голованов, В.К. Шамардин, ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия*

Представляемая жаропрочная 12%-ая хромистая сталь типа 16X12B2ФТaP является материалом с быстрым спадом наведенной активности, что показано расчетом активационных характеристик для нейтронных спектров быстрых реакторов и проекта ДЕМО. Исследуемый состав стали отвечает обоснованным научно-техническим требованиям, сформулированным ранее в постановочных работах. Представлены результаты металлургического освоения стали. Рассмотрено ее структурное состояние, приводятся кратковременные механические свойства после стандартного режима термической обработки (нормализация и отпуск) до температуры испытания 700°C, а также результаты исследования длительной прочности и ползучести зависимости от исходного режима термической обработки. Приводятся радиационные свойства после облучения в реакторе БОР-60.

При разработке в России ядерных энергетических установок нового поколения (например, термоядерного реактора ДЕМО, реакторов повышенной мощности на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением - БН-800, БН-1800 и др.), разработчики ставят перед собой задачу не только максимального повышения безопасности реакторов и улучшения экономических показателей, но также повышения их экологической безопасности вследствие использования конструкционных материалов элементов активных зон с относительно быстрым (до 100 лет) спадом наведенной активности. Так анализ работы деталей проектируемого термоядерного реактора синтеза ДЕМО показывает [1,2], что при температуре 300...650°C, повреждающей дозе быстрых нейтронов до 200 сна, циклическому характеру нагружения 10^5 циклов, совместимости с теплоносителем He, конструкционные материалы должны быть жаропрочными, термоциклически прочными, радиационностойкими и, по возможности, малоактивируемыми (т.е. не содержать или содержать в ограниченном количестве Nb, Mo, Ni, Si, Ag, Co и др.). Такое сочетание требований резко сужает круг возможных материалов.

С точки зрения уровня физических, механических, а также радиационных характеристик наиболее реальными кандидатными материалами представляются жаропрочные 12%-ые хромистые стали типа ЭП823, ЭП450 [3]. Эти стали показали высокий уровень работоспособности в качестве конструкционных материалов оболочек твэлов и чехлов ТВС реакторов типа БН (БН-600, БН-350, БОР-60 и др.).

Использовать эти стали в качестве конструкционного материала 1-ой стенки и бланкета для ТЯР нежелательно из-за чрезмерно высокого уровня и длительного спада (более 1000 лет) наведенной γ -активности, возникающей в результате ядерных реакций и трансмутации легирующих элементов стали под действием облучения быстрыми нейтронами.

Для дальнейших разработок и исследований сталей с быстрым спадом наведенной активности был выбран базовый состав по хрому – 12%, как обеспечивающий получение жаропрочной матрицы.

Комплекс легирующих элементов для стали разработан с учетом требований по жаропрочности и радиационной стойкости, наряду с выполнением условий по снижению γ -активности рассматриваемых сталей [4-5]. Разработка сталей проводилась в направлении:

- исключения традиционно используемых при легировании жаропрочных сталей Mo и Nb;
- замены Mo на W;
- замены Nb на Ta, V, Ti;
- ограничения содержания Ni;
- снижения допустимого содержания активируемых примесей (Co, Si, Ag и др.);
- оптимизации содержания других элементов, влияющих на проявление всех типов охрупчивания под облучением.

Определяющим свойством 12% Cr сталей, как конструкционного материала активной зоны реактора на быстрых нейтронах является их несклонность к вакансионному распуханию, а ограничивающими свойствами являются недостаточная жаропрочность и склонность к низкотемпературному радиационному охрупчиванию (НТРО) в интервале температур 300...400°C.

Предполагается, что отсутствие в стали молибдена и ниобия будет, в значительной степени, компенсироваться повышенным содержанием вольфрама, ванадия, тантала; функцию горофильного элемента будут выполнять церий и бор, а в целом, комплексное легирование бором, ванадием, вольфрамом, танталом и др. дадут возможность получить, при малой активируемости стали, желаемый уровень свойств.

Проработаны технологические варианты выплавки малоактивируемой хромистой стали с выполнением жестких требований к металлу в части содер-

жания в нем легкоплавких и примесных элементов, а также газов. Выплавка качественного металла с минимальным содержанием примесей является первой стадией борьбы с НТРО и обеспечением малой активированности 12%-ых хромистых сталей. При этом закладывается возможность при последующей оптимизации структуры и режимов термической обработки получить сталь с порогом хрупко-вязкого перехода, наименее чувствительным к облучению в нейтронном поле.

Рассмотрение различных способов металлургического производства стали показывает, что наиболее рациональным для выполнения указанных требований к чистоте металла, является метод вакуумной выплавки с последующим вакуумным переплавом [5].

На основании вышеизложенного была разработана сталь типа 16X12B2ФТаР [4], а потом выплавлена серия опытных и опытно-промышленных плавков этой стали с различным сочетанием элементов в пределах состава, приведенного в табл. 1. Состав плавков выбирался таким образом, чтобы содержание δ -феррита в исходной сорбитной структуре стали после термообработки (нормализация 1050...1100°C, отпуск 720°C 3 ч) не превышало 20% [5], т.к. δ -феррит способствует проявлению НТРО [6].

Для конкретного состава стали 16X12B2ФТаР (см. табл.1, пл.№1,) была проведена оценка активированности и накопления примесей под действием нейтронного облучения спектра ДЕМО по методике, изложенной в [4].

Таблица 1

Химический состав (мас. %) стали 16X12B2ФТаР

№ плавки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V
Марочный состав стали	0,10...0,20	0,3...0,5	0,5...0,8	10,0-12,0	<од	<0,01	1,0...2,0	0,2...1,0
пл.1	0,14	0,37	0,94	11,2	<0,01	<0,01	1Д	0,29
пл.2	0,13	0,37	0,73	11,4	<0,01	<0,01	1Д7	0,28
№ плавки	Nb	Ta	B	N	Ti	Zr	Сн	Со
Марочный состав стали	<0,01	0,05...0,2	0,003...0,006	0,02...0,15	0,03...0,3	0,05...0,2	<од	<0,01
пл.1	<0,01	0,17	0,004	0,044	0,02	0,06	<0,01	<0,01
пл.2	<0,01	0,18	0,005	0,024	0,04	0,07	<0,01	<0,01

Проведенные расчетные оценки изменения состава стали 16X12B2ФТаР показали:

- основной вклад в величину наведенной активности малоактивируемой стали (16X12B2ФТаР) дают изотопы Fe-55, Ta-182, Mn-54 и Co-60. Безопасный уровень суммарной дозы облучения достигается через 50...60 лет после окончания облучения (рис.1);
- содержание таких элементов, как S, P, O и N в процессе облучения практически не изменяется (табл.2);
- облучение вызывает образование в составе стали газовых трансмутантов (H и He) и легкоплавких металлов (Li, Mg, Zn, Cd, Ca и, возможно, других), концентрация которых возрастает с ростом времени облучения, зависит от содержания легирующих элементов и может составить (через 10 лет облучения) в сумме ~1.10⁵ мас.%(табл.2). Необходимо исследовать влияние этих элемен-

тов на радиационную повреждаемость стали.

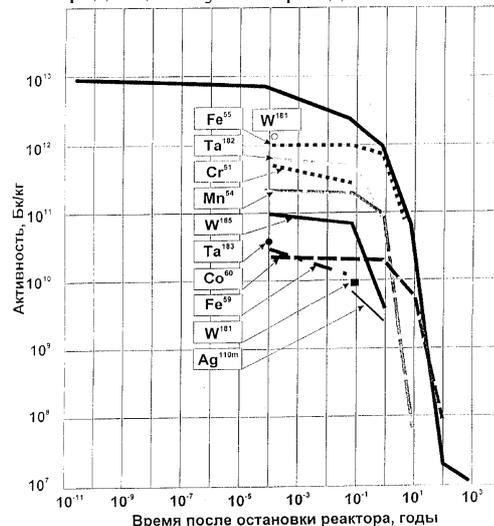


Рис. 1. Временная зависимость спада накопленной активности в стали 16X12B2ФТаР (Бк/кг)

Таблица 2

Изменение концентрации некоторых элементов в стали 16X12B2ФТаР (плавка №1, табл.1) при облучении в ДЕМО

Время облучения, год	Содержание элементов, мас.% x 10 ⁵							
	O	N	H	He	Li	Mg	Zn	Cd
	100	5000	-	-	-	-	-	-
2,5	99,9	4992	3,96	3,16	1,3	0,45	0,12	25
6,0	99,9	4991	10,44	5,04	3,0	1,1	0,29	58
10	99,9	4990	18,0	8,64	4,6	1,8	0,48	93

В данной работе приводятся свойства двух промышленных плавок стали 16X12B2ФТaP (табл.1). Отличительной особенностью полученного металла является его чистота по активируемым, примесным и легкоплавким элементам, что является одним из основных требований к малоактивируемым сталям:

- содержание примесей соответствует заданным величинам (медь н.б. 0,01; мышьяк н.б. 0,005; свинец н.б. 0,0005; олово н.б. 0,001 и др.);
- макроструктура соответствует принятым стандартам;
- неметаллические включения не превышают обычное их содержание в хромистых сталях аналогичного метода выплавки.

Изготовлена металлопродукция следующего сортамента:

- лист горячекатанный, толщина 6 мм;
- пруток Ø12 мм (в термообработанном состоянии).

Исследовано структурное состояние стали с целью выбора режима термической обработки.

Основные структурные исследования проведены на образцах, обработанных по традиционной для хромистых сталей схеме: нормализация + отпуск.

Структура стали после нормализации в интервале температур 1050...1100°C представляет собой мартенсит. Количество δ-феррита не превышает 20%. С увеличением температуры нормализации заметен рост аустенитных зерен и увеличение размеров пакетов мартенсита. Микротвердость при этом также повышается, а интервал разброса ее значений сужается. Этот факт свидетельствует об нарастании легированности твердого раствора и его гомогенности с приближением нагрева к 1100°C.

Температура и длительность отпуска (720°C, 3 ч) выбраны на основании совместного рассмотрения

кинетической зависимости изменения фазового состава стали и уровня ее прочности – пластичности после кратковременных и длительных механических испытаний.

Оптимальной структурой, обеспечивающей высокий уровень жаропрочности при сохранении достаточной пластичности стали является структура после нормализации от 1100°C с последующим отпуском (720°C, 3 ч).

Кратковременные механические свойства (σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ , Ψ) определенные при температурах испытаний 20...700°C представлены на рис. 2.

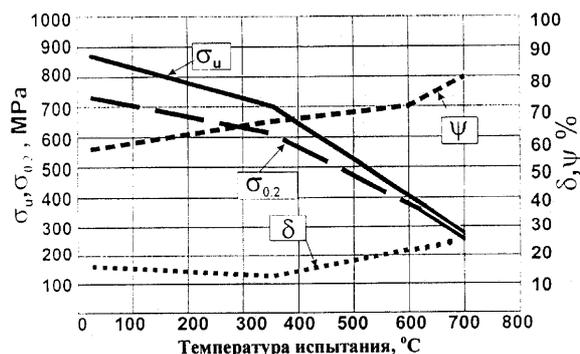


Рис. 2. Температурная зависимость кратковременных механических свойств стали 16X12B2ФТaP (пл. №1)

Испытания на ползучесть и длительную прочность стали 16X12B2ФТaP проводились при 650°C на воздухе по стандартной методике на цилиндрических образцах с размером рабочей части Ø5x25 мм, изготовленных из металла двух плавок (№ 1 и 2), с различной термообработкой. Результаты приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты испытаний на длительную прочность и ползучесть образцов из сталей 16X12B2ФТaP при температуре 650°C

Номер плавки	Термообработка	Напряжения, МПа	Время до разрушения, ч	Скорость установившейся ползучести, %/ч	Интервал определения скорости ползучести, ч	Примечание
№1	Нормализация 1050°C, 1ч + отп. 720°C, 3 ч	80	1416	4,8 · 10 ⁻⁴	200...1400	δ=14,1%, φ=52%
		80	>450	4,5 · 10 ⁻⁴	200...450	Испытания продолж.
		100	2384	5,0 · 10 ⁻⁴	500...2000	δ =24,4%, φ=87%
		120	980	3,3 · 10 ⁻³	100...600	δ =21,1%, φ=83%
№1	Нормализация 1100°C, 1ч + отп. 720°C, 3 ч	80	>12000	9,1 · 10 ⁻⁵	1500...8000	Испытания продолж.
		100	9657	2,1 · 10 ⁻⁴ *	1500...6000	δ =6,8%, φ=50,8%
		120	2935	3,3 · 10 ⁻⁴	700...2500	δ =23,6%, φ=87%
		140	2171	8Д · 10 ⁻⁴	500...1300	
№2	Нормализация 1050°C, 1ч + отп. 720°C, 3 ч.	80	8870	1,07 · 10 ⁻⁴	2500...6000	δ =14,0%, φ=49,6%
		100	8700	2,6 · 10 ⁻⁴	1500...6000	δ =17,8%, φ=84%

	120	1582	$1,1 \cdot 10^{-3}$	350...750	$\delta = 24,4\%$, $\varphi = 87\%$
	140	>450	$4,55 \cdot 10^{-3}$	100...400	Испытания продолж.

Испытания показали, что по характеристикам жаропрочности разработанная сталь превосходит 12% хромистые стали ЭП823 и ЭП450 [3] как по длительной прочности, так и по скорости установившейся ползучести. Повышение температуры нормализации стали с 1050°C до 1100°C заметно повышает характеристики жаропрочности стали 16X12B2ФТаР.

Образцы двух плавок стали 16X12B2ФТаР в настоящее время облучены в реакторе БОР-60 при температурах 325...345°C, повреждающих дозах 5,8...8,2 сна [5]. Испытания проводились на разрыв-

ных цилиндрических образцах длиной 28 мм с диаметром рабочей части 3 мм, а также на ударных образцах типа «Менаже» размерами 5x10x55 мм. Термообработка образцов проводилась по режиму: нормализация 1050°C, 1 ч + отпуск 720°C, 3 ч.

Первые результаты определения при 20°C кратковременных механических характеристик стали после облучения приведены в табл.4. Наблюдается типичная картина воздействия нейтронного облучения на свойства стали – повышение прочностных характеристик и снижение пластичности, что характерно и для других 12% Cr сталей [2,4-6].

Таблица 4

Механические свойства при 20°C стали 16X12B2ФТаР, облученной в реакторе БОР-60

Сталь	№ плавки	Условия облучения		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Равномерное удлинен., %	Общее удлинен., %
		$T_{\text{обл.}}$, °C	Поврежд. доза, сна				
16X12B2-ФТаР Промышл.	№1 исх.		0	764	653	5,3	19,2
	№1 обл.	325	6,0	1136	1124	0,5	2,3
		330	8,2	1173	1153	0,5	5,3
	№2 исх.	-	0	829	728	4,6	19,8
		335	8,0	1165	1144	0,5	1,8
	№2 обл.	345	5,8	1163	1155	0,5	1,8

Испытания на ударную вязкость показали (рис.3), что после низкотемпературного облучения быстрыми нейтронами стали 16X12B2ФТаР величина сдвига порога хладноломкости составила 80...90°C, температура хрупко-вязкого перехода приходится на температуру ~-30°C, а абсолютная величина ударной вязкости при этой температуре составляет 0,40...0,60 МДж/м².

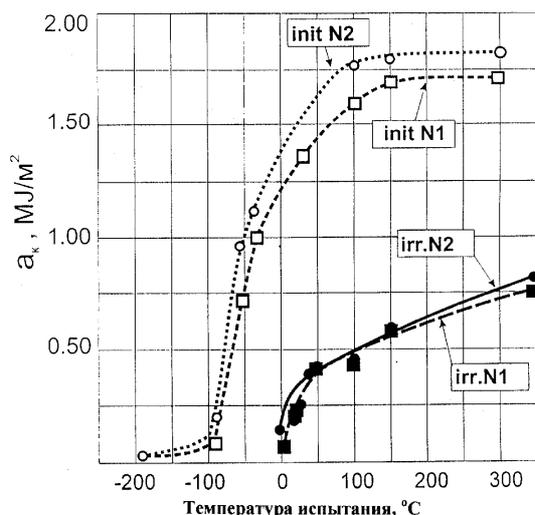


Рис. 3. Температурная зависимость ударной вязкости стали 16X12B2ФТаР (пл. №1, 2) в исходном состоянии и после облучения в реакторе БОР-60)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны состав жаропрочной малоактивируемой 12% хромистой стали 16X12B2ФТаР с микродобавками титана и циркония и технология ее промышленной выплавки, обеспечивающая повышенную чистоту стали по примесным (S, P, O и др.) и легкоплавким (Si, Pb, Sn и др.) элементам.

Проведена оценка структурного состояния, кратковременных и длительных механических свойств новой стали.

Установлено, что по уровню характеристик жаропрочности сталь 16X12B2ФТаР близка или превосходит другие стали данного типа (ЭП823, ЭП450 и др.).

Получены первые результаты оценки поведения стали 16X12B2ФТаР после облучения в реакторе БОР-60 при температуре 325...345°C и повреждающей дозе нейтронов 5,8...8,2 сна. Показана удовлетворительная радиационная стойкость разработанной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.G.Ioltukhovsky, V.P.Kondrat'ev, M.V.Leont'eva-Smimova et. al. Metallurgical aspects of possibility of 9-12% chromium steel application as a structural material for first wall and blanked of fusion reactors // *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 233-237, p. 299-304.
2. A.G. Ioltukhovsky, M.V. Leontyeva-Smimova, Y.I. Kazennov, et. al. Influence of operation Conditions on Structure and Properties of 12% Cr Steels as Candidate

Structural Materials for Fusion Reactor // *J. Nucl. Mater.* 1998, v. 258-262, p.1312–1318.

3. Ю.К. Бибилашвили, Ф.Г. Решетников, Е.А. Медведова и др. Состояние проблемы конструкционных материалов для реакторов БН. // *Сб. докладов VI Российской конференции по реакторному материаловедению*. Т.1. Димитровград, 2000, с. 66–82.

4. A.G. Ioltoukhovski, A.I. Blohin, N.I. Budylnin et al. Material Science and Manufacturing Development of Fabrication and Modification of Heat-Resistance Ferritic-Martensitic steels with Reduced Activation for Fusion // *J. Nucl. Mater.* 2000, v.283-287, p. 652–656.

5. А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, М.И. Солонин и др. Жаропрочная 12%-ая хромистая сталь типа 16Cr12W2VTaB с быстрым спадом наведенной активности – перспективный конструкцион-

ный материал для ТЯР и реакторов на быстрых нейтронах // *ICFRM-10*, г. Баден-Баден, 2001. В печати.

6. А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, В.С. Агеев и др. Влияние исходного структурного состояния на склонность 12%-ых хромистых сталей к охрупчиванию под облучением // *Сб. докладов III Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*. Т.2, Димитровград, 1994, с. 56–68.

7. М.В. Леонтьева-Смирнова, А.Г. Иолтуховский, Г.А. Арупонова и др. Влияние режимов термической обработки на структурное состояние 12%-ых хромистых сталей с быстрым спадом наведенной активности // *ICFRM-10*, г. Баден-Баден, 2001. В печати.

РОЗРОБКА ЖАРОПРОЧНІ 12% ХРОМІСТОЇ СТАЛІ 16X12B2FTaP НОВОГО ПОКОЛІННЯ З ШВИДКИМ СПАДОМ НАВЕДЕНОЇ АКТИВНОСТІ ДЛЯ НУЖД АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ РОСІЇ

А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова, В.М. Чернов, В.В. Цвельов, М.И. Солонин, В.Н. Голованов, В.К. Шамардин

Репрезентована жаротривка 12%- хроміста сталь типу 16X12B2FTaP є матеріалом із швидким падінням наведеної активності, що доведено розрахунком активаційних характеристик для нейтронних спектрів швидких реакторів та проекту ДЕМО. Склад сталі, що досліджується, відповідає обґрунтованим науково-технічним вимогам, сформульованим раніше у постановчих роботах. Наведені результати металургічного освоєння сталі. В роботі розглянуто структурний стан сталі, наводяться короточасні механічні властивості після стандартного режиму термічної обробки (нормалізація та відпуск) до температури випробування 700⁰С, а також результати досліджень залежності тривалої міцності та повзучості від вихідного режиму термічної обробки. Наведені радіаційні властивості після опромінення в реакторі БОР-60.

DEVELOPMENT OF HIGH-TEMPERATURE RESISTANT 12 % CHROMIUM STEEL 16Cr12B2FTaP NEW GENERATION WITH FAST DROP OF INDUCED ACTIVITY FOR RUSSIAN NUCLEAR POWER

A.G. Ioltukhovskiy, M.V. Leonytieva-Smirniva, V.M. Tchernov, V.V. Tsvelev, M.I. Solonin, V.N. Golovanov, V.K. Shamardin

The presented heat-resistant 12 % Chromium steel of the type 16Cr12V2FTaP is the material with high fall of induced activity; it is demonstrated by the calculation of activation characteristics for the neutron spectra of fast reactor and of the project DE-MO. The studied steel composition conforms to the science-technical specifications that were cited early. The results of the steel metallurgical use are presented. The steel structure state is also considered in the paper, the short-term mechanical properties after the standard thermal treatment (normalizing and tempering) to the test temperature of 700⁰ C are presented also as the results of the long-term strength and creep in dependence on the initial thermal treatment. The radiation properties after the irradiation in reactor BOR-60 are also presented.