

## **ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С PWR И ВВЭР\***

**В.И. Бараненко, С.Г. Олейник, О.А. Беляков, Л.С. Светлова,**

**Р.С. Истомин**

*ЭНИЦ ВНИИАЭС, г. Электрогорск*



Эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) является распространенным видом повреждения теплотехнического оборудования и трубопроводов АЭС. Ему подвержены практически все элементы конденсатно-питательного тракта турбоустановок АЭС. Другие виды износа металла в большинстве случаев протекают совместно с этим процессом.

В части применяемых материалов эволюция в зарубежном парогенераторостроении проходила более радикально. В начале 70-х годов осуществлялся переход с аустенитных сталей типа AJSJ 304 и AJSJ 316 на высоконикелевые сплавы типа Инконель-600МА. По мере увеличения срока эксплуатации были пересмотрены взгляды на использование данных сплавов, стали применять усовершенствованные стали типа Инконель-600ТТ, Инконель-690ТТ и Инколой-800, данные сплавы более устойчивы к межкристаллитному и транскристаллитному растрескиванию.

В отечественных ПГ используется нержавеющая сталь 08Х18Н10Т; считалось, что для ПГ без горизонтальной трубной доски ресурсные характеристики трубных систем из этой стали будут обеспечиваться.

Опыт эксплуатации отечественных АЭС показал, что наблюдаются довольно многочисленные разрушения трубных систем из-за хлоридного коррозионного растрескивания как на РУ ВВЭР-1000, так и на ВВЭР-440. В определенной степени последствия разрушения труб нивелируются возможностью ремонта ПГ.

Для наиболее точного определения остаточного ресурса и прогнозирования срока эксплуатации трубопроводов необходимо иметь ряд основополагающих факторов, таких как теплогидравлические, геометрические и немаловажный фактор – химический состав стали. В докладе авторами приводится анализ влияния химического состава, термообработки и других факторов на рабочие характеристики нержавеющих сталей (НС) и аустенитных нержавеющих сплавов (АНС), используемых на АЭС с PWR и ВВЭР для изготовления теплообменных труб парогенераторов (ТОТ ПГ).

© В.И. Бараненко, С.Г. Олейник, О.А. Беляков, Л.С. Светлова, Р.С. Истомин, 2004

\* Доклад с VIII Международной конференции "Безопасность АЭС и подготовка кадров" (Обнинск, 6-8 октября 2003 г.)

От выбора материала теплообменных труб парогенераторов в значительной степени зависит эксплуатационная надежность парогенераторов.

Чувствительность аустенитных сплавов к развитию коррозионных процессов в значительной степени определяется содержанием в них никеля и хрома.

Сплавы, содержащие высокий процент хрома 690, 800 (Alloy 690, Alloy 800), менее склонны к потере массы, чем сплав 600 (Alloy 600), возможно, из-за низкой растворимости оксидов хрома в теплоносителе первого контура с низким содержанием кислорода.

Улучшение рабочих характеристик сплавов осуществляется, в основном, за счет уменьшения остаточных напряжений, возникающих при изготовлении труб для ПГ. Для улучшения рабочих характеристик сплава 600 была разработана технология его термообработки.

Наиболее подходящим конструкционным материалом для изготовления ТОТ ПГ с учетом их тепловых и механических свойств, а также коррозионной стойкости являются нержавеющие стали и аустенитные нержавеющие сплавы.

Чувствительность аустенитных сплавов к развитию коррозионных процессов в значительной степени определяется содержанием в них никеля и хрома. Графики, иллюстрирующие чувствительность аустенитных сплавов к коррозионному растрескиванию в деминерализованной воде при  $t=350^{\circ}\text{C}$ , содержащей 1000 мкг/л ионов хлоридов, в зависимости от концентрации в металле никеля, приведены на рис. 1.

Из анализа этих графиков следует, что сплав Inconel 600 склонен к межкристаллитному растрескиванию под напряжением в воде первого контура (PWSCC), а сплавы Inconel 690 и Inconel 800 не склонны к PWSCC.

Аустенитные стали с содержанием никеля меньше 15% склонны к транскристаллитному растрескиванию, когда концентрация хлоридов в теплоносителе высокая (в данном случае 1000 мг/кг).

Аустенитные стали и сплавы с высоким содержанием никеля могут охрупчиваться серой.

Влияние концентрации хрома на потерю металла при высокой температуре борированного теплоносителя с низким содержанием кислорода при скорости теплоносителя, равной 5,5 м/с, показано на графиках рис. 2.

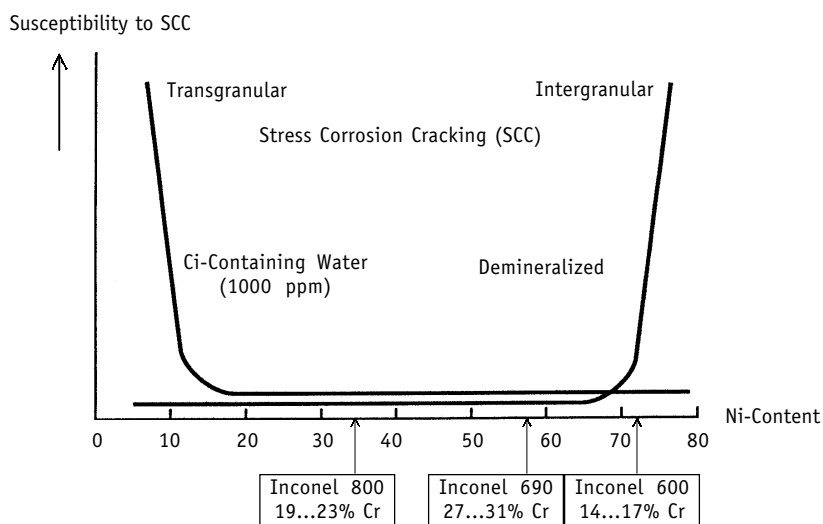


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая влияние содержания никеля на развитие трещин в металле теплообменных труб трех парогенераторов в воде с температурой  $350^{\circ}\text{C}$  и напряжениях, незначительно превышающих предел текучести

Сплавы, содержащие высокий процент хрома 690, 800 (Alloy 690, Alloy 800), менее склонны к потере массы, чем сплав 600 (Alloy 600), возможно, из-за низкой растворимости оксидов хрома в теплоносителе первого контура с низким содержанием кислорода.

В растворе 4% NaOH + 0.02 М Рb отмечено существенное различие в стойкости против КРН металла двух плавок из сплава инколой 800. В том случае, когда отношение Ti/C составляло 34.7, следов растрескивания не было. Когда же отношение Ti/C было равным 20, глубина трещин достигала 91% от толщины стенки.

В табл. 1 приведены марки сталей и сплавов, которые использовались в различные периоды для изготовления ТОТ ПГ АЭС с PWR и ВВЭР, а также указаны отличительные особенности этих сталей и сплавов.

Нержавеющие стали с содержанием никеля менее 10-12% подвержены транскристаллитной коррозии под напряжением (ТКРН), аустенитные нержавеющие сплавы с содержанием никеля более 70-72% подвержены межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением (МКРН).

Коррозионная стойкость нержавеющих сталей и аустенитных нержавеющих сплавов зависит от содержания в них хрома, титана, углерода и других химических элементов. Обоснованный выбор весового содержания химических элементов в НС и АНС, а также технологии их изготовления и термообработки позволяют получить НС и АНС с высокими коррозионно-стойкими свойствами.

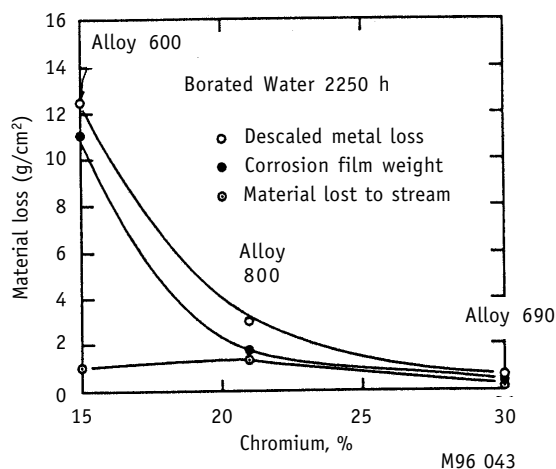


Рис. 2. Влияние содержания хрома на потерю металла в деаэрированной борированной воде при скорости теплоносителя 5,5 м/с

Таблица 1

**Характеристики конструкционных материалов (КМ), применяемых для изготовления ТОТ ПГ АЭС с PWR и ВВЭР в различных странах**

№	Марка КМ	Страны, использующие КМ	Годы использования КМ	Отличительные особенности КМ
1	Monel-400 (60Ni-15Cr-9Fe)	Canada	до конца 60-х	Склонность к КРН при наличии хлоридов, соединений меди и свинца
2	Inconel 600 MA (Ni-15Cr-9Fe)	Canada	до конца 70-х	Склонность к КРН при наличии хлоридов, соединений меди и свинца
3	Thermal treatment alloy – 600TT	USA, France, Japan	1980-1988 гг.	Повышенная сопротивляемость коррозионному растрескиванию
4	Inconel 690TT (Ni-30Cr-10Fe)	France	на АЭС с 1988 г.	Повышенная сопротивляемость коррозионному растрескиванию
5	Incoloy 800 (40Fe, 20-30Cr) Alloy 800M (35Ni-21.5Cr-44Fe)	German, Canada	с середины 80-х	Склонность к КРН при наличии хлоридов, соединений меди и свинца
6	Stainless steel 0X18H10T	Russia	с конца 70-х	Склонность к КРН при наличии хлоридов, соединений меди и свинца

Из табл. 1 следует, что до конца 60-х годов для изготовления ТОТ ПГ АЭС с PWR использовались нержавеющие стали марки 18-10 (типа AISI-304, 316, 347) и сплава Монель-400. ТОТ ПГ, изготовленные из этих сталей удовлетворительно работали в течение 70000 ч (например, на французской АЭС “Шуз”). Эти нержавеющие стали и сплав Монель-400 очень чувствительны к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) во многих агрессивных средах, особенно в присутствии хлоридов и кислороде, а также соединений меди и свинца. Начиная с 1967 г., при изготовлении парогенераторов фирмами “Вестингауз электрик”, “Комбачи инжиниринг” и “Бабкок и Уилкокс”, широкое применение нашел сплав 600 МА. В ФРГ для изготовления ПГ фирмой “Крафтверк Унион” был выбран сплав 800.

В табл 2 приведены основные характеристики парогенераторов, установленных на АЭС Японии, и указаны используемые на этих АЭС водно-химические режимы и материалы ТОТ ПГ в период с 1970 по 1993 гг.

Из анализа этой таблицы следует, что на АЭС Японии до 1982 г. для изготовления

Таблица 2

### Конструктивные характеристики парогенераторов

АЭС	Дата ввода в эксп.	Поставщик ПГ	Кол-во ПГ	Материал ТОТ	Способ вальцовки	Дистанционирующие решетки		ВХР второго контура
						Материал ТОТ	Тип отверстия	
Mihama	28/11/70	CE	2	MA600	Full depth Explosive	Carbon steel	Drill + egg crate	PO <sub>4</sub> →AVT
Mihama 2	25/07/72	MHI	2		Partial depth roll		Drill	
Takahama 1	14/11/74	West	3					
Genkai 1	15/10/75	MHI	2					
Takahama 2	14/11/75		3					
Mihama 3	01/12/76		3					
Ikata 1	30/09/77		2					
Ohi 1	27/03/79	West	4		Full depth roll			
Ohi 2	15/12/79		4					
Genkai 2	30/03/81		2		Full depth roll+rubber	405 ss		
Ikata 2	19/03/82	MHI	2	Full depth hydraulic + roll	Drill			
Sendai 1	04/07/84		3		chapter			
Takahama 3	17/01/85		3		Droache deqq crate (DEC)			
Takahama 4	05/06/85		3					
Sendai 2	28/11/85		3					
Tsuruga 2	17/02/87		3					
Tomari 1	22/06/89		2					
Tomary 2	13/04/91		2					
Ohi 3	18/12/91		4					
Ohi 4	2/2/93		4					
Genkai 3			4					
Ikata 3			3					
Genkai 4			4					

Таблица 3

**Химический состав материала теплообменных труб  
ПГ АЭС с PWR**

Alloy	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Al	Co	Ti	S
600	≥72	14-17	6-10	≤0.15	≤1.0	≤0.5	≤0.5	-	-	-	≤
690	≥58	28-31	7-11	0.05-0.025	≤0.5	≤0.5	-	≤0.5	≤0.02	≤0.5	≤0.01
800M	32-35	20-23	≥39.5	≤0.03	0.4-1.0	0.3-0.7	≤0.75	0.15-0.45	≤0.1	≤0.6	
Monel 400	≥63.0		≤2.5	≤0.3	≤2.0	≤0.5	28-34	-	-	-	≤0.024

ТОТ ПГ применяли сплав МА 600, такие ТОТ ПГ были установлены на 29 парогенераторах. С 1984 г. для изготовления ТОТ ПГ стали применять сплав 600ТТ, который был использован для изготовления ТОТ ПГ на 19 парогенераторах. Такие ТОТ ПГ были установлены на 19 парогенераторах. До 1981 г. дистанционирующие решетки изготавливались из углеродистой стали, а начиная с 1982 г. – из нержавеющей стали 405 SS. В конце 1991 г. для изготовления ТОТ ПГ был использован сплав 690ТТ.

В статье рассматриваются различные аспекты, связанные с влиянием химического состава металла ТОТ на их повреждения.

В табл. 3 приведены марки сталей, которые использовались в различные периоды для изготовления ТОТ ПГ и указаны отличительные особенности этих сталей и представлен химический состав сплавов, которые используются для ТОТ ПГ АЭС с PWR.

Наиболее подходящим материалом для изготовления ТОТ ПГ с учетом их механических и тепловых свойств, а также коррозионной стойкости, являются аустенитные и нержавеющие стали и сплавы.

Улучшение рабочих характеристик сплавов осуществляется в основном за счет уменьшения остаточных напряжений, возникающих в металле при изготовлении труб для ПГ. Для улучшения рабочих характеристик сплава 600 после проведения совместных исследований фирмами “Электрисите де Франс”, “Фраматом” и “Вестингауз Электрик” была разработана технология термообработки, которая позволила:

- значительно уменьшить остаточные напряжения, возникающие в процессе правки и полирования ремнем, а также уменьшить напряжения, появляющиеся в криволинейных участках малого радиуса, возникающие при операциях гибки труб;

- устранить наклеп, вызываемый у поверхности труб операциями правки и полировки, а также пескоструйной обработкой внутренней поверхности, которая проводится для уменьшения уровня напряжений и криволинейных участков большого радиуса и снижения скорости выделения продуктов коррозии в теплоноситель первого контура;

- сделать данный сплав менее чувствительным к межкристаллитной коррозии с выдержкой при температуре в течение времени, позволяющего повторно гомогенизировать хром, содержащийся в окрестности выделившихся карбидов, кроме того, значительно уменьшить количество карбидов хрома, которые могут выделяться в процессе последующего старения при рабочей температуре;

- повысить внутреннее сопротивление коррозии под напряжением в щелочных растворах, а также, по-видимому, в чистой воде, в предположении, что эти два явления представляют собой явления одного и того же типа.

В табл. 4-5 приведен химический состав сплавов, отвечающий различным техническим условиям. Химический состав сплава 600 в табл. 4 указан в соответствии с техническими условиями, применяемыми на французских АЭС. В сплаве 600 уменьшено содержание углерода (по сравнению со сплавом Монель 400) и указана концен-

Таблица 4

**Химический состав материалов, применяемых для изготовления труб парогенераторов на АЭС с РВР**

Наименование	Массовый состав, %												
	C	S	F	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Fe	Cu	Co
Сплав 600	≤0.15	≤0.015	-	≤0.5	≤1.0	(>72)	14...17	-	-	-	6...10	≤0.50	≤0.10
Технические условия, фирма "Электрисити де Франц"	0.01-0.050	≤0.015	≤0.025	≤0.50	≤1.00	>72	14-17 15.50	-	≤0.50	≤0.50	6...10	≤0.50	≤0.10 0.05
Сплав 690	≤0.05	≤0.015	-	≤0.50	≤0.50	>58	27-31	-	-	-	7...11	≤0.50	≤0.10
Сплав 800 ASTM A163	≤0.10	≤0.015	-	≤1.0	≤1.5	30-35	19-23	-	0.15-0.60	0.15-0.60	ост.	≤0.75	≤0.10
Нержавеющая сталь 316 ASTM A376	≤0.08	≤0.03	≤0.03	≤0.75	≤2.0	11-14	16-18	2-3	-	-	ост.	-	0.10
Дуплексная сталь типа "Крезолуар"	≤0.06	-	-	≤1	-	-	6-8	20-22	2-3	-	ост.	-	-

трация хрома (для увеличения сопротивления межкристаллитной коррозии). Содержание кобальта должно быть минимальным (для ограничения выноса Co в теплоноситель первого контура).

Данные по влиянию химического состава аустенитных нержавеющей сталей и сплавов на рабочие характеристики металла приведены в табл. 6.

Повреждения теплообменных труб парогенераторов были зафиксированы уже в первые годы их эксплуатации. На АЭС "Шиллингпорт -1" (США) в 1958 г. уже через 150 эффективных часов после пуска появились сквозные трещины в трубах ПГ горизонтального типа из стали 18-9 (304) вблизи трубной доски. Коррозионное растрескивание межкристаллитного или транскристаллитного характера (соответственно в сенсibilизированных или отожженных участках труб) произошло из-за избытка щелочи в воде второго контура. Случаи МКР той же стали наблюдались в трех из четырех ПГ горизонтального типа АЭС "Индиан-Поинт-1" (США) в 1968 г. (трещины вблизи трубной доски в U-образных трубах) и в ПГ АЭС "Янки атомик" (США) в 1966-1969 гг. (то же самое во всех четырех ПГ вертикального типа). Концентрирование хлоридов было причиной транскристаллитного КР (ТКР) труб и трубных досок из стали 18-10 Nb (347) в ПГ атомных подводных лодок типа "Наутилус" (США).

Эти и многие другие случаи хлоридного и щелочного КР послужили причиной замены материала труб ПГ – вместо сталей типа 18-9 фирма "Вестингауз" и другие фирмы по ее лицензии начали использовать высоконикелевый сплав инконель 600 в мощных усовершенствованных ПГ вертикального типа. Однако и этот сплав оказался восприимчивым к КР в условиях эксплуатации. Начиная с 1970 г., наблюдается массовый выход из строя труб ПГ, изготовленных из высоконикелевого сплава, по причине КР. В период с 1970 по 1979 гг. неисправности ПГ, связанные с КР труб, отмечались на таких АЭС США, как "Сан-Онофр", "Пойнт-Бич-1,2", "Робинсон-2", "Терки-Пойнт-3,4", "Сарри-1,2", "Прейри-Айленд-1,2", "Джина", "Норт-Анна-1", "Фарли-1"; на АЭС Японии "Михама-2", "Такахама-1"; на АЭС Швейцарии "Бецнау-1,2"; на АЭС ФРГ "Обригхейм", "Штаде"; на АЭС Бельгии "Тианж", "Дозль-2"; на АЭС Швеции "Рингхальс-2".

Межкристаллитные трещины, распространяющиеся со стороны воды второго контура, сосредоточены в основном на "горячей стороне" трубного пучка у трубных досок и на 30 – 150 мм выше их, на U-образных гibaх в верхней части трубного пучка, там же вблизи трубных решеток. Трещины со стороны воды первого контура развиваются преимущественно на U-образных гibaх и вблизи них. По данным на 31/XII 1977 г., из 35 блоков зарубежных АЭС с реакторами типа PWR, проработавших более 1000 эф. сут, на 28 блоках имелись дефекты труб ПГ, в основном по причине "чистого" КР или КР, связанного с "дентингом", т.е. сжатием труб продуктами коррозии в щелях трубных досок (часть труб выходила из строя по причинам коррозионного утонения, язвенной коррозии, механической вибрации и т.д.). Из 370000 труб ПГ этих АЭС около 10000 были заглушены. Номинальный срок службы ПГ фирмы "Вестингауз" составляет 40 лет. Некоторые владельцы АЭС заменили ПГ после 6-летней эксплуатации, некоторые рассматривают вопрос о замене. Стоимость замены, включая потерю энергии при простое, составляет от 100 до 300 млн. долл. на энергоблок.

## ВЫВОДЫ

1. От выбора материала теплообменных труб парогенераторов в значительной степени зависит эксплуатационная надежность парогенераторов.

2. Наиболее подходящим конструкционным материалом для изготовления ТОТ ПГ с учетом их тепловых и механических свойств, а также коррозионной стойкости являются нержавеющей стали (НС) и аустенитные нержавеющей сплавы (АНС).

Химический состав НС и Fe-Cr-Ni-сплавов (русские разработки), %

Таблица 5

Сталь или сплав	№ по ГОСТ, AISI или фирменный	Название элементов									
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb(+Ta)
		Не более									
12X18H9	ГОСТ 5632-72	0.12	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	8-10	-	-	-
03X18H11	ГОСТ 5632-72	0.03	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	10.5-12.5	-	-	-
08X18H10	ГОСТ 5632-72	0.08	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	9-11	-	-	-
08X18H10T	ГОСТ 5632-72	0.08	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	9-11	-	5C-0.7	-
12X18H10T	ГОСТ 5632-72	0.12	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	9-11	-	5C-0.8	-
18-9	302	0.15	1.0	2.0	0.030	0.045	17-19	8-10	-	-	-
18-9	304	0.08	1.0	2.0	0.030	0.045	18-20	8-10.5	-	-	-
18-9	304L	0.03	1.0	2.0	0.030	0.045	18-20	8-12	-	-	-
18-12Mo	316	0.08	1.0	2.0	0.030	0.045	16-18	10-14	2-3	-	-
18-10Ti	321	0.08	1.0	2.0	0.030	0.045	17-19	9-12	-	≥ 5C	-
18-10Nb	347	0.08	1.0	2.0	0.030	0.045	17-19	9-13	-	-	≥ 10C
18-10Nb	348	0.08	1.0	2.0	0.030	0.045	17-19	9-13	-	-	Co≤0.2; Ta≤0.1
АЧС с 12 – 29% Ni											
08X18H12T	ГОСТ 5632-72	0.08	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	11-13		5xC-0.6	
12X18H12T	ГОСТ 5632-72	0.12	0.8	2.0	0.020	0.035	17-19	11-13		5xC-0.7	
03X17H14M3	ГОСТ 5632-72	0.03	0.4	1.0-2.0	0.020	0.035	16-18	13-15	2.5-3.1	-	-



Продолж. табл. 5

Сталь или сплав	№ по ГОСТ, AISI или фирменный	Название элементов											
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb(+Ta)	Другие	
		Не более											
08X17H13M2T	ГОСТ 5632-72	0.08	0.4	2.0	0.020	0.035	16-18	12-14	2-3	5C-0.7	-	-	
03X16H15M3Б	ГОСТ 5632-72	0.03	0.42	0.58	0.020	0.008	14.48	15.25	2.0	-	0.44	-	
09X16H15M3Б	ГОСТ 5632-72	0.06	0.49	0.81	0.022	0.025	14.85	15.28	2.6	-	0.69	-	
03X15H15	ЭИ843	0.03	0.47	0.64	0.011	0.006	15.40	15.18	-	-	-	-	
03X15H15A	ЭИ845	0.03	0.44	0.64	0.017	0.008	15.62	15.68	-	-	-	N 0.18	
03X15H15P	ЭИ846	0.02	0.53	0.63	0.012	0.008	16.69	15.32	-	-	-	B 0.08	
08X17H15M3T	ГОСТ 5632-72	0.08	0.8	2.0	0.020	0.035	16.18	14-16	3-4	0.3-0.6	-	-	
10X11H20T3P	ГОСТ 5632-72	0.10	1.0	1.0	0.020	0.035	10-12.5	18-21	-	2.6-3.2	-	B 0.008-0.02; A1 0.08***	
03X20H14C3	ЭИ838	0.02	2.56	1.19	0.008	0.007	18.90	14.03	-	-	-	-	
12X20H14C3	ЭИ211	0.10	2.68	1.14	0.010	0.017	20.43	14.0	-	-	-	-	
15-25 MoTi AIVB	A-286	0.1	1.0	2.0	0.030	0.045	15	24	1.5	2	-	A1 0.3: V 0.3: B0.005	
20-28 CuMo	Корпентер 20	0.07	1.0	2.0	0.030	0.045	18-20	27-29	2.0	-	-	Cu 3**	
17-14 Si	Uranus S	0.020	4.0	-	-	-	17	14	-	-	-	-	
Сплавы с 30 – 45% Ni													
06XH28MДТ	ГОСТ 5632-72	0.06	0.8	0.8	0.020	0.035	22-25	26-29	0.5-3.0	0.5-0.9	-	Cu 2.5-3.5	
XH35BT	ГОСТ 5632-72	0.12	0.6	1-2	0.020	0.030	14-16	34-38	-	1.1-1.5	-	W 2.8-3.5	
XH38BTЮ	ГОСТ 5632-72	0.08	0.6	0.8	0.020	0.030	14-16	33-37	-	2.4-3.2	-	W 2.8-3.5; Al 0.7-1.4; B≤0.02	

Таблица 6

**Влияние элементов химического состава аустенитных нержавеющих сталей (АНС) на рабочие характеристики металла**

Наименование элементов	Влияние химического элемента	Концентрация в АНС и Fe-Cr-Ni %
Никель (Ni)	Увеличение содержания никеля способствует повышению устойчивости против коррозионного растрескивания (КР), при этом возрастает склонность к сенсibilизации, в результате влияние никеля на ТКР АНС неоднозначно.	8-80
Хром (Cr)	Увеличение содержания хрома обеспечивает повышенную стойкость против сплошной коррозии из-за усиления пассивации металла, образование защитных окисных пленок. Вместе с тем ионы в среде внутри трещины способствуют ее подкислению и образованию менее благоприятных компланарной дислокационной структуры в плоскостях скольжения. Поэтому влияние хрома на ТКР неоднозначно. Соотношение между никелем и хромом определяет структуру стали различного состава после охлаждения. Соотношение "18-8" соответствует структуре рис.3.	НС- 12-14% АНС - 11-31%
Титан (Ti)	Титан вводят в АНС для связывания углерода (стабилизирующая добавка). Для наиболее полноценного связывания углерода для сталей с 8-10% содержанием Ni концентрация титана определяется из выражения: $Ti \geq (5-6) C + (0.1-0.15)$ . Для сталей с повышенным содержанием никеля - из выражения $Ti \geq 4C + 0.15$ Менее пригодна, а иногда вредна, стабилизация НС, предназначенных для работы в сильноокислительных средах из-за возможного возникновения ножевой коррозии по сварным соединениям. Вводить добавки титана в НС для связывания углерода начали повсеместно с начала тридцатых годов прошлого столетия.	0.2-0.8
Кремний (Si)	Кремний служит для раскисления АНС. При хлоридном ТКР кремний в виде окисла переходит в пленку и улучшает защитные пассивирующие свойства пленки в кислых средах.	0.3-0.8
Медь (Cu)	Медь способствует торможению растворения АНС в кислотах в активном состоянии.	0.05-0.75
Углерод (C)	Содержится в АНС как примесь в количестве 0.05-0.15%. Углерод в соединении с хромом образует карбиды, которые выпадают по границам зерен. Сплав 600 наиболее устойчив к МКР, когда границы зерен полностью окружены карбидами. Если зерна окружены карбидами частично, то сопротивление сплава МКР уменьшается. При отсутствии карбидов по границам зерен фиксировалось наиболее сильное МКР. В связи с этим для сплава 600 желательно избежать таких концентраций углерода, которые являются низкими, чтобы произошло полное растворение карбидов хрома во время операции отжига. При низких содержаниях углерода существует риск того, что благодаря росту зерна и отсутствию межкристаллитных карбидов произойдет недопустимое уменьшение предела текучести. Известное наиболее экономичное соотношение между концентрациями хрома и углерода в зарубежных марках НС 18-9, 18-12 Мо, 18-10 Ti и других (при концентрации хрома 16-20%, концентрации углерода 0.08-0.15%) было установлено в двадцатых годах прошлого века.	0.035-0.05
Фосфор (P)	Фосфор присутствует в НС и ФНС в виде примесей и его наличие усиливает хладоломкость сталей. Поэтому обычно стремятся к максимальной очистке сталей от фосфора.	0.035-0.050
Сера (S)	В высокотемпературных водных средах при содержании серы до 0.1% и в кипящих при $t = 154^{\circ}\text{C}$ растворах $\text{MgCl}_2$ не обнаружено отрицательного действия примеси серы до 0.06-0.20% на хлоридное ТКР.	0.02-0.20
Молибден (Mo)	Наличие в НС и АНС молибдена способствует повышению коррозионной стойкости сталей в кислотных средах, морской воде и воздушной среде.	0.5-4.0

3. Нержавеющие стали с содержанием никеля менее (10-12)% подвержены транскристаллитной коррозии под напряжением (ТКРН), аустенитные нержавеющие сплавы с содержанием никеля более (70-72)% подвержены межкристаллитному коррозионному растрескиванию под напряжением (МКРН).

4. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей и аустенитных нержавеющих сплавов зависит от содержания в них хрома, титана, углерода и других химических элементов. Обоснованный выбор весового содержания химических элементов в НС и АНС, а также технологии их изготовления и термообработка позволяют получить НС и АНС с высокой коррозионной стойкостью.

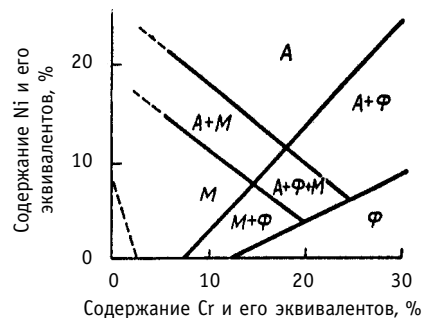


Рис. 3. Структура сталей различного состава после охлаждения: А – аустенит; М – мартенсит; Ф – δ-феррит (по Шеффлеру)

### Литература

1. *Dow B., Jr, Tomas R.S.* Update: repair and replacement trends//Nucl. Eng. Inter. – Feb. 1998. – P. 38-40.
2. *Kocourek J.* SG replacement project update// Nucl. Eng. Inter. – August. 1996. – P. 18-19.
3. *Steam Generator Tube Failures.*// NUREG/ CR – 6365. INEL – 95/0383. April 1996. Prepared for Safety Programs Division. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC 20555-0001. NRC Job Code E8238. 272 p.
4. *Berge Ph., Donati J.R.* Materials requirements for pressurized water reactor steam generator tubing// Nuclear Technology. – 1981. – V. 65. – № 1. – P. 88-104.
5. *Doczi V.* Steam Generator Inspections at Paks NPP//Nechnical Meeting on Steam Generator Problems Repair and Replacement (IAEA Meeting). NRI Rez, Czech Republic-February 4-6.

Поступила в редакцию 2.03.2003

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.53

*Influence of Choice Design Materials on NPP PWR and VVER SG Damage* \V.I. Baranenko, S.G. Oleinik, O.A. Belyakov, L.S. Osipova, R.S. Istomin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 11 pages, 3 illustration, 6 tables. – References 5 titles.

Erosion-corrosive wear (ECW) is a common damage of NPP processing equipment and pipelines. Practically all elements of the condensate-feeding circuit of NPP turbo-installations are subjected to ECW. In most cases other wear modes of metal are running simultaneously with the above process.

Selection of material determines substantially the reliability and residual life of the plant.

Susceptibility of austenitic nickel-chromium alloys to corrosion cracking in different corrosive mediums depends substantially on chemistry. So, nickel and chromium influence on susceptibility to chloride cracking. Austenitic steels with 70% content of nickel are susceptible to intergranular cracking under pressure in primary circuit water, and with under 15% content of nickel are susceptible to transcrystalline cracking, when chloride concentration in the coolant is high.

The evolution of materials applied was more radical in oversea steam-generator construction. At the beginning of 70-s austenitic steels AJSJ 304 and AJSJ 316 were changed into high-nickel alloys Inkonel-600MA. As the operation life increased, the view of these alloys use were revised: improved steels Inkonel-600TT, Inkonel-690TT and Inkonel-800 came to be used. The improved steels are more resistant to intergranular and transcrystalline cracking.

In domestic SG stainless steel 08X18H10T is used. It's considered that for steam generators without horizontal tube plate life characteristics of tube systems from this steel are ensured.

Operation experience of domestic NPP showed that a large in number destructions of tube systems due to chloride corrosive cracking both at VVER-1000 NPP and VVER-440 NPP is discovered. To a certain extent consequences of tube destructions are graded by possible repairing of steam generators.

To determine more exactly residual life and to predict operation life of the pipelines a set of basic factors, such as thermohydraulic, geometric and a factor of no small importance – steel chemistry, should be available.

### УДК 621.039

*Usage of Software-Methodical Complexes for NPP Second Circuit Elements Lifetime Management* \V.I. Baranenko, S.G. Oleynik, L.S. Osipova, R.S. Istomin, S.A. Baklashov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2004. – 6 pages, 3 illustration, 1 table. – References 9 titles.

The descriptions of PC programs (software) implementing for predicting of pipelines damages (software EKI-02) as well as steamlines (software EKI-03) of secondary circuit damages at NPPs with WWER-440 are represented in this report.

PC EKI-02 and PC EKI-03 are similar to well-known PC code CHECWORKS.

These programs allow to carry out the calculations on erosion-corrosion wear (ECW) of walls calculation of thinning and thinning velocity (direct problem), physical-chemical and thermal-hydraulic characteristic of pipelines (inverse problem) over a rated time period for pipelines with single and two-phase medium of secondary circuit at NPPs with WWER-440.

The following parameters of secondary circuit are used as initial data in software EKI-02 and EKI-03: temperature and velocity of coolant, water chemistry value (pH, oxygen concentration), design features of equipment components and pipelines, duration of operating, chemical composition of pipelines components metal and others.

The calculations on the velocity of ECW of the equipment and pipelines of the NPPs secondary circuit were carried out by means of PC EKI-02 and PC EKI-03.

### УДК 621.039.548:53.

*Ultrasonic Converters for the Automated Ultrasonic Installation of Diagnostics the Bent Pipelines of NPPs* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, A.N. Savin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.