

УДК 669.74

**Ю.А. Зиновьев, А.А. Колпаков, И.О. Леушин, В.Д. Швецов,
Г.И. Белявский, А.М. Тимофеев**

УВЕЛИЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ОАО «ГАЗ»

В работе приведены результаты исследования нового жаропрочного сплава для термических агрегатов. Длительная прочность звеньев цепей увеличилась более чем в четыре раза.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, длительная прочность, звенья цепи, термические агрегаты.

Жаропрочность – это способность стали и сплавов длительно противостоять при высоких температурах действию внешних механических нагрузок, вызывающих пластическую деформацию и разрушение. Естественно, что жаропрочные стали и сплавы будут отвечать своему назначению только в том случае, если они будут обладать одновременно высокими характеристиками прочности и пластичности при высоких температурах, а также высокой окалинотойкостью (жаростойкостью).

Условия эксплуатации жаропрочных сталей могут резко различаться по длительности сроков службы, по величине и сложности напряженного состояния и по рабочим температурам [1]. Так, в прямоточных котлах и паровых турбинах параметры пара могут достигать до 300 с лишним ат/см² при 600–650°С. Требуемая длительность службы деталей установок исчисляется десятками тысяч часов.

В газовых турбинах и реактивных двигателях лопатки, диски, трубы и другие детали работают при температурах около 700–1000°С в сложно нагруженном состоянии, но более короткое время, исчисляемое несколькими сотнями часов.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации к сталям и сплавам предъявляются весьма различные требования. Основным требованием к стали для котлотурбинных установок является высокое сопротивление ползучести, т.е. сопротивление к накоплению пластической ползучести материала во времени под действием постоянного напряжения. Детали турбореактивных двигателей должны иметь высокую длительную прочность, т.е. противостоять разрушению под влиянием постоянно действующей механической нагрузки, а также высокое сопротивление коррозионному разрушению. К техническим требованиям, предъявляемым к жаропрочным сталям и сплавам, относятся также и хорошие технологические свойства (хорошая свариваемость, деформируемость, отсутствие склонности к трещинообразованию, хорошие литейные свойства и пр.).

Удовлетворение всех этих сложных и разнообразных требований возможно только при комплексном легировании стали и создании сложнoleгированных сплавов, в которые вводят большие количества никеля и хрома. Кроме того, в такие стали и сплавы вводят титан, алюминий, вольфрам и молибден.

Высокую окалинотойкость сталям и сплавам придают хром, алюминий, никель и кремний. Под воздействием кислорода воздуха в поверхностных слоях нержавеющей стали и сплавов, легированных хромом, возникает оксидная труднопроницаемая защитная пленка, обогащенная хромом, вследствие чего и создается высокая окалинотойкость хромистой стали и сплавов.

Для надежной защиты металла от дальнейшего окисления, особенно при высоких

температурах, образуемая элементами окисная пленка должна быть прочной, плотной, непроницаемой для кислорода атмосферы. Именно такую пленку на железных сплавах и образует хром, окислы которого имеют плотность и молекулярный вес, близкие к окислам железа. При циклических нагревах и охлаждениях таких сталей и сплавов не происходит ни растрескивания, ни отслаивания оксидной пленки.

Никель в жаропрочных сталях и сплавах повышает окалиностойкость и способствует образованию однофазной стабильной аустенитной структуры.

Стабильность структуры и свойств жаропрочных сталей и сплавов при высоких температурах обеспечивают легированием элементами, образующими очень стойкие против коагуляции при высоких температурах карбиды и интерметаллические соединения. К таким элементам относятся титан, ниобий, молибден, вольфрам и др.

Высокие жаропрочные свойства создаются при последующей термической обработке. Задача термической обработки жаропрочных сталей и сплавов заключается в получении вначале обогащенного легирующими элементами аустенита, а затем – в выделении из этого аустенита дисперсных частиц упрочняющих фаз: карбидов и интерметаллидов. Это осуществляется закалкой с высоких температур и высоким отпуском, при котором происходит дисперсионное твердение стали и сплавов.

Большой стабильностью структуры и более высокими механическими свойствами при высоких температурах обладают жаропрочные сплавы на нежелезной основе, например, на никелевой.

Основным недостатком жаропрочной литейной стали типа 08X17H34B5T3Ю2РЛ [2], применяемой для изделий, работающих под нагрузкой при температуре 800-900°С, является слабое сопротивление межкристаллитной коррозии и ползучести ввиду диффузии хрома из пограничных районов зерна в границу зерна с образованием карбида хрома $(Cr, Fe)_{23}C_6$, дисперсные частицы которого располагаются по границам зерен. Данная фаза является упрочняющей и препятствует движению дислокаций, однако в интервале температур 620–670°С сложный карбид хрома $(Cr, Fe)_{23}C_6$ коагулирует с образованием крупных частиц, которые уже слабо препятствуют высокотемпературной ползучести и, кроме того, уже сами становятся концентраторами напряжения с последующим превращением их в микротрещины и дальнейшим разрушением изделия. Раскисление алюминием и ввод титана сопровождается падением ударной вязкости из-за неблагоприятного распределения неметаллических включений в виде плен и остроугольных нитей и увеличению усадочной пористости. Ввод бора приводит к образованию хрупкой фазы по границам зерен.

Поэтому необходимо было провести дополнительное легирование с целью предотвращения диффузии хрома из приграничной области зерна аустенита в границы зерен, поскольку тем самым снижается вероятность межкристаллитной коррозии. Для этого ввели новые легирующие элементы Nb, Ce и Ca, которые, образуя тугоплавкие карбиды, препятствуют высокотемпературной ползучести при температурах 800-900°С. При высокотемпературной эксплуатации атомы вольфрама частично диффундируют из раствора внедрения в границу зерна с образованием фазы Лавеса, что также является упрочняющей фазой, противостоящей высокотемпературной коррозии.

Содержание W и Nb ограничивается соответственно 2,5-3,2 W и 0,7-1,0 Nb, т.к. при превышении этих норм возрастает опасность образования феррита и снижения пластичности материала ввиду образования значительного количества карбидной фазы.

Длительная прочность жаропрочных изделий – звеньев цепи при 800°С термических агрегатов из стали 08X17H34B5T3Ю2РЛ составляет 2 месяца, и их заменяют на новые ввиду их большого износа и образования трещин.

Другим недостатком этой стали было низкое содержание углерода, что приводило к малой жидкотекучести и плохой заполняемости тонких стенок звеньев цепей, и как следствие, к появлению дефектов: спай, недолив, неслитина, усадочная пористость, что также уменьшало ресурс работы звеньев цепей.

Задачей данной работы было увеличение долговечности звеньев цепей и других изделий для термических агрегатов.

Технический результат достигается тем, что сталь [3], содержащая углерод, хром, никель, кремний, марганец, вольфрам, дополнительно содержит ниобий, РЗМ, кальций и цирконий, при следующем соотношении компонентов, масс, %:

Углерод	0,15-0,28
Хром	16,0-20,0
Никель	28,0-32,0
Кремний	1,8-2,2
Марганец	0,4-0,9
Вольфрам	2,5-3,2
Ниобий	0,7-1,0
РЗМ	0,005-0,2
Кальций	0,005-0,2
Цирконий	0,04-0,06
Сера	$\leq 0,02$
Фосфор	$\leq 0,03$
Железо	остальное

Так как W и Nb обладают большей активностью по отношению к углероду, чем хром, то они оттягивают на себя значительное количество углерода и предотвращают диффузию хрома из приграничной области зерна аустенита в границу зерна, тем самым снижая вероятность межкристаллитной коррозии. Кроме этого, образуя тугоплавкие карбиды (коагуляция этих карбидов происходит при температурах 800-900°C), препятствуют высокотемпературной ползучести при более высоких температурах.

Высокие концентрации хрома (16-20%) и никеля (28-32%) обеспечивают наилучшие сочетания длительной прочности и стойкости против окисления.

Повышенное содержание углерода (0,15-0,28% против до 0,08%) улучшает жидкотекучесть, достаточную для получения бездефектных, без спаев и микропор, тонких стенок (3-4 мм) жаропрочных изделий. Увеличивать содержание углерода более 0,28% нельзя, так как уменьшается жаропрочность сплава.

Кремний в приведенных пределах повышает стойкость против окисления, увеличивая стабильность окисной пленки. Верхний предел по кремнию ограничен (2,2%) из-за опасности ферритообразования и ускорения образования дельта-фазы, которая снижает ударную вязкость и пластичность при высоких температурах.

Верхний предел по марганцу ограничен из-за роста зерна при высокой температуре (800°C) и сопровождается повышением концентрации вредных примесей, приводящим к снижению механических свойств. Кроме того, повышение содержания марганца может инициировать образование дельта-фазы, которая снижает предел текучести стали и приводит к возникновению микротрещин.

Ниобий тормозит диффузионный обмен при высоких температурах (800°C), затрудняя коагуляцию дисперсных фаз и вызывая тем самым повышение предела текучести. Превышение содержания ниобия выше 1,0% приводит к неоднородному распределению соединений ниобия при повышенных температурах, что может вызвать появление разностенности и развитие микротрещин в междендритном пространстве.

Наименьшее пленообразование достигнуто при вводе 0,12% силикокальция (Ca=0,01%) и РЗМ ($\Sigma=0,15\%$). При такой обработке устраняются дефекты отливок по пленам, спаю и горячим трещинам. Кроме того, эти добавки устраняют локальные скопления оксидных включений, способствуя их глобуляризации, что приводит к повышению пластичности, ударной вязкости при высоких температурах.

Цирконий, обладая большим сродством к кислороду, сере и азоту, образует с ними интерметаллиды глобулярной формы, кроме очистки границ зерен, замедляет рост зерна при

нагреве, увеличивая прочность сцепления эвтектических фаз, препятствуя межкристаллитному разрушению.

На ГАЗе*, в условиях литейного цеха, были проведены сравнительные плавки стали с известным и предложенным химсоставом, с заливкой звеньев цепи термического агрегата. Сталь выплавляли в индукционной печи ИСТ-016 с кислой футеровкой. В качестве шихты использовали: сталь 10, отходы жаропрочной стали, FtCr, FeW, FeNb, FeSi, FeMn. Раскисляли SiCa и ФС 30РЗМ30 с добавлением FeZr. Химсостав приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химсостав плавок стали

Сплав	Химический состав													Наличие термообработки
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	С	Si	Mn	Cr	Ni	W	Ti	B	Al	Nb	Ce	Ca	Zr	15
Предлагаемый 1	0,18	1,7	0,3	15,0	27,0	2,3	-	-	-	0,6	0,05	0,02	0,03	без т/о
2	0,20	1,8	0,4	16,0	28,0	2,5	-	-	-	0,7	0,06	0,03	0,04	без т/о
3	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	0,05	без т/о
4	0,28	2,2	0,9	20,0	32,0	3,2	-	-	-	1,0	0,1	0,06	0,06	без т/о
5	0,30	2,3	1,0	21,0	33,0	3,3	-	-	-	1,2	0,08	0,04	0,07	без т/о
6	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	-	0,04	0,05	без т/о
7	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	-	0,05	без т/о
8	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	-	без т/о
9	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	0,05	без т/о
Известный 10	0,06	0,2	0,3	15,0	32,0	4,5	2,6	0,03	1,7	-	-	-	-	с т/о
11	0,08	0,5	0,6	18,0	35,0	5,5	3,2	0,05	2,1	-	-	-	-	с т/о

Как видно из табл. 2, звенья цепи из известного сплава (табл. 2, сплавы № 10-11) имели большой брак по спаю, горячим трещинам и усадочной пористости. Звенья цепи, отлитые из известного сплава, разрушились в термическом агрегате через 2 месяца. Звенья цепи, отлитые из предлагаемого сплава (табл. 1, сплавы № 2-4), не имели названных дефектов и стоят в термическом агрегате 8 месяцев без разрушения (табл. 2, сплавы № 2-4).

Таблица 2

Дефекты отливок у известного и предлагаемого сплавов

Сплав №	Брак по спаю в стенке толщиной 3 мм, %	Брак по горячим трещинам, %	Усадочная пористость, %	Время до разрушения в термическом агрегате при T=800-900°C
1	3	4	6	не ставились
2-4	0	0	0	8 месяцев, не разрушились
5	0	0	0	8 месяцев, не разрушились
6	8	5	4	не ставились
7	12	6	5	не ставились
8	9	12	7	не ставились
9	0	0	0	не ставились
10-11	18-24	15-17	10-12	2 месяца

Сравнительный анализ признаков, отличающих данное предложение от известных в этой области технических решений, показал, что в данном сочетании проявляется новое свойство – исключение пористости при повышении долговечности.

Суммарное содержание составляет $Sa+Se+Zr=0,13-0,22\%$. При содержании менее 0,13% увеличивается брак по спаю, горячим трещинам, усадочной пористости. При содержании более 0,225 увеличивается количество неметаллических включений, и долговечность уменьшается.

Библиографический список

1. **Паисов, И.В.** Термическая обработка стали и чугуна / И.В. Паисов. – М.: Изд-во «Металлургия». 1970. – 264 с.
2. Жаропрочная сталь 08X17H34B5T3Ю2РЛ. ГОСТ 5632-72.
3. Пат. на изобретение № 2416669 С 22 С 38/50. Жаропрочная сталь / Зиновьев Ю.А. и др. Бюллетень № 11. 2011.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

**Yu.A. Zinoviev, A.A. Kolpakov, I.O. Leushin, V.D. Shvetsov,
G.I. Beliavsky, A.M. Timofeev**

INCREASING THE LONG-TERM STRENGTH OF HEAT-TREATING FURNACES HEATPROOF PRODUCTS

The article suggests results of research into a new heatproof alloy for heat-treating furnaces. The long-term strength of chains links has more than quadrupled.

Key words: heatproof alloy, long-term strength, chains links, heat-treating furnaces.