

Послестендовые исследования обечаек из малолегированного сплава ВХ-2К с защитным покрытием в составе жаровой трубы

А. Н. Ракицкий, Ю. Е. Зубец, Н. П. Бродниковский,
Н. Д. Бега, С. А. Фирстов, Г. Ф. Мьяльница*, А. В. Косой*

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: Brodnikovsky@ipms.kiev.ua
*НПО “Машпроект”, Николаев, Украина

Проведены исследования послестендовых испытаний корпуса высокотемпературной жаровой трубы камеры сгорания, состоящей из двухслойных полуцилиндров, в которых в качестве материала первой стенки использовали листовой материал из сплава на основе хрома ВХ-2К с защитным слоем системы Y—Cr—O. Установлено, что при испытаниях по заданной программе указанный слой обеспечивает эффективную защиту сплава от насыщения азотом при высокой температуре. В исследуемом материале с защитным слоем сохраняются механические характеристики на высоком уровне, то есть практически без особых изменений по сравнению с исходным сплавом.

Ключевые слова: малолегированный сплав хрома, испытания, структура.

В течение ряда лет проводились научные изыскания по созданию на основе хрома жаропрочных сплавов с низкотемпературной и технологической пластичностью, а также разрабатывались технологические процессы их производства. Достигнутый запас пластичности позволил получить из малолегированных сплавов хрома различные пластичные полуфабрикаты (пруток, лист, фольга).

Сочетание высоких характеристик сопротивления высокотемпературному окислению и солевой коррозии при удовлетворительной жаропрочности и низкотемпературной пластичности делает малолегированные сплавы хрома типа ВХ-2К, ВХМ перспективными в качестве высокотемпературного материала малонагруженных деталей горячего тракта (ГТД). Их использование позволяет значительно повысить рабочую температуру газа (на 200—300 °С), а следовательно, и КПД газотурбинной установки. В качестве высокотемпературного материала для малонагруженных деталей ГТД применялся малолегированный сплав на основе хрома типа ВХ-2К [1].

Разработанная к настоящему времени технология листовой прокатки сплава ВХ-2К [2] позволяет получать листы, пригодные для изготовления из них методами гибки, штамповки малонагруженных деталей и узлов камеры сгорания ГТД.

Конструкция высокотемпературной жаровой трубы представляла собой двухслойный цилиндр, в котором в качестве материала первой стенки использовали листовой материал из сплава на основе хрома ВХ-2К

© **А. Н. Ракицкий**, Ю. Е. Зубец, Н. П. Бродниковский, Н. Д. Бега,
С. А. Фирстов, Г. Ф. Мьяльница, А. В. Косой, 2018

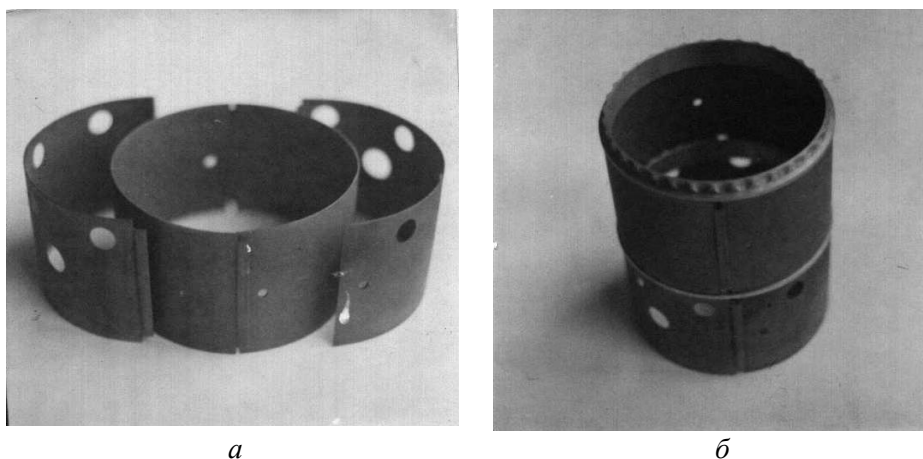


Рис. 1. Общий вид обечаек камеры сгорания из малолегированного сплава хрома ВХ-2К: *а* — перед сборкой; *б* — обечайки в сборе.

с защитным слоем системы $Y-Cr-O$ в виде полуцилиндров (обечаек) (рис. 1) в количестве 4 штук. Обечайки закрепляли на корпусе с помощью продуваемых зацепов, а также фиксаторов таким образом, чтобы термические напряжения несущего кольца и сегментов не были взаимно связаны.

В качестве исходного материала применяли листы толщиной $\delta = 1,2—1,3$ мм из малолегированного сплава хрома, полученные горячей и теплой прокаткой литых заготовок. Защитный слой системы $Y-Cr-O$ наносили на поверхность обечаек ионно-плазменным методом с одновременным напылением Cr и Y в присутствии кислорода. После нанесения защитного слоя проводили формирующий отжиг.

Испытания осуществляли в продуктах сгорания дизельного топлива с добавками солевых компонентов $NaCl$ и Na_2SO_4 до температуры $1000\text{ }^{\circ}C$ (время выхода на режим $0,5$ мин, выдержка 1 мин при этой температуре и охлаждение воздухом в течение 2 мин до температуры $60\text{ }^{\circ}C$). Длительность одного цикла составляла $3,5$ мин. Число тепло-смен — 1000 циклов. После термоциклирования проведена изотермическая выдержка при $950\text{ }^{\circ}C$ в течение 9 ч работы жаровой трубы при температуре газа на выходе из трубы $950\text{ }^{\circ}C$. Обечайки работали без охлаждения. Осмотр проводили через 20 циклов. Температуру металла измеряли в контрольных точках термопарами, прикрепленными жаростойким составом оксидов на наружных частях сегментов.

После испытаний обечайки подвергали металлографическому анализу, исследованию структуры и свойств металла, а также рентгенофазовому анализу защитного слоя.

При визуальном осмотре обечаек обнаружено, что несущее кольцо из сплава ВЖ-98 разрушилось в стадии расплавления и уноса. Самопроизвольное расплавление и унос крепежного кольца из ВЖ-98 в результате перегрева всей сборки изменили характер нагрузки от крепления обечаек, вызвали образование радиальной макротрещины на одном сегменте после второго этапа испытаний. Наблюдалось растрескивание защитного слоя при поперечных перегибах, возникших в результате изменения схемы закрепления обечаек при выгорании несущего кольца. Это свидетельствует



Рис. 2. Внешний вид обечайки после испытаний в продуктах сгорания топлива.

о том, что в месте сборки жаровой трубы при испытаниях была достигнута температура, близкая или превышающая $T_{пл}$ сплава ВЖ-98. Уноса защитного слоя на деталях из сплава на основе хрома не обнаружено. Сколы, оплавления, эрозионные и коррозионные повреждения отсутствовали. Макротрещины не просматривались. Произошло изменение цвета внутренней поверхности на всех четырех обечайках, наружной — только на двух, а также налипание продуктов сгорания топлива (рис. 2) вблизи соединения обечайек с несущим кольцом. Защитный слой сохранился на внутренней и наружной сторонах. Отмечено некоторое увеличение толщины защитного слоя.

При исследовании структуры металла наблюдается разнотернистость металла по толщине обечайек, находившихся на выходе потока продуктов сгорания топлива (рис. 3). Размер зерна у поверхности меньше, чем в сердцевине. Зернистость металла обечайек, расположенных на входе продуктов сгорания топлива, в приповерхностном слое и в центральном практически не различалась и составляла ~ 50 мкм. В исходном состоянии обечайки не имеют различия в зернистости в этих слоях. Увеличение размера зерна в обечайках после испытаний по сравнению с размером зерна в исходном состоянии ($T_{рекр} = 1100$ °С) свидетельствует о том, что одна пара обечайек находилась при температуре выше 1100 °С.

Электронно-микроскопические исследования (ТЭМ) структуры обечайек показали, что покрытия предотвратили проникновение азота в хром в процессе испытаний. Нитриды хрома не обнаружены в этом случае ни у поверхности, ни в объеме изделия. На рис. 4 приведены для сравнения микроструктуры сплава ВХ-2К после азотирования и с защитным слоем после стендовых испытаний.

Проведены испытания механических свойств листового материала на растяжение в области температур хрупковязкого перехода $20\text{—}400$ °С,

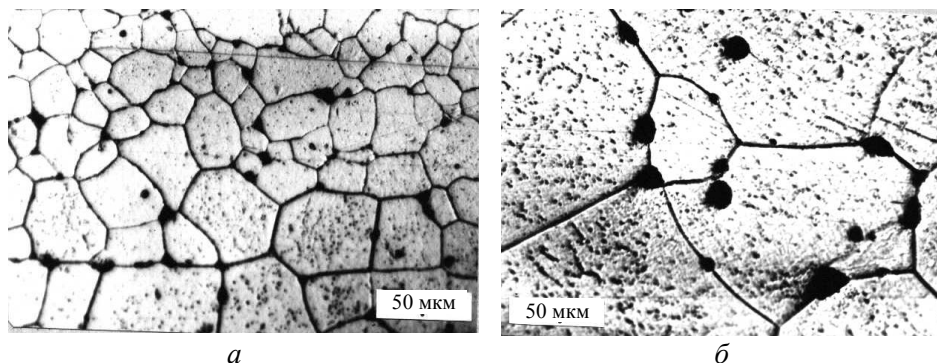


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения обечайки, находящейся на выходе потока продуктов сгорания топлива: *а* — приповерхностный слой обечайки; *б* — центральный слой.

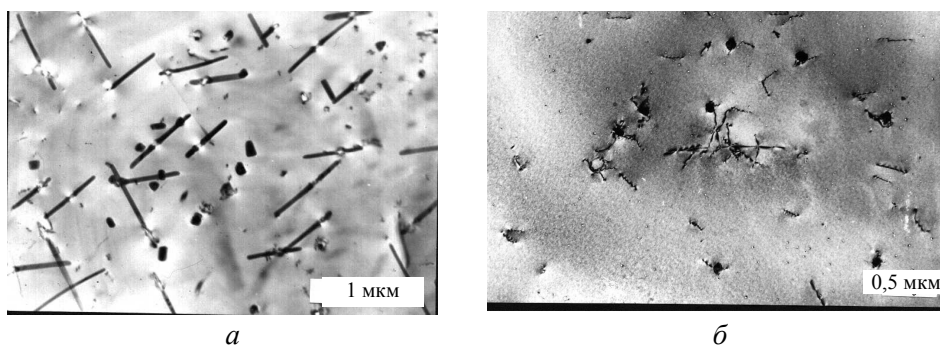


Рис. 4. ТЭМ микрофотографии структуры листового материала хрома: *а* — без защитного слоя после азотирования [3]; *б* — после испытаний в продуктах сгорания топлива.

при 600 и 800 °С. Данные механических свойств исходного металла и после испытаний практически одинаковые, то есть стендовые испытания не оказали существенных изменений на несущую способность материала.

Однако следует отметить, что нанесенный на обечайки защитный слой вызвал повышение $T_{\text{хл}}$ листового материала. Это обусловлено используемой технологией формирования защитного слоя и его свойствами. Стравливание защитного слоя восстанавливает низкое значение $T_{\text{хл}}$ (–10 °С). И после проведения стендовых испытаний и стравливания защитного слоя листа низкотемпературные свойства остались на уровне исходного материала.

Рентгенофазовый анализ защитного слоя, проведенный на установке ДРОН-3 в хромовом излучении, в исходном состоянии и после стендовых испытаний показал, что в защитном слое и в листовом сплаве ВХ-2К нитрид хрома не обнаружен. Результаты исследования фазового состава представлены в таблице. Анализ данных свидетельствует о том, что защитный слой многокомпонентный и состоит из оксида иттрия Y_2O_3 , оксида хрома Cr_2O_3 и хромита иттрия YCr_2O_3 . В процессе стендовых испытаний по заданной программе защитный слой сохранился. Произошло перераспределение количества фаз в сторону образования стабильного соединения хромита иттрия. Рентгенофазовый анализ участков обечайки с наростами темно-серой окраски показал, что они

Фазовый состав и относительное содержание фаз защитного слоя обечаек по данным рентгенофазового анализа

Состояние защитного слоя	Относительное содержание фаз защитного слоя J , отн. ед.			
	$YCrO_3$	Cr_2O_3	Y_2O_3	Cr_2N
Исходное состояние	82	8	238	Нет
После стендовых испытаний, внутренняя сторона обечайки	54	30	Нет	Нет
После стендовых испытаний, наружная сторона обечайки	70	12	80	Нет

не имеют кристаллической структуры и находятся в аморфном состоянии. Очевидно, участки нароста образовались из-за конденсации продуктов сгорания, в том числе и углерода в аморфном состоянии.

На основании полученных данных можно сделать заключение, что при испытаниях по заданной программе покрытие системы Y—Cr—O обеспечивает эффективную защиту сплава от насыщения азотом при высокой температуре. В исследуемом материале с защитным слоем сохраняются механические характеристики на высоком уровне, то есть практически без особых изменений по сравнению с исходным сплавом. При нанесении защитного слоя температура хладноломкости несколько повышается, однако работоспособность изделия при этом существенно не снижается.

1. А. с. 49182 СССР. Сплав на основе хрома / [Г. В. Карсанов, И. О. Панасюк, А. Н. Ракицкий и др.] // БИ. — 1975. — № 6.
2. А. с. 1343628 СССР. Способ получения листов из малолегированного хрома / [Г. А. Григорьева, С. В. Инденбаум, Г. В. Карсанов и др.] // БИ. — 1987. — № 6.
3. Ракицкий А. Н. Влияние дислокационной структуры и состояния примесей на механические свойства сплава Cr—0,5La—0,03N / [А. Н. Ракицкий, В. А. Писаренко, Е. В. Турцевич и др.] // Металлофизика. — 1984. — 6, № 6. — С. 79—84.

Післястендові дослідження обечайки з малолегованого сплаву хрому VX-2K з захисним покриттям в складі жарової труби

А. М. Ракицкий, Ю. Ю. Зубець, М. П. Бродниковський, М. Д. Бега,
С. О. Фірстов, Г. Ф. Мьяльница, О. В. Косой

Проведено дослідження після випробувань корпусу високотемпературної жарової труби камери згорання, яка складається з двошарових півциліндрів, в яких як матеріал першої стінки використовували листовий матеріал із сплаву на основі хрому VX-2K з захисним шаром системи Y—Cr—O. Встановлено, що під час випробування по заданій програмі вказаний шар забезпечує ефективний захист сплаву від насичення азотом за високої температури. В дослідженому матеріалі з захисним шаром зберігаються механічні характеристики на високому рівні, тобто практично без особливих змін в порівнянні з вихідним сплавом.

Ключові слова: малолегований сплав хрому, випробування, структура, захисний шар, температура.

After standing research of shells from protective layer of low-alloyed VX-2K alloy in structure of a combustion chamber

A. Rakitsky, Yu. Zubets, M. Brodnikovsky, M. Bega, S. Firstov,
G. Myalnitsa, A. Kosoy

Standing tests and after standing research of the high-temperature flame tube of the combustion chamber consisting of two-layer half-cylinders were studied, in which sheet material from chromium-based VX-2K alloy with a protective Y—Cr—O system was used as the first wall material. It has been established that when tested according to a given program, a protective layer provides effective protection of the alloy against nitrogen saturation at high temperature. The investigated material with a protective layer maintains mechanical characteristics at a high level and virtually no significant changes compared to the original alloy.

Keywords: low-alloyed chromium alloy, test, structure, protective layer, temperature.