

Влияние церия на повышение критической температуры жаропрочности титанового сплава BT1-0

И. В. Моисеева, В. К. Пищак

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев

Показано, что легирование титанового сплава BT1-0 малыми добавками Ce (0,05% (мас.)) приводит к повышению критической температуры жаропрочности этого сплава.

Ключевые слова: титановые сплавы, жаропрочность, легирующие элементы, критическая температура жаропрочности.

Введение

Влияние церия на жаропрочность металлических материалов исследовалось достаточно подробно [1—3], в частности и для титановых сплавов [2, 3]. Из всех характеристик жаропрочности в этих работах изучали в основном длительную прочность (время до разрушения при определенных σ и T), а также величину деформации образцов за определенное время испытания на ползучесть.

Однако есть еще одна важная характеристика жаропрочности металлических материалов. Это критическая температура жаропрочности [4]. Известно, что с повышением температуры прочностные характеристики металлов и сплавов понижаются. При достижении критической температуры прочность падает настолько, что металлические материалы практически невозможно применять для изготовления промышленных конструкций, работающих при повышенных температурах [4].

Согласно современным представлениям, такое снижение высокотемпературной прочности обусловлено развитием процессов термического возврата, что возможно в том случае, когда энергия активации высокотемпературной деформации становится равной энергии активации самодиффузии ($Q_d = Q_{sd}$) [5]. Для легированных сталей и никелевых сплавов максимальная температура жаропрочности находится в интервале $0,6—0,7T_{пл}$, в то время как для титановых сплавов она колеблется в интервале $0,35—0,40T_{пл}$.

Показано [6], что причиной низкой температуры жаропрочности титановых сплавов является особое строение кристаллической ГПУ решетки титана ($c/a < 1,633$). При нагревании металла с решеткой таких параметров в нем происходит аномально быстрое увеличение ангармонических колебаний и возникает анизотропия коэффициентов диффузии в направлениях c и a [6], что и приводит к снижению температуры жаропрочности.

Логично предположить, что для повышения критической температуры жаропрочности титана и его сплавов необходимо увеличить соотношение c/a . В работе [7] приведены химические элементы, которые способствуют этому. Отметим, что среди этих химических элементов есть церий, который существенно повышает соотношение c/a .

Для того чтобы выяснить, может ли увеличение c/a титанового сплава привести к повышению его жаропрочности, в настоящей работе проведено легирование церием титанового сплава ВТ1-0 и исследовано влияние такого легирования на изменение его критической температуры жаропрочности.

Материал и методика

В качестве исходного материала выбран титановый сплав ВТ1-0, который имеет в своем составе такие дополнительные химические элементы, как Al (0,7% (мас.)), Fe (0,3%), Si (0,1%) и O (0,2%). Слитки с церием получали в вакуумной электропечи в среде аргона. Церий вводили в сплав в виде стружки. Слиток ВТ1-0 с церием массой 30 г содержал примерно 0,05% церия по расчету.

Прокатку сплава в пруток диаметром 8 мм осуществляли в β -области при температуре 1100 °С. Термическую обработку прутков проводили в вакууме $5 \cdot 10^{-5}$ Па при температуре 800 °С 2 ч. Влияние церия на изменение критической температуры жаропрочности сплава ВТ1-0 изучали, определяя температурную зависимость как механических, так и других физических характеристик.

Поскольку при температурах выше критической температуры жаропрочности энергия активации высокотемпературной деформации Q_d равна энергии активации самодиффузии Q_{sd} , определив температуру, при которой $Q_d = Q_{sd}$, можно установить критическую температуру жаропрочности. Одним из простых и доступных методов определения температуры, при которой $Q_d = Q_{sd}$, является метод изучения температурной зависимости горячей твердости металлов [8]. Зависимость горячей твердости от температуры описывается выражением $HV = A_1 \exp\{Q_d/(3kT)\}$, где A_1 — константа, не зависящая от температуры; k — постоянная Больцмана; T — температура. Перестроив кривую зависимости горячей твердости от температуры в логарифмических координатах, можно из графика определить температуру, при которой $Q_d = Q_{sd}$ [8].

Помимо механических характеристик, усиление ангармонических колебаний и возникновение анизотропии коэффициентов диффузии в направлениях c и a при нагреве титановых сплавов оказывают существенное влияние и на температурные зависимости таких физических характеристик, как коэффициент термического расширения и энтальпия металлов [9]. Температурные зависимости этих характеристик измеряли с помощью стандартных установок — автоматизированного вакуумного дилатометра и установки для высокотемпературного дифференциального термического анализа. В основе поведения титановых сплавов при нагреве лежат одни и те же физические процессы: аномальное увеличение ангармонизма с повышением температуры и анизотропия коэффициентов диффузии вдоль осей c и a . Поэтому изучение температурных зависимостей физических характеристик дает возможность прогнозировать изменение критической температуры жаропрочности при легировании сплава ВТ1-0 церием.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены данные по изменению температурной зависимости горячей твердости исследованного сплава по сравнению с нелегированным церием сплавом ВТ1-0. Наибольшую твердость при

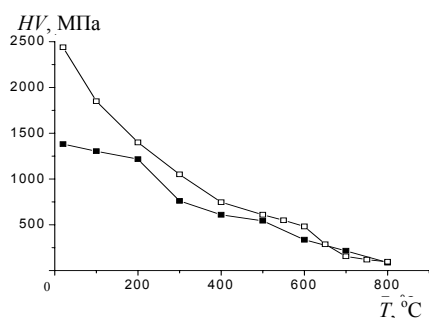


Рис. 1. Температурная зависимость горячей твердости исходного сплава ВТ1-0 (■) и легированного 0,05% (мас.) Се (□).

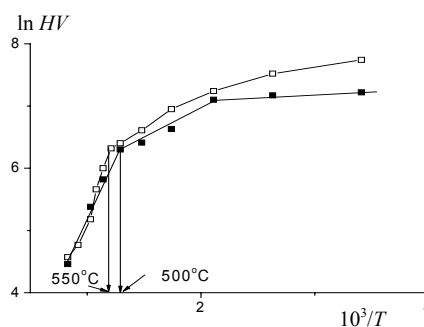


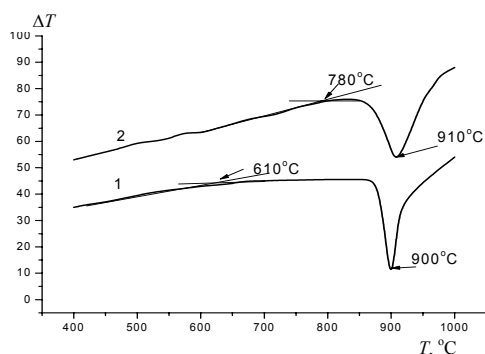
Рис. 2. Горячая твердость исходного сплава ВТ1-0 (■) и легированного 0,05% (мас.) Се (□) в координатах $\ln HV—10^3/T$.

низких температурах имеет сплав ВТ1-0 + 0,05% (мас.) Се. Перестройка кривых зависимости горячей твердости от температуры в логарифмических координатах позволяет определить температуру, при которой $Q_d = Q_{sd}$. На рис. 2 показаны результаты, полученные после перестройки данных рис. 1 в координатах $\ln HV—10^3/T$ для сплавов ВТ1-0 и ВТ1-0 + 0,05% (мас.) Се.

Анализ кривых, приведенных на рис. 2, выявил ряд прямолинейных участков, каждый из которых характеризуется определенной энергией активации деформации [8]. Точка перехода от среднетемпературного участка к высокотемпературному (рис. 2) и определяет температуру T_k , при которой происходит переход от низкотемпературных (контролируемых не диффузионными процессами) механизмов деформации к высокотемпературным (контролируемых диффузионным возвратом, $Q_d = Q_{sd}$). Температуру T_k можно условно назвать критической температурой жаропрочности, поскольку выше нее начинается быстрое падение прочности титановых сплавов и сплавы теряют свою жаропрочность [4].

Согласно данным, приведенным на рис. 2, в сплаве с 0,05% (мас.) Се наблюдается смещение температуры T_k на 50 ± 5 °С в сторону более высоких температур. Таким образом, повышение температуры T_k происходит в сплаве с достаточно малым количеством Се (0,05%).

Данные высокотемпературного дифференциального термического анализа (ВДТА) этого сплава представлены на рис. 3. Температуру, при которой наблюдается излом на кривых $\Delta T—T$, определяли методом проведения касательных на прямолинейных участках кривой. Точка пересечения касательных указывает на температуру излома на кривых ВДТА. Температура первого излома на кривых ВДТА и есть температура потери жаропрочности титанового сплава T_d , определенная методом ВДТА [9]. Для нелегированного сплава ВТ1-0 эта температура равна 610 ± 5 °С. Согласно кривым на рис. 3, при этой температуре в сплаве начинается $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение, которое заканчивается при 900 ± 5 °С.



Для нелегированного сплава ВТ1-0 эта температура равна 610 ± 5 °С. Согласно кривым на рис. 3, при этой температуре в сплаве начинается $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение, которое заканчивается при 900 ± 5 °С.

Рис. 3. Кривые ВДТА для исходного сплава ВТ1-0 (1) и легированного 0,05% (мас.) Се (2).

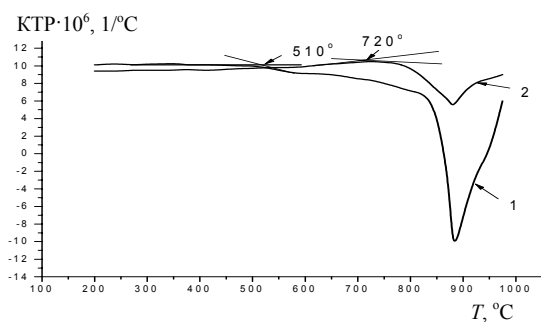


Рис. 4. Изменение КТР исходного сплава ВТ1-0 (1) и легированного церием (2) в зависимости от температуры.

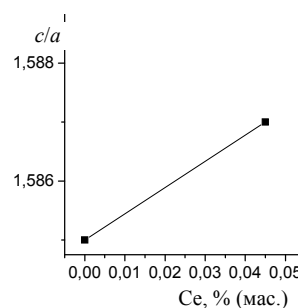


Рис. 5. Изменение величины c/a в сплаве ВТ1-0, легированном церием.

Легирование сплава церием значительно повышает T_d . В сплаве ВТ1-0 с 0,05% Се температура T_d возрастает до 780 ± 5 °С. Таким образом, измерения методом ВДТА показывают повышение критической температуры жаропрочности на 170 °С.

На рис. 4 приведены данные изменения коэффициента термического расширения в титановом сплаве ВТ1-0, легированном церием. Сопоставление кривых на рис. 4 обнаруживает заметное увеличение температуры T_d до 720 °С в легированном церием сплаве. Следовательно, легирование сплава ВТ1-0 церием в количестве 0,05% (мас.) приводит к повышению критической температуры жаропрочности (определенной по данным КТР) на 210 ± 5 °С.

По данным измерения КТР, легирование Се практически не изменяет температуру полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения сплава ВТ1-0. Этот результат, также как и данные ВДТА относительно температуры полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения сплава ВТ1-0 (рис. 3), позволяет утверждать, что церий не изменяет температуру $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, однако он повышает критическую температуру жаропрочности.

Поскольку предполагалось, что церий увеличивает соотношение c/a и тем самым способствует повышению температуры жаропрочности, были проведены измерения рентгеновским методом величины c/a в нелегированном и легированном церием сплаве ВТ1-0. Результаты этих измерений приведены на рис. 5. Видно, что добавка церия, действительно, повышает величину c/a в сплаве ВТ1-0.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что легирование титанового сплава ВТ1-0 церием приводит к увеличению температуры жаропрочности этого сплава.

Механические испытания, проведенные методом измерения горячей твердости, показывают повышение температуры T_k , при которой $Q_d = Q_{sd}$, на 50 °С.

Данные ВДТА обнаруживают, что температура T_d , при которой наблюдается излом на кривых $\Delta T - T$, увеличивается в сплаве ВТ1-0, легированном церием, на 170 °С. Рост температуры T_d в данном случае обусловлен возрастанием концентрации вакансий, изменением теплоемкости и аномальным ростом ангармонизма.

Согласно данным температурной зависимости КТР, температура T_k , при которой в сплаве ВТ1-0 с церием наблюдается отклонение от

линейности этой зависимости в сторону уменьшения КТР, увеличивается на 210 °С. В этом случае повышение T_k обусловлено аномальным возрастанием ангармонических колебаний и изменением электронной структуры в сплаве, легированном церием.

Таким образом, проведенные различными физическими методами исследования температурных зависимостей физических характеристик показывают, что легирование церием повышает критическую температуру жаропрочности титанового сплава VT1-0. В то же время оказывается, что величина критической температуры жаропрочности в сплаве VT1-0 + 0,05% Ce зависит от метода ее определения. Причиной этих различий может быть сложность тех физических процессов, которые лежат в основе температурных зависимостей измеряемых физических характеристик.

Однако несомненно, что на изменение критической температуры жаропрочности влияет увеличение соотношения c/a , вызванное легированием титанового сплава VT1-0 церием.

1. Савицкий Е. М. Перспективы исследования и применения РЗМ // Редкоземельные металлы и сплавы. — М.: Наука, 1971. — С. 8—16.
2. Улякова Н. М. Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и структуру жаропрочного титанового α -сплава // Металлы и термич. обработка материалов. — 1994. — № 3. — С. 30—32.
3. Zhang Jinxi, Xu Jialong, Chen Guoliang et al. The effect of B and Ce on the mechanical behaviour of a titanium alloy // Scripta Metal. — 1992. — 26, No. 1. — P. 1—6.
4. Гуляев А. П., Масленков С. Б. Перспективы развития жаропрочных сплавов // Структура и свойства жаропрочных металлических материалов / Под ред. Н. В. Агеева. — М.: Наука, 1973. — С. 29—41.
5. Пуарье Ж. П. Ползучесть кристаллов. — М.: Мир, 1988. — 290 с.
6. Журавльов А. Х., Івасишин О. М., Куліш М. П. та ін. Дифузія в анізотропних ГЦУ-кристалах та її вплив на високотемпературну деформацію // Металлофіз. новітні технології. — 2005. — 27, № 7. — С. 895—903.
7. Цвиккер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 510 с.
8. Бондарчук В. И., Івасишин О. М., Моисеева И. В. и др. Влияние скоростной термообработки на высокотемпературную деформацию титановых сплавов // Металлофіз. новітні технології. — 1999. — 21, № 2. — С. 117—123.
9. Шишкин В. А., Белоцкая А. А., Моисеева И. В., Пищак В. К. Сравнительный анализ температурных зависимостей физических характеристик титановых сплавов // Электронная микроскопия и прочность материалов. — 2006. — Вып. 13. — С. 95—109.

Вплив церію на підвищення критичної температури жароміцності титанового сплаву VT1-0

I. V. Moiseeva, V. K. Pischak

Показано, що легування жароміцного титанового сплаву VT1-0 малими домішками Ce (0,05% (мас.)) приводить до підвищення критичної температури жароміцності цього сплаву.

Ключові слова: титанові сплави, жароміцність, легуючі елементи, критична температура жароміцності.

Ce effect on the enhancing of critical temperature of high-temperature strength of titanium alloy VT1-0

I. V. Moiseeva, V. K. Pischak

As shown, that alloyage of the high temperature titanium alloy VT1-0 the microaddition of Ce (0,05% (wt.)) caused to increase of the critical temperature this alloy.

Keywords: titanium alloys, high-temperature strength, alloying elements, critical temperature of high-temperature strength.