

Алексей Владимирович Шалин¹, Степушин Александр Сергеевич¹, Ольга Николаевна Гвоздева¹, Павел Александрович Смирнов^{1*}, Артём Александрович Смирнов¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ

*cherepashkasm@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОГО ОТЖИГА НА КИНЕТИКУ ДЕГАЗАЦИИ ВОДОРОДА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

Рассмотрена возможность управления процессом структурообразования в промышленном двухфазном титановом сплаве мартенситного класса ВТ6 с помощью термоводородной обработки. Установлено, что дегазация водорода при вакуумном отжиге происходит и при нагреве и при выдержке и обуславливается различными причинами. Показано, что управляя температурно-временными параметрами вакуумного отжига можно изменять морфологию и размер структурных составляющих, формируя структуры от крупнопластинчатой до мелкодисперсной.

Ключевые слова: термоводородная обработка титановый сплав, фазовые превращения водород, вакуумный отжиг, кинетика

Alexsey V. Shalin, Aleksandr S. Stepushin, Olga N. Gvozdeva, Pavel A. Smirnov, Artem A. Smirnov

INFLUENCE OF VACUUM ANNEALING PARAMETERS ON HYDROGEN DEGASSING KINETICS AND PHASE TRANSFORMATIONS IN TITANIUM ALLOYS

The possibility of controlling structure formation processes in the industrial two-phase VT6 titanium alloy of the martensitic class using thermal hydrogen treatment is considered. It is established that hydrogen degassing during vacuum annealing occurs both during heating and during holding and is caused by various reasons. It is shown that by controlling the temperature-time parameters of vacuum annealing it is possible to change the morphology and size of the structural components, forming a variety of structures from coarselamellar to finely dispersed ones.

Keywords: thermal hydrogen treatment, titanium alloy, phase transformations, hydrogen, vacuum annealing, kinetics.

Введение

Титановые сплавы давно зарекомендовали себя как конструкционный материал широко применяющийся в различных изделиях современной промышленности [1]. Особый интерес представляют изделия, которые в

процессе эксплуатации должны обеспечивать комплекс противоположных свойств, т.к. работают в сложно нагруженных условиях. Например, элементы эндопротезов коленного сустава, должны обладать высокой стойкостью к износу и выдерживать высокоамплитудные циклические нагрузки. Другим примером является броневая защита, которая должна обеспечивать эффективное поглощение энергии удара и при этом снижать скорость распространения трещин. Поэтому в таких изделиях создают равностороннюю и одностороннюю (линейную) градиентную структуру (рис. 1), в которой наблюдается плавный переход от одного типа структуры на поверхности к другому типу в центре или с противоположной стороны, например, от дисперсной к пластинчатой.

Одним из эффективных способов управления структурой титановых сплавов является термоводородная обработка, основанная на обратимом легировании сплавов водородом [2]. А основными превращениями за счет, которого формируется определённый тип структуры, являются полиморфное $\beta \rightarrow \alpha$ - и мартенситное $\beta \rightarrow \alpha''$ - превращения. В серии работ [3-5] подробно исследуется кинетика взаимодействия титана с водородом и объясняются закономерности формирования структуры. А вот исследований, посвящённых особенностям структурообразования при последующей дегазации водорода было проведено мало.

Поэтому цель настоящей работы состояла в изучение кинетики процесса дегазации водорода из титанового сплава ВТ6 и влияние параметров вакуумного отжига на формирование фазового состава и структуры сплава.

Результаты исследования и их обсуждение

Образцы из сплава ВТ6 в отожжённом состоянии имеют крупнопластинчатую структуру, представленную β -зёрнами, окружёнными α -оторочкой и α -пластинами. После объёмного наводороживающего отжига (после поглощения водорода следует изотермическая выдержка) при температуре 850°C до концентрации 0,75% формируется двухфазная структура, представленная пластинами α' -мартенсита и β -фазой. А увеличение водорода до 0,9% способствует более полному завершению $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения с формированием структуры, представленной только β -зёрнами.

На первом этапе работы была исследована кинетика процесса дегазации водорода в процессе вакуумного отжига. Вакуумный отжиг (ВО) проводили в интервале температур от 850°C до 625°C в течении от 4 до 8 часов.

Анализ кинетических кривых по температуре показал, что на них можно условно выделить несколько характерных участков. Для всех температур вакуумного отжига примерно до 600°C наблюдается участок №1, на котором протекает только нагрев образцов при практически постоянном давлении. В интервале температур 600° – 750°C выделяется участок №2, которому свойственно интенсивное увеличение давления, связанное с началом «растворения» оксидной плёнки (рис. 1 а).

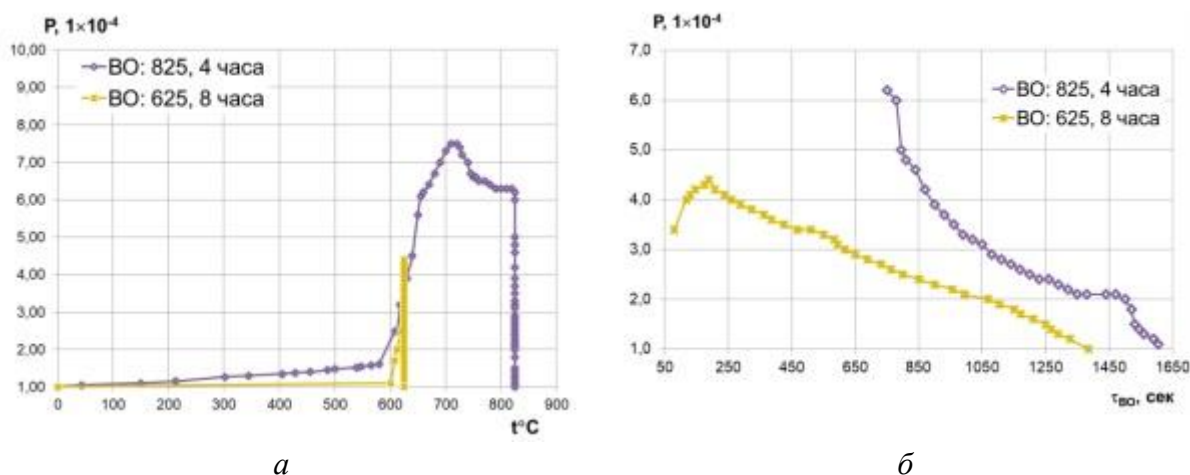


Рис. 1. Кинетические кривые дегазации водорода в процессе вакуумного отжига от температуры (а) и от времени (б)

Резкое уменьшение давления с увеличением температуры нагрева на участке №3 говорит о непосредственном начале дегазации водорода из приповерхностных слоёв. На участке №4 (выше 750°C) наблюдается выход на плато, т.е. при повышении температуры давление остаётся неизменным, что характерно для протекания внутренней выравнивающей диффузии атомов водорода (рис. 1 а). При достижении температуры вакуумного отжига начинается выдержка при постоянной температуре, а на кинетической кривой выявляется участок №5, для которого характерно интенсивное снижение давления, связанное с наибольшей равномерной по объёму дегазацией водорода (рис. 1 а). При этом по мере выхода водорода интенсивность уменьшения давления замедляется (рис. 1, б). Наибольшую продолжительность имеет участок №5, а наименьшую – №2 и №3 (табл.)

Таблица

Продолжительность дегазации водорода в зависимости от температуры вакуумного отжига

Температура ВО, $^\circ\text{C}$	Продолжительность, сек			
	Участок №2 «	Участок №3	Участок №4	Участок №5
850	325	245	230	1110
825	400	160	200	595
800	400	95	190	930
700	300	70	25	1165
625	200	—	—	1185

Общая продолжительность процесса дегазации 0,75% водорода уменьшается в 1,2 раза при снижении температуры вакуумного отжига с 850°C до 625°C (табл.)

На следующем этапе было исследовано влияние температуры вакуумного отжига на морфологию и размер структурных составляющих, в частности на α -фазу.

Проведенные исследования показали, что при температурах выше 625°C при нагреве развивается обратное мартенситное $\beta \rightarrow \alpha'$ - превращение, в

результате которого α -фаза выделяется в виде пластин длиной от 50 до 150 мкм и толщиной от 15 до 50 мкм (рис. 2). При этом при температурах от 850°C до 800°C наблюдается преимущественно гетерогенный характер зарождения и роста (рис. 2 а-в). Твёрдость такой структуры невысокая и составляет в среднем 32,0 ед. HRC. А при температуре 700°C и ниже преобладает процесс зарождения, который имеет гомогенный характер, что приводит к формированию структуры близкой к глобулярной с толстыми и короткими пластинами α -фазы и раздробленной α -оторочкой (рис. 2 г). Температура 625°C лежит ниже температуры обратного мартенситного превращения, поэтому α -фаза выделяется гомогенно из α' -мартенсита, наследуя его морфологию (рис. 2 д). Такая структура обеспечивает твёрдость порядка 38,5 ед. HRC.

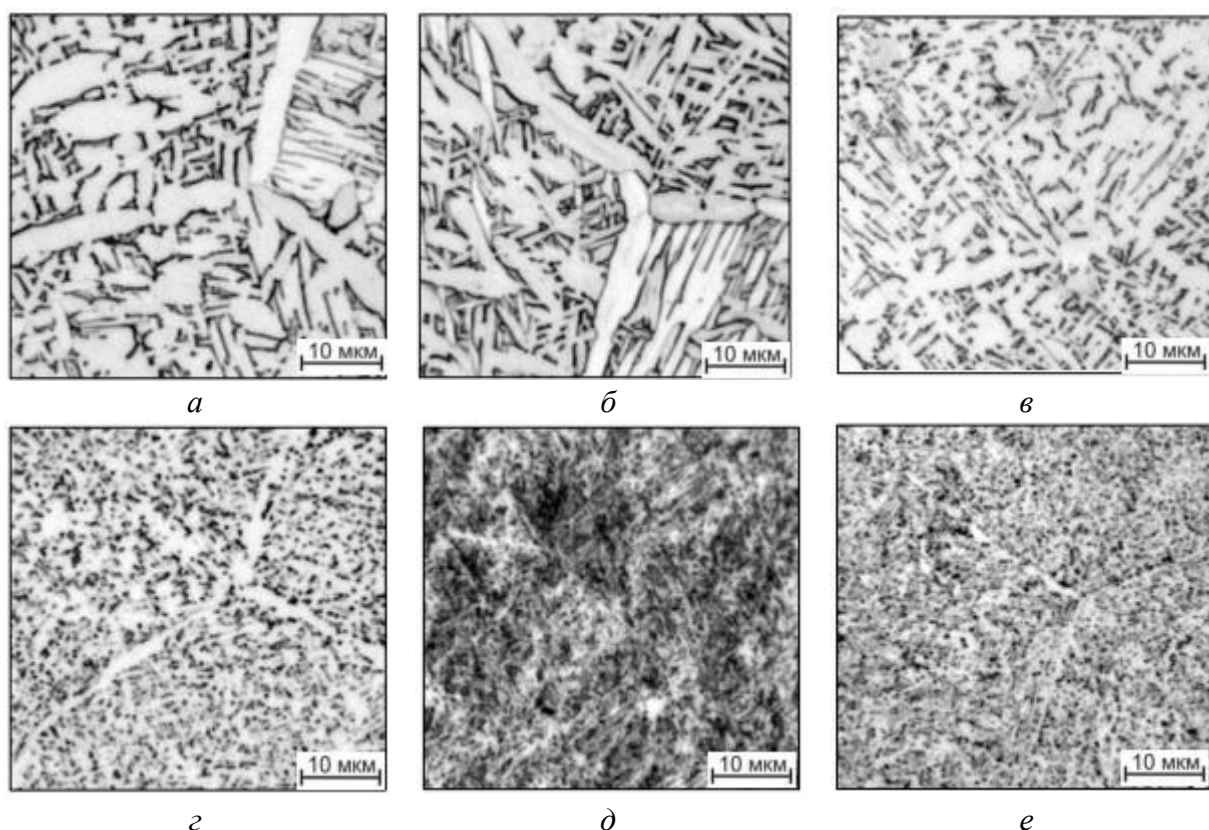


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТ6 после вакуумного отжига при температуре 850°C (а), 825°C (б), 800°C (в), 700°C (г) и 625°C (д)

Если наводороживающий отжиг до 0,9% водорода позволяет подавить мартенситное превращение и зафиксировать однофазную β -структуру, то при последующем вакуумном отжиге α -фаза будет выделяться только из β -фазы в виде мелких частиц, обеспечивая наибольшую твёрдость порядка 39,5 ед. HRC (рис. 2 е).

Проведённые аналогичные исследования на высоколегированном сплаве ВТ22 показали, что кинетика дегазации водорода имеет схожий характер, а из-за заторможенности процессов выделения, дисперсные (α - β)-структуры формируются при температурах вакуумного отжига выше 820°C

Заключение

Таким образом, на основании проведённых исследований показано, что процесс дегазации водорода начинается при температуре выше 600°C, когда «растворяется» оксидная плёнка, интенсивнее всего выделяется в процессе выдержки. Установлено, что в процессе дегазации водорода за счёт развития $\beta \rightarrow \alpha$ - или $\alpha' \rightarrow \alpha$ превращений в сплаве ВТ6 возможно формирование структуры от крупнопластинчатой до дисперсной. При этом дисперсные структуры формируются при низкотемпературном вакуумном отжиге. Показано, что с увеличением степени легированности дисперсная структура формируется при более высоких температурах вакуумного отжига.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10264, <https://rscf.ru/project/22-79-10264/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. Титановые сплавы. Состав, структура, Свойства. Справочник – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009, 520 с.
2. Водородная технология титановых сплавов / Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. – М.: МИСиС, 2002. – 392 с.
3. Скворцова С.В., Гвоздева О.Н., Шалин А.В., Степушин А.С. Исследование стойкости пластин из сплава ВТ6 с линейно изменяющейся градиентной структурой к направленному высокоскоростному воздействию // Деформация и разрушение материалов, №5, 2022, с. 26-32.
4. Скворцова С.В., Шалин А.В., Гвоздева О.Н., Степушин А.С., Журбенко А.С. Влияние концентрационно-временных условий наводороживающего отжига на насыщение водородом титанового сплава ВТ23 // Деформация и разрушение материалов, №4, 2024, с. 25-31, DOI: 10.31044/1814-4632-2024-4-25-31.
5. Скворцова С.В., Шалин А.В., Гвоздева О.Н., Степушин А.С., Зайнетдинва Г.Т. Особенности кинетики объемного и поверхностного наводороживания и формирования структуры в титановом сплаве ВТ22 // Электromеталлургия, №7, 2024, с. 3-1.