

05;12

Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов

© С.В. Лоскутов, В.В. Левитин

Запорожский государственный технический университет,
69060 Запорожье, Украина
e-mail: svl@zstu.edu.ua

(Поступило в Редакцию 14 августа 2001 г.)

Проведено исследование влияния обработки импульсами электрического тока на структуру и свойства титанового сплава ВТЗ-1. Обнаружено, что электроимпульсная обработка титановых образцов приводит к увеличению их долговечности при испытаниях на многоцикловую усталость.

Аналізу впливння потужних імпульсів електричного тока на змінення структури металів присвячен ряд робіт [1–4]. В цих дослідженнях показано, що електричний ток густоти порядку 100 MA/m^2 оказує не тільки теплове дієвство на кристаллическу решітку металу, но і специфічне впливння на структурні дефекти (електропластический ефект). Так, в роботі [1] досліджена можливість збільнення усталостної довговічності сталей путем обробки їх імпульсами електричного тока. Представляється перспективним застосувати електроімпульсну обробку к сплавам титана.

Прочностні характеристики титанових сплавів, содержачих α - і β -фазы (марок ВТЗ-1, ВТ8) отличаються високими експлуатаційними характеристиками. Обумовлено это метастабільністю α - і особливо β -модифікацій, складної кінетикою фазових превращень, сопроовождоючоїся образоуванням нових метастабільних фаз [5]. Эти превращення происходять в локальних об'ємах і кінетика їх протекання зв'язана с природою і концентрацією легируючих елементів. Терміческая обробка титанових сплавів, величина і довготривалість статических і динаміческих нагрузок, поверхнісна пластическая деформация і ряд других факторів определяють фазовий склад і кінетику фазових превращень. В результаті різного виду упрочнюючих обробок в приповерхнісному шарі деталей із титанових сплавів удається створити значительні по величині (до 850 МПа) остаточні сжимаючі напруження. Однак с форміроуванням остаточних напружень всегда зв'язані другие змінення матеріалу, также впливаючі на усталостную прочність. Накопленний експериментальний опыт дає основание передположити, что использование в качестве финішної обробки деталей, подверженних циклическим нагрузкам, імпульсів електричного тока большой густоты позволит за счет преобладающего выделения тепловой энергии на дефектах кристаллической структуры збільшити диффузійну подвижність атомів в их окрестности, привести дефектную структуру к енергетически более выгодному равновесному термодинаміческому состоянию.

Целью данной работы были рентгенодифрактометрическое исследование структурных изменений в тита-

новых сплавах после электроімпульсной обробки і определение влияния такого вида обробки на многоцикловую усталость.

Для исследований были изготовлены образцы из титанового сплава марки ВТЗ-1 в форме одинарной лопатки с размером рабочей части $2 \times 10 \times 60 \text{ mm}$. Обробку поверхности осуществляли наклепом мелкими стальными шариками, колеблющимися в ультразвуковом поле, а также с помощью виброобробки. Виброобробка состояла в том, что образцы закреплялись в кювете, содержачей рабочие элементы (керамические гранулы). При этом кювета приводилась в колебательное движение, время и амплитуда колебаний варьировались.

Для обробки образцов імпульсами електричного тока одной полярности использовали разряд конденсаторной батареи электрогідроімпульсного пресси модели Т1220. Регулировка тока через образец осуществлялась изменением длины и толщины медной проволоки взрываемого проводника. В основном обробка образцов осуществлялась імпульсами тока амплитудой порядка 170 MA/m и длительностью $10 \mu\text{s}$. Для определения температуры нагрева образцов применяли хромель-копелевую термопару, упруго прижатую в средней части образца. Очевидно, что таким образом фиксировалось несколько заниженное значение температуры разогрева образца. Нагрев образцов при обробке імпульсным током варьировался в интервале от 80 до 250°C . Измінення состояния поверхности образцов оценивались по данным измерений распределения контактной разности потенциалов (КРП).

Рентгеновская дифрактометрия образцов до и после электроімпульсной обробки проводилась на дифрактометре ДРОН-3М, работающем на линии с ПК [6]. Использовали монохроматизированное излучение линии $\text{CoK}\beta$. Остаточные макронапряжения рассчитывались методом $2\theta - \sin^2\psi$, а для определения микродеформаций и размеров блоков когерентного рассеяния применяли метод аппроксимации по уширению дифракционных линий.

Для испытаний на многоцикловую усталость образцов служил малогабаритный пьезоэлектрический вибростенд [7]. Фиксировались частота колебаний, динаміческая нагрузка и число циклов до разрушения образцов.

Характеристики структурного состояния образцов титанового сплава и результаты испытаний на усталость

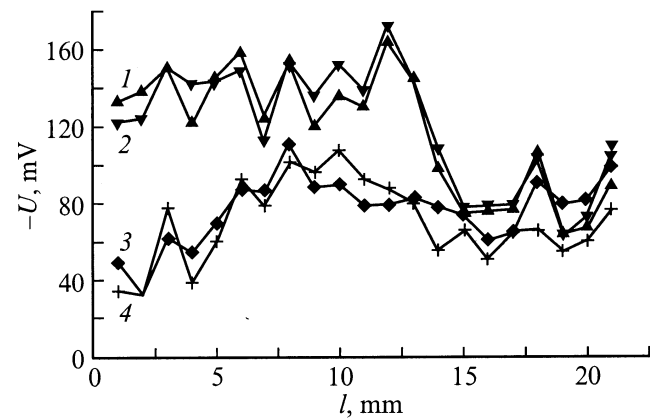
№ партии образца	Обработка	Остаточные макро-напряжения σ , МПа	Относительная микро-деформация ϵ , 10^{-3}	Размер блоков D , nm	Среднее число циклов до разрушения N , 10^6
08	Механическая шлифовка и отжиг	-82	2.5	17	0.1
	То же после импульса тока ($t = 250^\circ\text{C}$)	-103	1.7	19	0.3
07	Механическая шлифовка и отжиг	-37	2.8	18	0.5
	То же после импульса тока ($t = 250^\circ\text{C}$)	-38	2.5	16	1.2
04	Стальными шариками диаметром 1.9 mm в ультразвуковом поле, 3 min	-530	1.6	13	1.3
	То же после импульса тока ($t = 80^\circ\text{C}$)	-560	1.5	14	1.8
05	Виброамплитудная шлифовка и полировка, 30 min	-590	1.2	12	1.8
	То же после импульса тока ($t = 225^\circ\text{C}$)	-360	2.0	20	2.6
06	Виброамплитудное упрочнение керамическими гранулами диаметром 1.9 mm	-320	0.9	14	2.7
	То же после импульса тока ($t = 250^\circ\text{C}$)	-285	2.4	22	5.0

Для каждого вида механической обработки определялась предельная нагрузка, при которой образцы не выдерживали базу испытаний ($2 \cdot 10^6$ циклов). Каждая партия одного вида обработки составляла 6 образцов. Затем образцы после электроимпульсной обработки испытывались на этой предельной нагрузке, а их долговечность оценивалась по отношению к выбранной базе испытаний. В таблице представлены средние значения числа циклов до разрушения в каждой партии образцов. Отклонения от среднего не превышали 30% для всех образцов.

После электрообработки на поверхности образцов образуются окисные пленки от светло-желтого до коричневого цвета. Геометрия распределения КРП, или энергетический рельеф поверхности, при этом существенно не изменяется. Это видно на рисунке, где прослеживаются особенности рельефа при общем сдвиге кривых КРП. В районе зажима $l = 22$ mm, где образец имеет значительно большее сечение и осуществляется токосъем, не наблюдаются существенные изменения КРП. В рабочей области весь график смещается в сторону роста КРП (рост работы выхода электрона), что характерно для окисляющихся поверхностей сплавов титана.

Для определения величины остаточных напряжений в деформированных металлах измеряют углы Вульфа-Брэгга, близкие к $\pi/2$. Точность этого метода зависит от возникающих в металле при деформации ориентированных микроискажений решетки, так как из-за них может нарушиться линейная зависимость межплоскостного расстояния d от $\sin^2 \psi$ (ψ — угол между нормалью к поверхности образца и нормалью к отражающей плоско-

сти). Было обнаружено, что после обработки импульсным током улучшается плосконапряженное состояние поверхностного слоя образцов (улучшается линейность графиков в рентгеноструктурном методе определения остаточных макронапряжений " $2\theta - \sin^2 \psi$ ") [8]. По-видимому, это означает, что дефектная кристаллическая структура приповерхностного слоя металла становится в результате электроимпульсного воздействия более однородной и в приповерхностном слое реализуется плосконапряженное состояние материала.



Распределение КРП по поверхности образца: 1 — исходный, 2 — повтор через 48 h, 3 — после обработки 1 импульсом тока 8 kV при нагреве до 250°C , 4 — повтор через 48 h.

Кратковременность воздействия и сравнительно низкие температуры нагрева образцов вызывают ряд вопросов о механизмах структурных перестроек при воздействии мощных импульсов тока на кристаллическую решетку. Поэтому были выполнены эксперименты по изучению структурных изменений, вызванных влиянием нагрева образцов постоянным электрическим током и вакуумным отжигом. Образцы нагревались постоянным током до температуры 350°C, а вакуумная обработка осуществлялась при температуре 650°C в течение 3 h в вакууме не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ mm Hg.

По данным рентгенодифрактометрического анализа, для образцов, подвергнутых нагреву постоянным током, наблюдалось незначительное увеличение интенсивности дифракционных пиков. Фазовый состав при этом практически не изменился. Значительные изменения произошли в остаточных макронапряжениях: они стали растягивающимися, уменьшились микродеформации, увеличились размеры блоков мозаики. Нагрев образцов постоянным током до 350°C на воздухе приводит к образованию окисной пленки, аналогичной той, что образуется при электроимпульсной обработке.

Влияние вакуумного отжига приводило к росту интенсивности дифракционных пиков и разделению близко расположенных фаз, снятию остаточных макронапряжений. Отжиг вызывал увеличение микродеформаций и размеров блоков мозаики для поверхностей с исходными остаточными макронапряжениями в большей степени, чем для поверхностей без остаточных макронапряжений. Для образцов после ультразвуковой обработки и виброшлифовки влияние последующего отжига проявлялось в уменьшении разброса структурных параметров по образцам, макро- и микронапряжения становились практически одинаковыми для всех образцов.

Результаты измерений и испытаний представлены в таблице. Видно, что электроимпульсное воздействие благотворно сказалось на увеличении долговечности образцов, подвергнутых различным обработкам. Для образцов с поверхностным упрочнением электроимпульсная обработка привела к снижению остаточных макронапряжений. При этом выросли остаточные микронапряжения и несколько повысился размер блоков мозаики.

Данные рентгенодифрактометрического анализа свидетельствуют также об изменении фазового состава титановых сплавов при электроимпульсной обработке. Наиболее существенные изменения в процессе электрообработки претерпевают линии $(200)_\beta$ и $(110)_\beta$. Наблюдался рост интенсивности линии $(200)_\beta$, что, по-видимому, означает протекание низкотемпературного $\alpha'' \rightarrow \beta$ превращения [9].

Испытания на многоцикловую усталость показали, что долговечность образцов после обработки единичным импульсом тока, когда остаточные сжимающие напряжения релаксировали на 100–150 МПа, выросла приблизительно в 2–3 раза при тех же уровнях динамической нагрузки. Возможно, что частичное снижение уровня остаточных напряжений сопровождалось изменениями

в структуре, приводящими к увеличению усталостной прочности образцов.

На основе полученных экспериментальных данных можно считать, что при обработке титановых образцов мощным импульсом электрического тока происходят структурные изменения, отличные от аналогичного теплового воздействия постоянным током или вакуумного отжига. После обработки импульсным током улучшается плосконапряженное состояние поверхностного слоя образцов (улучшается линейность графиков в методе $2\theta - \sin^2 \psi$). В результате электроимпульсного воздействия повышается усталостная долговечность образцов из титанового сплава, подвергнутых различным поверхностным упрочняющим обработкам.

Список литературы

- [1] Зуев Л.Б., Соснин О.В., Подборонников С.Ф. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 3. С. 24–26.
- [2] Пинчук А.И., Шаврей С.Л. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 8. С. 1416–1417.
- [3] Кирьянчев Н.Е., Троицкий О.А., Клевцур С.А. // Проблема прочности. 1983. № 5. С. 101–105.
- [4] Дубовицкая Н.В., Захаров С.М., Ларионов Л.Н. // Физ. и хим. обраб. матер. 1980. № 3. С. 128–133.
- [5] Дьякова М.А., Львова Е.А., Хабдиев С.З. // ФММ. 1977. Т. 44. Вып. 6. С. 1254–1261.
- [6] Серпецкий Б.А., Левитин В.В., Лоскутов С.В., Манько В.К. // Заводская лаборатория. 1998. Т. 64. Вып. 3. С. 28–30.
- [7] Лоскутов С.В., Левитин В.В., Манько В.К., Серпецкий Б.А., Павлоткин Ю.С. // Заводская лаборатория. 1999. Т. 65. Вып. 7. С. 43–45.
- [8] Васильев Д.М., Трофимов В.В. // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50. Вып. 7. С. 20–29.
- [9] Львова Е.А., Дьякова М.А., Хабдиев С.З. // Изв. АН СССР. Металлы. 1979. № 1. С. 154–159.