



УДК 620.165.79:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-5-5

**ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО
ТИТАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

В.В. Березовский

К.О. Базалева

кандидат физико-математических наук

В.С. Калашников

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 620.165.79:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-5-5

В.В. Березовский¹, К.О. Базалева², В.С. Калашиников¹

ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Представлена температурная зависимость удельного электросопротивления технически чистого титана от температуры в интервале температур от -100 до +100°C после интенсивной пластической деформации. В качестве контроля методики измерения приведена температурная зависимость удельного электросопротивления технически чистого титана в отожженном состоянии.

Ключевые слова: *интенсивная пластическая деформация, удельное электросопротивление, титан.*

V.V. Berezovsky, O.K. Bazaleeva, V.S. Kalashnikov

ELECTRICAL RESISTIVITY OF PURE TITANIUM AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION AS A FUNCTION OF TEMPERATURE

A temperature dependence of the electrical resistivity of commercially pure titanium after severe plastic deformation was shown as a function of temperature within the range of -100/+100°C. A temperature dependence of electrical resistivity of commercially pure titanium in annealed state was offered as a measurement control technique.

Keywords: *severe plastic deformation, electrical resistivity, titanium.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]

E-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» [Federal state budgetary institution of higher professional education Bauman Moscow state technical university]

Введение

Удельное электросопротивление материала является важной характеристикой его структуры. Контроль этого параметра позволяет с высокой точностью регистрировать изменения в фазовом составе и количество дефектов структуры материала. Измерение удельного электросопротивления позволяет осуществлять технологический контроль качества изделий, к которым предъявляются повышенные требования по надежности. Например, при производстве муфт лопасти несущего винта легких вертолетов EC155 концерна Eurocopter из металлического композиционного материала системы Al-SiC проводят 100%-ный контроль удельного электросопротивления. Эта деталь относится к первому классу жизненно важных узлов, что означает – при ее разрушении в процессе полета летательный аппарат будет потерян. Контроль удельного электросопротивления позволяет гарантировать равномерность распределения частиц упрочняющей фазы в материале матрицы [1–11].

В данной работе определяли, как интенсивная пластическая деформация влияет на зависимость удельного электросопротивления технически чистого титана от температуры.

Материалы и методы

Объектом исследования служили образцы из титанового сплава ВТ1-0 размером 14×14×1 мм, полученные методом интенсивной пластической деформации (ИПД), и образцы из того же сплава размером 20×10×1,5 мм в отожженном состоянии. Заготовки титана в наноструктурном состоянии получены методом всестороннего прессования*. На первом этапе заготовки титана подвергали многократному одноосному прессованию в интервале скоростей от 10^{-3} до 10^{-2} с при последовательном ступенчатом понижении температуры с 750 до 390°C. Каждый цикл при заданной температуре включал трех- или четырехкратное одноосное прессование в пресс-форме со сменой оси деформации. На втором этапе заготовки после многократного одноосного прессования подвергали пластической деформации с помощью прокатки в ручьевых или в плоских валках. Величина суммарной деформации при прокатке составила 80–90%. После прокатки прутки и пластины отжигали при температурах 250 и 300°C в течение 1 ч [5–8].

Для сравнения и контроля работоспособности установки измеряли электросопротивление образцов из технически чистого титана в состоянии поставки – после отжига.

Измерение электросопротивления проводили в температурном диапазоне от -100 до +100°C компенсационным методом. Образец помещали в сосуд с кипящим жидким азотом, когда его температура опускалась до -100°C, затем образец нагревали до +100°C. Скорость нагрева составляла 1°C/с. Для графической интерпретации данных, полученных с помощью аналого-цифрового преобразователя, применялась программа vHeater.

Результаты

На рисунке представлены температурные зависимости удельного электросопротивления для отожженного образца и образца, подвергнутого ИПД. С ростом температуры удельное сопротивление титана в отожженном состоянии линейно возрастает (см. рисунок, *a*). Такой ход зависимости характерен для всех металлических объектов [4], в которых с ростом температуры увеличивается вклад зависящего от температуры слагаемого ρ_T .

Известно, что удельное электросопротивление металлов и сплавов состоит из двух слагаемых (правило Матиссена):

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{деф}},$$

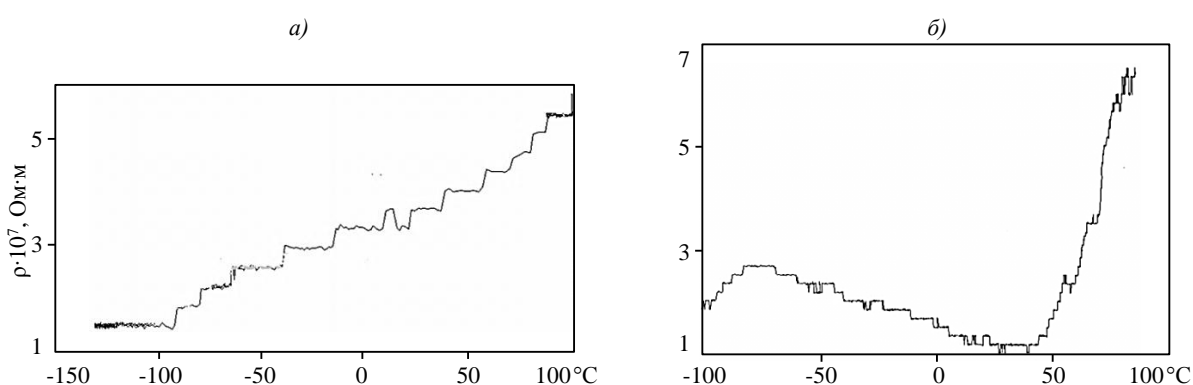
где ρ_T – зависящая от температуры часть слагаемого, характеризующая рассеяние электронов проводимости на тепловых колебаниях ионной решетки; $\rho_{\text{деф}}$ – не зависящая от температуры часть слагаемого, характеризующая рассеяние электронов на дефектах кристаллического строения.

Обсуждение и заключения

Из данных температурных зависимостей электросопротивления видно, что при температуре -100°C удельное электросопротивление недеформированного сплава составляет 1,6 Ом·м, а сплава, находящегося в наноструктурном состоянии, т. е. после ИПД: 2 Ом·м. При температуре +100°C удельное электросопротивление недеформированного и деформированного сплавов составляет 5,6 и 6,5 Ом·м соответственно. Таким образом, удельное электросопротивление сплава после интенсивной пластической деформации при этих температурах на ~20% выше, чем электросопротивление сплава до деформации. Этот рост электросопротивления, согласно научным литературным данным [3, 6–15], может быть вызван повышением концентрации дефектов кристаллического строения в процессе деформации.

* Образцы предоставлены Ю.П. Шаркеевым, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лабораторией физики наноструктурных биоконпозитов ИФПМ СО РАН.

Наиболее интересный результат зафиксирован при сравнении характера температурной зависимости электросопротивления для деформированного и недеформированного сплавов. Видно (см. рисунок, *a*), что электросопротивление обычного кристаллического α -титана непрерывно возрастает с ростом температуры. Такой ход зависимости характерен для всех металлических объектов, в которых с ростом температуры увеличивается вклад зависящего от температуры слагаемого ρ_T .



Температурная зависимость удельного электросопротивления для образцов из титанового сплава VT1-0 в отожженном состоянии (*a*) и после интенсивной пластической деформации (*b*)

Совершенно иной характер зависимости демонстрирует образец, находящийся в нанокристаллическом состоянии после ИПД (см. рисунок, *b*). После непродолжительного возрастающего участка наблюдается уменьшение удельного электросопротивления с ростом температуры. При дальнейшем росте температуры удельное сопротивление резко возрастает и приблизительно к 90–100°C достигает значений, близких к сопротивлению недеформированного образца. Вероятно, такой немонотонный характер зависимости электросопротивления от температуры связан со значительным искажением кристаллической решетки, характерным для материалов после ИПД. Причем уменьшение электросопротивления с ростом температуры не может быть объяснено уменьшением концентрации дефектов кристаллического строения при нагреве, так как при повторении эксперимента зависимость удельного электросопротивления демонстрирует тот же характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В. и др. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 373–380.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Березовский В.В. Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 16–19.
5. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 10 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В. и др. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники //Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 2. №3. С. 359–368.
7. Гришина О.И., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Серпова В.М. Аспекты применения высокопрочных и высокомодульных волокнистых металлических композиционных материалов авиационного назначения (обзор) //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 05 (viam-works.ru).
8. Милейко С.Т. Композиты и наноструктуры //Композиты и наноструктуры. 2009. №1. С. 6–37.
9. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Братчиков А.Д. и др. Структура и механические свойства наноструктурированного титана после дорекристаллизационных отжигов //Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. Спец. вып. С. 91–94.
10. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии. Томск: Изд-во НТЛ. 2008. 324 с.
11. Sharkeev Yu.P., Legostaeva E.V., Eroshenko A.Yu. et al. The Structure and Physical and Mechanical Properties of a Novel Biocomposite Material, Nanostructured Titanium-Calcium-Phosphate Coating //Composite Interfaces. 2009. V. 16. P. 535–546.
12. Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Толмачев А.И. и др. Структура и свойства объемного ультрамелкозернистого титана, полученного абс-прессованием и прокаткой //Перспективные материалы. 2009. №7. С. 107–112.

13. Шаркеев Ю.П., Поленичкин В.К. Перспективы применения ультрамелкозернистого титана в стоматологии //Перспективные материалы. 2009. №7. С. 372–377.
14. Chawla N., Chawla K.K. Metal Matrix Composites /In: Springer Science+Business Media. 2006. P. 401.
15. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.St. Perspective high-temperature ceramic composite materials //Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. S. 986–991.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenii razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. С. 7–17.
2. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Grashhenkov D.V. i dr. Metallomatrichniye kompozicionnye materialy na osnove Al–SiC [Metal matrix composites based on Al–SiC] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 373–380.
3. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 2–14.
4. Krasnov E.I., Shtejnberg A.S., Shavnev A.A., Berezovskij V.V. Issledovanie sloistogo metallicheskogo kompozicionnogo materiala sistemy Ti–TiAl₃ [Investigation metal laminate composite systems Ti–TiAl₃] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 16–19.
5. Grinevich A.V., Lucenko A.N., Karimova S.A. Raschetnye harakteristiki metallicheskikh materialov s uchedom vlazhnosti [Design characteristics of metallic materials with the humidity] //Trudy VIAM. 2014. №7. Ct. 10 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Shhetanov B.V. i dr. Metallicheskie kompozicionnye materialy na osnove Al–SiC dlja silovoj jelektroniki [Metal composite materials on the basis of Al–SiC power electronics] //Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. 2012. T. 2. №3. S. 359–368.
7. Grishina O.I., Kochetov V.N., Shavnev A.A., Serpova V.M. Aspekty primenenija vysokoprochnyh i vysokomodul'nyh voloknistyh metallicheskikh kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija (obzor) [Aspects of the use of high-strength and high-fiber metal composites aviation applications (review)] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 05 (viam-works.ru).
8. Milejko S.T. Kompozity i nanostruktury [Composites and nanostructures] //Kompozity i nanostruktury. 2009. №1. S. 6–37.
9. Sharkeev Ju.P., Eroshenko A.Ju., Bratchikov A.D. i dr. Struktura i mehanicheskie svojstva nanostrukturirovannogo titana posle dorekristallizacionnyh otzhigov [Structure and mechanical properties of nanostructured titanium after annealing dorekristallizatsionnyh] //Fizicheskaja mezomehanika. 2005. T. 8. Spec. vyp. S. 91–94.

10. Kurzina I.A., Kozlov Je.V., Sharkeev Ju.P. i dr. Nanokristallicheskie intermetallidnye i nitridnye struktury, formirujushhiesja pri ionno-plazmennom vozdejstvii [Nanocrystalline intermetallic and nitride structures, which are formed in ion-plasma exposure]. Tomsk: Izd-vo NTL. 2008. 324 s.
11. Sharkeev Yu.P., Legostaeva E.V., Eroshenko A.Yu. et al. The Structure and Physical and Mechanical Properties of a Novel Biocomposite Material, Nanostructured Titanium-Calcium-Phosphate Coating //Composite Interfaces. 2009. V. 16. P. 535–546.
12. Eroshenko A.Ju., Sharkeev Ju.P., Tolmachev A.I. i dr. Struktura i svojstva ob#emnogo ul'tramelkozernistogo titana, poluchennogo abc-pessovaniem i prokatkoj [The structure and properties of bulk ultrafine titanium obtained abc-pressing and rolling] //Perspektivnye materialy. 2009. №7. S. 107–112.
13. Sharkeev Ju.P., Polenichkin V.K. Perspektivy primenenija ul'tramelkozernistogo titana v stomatologii [Prospects for the use of ultrafine titanium in dentistry] //Perspektivnye materialy. 2009. №7. S. 372–377.
14. Chawla N., Chawla K.K. Metal Matrix Composites /In: Springer Science+Business Media. 2006. P. 401.
15. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.St. Perspective high-temperature ceramic composite materials //Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. S. 986–991.