

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА В ОБЛАСТИ 77...800 К

*Л.А. Чиркина, М.Б. Лазарева, В.И. Соколенко, В.В. Калиновский,
П.А. Хаймович, В.С. Оковит*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
Харьков, Украина*

E-mail: mlazareva@kipt.kharkov.ua

Исследовано влияние деформации на 25% в условиях всестороннего сжатия с давлениями 22 и 16,5 кбар при 77 К и 12 и 8 кбар при 300 К в результате применения квазигидроэкструзии с противодавлением (КГЭП) и без противодавления (КГЭ) на физико-механические характеристики в области 77...800 К титана марки ВТ1-0. Двухстадийный характер температурной зависимости механических свойств титана в исходном состоянии – температурно-зависимый в области 77...600 К и атермический в области 600...800 К – после деформации КГЭ и КГЭП меняется на одностадийный, температурно-зависимый характер во всей области температур. Показано, что деформация в условиях всестороннего сжатия приводит к повышению прочности титана в области 77...800 К и к уменьшению энергии дефекта упаковки титана, что помимо увеличения плотности деформационных дефектов является дополнительным фактором упрочнения. Установлено, что повышение давления в условиях всестороннего сжатия приводит к меньшему упрочнению и меньшему накоплению деформационных дефектов, что связывается с активизацией возвратных процессов.

PACS: 62.20.Fe

ВВЕДЕНИЕ

Титан и его сплавы находят широкое применение как перспективные конструкционные материалы в аэрокосмической технике, химическом машиностроении, медицине и ядерной энергетике [1].

Для повышения физико-механических характеристик титана в широкой области температур в настоящее время широко используются различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД), обеспечивающие получение необходимого комплекса свойств за счёт существенного диспергирования структуры, изменения плотности и конфигурации линейных и точечных дефектов и других структурных перестроек. В настоящее время для получения металлов и сплавов с повышенными физико-механическими характеристиками наиболее распространёнными методами ИПД являются равноканальное угловое прессование (РКУП), экструзия с кручением и др. [2, 3].

Важной особенностью титана является возможность реализовать пластическое деформирование на высокие степени без нарушения сплошности материала в широкой области температур, включая низкие. Это возможно за счёт активного развития как скольжения, так и двойникования. Кроме того, двойникование является одним из способов измельчения структуры титана [4-6].

Одним из перспективных современных методов получения материалов с особыми свойствами является КГЭ при криогенных температурах [7], позволяющая в определенных условиях получить более мелкодисперсную структуру, чем в результате РКУП [8]. Деформацию КГЭ можно осуществлять при различных температурах и рабочих давлениях.

Целью настоящей работы является изучение влияния уровня давления и температуры при КГЭ на физико-механические свойства титана ВТ1-0 в области 77...800 К.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исследуемого материала использовался технически чистый титан марки ВТ1-0. Физико-механические свойства титана определялись в исходном состоянии (состоянии поставки) и после КГЭ при 77 и 300 К на 25%, осуществляющейся в условиях всестороннего сжатия с давлением 22,0 и 16,5 кбар при 77 К и 12,0 и 8,0 кбар при 300 К. Увеличение давления при всестороннем сжатии достигалось путем приложения противодавления в процессе КГЭ [9]. Противодействие составляло 5,5 кбар при 77 К и 4 кбар при 300 К. Приложение противодействия позволяет проводить деформирование материала при более высоком уровне сил всестороннего сжатия по сравнению с обычным КГЭ, снизить вероятность нарушения сплошности материала в очаге деформации и формировать более однородную по объёму структуру.

Экструдаты титана представляли собой стержни диаметром 3,8 мм и длиной 28 мм. Образцы для исследований вырезались из экструдата на электроискровом станке.

Механические характеристики образцов титана определялись в области 77...800 К в условиях активного растяжения со скоростью $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 1 Н.

Контроль микроструктуры осуществлялся с помощью цифровой камеры, установленной на микротвердомере ПМТ-3. Микроструктура образцов выявлялась в результате электролитического травления в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$ (в равных объёмах) при напряжении постоянного тока 20 В.

Относительное удельное электросопротивление (ρ_{77}/ρ_{300}) образцов измерялось при 77 и 300 К потенциометрическим методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства. Изучение микроструктуры показало, что материал в состоянии поставки представляет собой поликристалл с равноосными зёрнами с большим разбросом по размерам (от 7 до 75 мкм).

На рис.1 приведены температурные зависимости предела пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ (см. рис. 1,а), условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (см. рис. 1,б) и предела прочности σ_B (см. рис. 1,в) для исходного состояния и после деформации КГЭ и КГЭП при 77 и 300 К.

Для исходного состояния титана наблюдаются три температурные области (77...130; 130...600 и 600...800 К), в которых характер пластического течения материала различен (см. рис. 1). В первой области (77...130 К) повышение температуры деформирования от 77 до 130 К приводит к резкому снижению всех прочностных характеристик. Во второй области температур (130...600 К) температурная зависимость прочностных свойств ($\sigma(T)$) имеет линейно убывающий с ростом температуры характер. В области 600...800 К наблюдается атермический характер всех прочностных параметров титана. Температура перехода (T_0) от термоактивируемого пластического течения к атермическому соответствует 600 К.

Предварительная деформация ВТ1-0 в условиях всестороннего сжатия как путем КГЭП, так и КГЭ при 77 и 300 К привела к существенному росту всех прочностных характеристик по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 1).

Важно отметить, что степень увеличения прочностных характеристик титана не зависит от температуры деформации в случае КГЭП, в то время как после КГЭ при 77 и 300 К величина упрочнения по сравнению с исходным состоянием разная (см. рис. 1). Зависимость $\sigma_{\text{пл}}(T)$ после КГЭ при 300 К совпадает с зависимостями $\sigma_{\text{пл}}(T)$ после КГЭП при 300 и 77 К, тогда как КГЭ при 77 К приводит к росту зависимости $\sigma_{\text{пл}}(T)$ в области 77...600 К, достигая 32% при 120 К по сравнению с КГЭП и 75% по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 1,а).

Такой же характер наблюдается и для зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ после КГЭ при 77 К по сравнению с $\sigma_{0,2}(T)$ после КГЭП при 300 и 77 К (см. рис. 1,б). В этом случае упрочнение после КГЭ при 77 К составляет 26% при 120 К по сравнению с КГЭП и 67% по сравнению с исходным состоянием. Разница в увеличении $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{0,2}$ после КГЭ и КГЭП уменьшается с ростом температуры испытания и практически отсутствует при $T > 600$ К.

Рост σ_B после КГЭ при 77 К наблюдается лишь в области 77...300 К – достигает 17% при 120 К по сравнению с σ_B после КГЭП и 60% по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 1,в). Более высокий уровень $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{0,2}$ титана после КГЭ при 77 К по сравнению с КГЭ при 300 К и КГЭП при 300 и 77 К может быть результатом повышения после КГЭ при 77 К напряжения для двойникования, которое является преимущественным видом деформации титана

при низких температурах. После КГЭ при 300 К наблюдается снижение величины σ_B в области 120...600 К (на 11% при 120 К) по сравнению с КГЭП и увеличение σ_B на 23% по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 1,в).

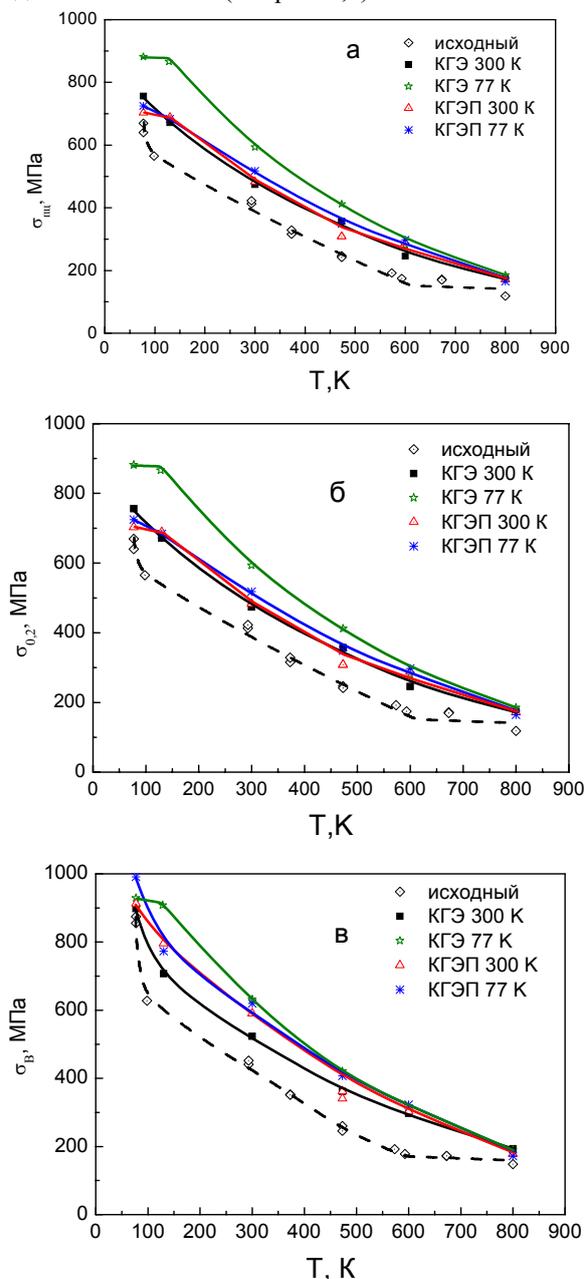


Рис. 1. Температурные зависимости: $\sigma_{\text{пл}}$ (а), $\sigma_{0,2}$ (б) и σ_B (в) титана в исходном состоянии, после КГЭП и КГЭ при 77 и 300 К

Кроме увеличения прочностных характеристик титана после КГЭП и КГЭ при 77 и 300 К по сравнению с исходным состоянием важной отличительной особенностью титана, деформированного в условиях всестороннего сжатия, является изменение характера температурных зависимостей прочностных характеристик в области 130...800 К (см. рис. 1). Для исходного состояния в этой области температур наблюдается двухстадийная температурная зависимость $\sigma(T)$ с переходом от термоактивируемого к атермическому при 600 К. Для титана, деформированного КГЭП и КГЭ при 77 и 300 К,

характерна одностадийная, монотонно убывающая зависимость $\sigma(T)$ в интервале 130...800 К.

Согласно [10] температурно-зависимая часть $\sigma(T)$ определяется термоактивируемыми процессами движения дислокаций, происходящими путём поперечного скольжения. В области атермической зависимости $\sigma(T)$ основным механизмом пластической деформации металлов является переползание дислокаций. Наличие одностадийного термоактивируемого характера зависимости $\sigma(T)$ в области 130...800 К после КГЭП и КГЭ на 25% при 77 и 300 К означает, что для деформированного в условиях всестороннего сжатия титана температура перехода пластического течения от термоактиви-

руемого к атермическому механизму деформации (T_0) смещена в сторону высоких температур по сравнению с исходным состоянием. Температура T_0 , согласно [10] определяется величиной энергии дефекта упаковки. Смещение температуры T_0 в сторону высоких температур является результатом уменьшения энергии дефекта упаковки (ЭДУ), т. е. увеличения ширины расщепления дислокаций [10]. Поэтому сдвиг T_0 в сторону высоких температур для предварительно деформированного титана методами КГЭП и КГЭ по сравнению с исходным состоянием означает, что деформация в условиях всестороннего сжатия при 77 и 300 К уменьшает ЭДУ титана.

Микротвёрдость H_μ и относительное удельное электросопротивление ρ_{77}/ρ_{300} титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях

Состояние материала	Уровень давления при всестороннем сжатии, кбар	H_μ , МПа	$\frac{H_\mu^{деф} - H_\mu^{исх}}{H_\mu^{исх}}, \%$	$\frac{\rho_{77}}{\rho_{300}}$	$\frac{\left(\frac{\rho_{77}}{\rho_{300}}\right)^{деф} - \left(\frac{\rho_{77}}{\rho_{300}}\right)^{исх}}{\left(\frac{\rho_{77}}{\rho_{300}}\right)^{исх}}, \%$
Исходное	0	1433	–	0,188	–
КГЭП при 77 К на 25%	22	2042	43	0,215	16
КГЭП при 300 К на 25%	12	1907	33	0,205	10
КГЭ при 77 К на 25%	16,5	2453	71	0,223	20
КГЭ при 300 К на 25%	8	1986	39	0,212	13

В таблице представлены характеристики ВТ1-0 в исходном состоянии и после деформации КГЭ в различных режимах. Из таблицы видно, что деформация на 25% в условиях всестороннего сжатия при 77 К приводит к большему увеличению H_μ , чем при 300 К как после КГЭ, так и после КГЭП. При этом деформация при меньших значениях давления путём КГЭ вызывает большее повышение микротвёрдости (на 71 и 39%), чем в результате КГЭП (на 43 и 33%) при 77 и 300 К соответственно.

Результаты измерения микротвёрдости подтверждаются данными измерения относительного удельного электросопротивления. Деформация в условиях всестороннего сжатия при 77 К вызывает большее увеличение этой характеристики после КГЭ, а следовательно, и увеличение степени дефектности материала по сравнению с КГЭП.

Таким образом, повышение прочностных характеристик титана в результате деформации в условиях всестороннего сжатия может быть следствием как повышения общего уровня дефектности кристаллической решетки, так и увеличения степени расщепления дислокаций по сравнению с исходным состоянием.

Исходя из результатов измерения микротвёрдости и электросопротивления следует, что в условиях одинаковых температур деформации при более высоком уровне давления и всестороннем сжатии в деформируемом материале создаются более низкие уровни внутренних напряжений и плотности деформационных дефектов. Это может быть результатом активного развития процессов возврата при КГЭП и их подавления в процессе КГЭ. Этот вывод основывается на результатах работы [11], в которой

показано, что в условиях всестороннего сжатия при высоких давлениях резко усиливаются процессы переползания за счет увеличения скорости диффузии.

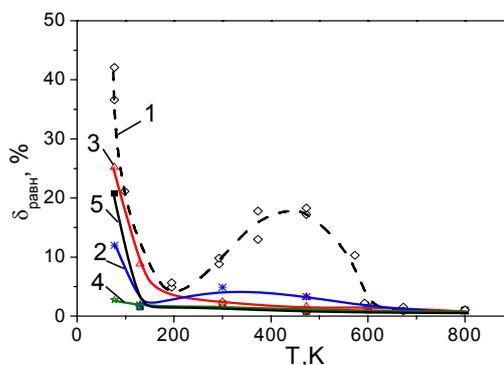


Рис. 2. Температурная зависимость относительного удлинения титана в разных структурных состояниях: 1 — исходный; 2 — КГЭП при 77 К; 3 — КГЭП при 300 К; 4 — КГЭ при 77 К; 5 — КГЭ при 300 К

На рис. 2 приведена температурная зависимость относительного удлинения $\delta_{равн}(T)$ титана в пяти структурных состояниях.

Ранее было показано [12-14], что для исходного состояния титана в температурном интервале 77...130 К наблюдаются одновременно высокие значения как пластичности, так и прочности. При расширении температурного интервала исследований от 77 до 800 К, как видно из рис. 2, температурная зависимость относительного удлинения $\delta_{равн}(T)$ титана в исходном состоянии имеет немонотонный характер: при 77 К наблюдается максимальная пла-

стичность, достигающая 42%; при повышении температуры испытаний до 200 К происходит уменьшение запаса пластичности до 5%; в интервале 200...600 К проявляется широкий пик пластичности с максимумом на уровне 18% при 475 К; в области 600...800 К пластичность равна ~1%, что, как показано в [14], может быть связано с сильной зависимостью пластичности от концентрации газовых примесей.

Следует отметить, что верхняя температурная граница участка повышенной пластичности (600 К) для титана в исходном состоянии (см. рис. 2, кривая 1) совпадает с температурой T_0 на зависимости $\sigma(T)$, характеризующей смену механизма пластической деформации от термоактивируемой к атермической (см. рис. 1). Высокие значения пластичности T_i наблюдаются в области интенсивной термической активации, облегчающей процессы поперечного скольжения. Развитию процессов поперечного скольжения в интервале 300...600 К может способствовать также тот факт, что в этой температурной области скольжение может развиваться по многим системам [15, 16].

Деформирование в условиях всестороннего сжатия приводит к снижению пластичности титана в области 77...200 К и устраняет пик пластичности в интервале 200...600 К по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 2). При 77 К пластичность титана после КГЭ и КГЭП при 77 и 300 К снижается от 42% (кривая 1) для исходного состояния до 12% после КГЭП при 77 К (кривая 2), до 25% после КГЭП при 300 К (кривая 3); до 2,5% после КГЭ при 77 К (кривая 4) и до 21% после КГЭ при 300 К (кривая 5).

При $T > 200$ К, когда основным видом деформации титана является скольжение, причиной низкого уровня пластичности после деформации КГЭП и КГЭ может быть подавление процессов поперечного скольжения из-за уменьшения энергии дефектов упаковки, а также снижение длины пробега дислокаций при увеличении их плотности.

При $T < 200$ К согласно [13] основной вклад в пластическую деформацию титана вносит двойникование. Следовательно, резкое снижение пластичности титана после КГЭ и КГЭП может быть обусловлено расщеплением дислокаций, особенно в процессе всестороннего сжатия при 77 К, что существенно снижает вероятность развития двойникования [17]. Низкий уровень пластичности после деформации в условиях всестороннего сжатия, вызванный расщеплением дислокаций, может быть результатом того, что при встрече расщепленных дислокаций, расположенных в пересекающихся плоскостях скольжения, возможно образование малоподвижного дефекта – «барьера Ломера–Коттрелла», блокирующего обе плоскости скольжения и затрудняющего дальнейшее протекание пластической деформации [18].

ВЫВОДЫ

Изучено влияние различных уровней всестороннего сжатия при использовании деформаций КГЭ и КГЭП при 300 и 77 К на механические свойства в области температур 77...800 К титана марки ВТ1-0.

Показано более существенное увеличение прочностных характеристик и удельного электросопротивления титана в случае предварительной деформации КГЭ по сравнению с КГЭП.

Показано, что в результате предварительной деформации КГЭ и КГЭП температурная зависимость прочностных свойств T_i имеет термоактивированный характер во всей исследованной области температур (77...800 К), в отличие от двухстадийного характера (термоактивированного в интервале 77...600 К и атермического при 600...800 К) для T_i в исходном состоянии.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном снижении энергии дефекта упаковки T_i в условиях всестороннего сжатия при КГЭ и КГЭП.

Снижение степени упрочнения T_i при увеличении давления в условиях деформации КГЭП связывается с развитием процессов возврата за счет ускорения процессов переползания дислокаций и роста скорости диффузии.

Исследовано изменение пластичности титана в различных структурных состояниях: в исходном, после КГЭП и КГЭ при 77 и 300 К. Для исходного состояния наблюдается сочетание высокой прочности (87 кг/мм²) и высокой пластичности (42%) при понижении температуры испытания до 77 К. Деформация в условиях всестороннего сжатия при 77 и 300 К снижает пластичность титана по сравнению с исходным состоянием.

Показано, что пластичность ВТ1-0 после деформации на 25% в условиях всестороннего сжатия снижается в большей степени при меньшем давлении и отсутствии противодействия, чем при большем давлении и при наличии противодействия ($\delta = 2,5\%$ при 77 К после КГЭ при 77 К, $\delta = 21\%$ при 77 К после КГЭП при 77 К).

Изменение механических характеристик титана ВТ1-0 в области 77...600 К после деформации методами КГЭ и КГЭП при 300 и 77 К может быть обусловлено как ростом плотности дислокаций, так и увеличением степени их расщепления вследствие применения всестороннего сжатия, что затрудняет развитие двойникования в области 77...200 К и поперечного скольжения в области 200...600 К, являющихся основными видами деформации в случае термоактивированного пластического течения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. *Конструкционные титановые сплавы*. М.: «Металлургия», 1974, 366 с.
2. R.Z. Valiev, Yu. Estrin, Z. Horita, T.G. Zangdon, M. Zehetbauer, and Y.T. Zhu. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation // *JOM*. 2006, v. 58(4), p. 33.
3. Yang Zh., Chen I., He Z., Cong H., and Ye H. Microstructure and grain boundary relaxation in ultrafine-grained Al/Al oxide composites // *Acta Materialia*. 2009, v. 57, №12, p. 3633-3644.
4. И.М. Неклюдов, В.И. Соколенко, Л.А. Чиркина, Г.П. Ковтун, И.Ф. Борисова, В.В. Калиновский, Д.Г. Малыхин, Э.Н. Метолитиди, В.С. Оковит. Структура и физико-механические свойства технического

титана после деформации ковкой при 77 и 300 К // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2007, т. 29, №3, с. 359-380.

5. В.А. Москаленко, А.Р. Смирнов, А.В. Москаленко. Нанокристаллический титан, полученный криомеханическим методом: микроструктура и механические свойства // *ФНТ*. 2009, т. 35, №11, с. 1160-1164.

6. И.С. Брауде, Н.Н. Гальцов, В.А. Москаленко, А.Р. Смирнов. Исследование наноструктуры титана, деформированного при низких температурах // *ФНТ*. 2011, т. 37, №12, с. 1307-1314.

7. P.A. Khaymovich. Nanostructuring of metals cryodeformed at hydrostatic stress // *Russian Physics Journal*. 2007, v. 50, №11, p. 1079-1083.

8. Е.Д. Табачникова, А.В. Подольский, С.Н. Смирнов и др. Механические свойства наноструктурного Ti GRADE 2, полученного разными способами интенсивной пластической деформации // *Материалы X Международной конференции «Высокие давления – 2008»*, 16-20 сентября 2008 г., Судак, с. 102.

9. В.У. Асанов, А.В. Мац, П.А. Хаймович. Устройство для квазигидроэкструдирования металлов при низких температурах // *Физика и техника высоких давлений*. 1983, №14, с. 64-65.

10. Р. Бернер, Г. Кронмюллер. *Пластическая деформация монокристаллов*. М.: «Мир», 1969, 272 с.

11. Е.Д. Мартынов, В.И. Трефилов, С.А. Фирстов, Б.И. Береснев, Ю.Н. Рябинин. Электронно-микроскопические исследования хрома и молибдена, деформированных в условиях высокого давления // *ДАН СССР*. 1967, т. 176, №6, с. 1276-1277.

12. Б.А. Колачев. *Физическое металловедение титана. Серия «Успехи современного металловедения»*. М.: «Металлургия», 1976, 184 с.

13. В.И. Старцев, В.П. Ильичев, В.В. Пустовалов. *Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах*. М.: «Металлургия», 1975, 328 с.

14. Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, А.А. Буханова. *Механические свойства титана и его сплавов*. М.: «Металлургия», 1974, 543 с.

15. А.А. Предводителев, О.А. Троицкий. *Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах*. М.: «Атомиздат», 1973, 201 с.

16. И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. *Пластическая деформация бериллия*. М.: «Атомиздат», 1973, 303 с.

17. М.В. Классен-Неклюдова. *Механическое двойникование кристаллов*. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 261 с.

18. М.А. Штремель. *Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки*. М.: «Металлургия», 1982, 280 с.

Статья поступила в редакцию 19.11.2013 г.

ВПЛИВ ТИСКУ І ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ВСЕБІЧНОГО СТИСАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНУ В ОБЛАСТІ 77...800 К

Л.О. Чиркіна, М.Б. Лазарева, В.І. Соколенко, В.В. Калиновський, П.О. Хаймович, В.С. Оковит

Досліджено вплив деформації на 25% в умовах всебічного стиснення з тисками 22 і 16,5 кбар при 77 К та 12 і 8 кбар при 300 К в результаті застосування квазігідроекструзії з протитиском (КГЕП) і без протитиску (КГЕ) на фізико-механічні характеристики в області 77...800 К титану марки VT1-0. Двостадійний характер температурної залежності механічних властивостей титану в початковому стані – температурно-залежний в області 77...600 К і атермічний в області 600...800 К – після деформації КГЕ і КГЕП змінюється на однастадійний, температурно-залежний характер у всій області температур. Показано, що деформація в умовах всебічного стиснення призводить до підвищення міцності титану в області 77...800 К і до зменшення енергії дефекту пакування титану, що крім збільшення щільності деформаційних дефектів є додатковим чинником зміцнення. Встановлено, що підвищення тиску в умовах всебічного стиснення призводить до меншого зміцнення і меншого накопичення деформаційних дефектів, що зв'язується з активізацією зворотних процесів.

EFFECTS OF PRESSURE AND TEMPERATURE AT DEFORMATION IN CONDITIONS OF UNIFORM COMPRESSION ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM IN THE RANGE OF 77...800 K

L.A. Chirkina, M.B. Lazareva, V.I. Sokolenko, V.V. Kalynovskiy, P.A. Khaimovich, V.S. Okovit

Influence of deformation at 25% under uniform compression at pressure of 22 and 16.5 kbar at 77 K and 12 and 8 kbar at 300 K by using quasihydroextrusion with counterpressure (QHEC) and without counterpressure (QHE) on physical-mechanical properties of titanium VT1-0 in the range of 77...800 K was investigated. It was shown, that two-stage character of dependence mechanical properties versus temperature in initial state (temperature-dependent in the range of 77...600 K and athermal in the range of 600...800 K) after deformation QHE and QHEP changed to one-stage and temperature-dependent character in the entire temperature range. It was shown that deformation under uniform pressure result in increase of strength in the range of 77...800 K and decrease the stacking fault energy of titanium. That is an addition factor of hardening besides increasing the density of deformation defects. It was found that uniform compression realized under higher pressures leads to less hardening and less accumulation of deformation defects. This associated with activation of recovery processes.