

УДК 621.777:669.2

DOI dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-4-42-47

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ТВЕРДОФАЗНОЙ КОНСОЛИДАЦИЕЙ ТИТАНОВОЙ ГУБКИ

© 2015 г. **А.В. Нестеренко, В.И. Новожинов, Д.И. Вичужанин**

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Институт физики металлов (ИФМ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 13.12.13 г., доработана 04.04.14 г., подписана в печать 29.04.14 г.

Экспериментально исследовано влияние плотности титановых брикетов, полученных из титановой губки марки ТГ-100, и наличия в них водорода на усилие прямого прессования брикетов при температуре 600 °С, плотность и механические свойства прессованных прутков. Полученные результаты показывают, что для более плотных брикетов, легированных водородом, требуется меньшее усилие прессования, а плотность и пластичность прессованных прутков, оцененные при $t = 600$ °С, увеличиваются.

Ключевые слова: титановая губка, прессование брикетов, термоводородное легирование титана.

The influence of the density of titanium briquettes formed from titanium sponge of TG-100 brand and the presence of hydrogen in them on the force of direct briquette compacting at 600 °С, density, and mechanical properties of pressed rods is investigated experimentally. The results show that the smaller compacting force is required while the density and plasticity of compacted rods evaluated at $t = 600$ °С increase.

Keywords: titanium sponge, briquette compacting, thermal hydrogen alloying of titanium.

Введение

Интерес к получению полуфабрикатов и изделий из титановой губки методами порошковой металлургии обусловлен возможностью существенно снизить стоимость технологии за счет исключения вакуумной выплавки слитков и сокращения количества последующих переделов. К примеру, в затратах на изготовление титанового листа толщиной 25,4 мм около 40 % составляет стоимость губки, а 60 % — стоимость операций двойного вакуумного переплава и последующих термической и деформационной обработок [1].

Результаты успешного получения квазимоно-

литных полуфабрикатов и изделий обработкой давлением титановой губки описаны в работах [2–6]. Показано, что после компактирования брикетов из губки целесообразно производить их прямое прессование через коническую матрицу с получением прутков или полосы. Этот процесс позволяет достигать больших деформаций сдвига в обрабатываемом материале при схеме напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений. Благоприятная схема напряженного состояния в сочетании со значительными деформациями сдвига позволяет получать материал с плотностью, близкой к теоре-

Нестеренко А.В. — канд. техн. наук, науч. сотрудник лаборатории микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). Тел.: (343) 375-35-96. E-mail: nav@imach.uran.ru.

Вичужанин Д.И. — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник той же лаборатории. Тел.: (343) 375-35-96. Факс: (343) 374-53-30. E-mail: mmm@imach.uran.ru.

Новожинов В.И. — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории прочности ИФМ УрО РАН (620090, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). Тел.: (343) 378-38-25.

тической, который в дальнейшем можно подвергать пластической деформации известными процессами обработки давлением [2, 7, 8].

В частности, в работе [2] приведены данные, полученные при горячей экструзии брикетов, изготовленных из титановой губки различных фракций. Авторами изучено влияние коэффициента вытяжки (μ), температуры и исходной пористости брикетов на усилия горячего прессования. Показано, что изготовленные при $\mu \geq 25$ и $t = 960 \div 1000$ °С прутки соответствовали требованиям, предъявляемым к пруткам из титана ВТ1-00, полученным традиционным способом.

Следует отметить, что в упомянутых работах для достижения плотности и механических свойств обрабатываемого материала на уровне компактного технического титана процессы твердофазной консолидации губки осуществляли при температурах ≥ 800 °С. Это обуславливало необходимость защиты обрабатываемого материала от интенсивного газонасыщения, а также усложняло условия работы прессовой оснастки.

Известен эффект водородного пластифицирования компактного титана, заключающийся в снижении сопротивления деформации и повышении пластичности в температурном диапазоне 200—800 °С [9]. При этом легирование водородом носит временный характер и применяется для улучшения деформируемости титана. После операций пластического деформирования водород из титана удаляется отжигом в вакууме для исключения «водородной хрупкости» изделий в процессе их эксплуатации.

По результатам обзора литературы авторами настоящей статьи сделан вывод, что целесообразность применения водородного легирования при пластическом деформировании титановой губки не была исследована. Поэтому целью представленной работы является определение влияния плотности исходных титановых брикетов и наличия в них водорода на усилие экструзии, плотность и механические свойства прессованных прутков.

Методика эксперимента

В качестве материала для экспериментов использовались частицы отсева титановой губки марки ТГ-ОП-1, содержащей согласно ТУ 1715-484-05785388-2005 металлические и газовые примеси в количестве, мас. %: 0,24 Fe, 0,064 Mg, 0,025 Ni, 0,041 Cr, 0,089 Cl,

0,007 N, 0,041 O и 0,007 C. Гранулометрический состав соответствовал частицам размером от 2 до 5 мм.

Некоторое количество исследуемого материала легировали водородом до концентрации 0,5 мас. % H. Проведенный при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (Япония) рентгеноструктурный анализ показал, что при введении 0,5 мас. % H в титане появляются гидридные выделения (γ -фаза). Губка без водорода при комнатной температуре представляет собой α -фазу титана.

Образцы губки компактировали на гидравлическом прессе в замкнутом цилиндрическом контейнере при давлении 1000 МПа и температурах 170 °С и 325 °С. Относительную плотность полученных брикетов определяли взвешиванием и измерением геометрических размеров. Далее они были подвергнуты прямому прессованию в медной оболочке в прутки при $t = 600$ °С. Коэффициент вытяжки при прессовании составлял $\mu \approx 9$. Температура нагрева была выбрана с учетом данных работы [10]. Для монолитного титана марки ВТ1-0 при $t = 600$ °С сопротивление деформации при испытаниях на осадку образца, содержащего 0,5 мас. % H, составляет $\sigma_{350} \approx 100$ МПа, а у нелегированного титана — около 200 МПа [10]. Прессование осуществляли на вертикальном гидравлическом прессе с номинальным усилием 4000 кН. Брикет, помещенный в медную оболочку, перед прессованием нагревали до 600 °С, оснастку для прессования — до 400 °С.

В экспериментах оценивали влияние плотности исходного брикета ($\rho_{бр}$) и наличия в нем водорода (C_H) на усилие прессования (P), плотность прутков ($\rho_{пр}$) и их механические свойства (табл. 1). Плотность прессованных прутков определяли методом гидростатического взвешивания.

Таблица 1

Влияние плотности брикетов и наличия в них водорода на усилие прессования и плотность полученных прутков

№ обр. брикета/прутка	C_H , мас. %	$\rho_{бр}$, %	P , кН	$\rho_{пр}$, %
1	0	95,0	1140	99,2
2	0	97,2	1090	98,9
3	0,5	92,0	1130	100
4	0,5	98,5	950	99,8

Примечание. Теоретическая плотность титана составляет 4,51 г/см³, а сплава Ti-0,5H — 4,375 г/см³ [11].

Результаты и их обсуждение

В результате выполненных исследований определено влияние плотности брикетов и термоводородной обработки на усилие экструзии и свойства эструдированных прутков. В частности, из табл. 1 следует, что для брикетов 1 и 2 разница в начальной плотности $\approx 2,2\%$ приводит к $\approx 10\%$ -ной разнице в усилии экструзии. Та же закономерность наблюдается для гидрированных брикетов 3 и 4, плотность которых до прессования различается на $\approx 6,5\%$, а усилие экструзии на $\approx 25\%$. В работе [5] рост величины P при снижении $\rho_{бр}$ авторы объясняли увеличением степени окисления по мере уменьшения плотности и более интенсивным охлаждением брикетов с меньшей исходной плотностью вследствие более развитой поверхности.

Сравнивая результаты эксперимента, полученные для брикетов 1 и 3, установлено, что эффект влияния водородного пластифицирования на усилие прессования снижается при уменьшении начальной плотности брикета. По данным исследования брикетов 2 и 4 выявлено, что увеличение $\rho_{бр}$ и легирование водородом приводят к снижению усилия экструзии на $\approx 20\%$.

По оценке плотности прессованных прутков видно, что она зависит от приложенного усилия прессования и наличия водорода в брикете. Первый фактор определяет уровень сжимающих напряжений, второй — сопротивление деформации материала экструдированного брикета.

Для характеристики напряженного состояния в работах [12–15] использовано отношение среднего нормального напряжения к интенсивности касательных напряжений, значение которой пропорционально сопротивлению деформации материала. Чем ниже это отношение, называемое «показателем напряженного состояния», тем в большей степени процессы уплотнения материала преобладают над процессами его «разрыхления» при пластической обработке.

Количественный анализ показателя напряженного состояния в нашей работе не проводился, но по зафиксированному усилию прессования при известном [10] сопротивлении деформации гидрированного и негидрированного образцов титана можно оценить его качественно. Минимальные значения этот параметр имел в процессах прессования прутков 3 и 4, которые обладали наибольшей плотностью ($\approx 100\%$).

Для исследования механических свойств прессованных прутков из них были изготовлены стандартные образцы для испытаний на растяжение. Поскольку эти прутки представляются перспективными заготовками для дальнейшей «теплой» деформации, температура испытания составляла $t = 600\text{ }^\circ\text{C}$. Эксперименты проводились¹ на испытательной машине Instron 8801 при скорости активного захвата 1 мм/мин. При растяжении цилиндрического образца реализуется схема напряженного состояния с преобладанием растягивающих напряжений, а в момент разрушения, которое, как правило, происходит в шейке на оси образца, формируется схема всестороннего растяжения.

Известно [12–15], что пластические свойства металлов при преобладании растягивающих напряжений значительно ниже, чем в условиях сжимающих напряжений. Особенно выражена такая зависимость и актуальна ее количественная оценка для материалов, имеющих внутренние концентраторы напряжений.

Таким образом, по результатам испытаний на растяжение можно провести оценку пластичности, соответствующей неблагоприятным условиям деформирования материала прессованных из губки титановых прутков, имеющего концентраторы напряжений.

В табл. 2 приведены механические свойства полученных прутков. Видно, что значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b , характеризующие прочностные параметры материала прутков, для всех образцов находятся на низком уровне. Для оценки сопротивления деформации на участке равномерной деформации построены кривые деформационного упрочнения, приведенные на рис. 1.

Таблица 2
Механические свойства прессованных прутков при растяжении

№ обр. брикета/прутка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	A_p
1	25,4	30	45	79,6	2,75
2	23,8	28,7	16	44	1,01
3	13,5	15,8	58,6	99,2	8,33
4	22,4	28,1	74,7	98,6	7,36

Примечание. Температура испытания $600\text{ }^\circ\text{C}$.

¹ Испытания на растяжение проведены на оборудовании Центра коллективного пользования ИМАШ УрО РАН.

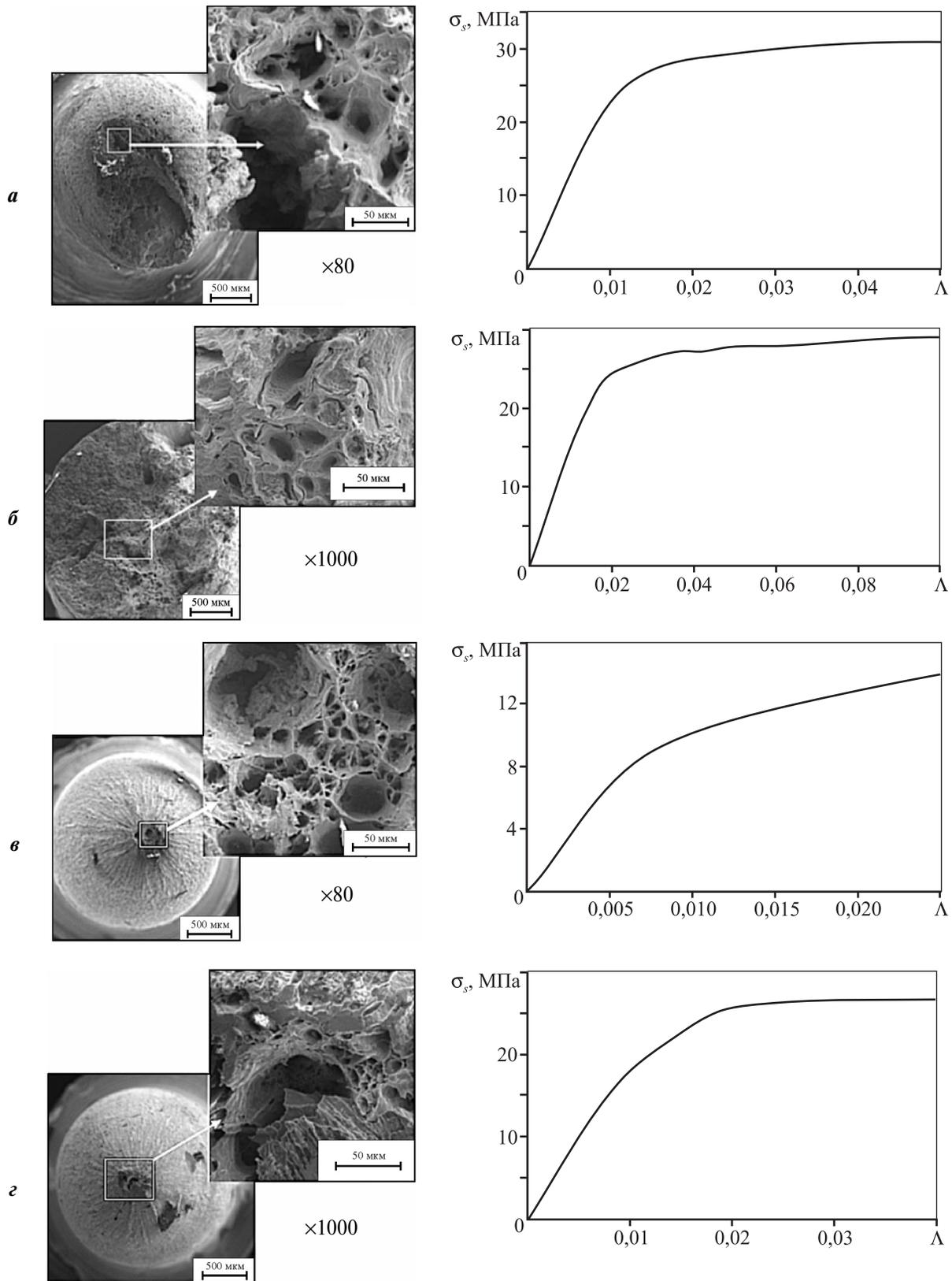


Рис. 1. Вид разрушения негидрированных (*а, б*) и наводороженных (*в, г*) образцов и кривые деформационного упрочнения на стадии равномерной деформации
а – пруток 1, *б* – 2, *в* – 3, *г* – 4. Характеристики образцов описаны в табл. 1

Пластические характеристики оценены по относительному удлинению (δ), относительному сужению (ψ) и предельной степени деформации сдвига (Λ_p) при среднем для каждого образца показателе напряженного состояния. Перечисленные характеристики значительно выше для образцов, содержащих 0,5 мас.% водорода. Учитывая, что дальнейшая «теплая» деформация исследуемых материалов будет осуществляться с применением схем напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений, степень деформации сдвига, накопленная к моменту разрушения, может еще более вырасти.

На рис. 1 при увеличениях $80\times$ и $1000\times$ показаны изображения поверхностей разрушения образцов без водорода и содержащих его в количестве 0,5 мас.%. Снимки поверхностей получены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega II ХМУ. На рис. 1, в, г (наводороженный пруток) наблюдается более развитое пластическое течение материала в шейке.

Поскольку плотность гидрированных образцов 3 и 4 близка к теоретической для компактного титана, полученного по традиционной технологии, было выполнено сравнение их деформационных свойств с данными [10]. Установлено, что полученные в нашей работе посредством пластической деформации наводороженной титановой губки образцы при $t = 600\text{ }^\circ\text{C}$ обладают более низким сопротивлением деформации по сравнению с образцами, исследованными авторами [10]; при этом предельная степень деформации сдвига составляла $\Lambda_p \approx 7\div 8$. Такие свойства обеспечивают высокую деформационную способность даже при достаточно неблагоприятных схемах напряженного состояния. Это позволяет подвергать материал большим разовым суммарным деформациям.

В работе [10] при растяжении со скоростью 1 мм/мин и $t = 600\text{ }^\circ\text{C}$ образцов сплава ВТ1-0, содержащего 0,5 мас.% Н, зафиксировано напряжение $\sigma_{0,2} \approx 60\text{ МПа}$; при этом степень деформации сдвига, накопленная металлом к моменту разрушения, стремилась к бесконечности (диаметр образца в минимальном сечении шейки к моменту разрушения стремился к нулю). Усилие деформирования к моменту разрушения монотонно снижалось до нуля.

Микроструктура прутка, полученного прессованием брикета, изготовленного из наводороженной титановой губки, изучалась с использованием сканирующего электронного микроскопа. В процессе

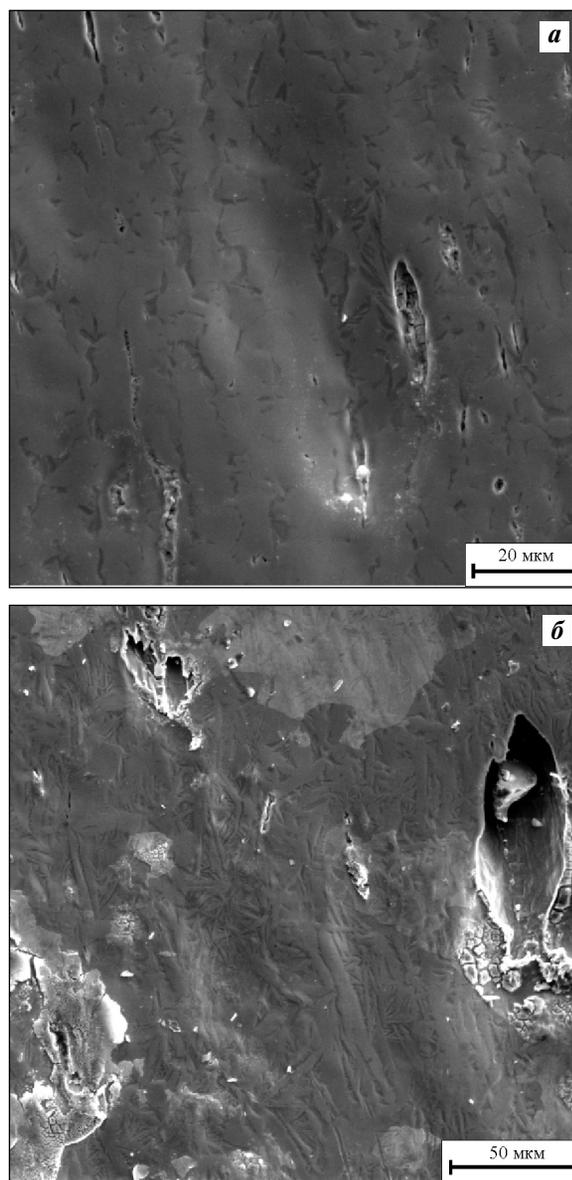


Рис. 2. Продольное сечение разрушившегося при растяжении образца 4 (см. табл. 1)

а – участок равномерной деформации ($\times 2000$)

б – зона локализованной деформации ($\times 1000$)

исследования рассматривался шлиф продольного сечения обр. 4, разрушенного при растяжении. Установлено, что в структуре металла присутствуют микропоры, вытянутые вдоль направления прессыования (рис. 2), размеры которых не превышают 100 мкм.

Выводы

1. Показана целесообразность применения эффекта водородного пластифицирования перед про-

цессами компактирования и прессования титановой губки и определено влияние плотности исходных титановых брикетов и наличия в них водорода на усилие экструзии, плотность и механические свойства прессованных прутков.

2. При прессовании прутков из брикетов гидрированной губки (0,5 мас.% Н) при температуре 600 °С эффект водородного пластифицирования титана проявляется в существенном снижении (до 25 %) давления на пуансон и повышении макроскопической плотности прутков до 99,8–100 %. При этом усилие прессования растет с уменьшением плотности исходного брикета.

3. Деформационные свойства при $t = 600$ °С прутков, полученных прессованием брикетов при той же температуре, улучшаются по мере увеличения плотности исходного брикета и применения легирования водородом, которое оказывает наибольшее влияние, значительно повышая пластические свойства при испытаниях на растяжение.

Исследования проведены по инициативе чл.-корр. РАН В.Л. Колмогорова в соответствии с планами работ ИМАШ УрО РАН и программы Президиума РАН №25 (проект 12-П-1-1027).

Авторы выражают благодарность вед. технологу Е.Б. Трушиной за проведение электронной микроскопии.

Литература

1. Hartman A.D., Gerdemann S.J., Hansen J.S. Producing Lower-Cost Titanium for Automotive Applications // JOM. 1998. Vol. 50, № 9. P. 16.
2. Павлов В.А., Щербина В.В., Токарев В.П. и др. // Порошковая металлургия. 1974. № 9. С. 19.
3. Бондарь М.П., Войцеховский Б.В., Ободовский Е.С. и др. // Цв. металлы. 1978. № 12. С. 75.
4. Лаптев А.М., Ободовский Е.С. // Порошковая металлургия. 1986. № 7. С. 20.
5. Ободовский Е.С., Лаптев А.М. // Порошковая металлургия. 1987. № 4. С. 28.
6. Залазинский А.Г., Новожинов В.И., Колмыков В.Л. и др. // Металлы. 1997. № 6. С. 64.
7. Соколов М.В., Степаненко В.И., Залазинский А.Г., Лисин А.Л. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2000. № 4. С. 65.
8. Новожинов В.И., Залазинский А.Г., Модер Н.И. и др. // Кузн.-штамп. пр-во: Перспективы и развитие. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2005. С. 386.
9. Pat. 2892742 (USA). Titanium Alloys Deformability Improvement Technique during Hot Pressure Shaping / U. Zwicker, H. Schleicher. 1959.
10. Аксенов Ю.А., Башкин И.О., Колмогоров В.Л. и др. // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 67, № 5. С. 993.
11. Мюллер В. Гидриды титана // Гидриды металлов / Под ред. В. Мюллера, Д. Блэкледжа, Дж. Либовица. М.: Атомиздат, 1973. С.278.
12. Смирнов С.В., Нестеренко А.В., Быков В.Н., Михайлов В.Г. // Металлы. 2007. Вып. 6. С. 73.
13. Смирнов С.В., Нестеренко А.В., Швейкин В.П. // Металлы. 2008. Вып. 5. С. 80.
14. Smirnov S.V., Nesterenko A.V., Bykov V.N., Mikhailov V.G. // Rus. metallurgy (Metally). 2007. № 6. P. 506.
15. Smirnov S.V., Nesterenko A.V., Shveikin V.P. // Rus. metallurgy (Metally). 2008. № 5. P. 425.