

А. И. КОРШУНОВ

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО  
УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ.  
ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ**

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики»

А. И. Коршунов

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ  
ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ.  
ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ**

Монография

Саров  
2013

УДК 620.22:620.3:620.17  
ББК 30.3  
К70

**А. И. Коршунов.** Физико-механические свойства материалов после равноканального углового прессования. Особенности проявления. Монография. – Саратов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013, – 257 с. – ил.

ISBN 978-5-9515-0234-6

Приведены результаты получения объемных наноструктурных материалов методом равноканального углового прессования и их последующего исследования. Представлена конструкция штампа для равноканального углового прессования, позволяющая выполнять ремонт рабочих поверхностей штампа без изменения размеров каналов штампа. Для ряда материалов разработана технология нанесения гальванической меди, позволившая уменьшить при равноканальном угловом прессовании эффективный коэффициент трения до значения 0,02. Получены экспериментальные результаты по влиянию равноканального прессования на механические свойства ряда металлов и сплавов. Сделана оценка качества полученных характеристик, определен температурно-скоростной диапазон использования наноструктурных материалов.

Монография адресована широкому кругу ученых и инженеров, специализирующихся в области получения и исследования объемных наноструктурных материалов, а также преподавателям, аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-9515-0234-6

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Перечень основных сокращений и обозначений . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>Предисловие . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>Глава 1</b>	
<b>Обзор работ, посвященных получению и исследованию механических свойств объемных наноструктурных материалов .</b>	<b>14</b>
1.1. Терминология и классификация . . . . .	14
1.2. Методы получения объемных наноструктурных материалов . . . .	15
1.3. Кручение под высоким давлением . . . . .	17
1.4. Всесторонняя изотермическая ковка . . . . .	19
1.5. Равноканальное угловое прессование . . . . .	23
1.6. Винтовая экструзия . . . . .	31
1.7. Влияние интенсивной пластической деформации на механические свойства . . . . .	32
1.7.1. Плотность . . . . .	33
1.7.2. Модули упругости . . . . .	33
1.7.3. Микротвердость . . . . .	35
1.7.4. Механические свойства при растяжении . . . . .	37
1.7.5. Диаграммы деформирования при растяжении . . . . .	39
1.7.6. Анизотропия при растяжении . . . . .	40
1.7.7. Сопротивление усталости . . . . .	42
1.7.8. Термическая стабильность . . . . .	43
1.7.9. Эффект Баушингера . . . . .	47
1.7.10. Сверхпластичность . . . . .	48
<b>Глава 2</b>	
<b>Методические особенности получения наноструктурных материалов методом равноканального углового прессования и проведения экспериментальных исследований . . . . .</b>	<b>49</b>
2.1. Разработка штампа для равноканального углового прессования . .	49
2.2. Трибологические условия равноканального углового прессования . .	54
2.2.1. Технология нанесения гальванической меди на титан . . . . .	57
2.2.2. Технология нанесения гальванической меди на тантал . . . . .	58
2.2.3. Технология нанесения гальванической меди на нержавеющую сталь . . . . .	59
2.3. Исследование механических свойств при растяжении . . . . .	60
2.3.1. Образцы для исследований . . . . .	60
2.3.2. Построение условных диаграмм деформирования . . . . .	62
2.3.3. Построение истинных диаграмм деформирования . . . . .	65

## Глава 3

<b>Влияние равноканального углового прессования на механические свойства меди</b> . . . . .	67
3.1. Бескислородная медь М0б . . . . .	67
3.1.1. Прутки диаметром 70 мм . . . . .	67
3.1.1.1. Металлографические исследования . . . . .	67
3.1.1.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	70
3.1.1.3. Термическая стабильность . . . . .	72
3.1.2. Прутки диаметром 40 мм . . . . .	76
3.1.3. Выводы . . . . .	81
3.2. Технически чистая медь М1 . . . . .	82
3.2.1. Металлографические исследования и параметры прессования . . . . .	82
3.2.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	84
3.2.3. Неоднородность механических свойств при растяжении по сечению заготовки . . . . .	87
3.2.4. Исследование макроструктуры . . . . .	94
3.2.5. Повторяемость результатов . . . . .	97
3.2.6. Скоростная чувствительность . . . . .	99
3.2.7. Анизотропия . . . . .	102
3.2.8. Распределение микротвердости по сечению заготовки . . . . .	106
3.2.9. Влияние скорости прессования . . . . .	108
3.2.10. Термическая стабильность . . . . .	109
3.2.11. Длительная прочность . . . . .	113
3.2.12. Выводы . . . . .	113

## Глава 4

<b>Влияние равноканального углового прессования на механические свойства титана и титановых сплавов</b> . . . . .	115
4.1. Технически чистый титан ВТ1-0 . . . . .	115
4.1.1. Металлографические исследования и параметры прессования . . . . .	115
4.1.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	117
4.1.3. Неоднородность механических свойств при растяжении по сечению заготовки . . . . .	119
4.1.4. Макроструктура . . . . .	125
4.1.5. Повторяемость результатов . . . . .	127
4.1.6. Скоростная чувствительность . . . . .	129
4.1.7. Анизотропия при сжатии . . . . .	133
4.1.8. Выводы . . . . .	136
4.2. Технически чистый титан Grade 4 . . . . .	137
4.2.1. Комплексная термомеханическая обработка . . . . .	137
4.2.2. Структура . . . . .	138
4.2.3. Механические свойства при растяжении . . . . .	139

4.2.4. Анизотропия при сжатии . . . . .	141
4.2.5. Распределение микротвердости . . . . .	142
4.2.6. Сверхпластичность . . . . .	144
4.2.7. Выводы . . . . .	148
4.3. Титановый сплав ВТ6 . . . . .	149
4.3.1. Материал для исследований . . . . .	149
4.3.2. Структурные исследования . . . . .	150
4.3.3. Фрактографические исследования . . . . .	151
4.3.4. Характеристики упругости . . . . .	154
4.3.5. Рентгеноструктурные исследования . . . . .	155
4.3.6. Механические свойства . . . . .	159
4.3.7. Масштабный эффект . . . . .	161
4.3.8. Выводы . . . . .	164
4.4. Титановый сплав Ti-6Al-4V ELi . . . . .	165
4.4.1. Прутки диаметром 20 мм . . . . .	165
4.4.1.1. Исходное, отожженное состояние . . . . .	165
4.4.1.2. Равноканальное угловое прессование . . . . .	167
4.4.1.3. Равноканальное угловое прессование с дополни- тельной экструзией . . . . .	169
4.4.1.4. Предварительная термообработка и стабилизирую- щий отжиг . . . . .	170
4.4.1.5. Эволюция механических свойств при растяжении . .	171
4.4.1.6. Анизотропия при сжатии . . . . .	173
4.4.2. Прутки диаметром 40 мм . . . . .	175
4.4.2.1. Структура и стандартные механические свойства . .	175
4.4.2.2. Распределение свойств по сечению . . . . .	177
4.4.2.3. Скоростная чувствительность при растяжении . . .	181
4.4.2.4. Скоростная чувствительность при сжатии . . . . .	185
4.4.2.5. Анизотропия при сжатии и растяжении . . . . .	188
4.4.2.6. Влияние естественного хранения . . . . .	191
4.4.2.7. Ударная вязкость . . . . .	193
4.4.2.8. Масштабный эффект . . . . .	193
4.4.2.9. Стабилизирующий отжиг . . . . .	194
4.4.3. Выводы . . . . .	195

## Глава 5

### **Влияние равноканального углового прессования на механические свойства металлов и сплавов специального назначения . . . . .**

5.1. Сплав с эффектом памяти формы TiNi . . . . .	197
5.1.1. Параметры прессования и структура . . . . .	197
5.1.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	199
5.1.3. Анизотропия при растяжении . . . . .	200
5.1.4. Масштабный эффект . . . . .	201
5.1.5. Влияние формы . . . . .	202

5.1.6. Обратимая пластическая деформация . . . . .	203
5.1.7. Характеристики упругости . . . . .	204
5.1.8. Выводы . . . . .	204
5.2. Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т . . . . .	205
5.2.1. Прессование при комнатной температуре . . . . .	205
5.2.2. Прессование при повышенной температуре . . . . .	209
5.2.3. Влияние скорости прессования . . . . .	211
5.2.4. Выводы . . . . .	212
5.3. Магнитомягкий сплав 27КХ . . . . .	213
5.3.1. Параметры прессования и структура . . . . .	213
5.3.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	214
5.3.3. Термическая стабильность . . . . .	216
5.3.4. Характеристики упругости . . . . .	219
5.3.5. Выводы . . . . .	220
5.4. Тантал высокой чистоты ТВЧ . . . . .	221
5.4.1. Металлографические исследования и параметры прессования . . . . .	221
5.4.2. Механические свойства при растяжении . . . . .	225
5.4.3. Выводы . . . . .	226

## Глава 6

<b>Основные закономерности изменения и качество механических свойств после равноканального углового прессования . . . . .</b>	<b>227</b>
6.1. Прочностные и пластические характеристики . . . . .	227
6.2. Длительная прочность . . . . .	230
6.3. Ударная вязкость . . . . .	230
6.4. Характеристики упругости . . . . .	230
6.5. Неоднородность . . . . .	230
6.6. Анизотропия . . . . .	231
6.7. Масштабный эффект . . . . .	232
6.8. Скоростная чувствительность . . . . .	233
6.9. Дегградация механических свойств . . . . .	234
6.10. Температурно-скоростной диапазон использования нанострук- турных материалов . . . . .	234
6.11. Отжиг после равноканального углового прессования . . . . .	235
6.12. Выводы . . . . .	236
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>237</b>

миниевого сплава 1421, полученного с использованием равноканального углового прессования и прокатки // *Материаловедение*. 2008, № 7. С. 56–62.

212. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Иностранная литература, 1957.

213. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1981.

214. Попов Н. Н., Коршунов А. И., Сидоркин М. Ю., Сысоева Т. И., Аушев А. А., Кравченко Т. Н. Влияние равноканального углового прессования на структурные характеристики и свойства титанового сплава ВТ6 // *Деформация и разрушение материалов*. 2005. № 8. С. 41–44.

215. Багаряцкий Ю. А. и др. Рентгенография в физическом металловедении / Под редакцией Ю. А. Багарядского. М.: Металлургиздат, 1961.

216. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: МИСиС, 1994.

217. Лякишев Н. П., Алымов М. И., Добаткин С. В. Объемные наноматериалы конструкционного назначения // *Металлы*. 2003, № 3. С. 3–16.

218. Столяров В. В., Валиев Р. З. Получение метастабильных ультрамелкозернистых сплавов равноканальным угловым прессованием // *Металлы*. 2004, № 2. С. 5–11.

219. Семенова И. П., Сaitова Л. Р., Исламгалиев Р. К., Доценко Т. В., Кильмаматов А. Р., Демаков С. Л., Валиев Р. З. Эволюция структуры сплава ВТ6, подвергнутого равноканально-угловому прессованию // *Физика металлов и металловедение*. 2005. Т. 100, № 1. С. 77–84.

220. Миронов С. Ю., Салищев Г. А. Влияние размера зерна и однородности микроструктуры на равномерность деформации технически чистого титана // *Физика металлов и металловедение*. 2001. Т. 92, № 5. С. 81–88.

221. Круглов А. А., Лутфуллин Р. Я., Мухаметрахимов М. Х., Руденко О. А., Сафиуллин Р. В. Средний размер зерна в титановом сплаве ВТ6 и выбор рациональной схемы интегрального процесса сверхпластической формовки / сварки давлением // *Перспективные материалы*. 2005, № 6. С. 79–85.

222. Korshunov A. I., Vedernikova I. I., Kravchenko T. N., Polyakov L. V., Semenova I. P., Raab G. I. Sample Size Effect of the Mechanical Behaviors of UFG Ti-6Al-4V Alloy // *Ultrafine Grained Materials III*, ed. Y. T. Zhu et al., TMC, 2004. P. 589–594.

223. Коршунов А. И., Новиков С. А. Статистическая оценка хрупкой прочности с учетом трещиностойкости // *Прикладная механика и техническая физика*. 1984, № 6. С. 135–138.

224. Semenova I. P., Saitova L. R., Raab G. I., Korshunov A. I., Zhu Y. T., Lowe T. C. 3, Valiev R. Z. Microstructural features and mechanical properties of the Ti-6Al-4V ELI alloy processed by severe plastic deformation // *Materials Science Forum*. 2006. Vols. 503–504, P. 757–762.

225. Семенова И. П. Формирование ультрамелкозернистых структур и повышенных механических свойств в малолегированных титановых сплавах ком-



бинированными методами интенсивной пластической деформации: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Институт физики перспективных материалов при Уфимском государственном авиационном техническом университете. Уфа, 2011.

226. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

227. Яковлева С. П., Махарова С. Н., Борисова М. З. Структура, свойства и особенности разрушения низколегированной стали в субмикрорекристаллическом состоянии // Металлы. 2006, № 4. С. 71–78.

228. Коршунов А. И., Смоляков А. А., Кравченко Т. Н., Каганова И. И. Влияние равноканального углового прессования на механические свойства сплава  $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$  // Физика и техника высоких давлений. 2010. Т. 20, № 4. С. 109–116.

229. Пушин В. Г. и др. Сплавы никелида титана с памятью формы. Часть 1. Структура, фазовые превращения и свойства / Под научной редакцией В. Г. Пушина. Екатеринбург: УрО РАН, 2006.

230. Попов Н. Н. Разработка прогрессивных технологий на основе материалов, обладающих эффектом памяти формы. Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.

231. Попов Н. Н., Коршунов А. И., Аушев А. А., Сидоркин М. Ю., Сысоева Т. И., Костылев И. В., Гусаров А. Е., Столяров В. В. Влияние наноструктурирования и скорости наведения деформации на структурные и термомеханические характеристики сплава на основе никелида титана // Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 102, № 4. С. 460–466.

232. Попов Н. Н., Коршунов А. И., Аушев А. А., Сидоркин М. Ю., Сысоева Т. И., Костылев И. В. Влияние наноструктурирования и температурно-скоростных условий наведения деформации на структурные и термомеханические характеристики сплава на основе никелида титана // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 2010. Вып. 15. С. 460–469.

233. ГОСТ 2590-88. Прокат стальной горячекатаный круглый. Сортамент.

234. ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.

235. ГОСТ 5949-75. Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия.

236. Закирова А. А. Структура и свойства коррозионно-стойкой стали 12X18H10T, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом равноканального углового прессования // Материалы VIII Всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем», 10–14 ноября 2008 г., Белгород. М.: МИФИ, 2008. С. 219–220.

237. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитомягкие. Технические условия.

238. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки.

239. Коршунов А. И., Смоляков А. А., Кравченко Т. Н., Поляков Л. В., Каганова И. И., Коротченкова И. В. Качество механических свойств металлов и спла-

вов после равноканального углового прессования // Физика и техника высоких давлений. 2008. Т. 18, № 4. С. 87–95.

240. Valiev R. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // Nature Materials. 2004. Vol. 3, N 8. P. 511–516.

241. Valiev R. Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T. G., Zehetbauer M. J., Zhu Y. T. Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation // JOM. 2006. Vol. 58, N 4. P. 33–39.

242. Валиев Р. З., Семенова И. П., Латыш В. В., Щербаков А. В., Якушина Е. Б. Наноструктурный титан для биомедицинских применений: новые разработки и перспективы коммерциализации // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3, № 9–10. С. 106–115.

243. Мышляев М. М., Камалов М. М., Прокунин М. А., Мышляева М. М. Структурное состояние РКУ-прессованного сплава Al-Li // Металлы. 2003. № 1. С. 99–101.

244. Копылов В. И., Чувильдеев В. Н. Предел измельчения зерен при равноканальной угловой деформации // Металлы. 2004, № 1. С. 22–35.

245. Чувильдеев В. Н., Нохрин А. В., Копылов В. И. Аномальное упрочнение при отжиге микрокристаллических металлов, полученных методом многоциклового равноканального углового прессования // Металлы. 2003, № 3. С. 70–81.

246. Шпейзман В. В., Николаев В. И., Смирнов Б. И., Лебедев А. Б., Ветров В. В., Пульнев С. А., Копылов В. И. Деформация нанокристаллических материалов при низких температурах // Известия Академии наук. Серия физическая. 2000. Т. 64, № 2. С. 377–380.

247. Савиных А. С., Разоренов С. В., Канель Г. И. Влияние размера зерна и начальной температуры на механические свойства титана BT1-0 при ударно-волновом нагружении. Физика экстремальных состояний вещества – 2003 // Труды 18-й Международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», 1–6 марта 2003 г., Эльбрус. Черноголовка (Моск. обл.): Изд-во ИПХФ РАН, 2003. С. 62–63.

248. Пат. 2383654 РФ, МПК C22F 1/18, B82B 3/00. Наноструктурный технически чистый титан для биомедицины и способ получения прутка из него / Р. З. Валиев, И. П. Семенова, Е. Б. Якушева, Г. Х. Салимгареева // Бюллетень изобретений. 2010, № 7.

249. Колобов Ю. Р., Кашин О. А., Дударев Е. Ф., Валиев Р. З., Столяров В. В., Сагымбаев Е. Е. Высокопрочный наноструктурный титан для медицинских применений // Перспективные материалы. 2001, № 6. С. 55–60.

250. Выборнов П. Современное состояние нанотехнологической программы МО США // Зарубежное военное обозрение. 2007, № 11. С. 21–27.

**Коршунов Александр Иванович**

**Физико-механические свойства материалов после  
равноканального углового прессования.  
Особенности проявления**

Монография

Редактор *Н. П. Мишкина*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *Е. В. Моисеева*

---

Подписано в печать 10.07.2013    Формат 70 × 100/16  
Печать офсетная.    Усл. печ. л. ~21,3    Уч.-изд. л. 20,0  
Тираж 250 экз.    Зак. тип. 1075-2012

---

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23