

PACS: 62.20.Fe

Г.И. Рааб

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТИТАНОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Институт физики перспективных материалов при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
ул. К. Маркса, 12, г. Уфа, 450000, Россия  
E-mail: giraab@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2007 года

*Проведен анализ важных факторов, влияющих на структурообразование и технологичность метода равноканального углового прессования (РКУП). Впервые разработан и исследован метод РКУП conform для получения наноструктурных (НС) длинномерных полуфабрикатов из технического титана. В рамках проведенных исследований создана экспериментальная установка для РКУП conform заготовок длиной до 3 м и сечением до 7.5 × 7.5 мм. Отработаны элементы технологии получения НС технически чистых титановых полуфабрикатов с уровнем предела прочности до значений, близких к 1000 МПа, и пластичности более 10%.*

### Введение

Традиционные промышленные процессы обработки металлов давлением (ОМД), использующие горячую и/или холодную деформацию, направлены преимущественно на формообразование. При этом важным является технологичность процессов, а уровень механических свойств получаемых полуфабрикатов и изделий формируют термической обработкой или деформированием в определенных условиях на финишных стадиях. Как правило, металлические материалы после вышеотмеченных обработок имеют крупнозернистую и/или субзернистую структуру. Вместе с тем известно [1,2], что их НС-состояния с зернами размером менее 1  $\mu\text{m}$  и особым состоянием границ могут в 2–3 раза повысить прочность технически чистых металлов и в 1.5–2 раза – сплавов в сочетании с достаточно высокой пластичностью. На практике при формировании НС-состояний в металлических объемных материалах наиболее широкое распространение получили методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [2]. В последние годы научно-прикладные исследования этих методов с целью получения НС-полуфабрикатов с высоким комплексом физико-механических свойств в технически чистых металлах и сплавах формируются в одно из новых направлений ОМД.

В ряд перспективных методов ИПД следует поставить РКУП. Этот метод имеет технологические преимущества в плане достигаемых высоких уровня и однородности разовых деформаций и производительности процесса, например для случая использования схемы *conform* [3,4]. Благодаря преимуществам РКУП *conform* появляется возможность создания промышленных высокопроизводительных технологий получения длинномерных НС-полуфабрикатов.

В данной работе показаны методические подходы при анализе параметров получения методом РКУП металлических НС-полуфабрикатов, в том числе и длинномерных. В качестве исследуемого материала использовали технически чистый титан марки ВТ1-0.

### Метод РКУП *conform*

Известные исследования метода РКУП *conform* проведены с использованием технически чистого пластичного алюминия и носят преимущественно научный характер, связанный с изучением эффективности структурообразования. Применение в качестве объекта исследований титана инициирует инновационную составляющую работ в связи с заинтересованностью стоматологических компаний в высокопрочных титановых материалах, повышающих качество и расширяющих номенклатуру имплантантов. НС технически чистые марки титана отвечают этим требованиям в виду того, что обладают пределом прочности порядка 1000–1300 МПа и пластичностью более 10%, сравнимыми с соответствующими свойствами легированных сплавов и даже более высокими. Кроме того, он менее токсичен в физиологической среде.

В отожженном состоянии технический титан при комнатной температуре проявляет довольно высокую пластичность ( $\delta = 25\text{--}30\%$ ), что позволяет подвергать его холодной обработке, приводящей к ряду известных экономических преимуществ. Однако следует учитывать, что титан при этом интенсивно упрочняется со снижением пластических свойств. В этой связи особый интерес вызывает разработка процесса формирования НС-состояния титана при комнатной температуре. Поэтому оценка деформируемости титана в условиях интенсивной многоциклового холодной обработки методом РКУП становится актуальной. В основу таких оценок легли подходы Уральской научной школы [5]. Используя адекватность схем деформации и характера разрушения при РКУП и кручении в условиях локализованного сдвига, предлагаем методику оценки деформируемости при РКУП. Сущность методики проиллюстрирована на рис. 1.

По результатам испытания образцов кручением определяется интенсивность деформации сдвига, которая сопоставляется с интенсивностью накапливаемой деформации при РКУП. Кручение в обычных условиях позволяет воссоздать условия, близкие к РКУП. Особенно это относится к зоне заготовки, близкой к внутреннему углу пересечения каналов. В данной зоне отмечается наличие даже растягивающих напряжений [6], а ведь известно, что

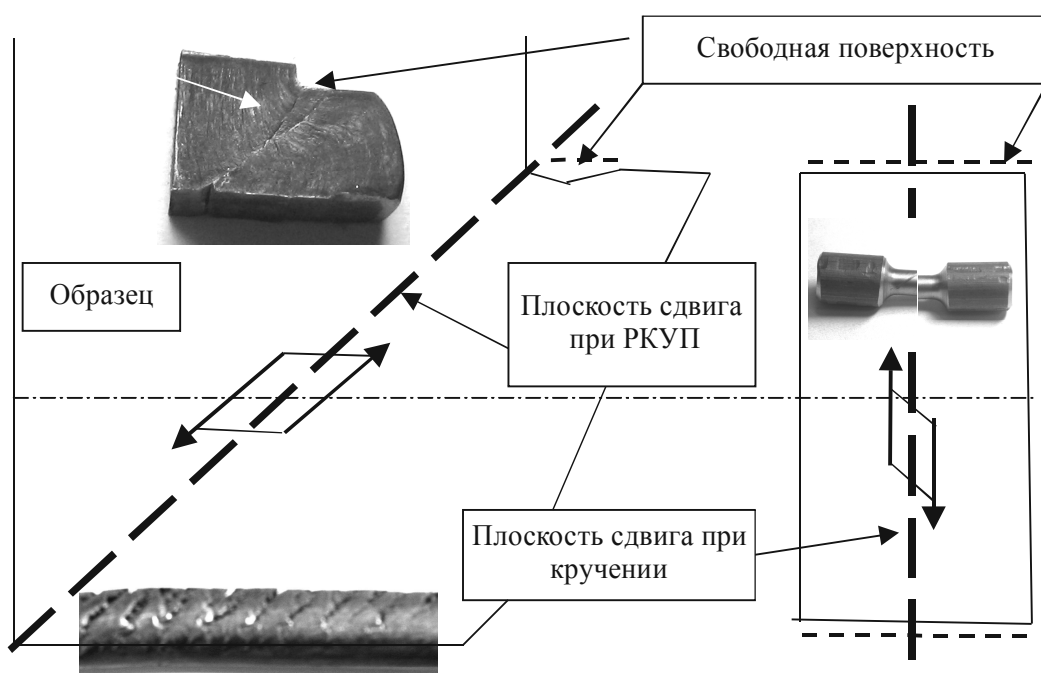


Рис. 1. Схема методологического подхода для оценки деформируемости материалов при РКУП

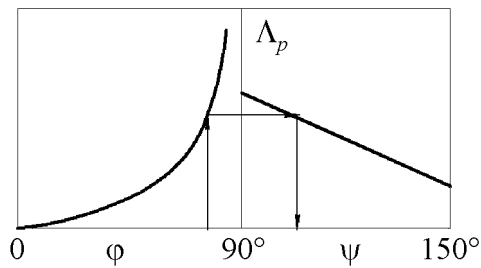
трещины начинают развиваться именно в этой области заготовок. Оценка деформируемости по предложенной методике после каждого цикла РКУП позволяет оптимизировать процесс структурообразования и получать бездефектные образцы в условиях многоциклового обработки. В итоге разработанный подход с достаточно высокой степенью сходимости позволяет прогнозировать деформируемость материалов при РКУП (табл. 1). Практическое использование методики представлено в виде номограммы на рис. 2. Анализируя технологические особенности титана, следует отметить его высокую адгезионную активность, которая создает трудности при его обработке методами ОМД. Трибологические аспекты процесса РКУП титана при комнатной температуре были исследованы нами ранее [7] и использованы при разработке процесса РКУП *conform*. Однако контактные условия холодной ИПД титана требуют улучшения и дальнейшего изучения.

Таблица 1

**Результаты исследования запаса пластичности меди М1 и титана ВТ1-0 и рекомендуемый угол пересечения каналов при их обработке\***

Накопленная деформация при РКУП $e$		Угол закрутки $\varphi$ , grad		Интенсивность деформации $\Lambda_p$		Угол пересечения каналов $\psi$ , grad	
М1	ВТ1-0	М1	ВТ1-0	М1	ВТ1-0	М1	ВТ1-0
0		81	73	6.3	3.3	90	
0.8		78	60	4.7	1.7	90	110
3.2		73	53	3.2	1.3	90	120

\* Размеры поперечного сечения заготовки  $7.5 \times 7.5$  mm.

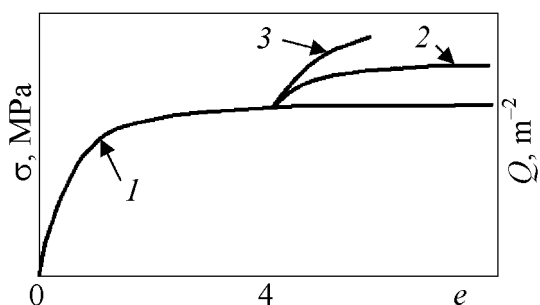


**Рис. 2.** Номограмма для экспресс-анализа технологической пластичности материалов перед РКУП и выбора угла пересечения каналов:  $\varphi$  – угол закрутки образца в момент разрушения,  $\psi$  – рекомендуемый угол пересечения каналов,  $\Lambda_p$  – интенсивность деформации сдвига

Другими важными аспектами при получении НС-материалов являются характер, суммарный уровень и однородность накапливаемой деформации в условиях многоциклового обработки. Это одни из наиболее необходимых параметров и факторов, заметно влияющих на формирование НС зеренного типа, повышенный уровень и изотропность механических свойств. В ряде работ [2,8] показано, что изменение направления главных осей деформации при РКУП на  $90^\circ$  или на противоположное, осуществленное за счет кантовки заготовки между циклами обработки, приводит к более быстрому

формированию НС, в том числе и в титане. Проведенные нами теоретические и практические исследования и полученные результаты, подтверждающие положительное воздействие суммарно немонотонных деформаций, позволили разработать ряд новых схем, приводящих к интенсификации процесса формирования НС-состояний материалов [9].

Уровень накопленной деформации оказывает решающее воздействие на фрагментацию структуры. Применительно к методам интенсивной деформации установлено, что процесс фрагментации, прочность НС-материала и плотность дислокаций зависят от геометрии очага деформации и характера его изменения [10] (рис. 3). В условиях стабильной геометрии очага и отношения его площади к его объему (удельной поверхности очага деформации  $\Delta A$ ), например, как при РКУП или кручении заготовок под гидростатическим давлением, фрагментация структуры с накоплением деформации затухает. При уровне накопленной деформации  $e = 3-4$  и немонотонном воздействии возможно формирование НС-состояний материалов, в частности в титане. Однако повышение  $\Delta A$  при РКУП за счет уменьшения геометрических размеров НС-заготовок приводит к повышению уровня прочности с характерным затуханием скорости роста прочности. Для случаев, когда происходит изменение  $\Delta A$  в сторону увеличения от цикла к циклу (например, при волочении), прочность продолжает расти при заметно меньшем уровне накапливаемой деформации. Так, после РКУП при прочих близких условиях круглая (диаметром 20 mm) титановая заготовка имеет прочность 750 МПа, размер зерен  $\sim 280$  nm, а квадратная ( $7.5 \times 7.5$  mm) – 830 МПа, размер зерен  $\sim 240$  nm. Холодное волочение НС-титана с квадратного ( $7.5 \times 7.5$  mm) профиля на круглый (диаметром 5 mm) с суммарно накопленной дефор-



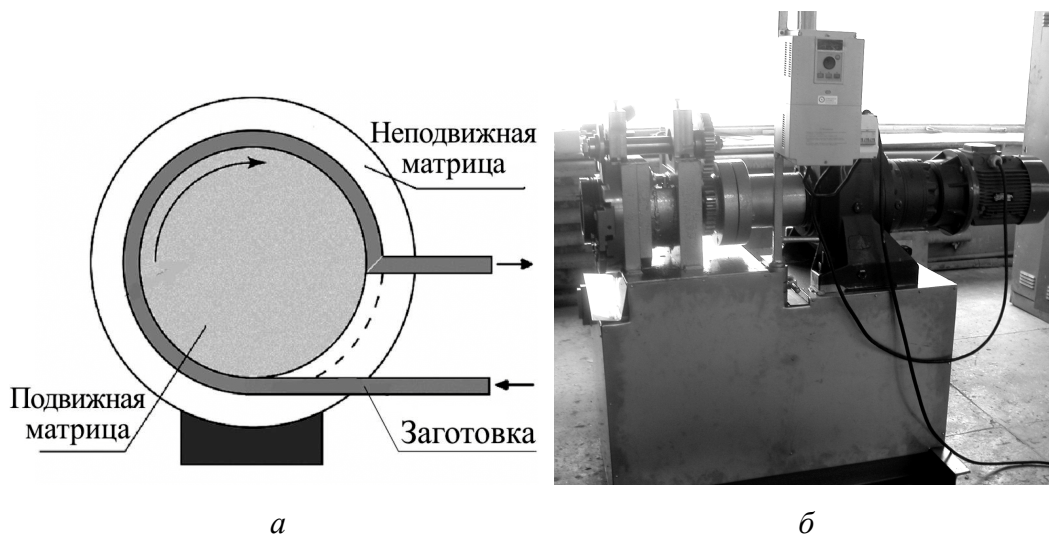
**Рис. 3.** Выявленные тенденции влияния накопленной деформации на показатели предела прочности и плотности дислокаций в процессах ИПД: 1 – РКУП крупногабаритной заготовки ( $\Delta A = \text{const}$ ); 2 – РКУП малогабаритной заготовки, полученной из крупногабаритной НС-заготовки ( $e \sim 4$ ,  $\Delta A = \text{const}$ ); 3 – волочение малогабаритной заготовки, полученной из крупногабаритной НС-заготовки ( $e \sim 4$ ,  $\Delta A = \text{var}$ )

мацией  $e = 0.9$  позволяет получить прочность 1000 МПа и размер зерен около 200 nm.

Очевидно, что однородность накапливаемой деформации соответственно влияет на однородность структуры и механических свойств. Исследование процесса РКУП *conform* методом конечных элементов с использованием пакета Deform 3D было представлено нами в [6], где показано, что для стадии устойчивого течения однородность деформации титановых заготовок после одного цикла составляет  $e = 0.8 \pm 0.04$ . Поэтому при формировании НС-состояний методом РКУП *conform*

следует ожидать однородного уровня свойств в получаемых длиномерных полуфабрикатах.

Представленный выше анализ и комплексный подход к проблеме формирования НС-материалов позволили создать экспериментальную установку и разработать опытную технологию получения длиномерных НС-полуфабрикатов методом РКУП *conform* (рис. 4, табл. 2). Конструктивное исполнение устройства и способ обработки технического титана защищены международными патентами.



**Рис. 4.** Принципиальная схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки для РКУП *conform*

Технические характеристики экспериментальной установки

Параметры	Значения
Марка материала обрабатываемых заготовок	Ti, Cu, Ni, Fe и др.
Длина обрабатываемых заготовок, m	1–3
Поперечное сечение, mm	до $\square 7.5 \times 7.5$
Температура обработки, °C	20
Скорость обработки, mm/s	20–100
Крутящий момент, N·m	8000
Мощность привода, kW	5.5
Регистрируемые	1. Крутящий момент 2. Температура формообразующих вставок 3. Скорость обработки
Управляемые	Скорость обработки

Использование предложенной методики для оценки деформируемости технического титана при комнатной температуре в условиях РКУП позволило определить максимально возможное воздействие за цикл обработки. При этом рекомендуемый угол пересечения каналов методом *conform* составил  $120^\circ$ . В качестве подсмазочного покрытия рекомендуются бораты в сочетании со смазкой Росойл-А. На основе результатов исследований и проведенного анализа для реализации процесса РКУП *conform* были выбраны маршруты прессования с кантовкой заготовки относительно ее продольной оси на  $90^\circ$  в условиях 4–6-цикловой обработки, позволяющей накапливать деформацию  $e \geq 3$ .

Исследования проводили на двух типоразмерах длинномерных образцов сечениями  $5.2 \times 5.2$  и  $7.5 \times 7.5$  mm. Сравнение характеристик свойств НС-титана после обработки методом РКУП *conform* (табл. 3) показало, что после шести циклов обработки прочность титана достигает значений, близких к 1000 МПа при пластичности более 10%. Общий вид полученных длинномерных заготовок диаметром 5 mm и длиной до 2–3 m представлен на рис. 5. Анализ температурных полей оснастки и заготовки показал, что деформационный разогрев при скорости  $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  повышает температуру заготовки до  $120\text{--}130^\circ\text{C}$ , что необходимо учитывать при разработке оснастки и промышленных технологий РКУП *conform*.



Рис. 5. Общий вид НС титановых длинномерных заготовок, полученных методом РКУП *conform* после 4 циклов и последующего волочения с квадратного ( $7.5 \times 7.5$  mm) профиля на круглый (диаметр 5 mm)

Таблица 3

Характеристики метода РКУП *conform* и свойства получаемого НС-титана ВТ1-0

Размеры поперечного сечения, mm	Количество циклов обработки $N$	Накопленная деформация $e$	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Размер зерен, nm
5.2 × 5.2	6	4.4	960	12–13	200
	4	3	850	10–11	200
7.5 × 7.5	4	3	830	8–9	240

### Выводы

1. Проведен анализ важных факторов, влияющих на структурообразование и технологичность метода РКУП.

2. Впервые разработан и исследован метод РКУП *conform* для получения НС длинномерных полуфабрикатов из технического титана.

3. В рамках проведенных исследований создана экспериментальная установка для РКУП *conform* заготовок длиной до 3 м и сечением до 7.5 × 7.5 mm. Отработаны элементы технологии получения таких полуфабрикатов с уровнем предела прочности до значений, близких к 1000 МПа, и пластичностью более 10%.

4. Для получения более прочного и пластичного состояния НС-титана предпочтительнее накапливать уровень суммарной деформации  $e > 4$ .

Работа проведена при поддержке проекта МНТЦ № 3208р.

1. *H. Gleiter*, Prog. Mater. Sci. **33**, 223 (1989).
2. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
3. *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев*, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).
4. *D. Green*, J. Inst. Metals **99**, 76 (1972).
5. *А.А. Богатов, О.И. Мижирецкий, С.В. Смирнов*, Ресурс пластичности металлов при обработке давлением, Металлургия, Москва (1984).
6. *Г.И. Рааб, Ф.Ф. Сафин, Р.З. Валиев*, КШП № 6, 41 (2006).
7. *Г.И. Рааб, В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов, Р.З. Валиев*, КШП № 5, 20 (1999).
8. *V.V. Stolyarov et al.*, Mater. Sci. Eng. **A299**, 59 (2001).
9. *Р.З. Валиев, Х.Ш. Салимгареев, Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, Н.М. Амирханов*, Способ комбинированной ИПД заготовок, Патент РФ № 2240197г, опублик. 2004.
10. *Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб*, ФММ **101**, 311 (2006).

G.I. Raab

## DEVELOPMENT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION METHOD TO OBTAIN LONG-SIZED NANOSTRUCTURED TITANIUM SEMIPRODUCTS

There has been performed an analysis of significant factors that influence structure formation and technological effectiveness of the method of equal-channel angular pressing (ECAP). For the first time there was developed and investigated the method of ECAP conform for producing nanostructured (NS) long-sized semiproducts made of CP Ti. Within the framework of the investigations conducted there was constructed a pilot unit for ECAP conform billets having length up to 3 m and section up to 7.5 mm. There were developed elements of the technology for producing nanostructured CP Ti semiproducts with a level of ultimate strength up to the values close to 1000 MPa and ductility more than 10%.

**Fig. 1.** Scheme of methodologic approach to estimate deformability of a material under the ECAP

**Fig. 2.** Nomograph for express analysis of technological plasticity of materials prior to the ECAP and for selection of channel intersection angle:  $\varphi$  – angle of sample twisting at a moment of fracture,  $\psi$  – recommended angle of channel intersection,  $\Lambda_p$  – intensity of shear deformation

**Fig. 3.** Revealed tendencies of accumulated strain effect on ultimate strength and dislocation density values during SPD: 1 – ECAP of long-sized billet ( $\Delta A = \text{const}$ ); 2 – ECAP of small-sized billet obtained from the long-sized NS-billet ( $e \sim 4$ ,  $\Delta A = \text{const}$ ); 3 – drawing of small-sized billet obtained from the long-sized NS-billet ( $e \sim 4$ ,  $\Delta A = \text{var}$ )

**Fig. 4.** Schematic diagram (a) and general view (б) of experimental plant for ECAP conform

**Fig. 5.** General view of NS long-sized titanium billets produced by the method of ECAP conform past 4 cycles followed by drawing of square (7.5 × 7.5 mm) section for having rounds (5 mm diameter)