

УДК 669.539.620

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ

© Владимир Владимирович Столяров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

vlst@yauza.ru

Аннотация. Статья посвящена краткому обзору деформационных методов измельчения структуры объемных образцов сплавов, имеющих различную природу.

Введение

Особенностью рассматриваемых ниже методов является деформационная природа механизмов измельчения структуры. В [1] подробно рассмотрены схемы и режимы объемного наноструктурирования с использованием методов интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) и равноканального углового прессования (РКУП), а также всестороннейковки и винтовой экструзии. Поскольку для разных по природе материалов техника наноструктурирования имеет свои особенности, то ниже описываются эти и другие развиваемые методы применительно к титановым сплавам. Кроме объемных методов наноструктурирования представлен поверхностный метод упрочнения и измельчения структуры, также основанный на деформационном воздействии.

1. Объемные и поверхностные методы наноструктурирования

1.1. Интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением. Идея применения деформации кручением под высоким гидростатическим давлением и создания соответствующей аппаратуры была реализована в (Бриджмен П.У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М. : Иностранная литература, 1955. 444 с.). Им отмечено, что напряжения течения стремятся к насыщению и сильно повышаются с увеличением гидростатического давления. Схемы метода представлены на рис.1. Применение разных схем ИПДК обусловлено различной исходной пластичностью материала и сохранением целостности образца. Для титановых сплавов ВТ1-0, ВТ6 и TiNi ввиду их достаточно высокой исходной пластичности в *метод* ИПДК большая часть образцов деформируется по схеме рис.1а при комнатной температуре, скорости деформации 3 с^{-1} и давлении 5 ГПа. Для более хрупких материалов, для сохранения целостности образцов при больших накопленных деформациях применяется схема с максимально возможным давлением 12 ГПа (рис.1б).

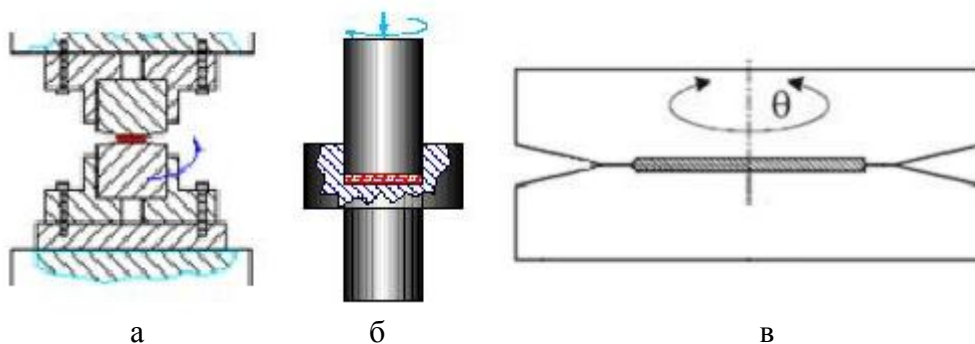


Рис.1. Схемы метода: а – с открытыми бойками; б – с боковой поддержкой; в – с полостью

При необходимости использования максимальных монотонных или циклических деформаций для большего измельчения структуры и аморфизации образца можно переходить от простой схемы (рис.1а) к более сложным схемам (рис.1 б, в). В настоящее время метод ИПДК позволяет получать образцы $\varnothing 20 \times 1$ мм при давлении до 5-6 ГПа и реверсировании по направлению вращения образца. Температура деформирования может варьироваться в интервале 500-550 °С.

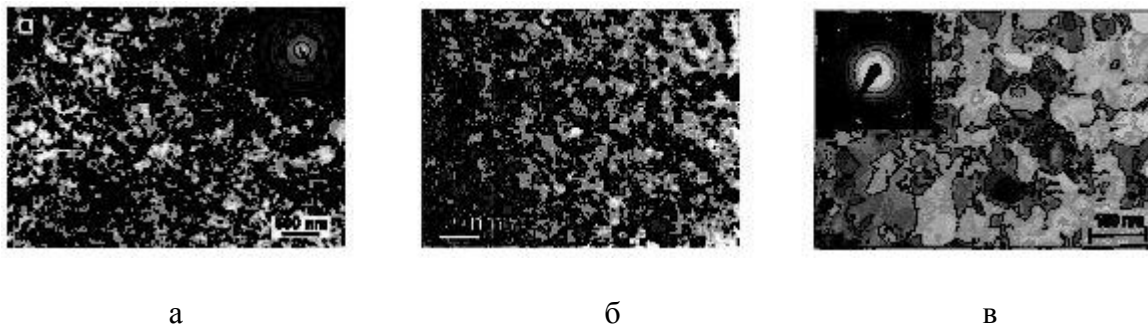


Рис.2 Микроструктура сплавов после ИПДК: а – VT1-0; б – TiNi; в – VT6

Вид микроструктур подтверждает, что сплавы после ИПДК имеют наноструктурное (рис.2б) или УМЗ (рис.2а, в) состояния.

1.2. Равноканальное угловое прессование

Для получения массивных образцов из титановых сплавов с УМЗ структурой развит метод РКУП, схема которого для случая $\Phi = 90^\circ$ показана на рис.3а. Метод РКУП характеризуется большим количеством параметров, определяющих качество, структуру и свойства получаемых образцов. К таким параметрам относятся исходное структурное состояние материала, угол Φ , температура, скорость и степень деформации, а также маршрут прессования (рис.3 б, с).

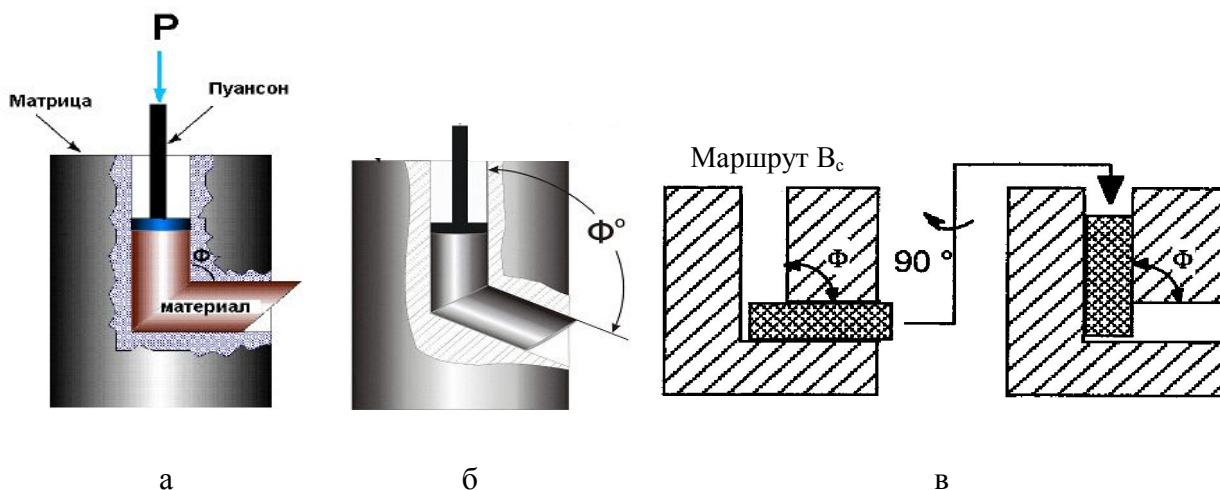


Рис.3. Схемы и маршрут РКУП, а - $\Phi = 90^\circ$; б - $\Phi = 110^\circ$; в - B_c

Для всех титановых сплавов структурное состояние перед прессованием выбирается хорошо отожженным, а в случае TiNi сплава проводится гомогенизация с последующей закалкой на твердый раствор с температур 700-800 °С. Для менее прочного сплава VT1-0 угол $\Phi = 90^\circ$, а для более прочных и менее пластичных сплавов VT6 и TiNi $\Phi = 110-135^\circ$ (рис.3б). Для большинства разных материалов маршрут РКУП выбирается B_c . Контролируя и варьируя основные параметры и режимы, возможно получение регламентированной структуры.

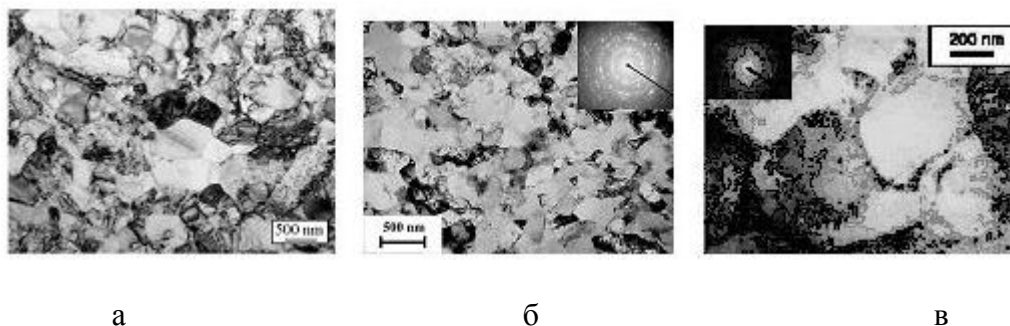


Рис.4. Микроструктура сплавов после 8 циклов РКУП: а – Grade-2, 450 °С; б – TiNi, 450 °С; в – Ti-64, 700 °С

В результате исследования структуры, механических свойств и качества поверхности образцов, пресованных по разным маршрутам, экспериментально были найдены оптимальные форма и геометрия каналов пресования, число циклов ($N = 8$), ориентация заготовки перед каждым последующим пресованием, температура пресования, которая, например, для VT1-0 находится в интервале 250 - 450°С. Способы получения УМЗ титановых заготовок из сплавов VT1-0, TiNi и др. методом РКУП были запатентованы (Патент США № 6399215, 2000; Патент РФ № 2175685, 2001; РФ, № 2266973, 2005) и широко применяются в различных отраслях промышленности .

Комплексный подход к развитию метода РКУП позволил разработать технологический процесс получения объемных цилиндрических заготовок $\varnothing 20 \div 40$ мм и длиной 100÷200 мм из сплавов VT1-0, TiNi, VT6 с УМЗ структурой (рис.4) и высоким уровнем механических свойств.

Одним из эффективных технологических элементов для РКУП хрупких материалов является *противодавление*, которое способствует получению цельных, без трещин заготовок и повышению механических свойств.

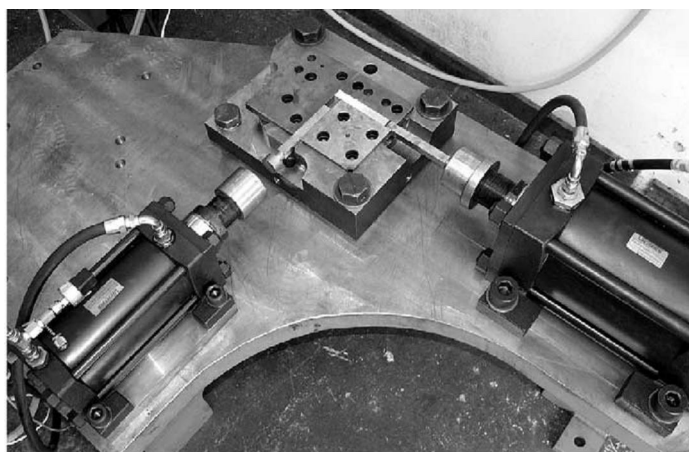


Рис.5. РКУП оснастка с контролируемым противодавлением (Stolyarov V.V. et al., Mater. Sci& Eng., A 357, 2003, 159-167)

Впервые оно было применено для алюминиевых сплавов с использованием горизонтальной оснастки, рис.5. Отметим, что метод РКУП не ограничивается его применением в лабораторных исследованиях. Примеры разработки технологий получения разнообразных полуфабрикатов на основе метода РКУП подробно представлены в (Рааб Г.И., Автореферат докт. диссертации, Уфа, 2009).

1.3. Всесторонняя изотермическая ковка

Метод РКУП обычно осуществляется при относительно низких температурах ($< 550\text{ }^{\circ}\text{C}$), что связано с допустимой рабочей температурой материала оснастки. Для малопластичных и высокопрочных материалов часто используют метод многократной всесторонней изотермическойковки [2], лабораторная схема которой представлена на рис.6.

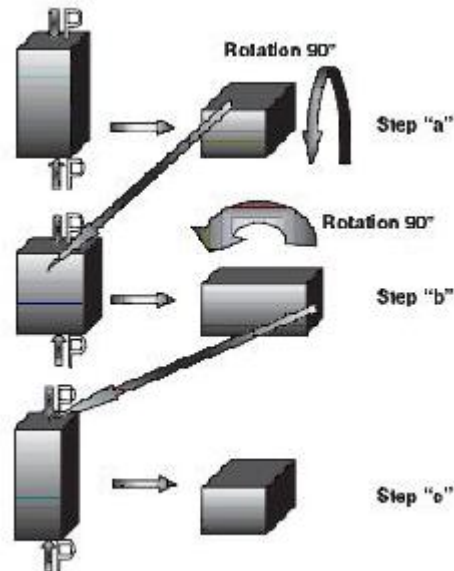


Рис.6. Схема трех циклов осадки со сменой оси деформации (Zherebtsov S. et al, *Materials Transactions*, 46, 9 2005 1-6).

Метод заключается в свободной осадке цилиндрического или призматического образца на плоских бойках с многократной сменой оси деформации при скорости деформации 10^{-3} - 10^{-4} c^{-1} и последовательном снижении температуры в интервале $(0.2-0.5) T_{\text{пл,К}}$. При каждой температуре производится от 3 до 6 шагов со сменой оси деформации, после чего выполняется отжиг для снятия напряжений. Исследование процесса формирования УМЗ структуры данным методом было выполнено на сплавах ВТ1-00, ВТ8, ВТ6. Показано, например, что в температурной области $400 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($< 0,5 T_{\text{пл}}$) в чистом титане ВТ1-00 в результате развития динамической рекристаллизации формируется УМЗ структура со средним размером зерен $0.1-0.5\text{ }\mu\text{м}$ (Салищев Г.А. и др. *Изв. РАН. Металлы*. 4. 1996. С. 86-91).

Для получения заготовок титана в наноструктурном состоянии метод многостороннейковки был модифицирован так, что одноосное прессование осуществляли в стесненных условиях (рис.7) в специально изготовленной пресс-форме (Патент РФ № 2315117, 2008).

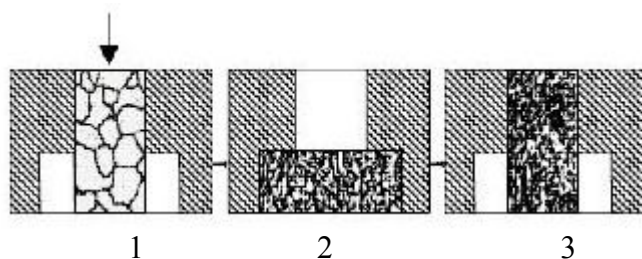


Рис. 7. Схема многократного одноосного прессования со сменой оси деформации: 1 – исходная заготовка, 2 – после первого цикла прессования, 3 – повторение циклов прессования

1.4. Винтовая экструзия

Метод винтовой экструзии (ВЭ), предложенный в работе (Бейгельзимер Я.Е. и др. *Физика и техника высоких давлений.* 9 (3), 1999, С. 109), отличается от известных методов напряженно-деформированным состоянием в образце, а также технологическими возможностями применения (рис.8). ВЭ позволяет аккумулировать большие деформации в металлах, заметно измельчать их микроструктуру и может быть реализована в установках гидроэкструзии для получения прецизионных длинномерных профилей разной формы (прутки, трубы, сверла и др.). Однако она может приводить к появлению сильной нежелательной анизотропии, например, в чистом титане. Применение последующей прокатки позволяет существенно снизить степень анизотропии, вызванной ВЭ (Патент РФ № 2237109, 2004).

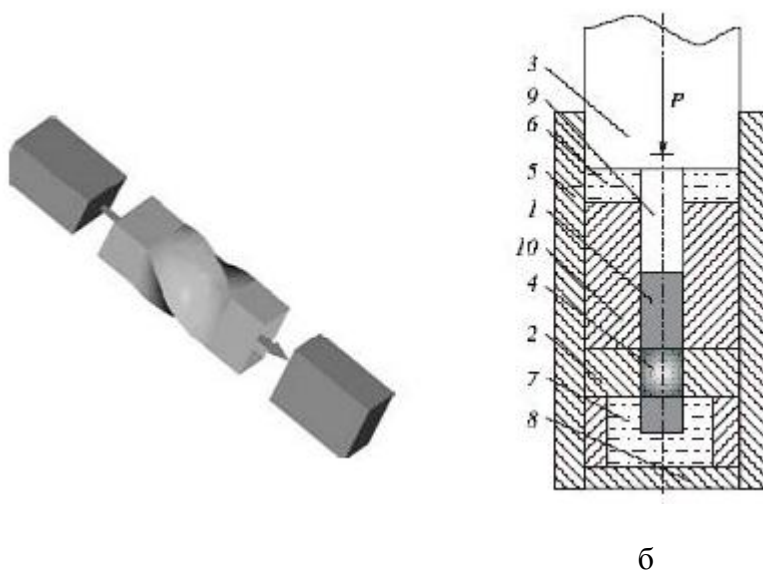


Рис.8. Схема винтовой экструзии (а) и установки (б): 1, образец; 2, винтообразная вставка; 3, пуансон; 4, схематический винтовой канал; 5, контейнер; 6 и 7, соединенные вместе камеры высокого давления; 8, клапан; 9, стержень; 10, промежуточный вкладыш.

1.5. Электропластическая деформация

Использование методов интенсивной пластической деформации, таких как ИПДК, РКУП, многосторонняя ковка, винтовая экструзия приводит к измельчению структуры сплавов, однако не применимо для получения длинномерных ультрамелкозернистых заготовок тонкого сечения. Наибольшим потенциалом для этой цели обладает метод электропластической прокатки (ЭПП), впервые использованный сначала для наноструктурирования титанового сплава на основе TiNi [3], а затем для измельчения структуры сплавов ВТ6 и Ti-64 (Семендеева О.В. и др. *Деформация и разрушение материалов.* №8 2011, С.20-23). Метод и схема ЭПД, как способ измельчения микроструктуры в длинномерных заготовках тонкого сечения титановых сплавов различной природы, запатентован (патенты РФ № 2367712, № 2367713, 2007) и показан на рис. 9 на примере электропластической прокатки. Многоходовая ЭПП проводится в плоских валках или ручьевых калибрах при комнатной температуре с постоянной скоростью прокатки 50 мм/с при регулируемом разовом обжатии по сечению образца. Плотность (10-1000 А/мм²), частота (500-1000 Гц) и длительность (10-1000 мкс) импульса тока регулируются генератором и поддерживаются постоянными в процессе прокатки. Импульсный ток от генератора (4) подводится отрицательным полюсом к подающему столу (3) и через образец (2) передается на валки (1). От положительного полюса на валках ток передается обратно к генератору. Поскольку пропускание тока сопровождается тепловым эффектом, то при ЭПД возможен нагрев образцов, величина которого будет зависеть от параметров и режима импульсного тока.

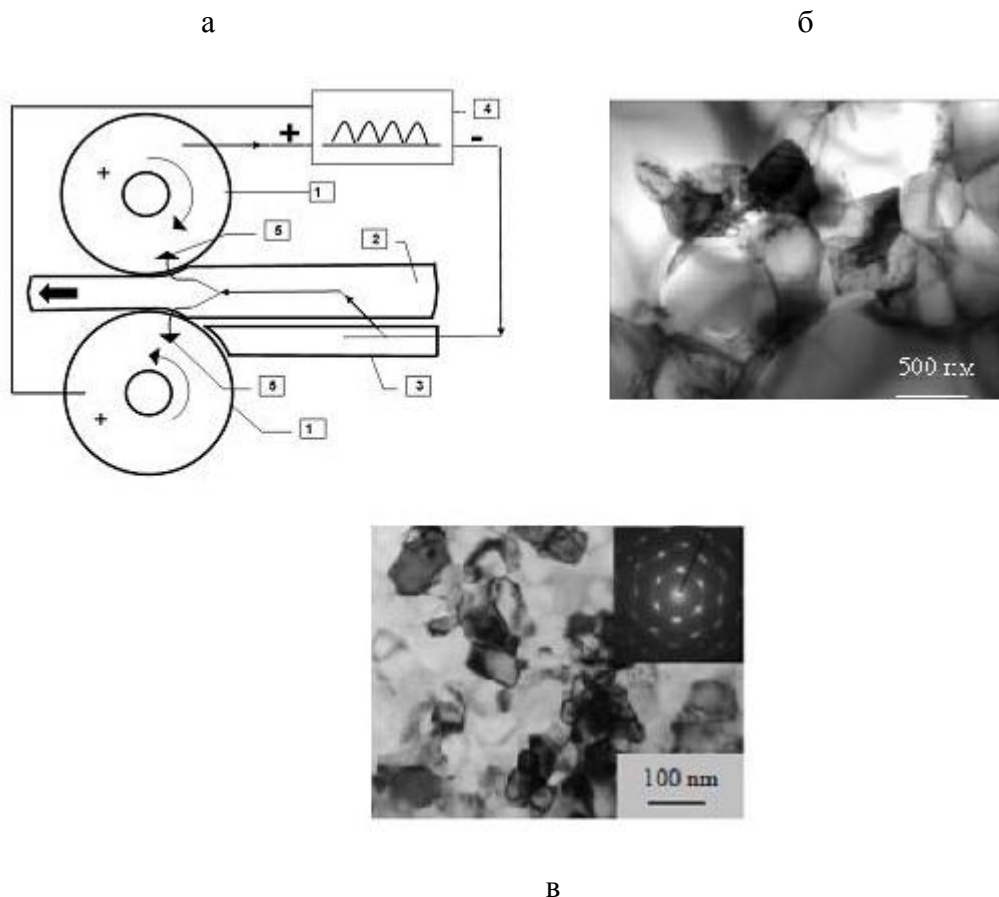


Рис. 9. Схема подвода тока (а) и микроструктуры сплавов ВТ6 (б) и TiNi (в) после ЭПП: 1 – валки; 2 – образец; 3 – подающий стол; 4 – ГИТ; 5 – направление тока

Теоретические и экспериментальные оценки, выполненные для сплава TiNi показали, что в результате совместного действия деформации и тока при однородном распределении тепла по объему максимальная температура на поверхности образца $T_{\max} \ll T_{\text{рекр}}$. Так например, при прокатке или растяжении с током T_{\max} , измеренная чувствительным тепловизором, составляет соответственно, 200-250 и 40-50 °С. Это позволяет отнести ЭПД к теплой или даже холодной деформации.

1.6. Ультразвуковая поверхностная обработка

Объемные методы наноструктурирования приводят к формированию однородной микроструктуры и равномерных механических свойств в различных точках сечения образца от центра к поверхности. Однако в практике часто появляется необходимость в создании градиентных структур, с высокой прочностью в поверхностных слоях и высокой пластичностью в сердцевине. Такое сочетание прочности и пластичности в разных точках сечения способствует формированию свойств, обеспечивающих повышенную работоспособность поверхностных слоев. К ним относятся сопротивление усталости, трение, износ, коррозионная стойкость и др. В этой связи развитие методов наноструктурирования поверхностных слоев относится к одной из приоритетных задач науки о материалах.

Способы упрочнения поверхности детали ультразвуковым методом известны достаточно давно, однако их разработки применительно к созданию наноструктур на поверхности материалов появились относительно недавно [4, 5]. В процессе ультразвуковой обработки резанием или выглаживанием поверхностного слоя материала происходит его пластическое деформирование при высокочастотном виброударном воздействии инструмента, который строками движется вдоль поверхности, соударяясь с ней при малых импульсах удара. При этом изменяется как геометрия (чистота) самой поверхности, так и структура тонких

поверхностных и приповерхностных слоев материала, в которых возникают слои упорядоченных наноструктур.

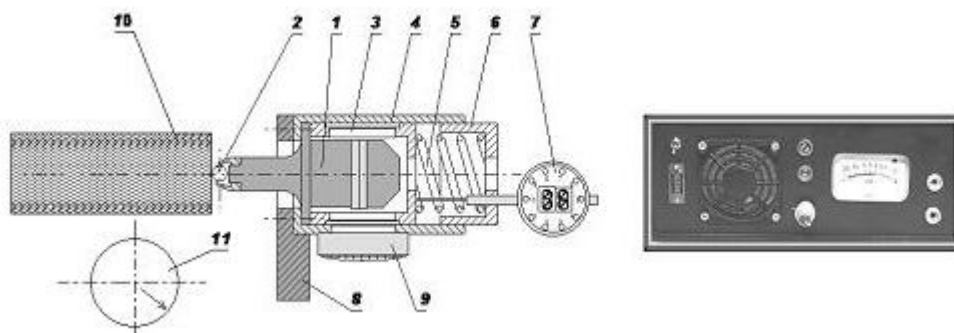


Рис. 10. Установка УЗВУ: 1.Ультразвуковой излучатель (УЗИ); 2.Индентор; 3.Втулка; 4.Корпус устройства; 5.Пружина; 6.Резьбовой стакан; 7.Индикатор часового типа; 8.Сменный кронштейн; 9.Вентилятор; 10.Обрабатываемая деталь; 11.Вид деформируемой поверхности материала.

В ИМАШ РАН совместно с ЗАО «НТГ-Авторезонанс» разработано и изготовлено устройство ультразвукового выглаживания и упрочнения (далее УЗВУ) поверхности деталей (рис. 10), обрабатываемых на токарных, фрезерных и строгальных станках. УЗВУ содержит ультразвуковой авторезонансный генератор мощностью $P = 100$ Вт. Генератор соединяется с ультразвуковым излучателем 1 (далее УЗИ) кабелем длиной 1.5-2.5 м. На рабочем конце УЗИ установлен инструмент 2 для выглаживания, представляющий собой шар диаметром 5 – 10 мм. Сам УЗИ закреплён на втулке 3, имеющей возможность линейно перемещаться, в корпусе 4 устройства.

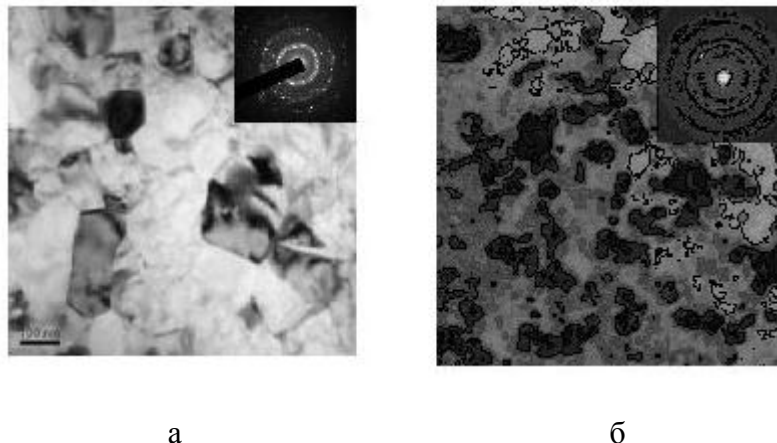


Рис. 11. Микроструктура с картиной микродифракции приповерхностного слоя сплавов VT1-0 (а) и TiNi (б), обработанных методом УЗО.

В заключение отметим, что для исследованных сплавов наименьший размер структурных элементов может быть получен только методом ИПДК. Кроме перечисленных методов ИПД, являющихся многоциклическими, к настоящему времени разработаны десятки других, особенностью которых является непрерывность процесса, что позволяет их рассматривать как потенциал для практического применения. Наиболее известными из них являются Accumulative Roll Bonding (ARB), Conshearing Process, Continuous Confined Strip Shearing, ECAP-Conform, поперечно-винтовая прокатка.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, госконтракт №14.513.11.0047.

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства.- М.:ИКЦ «Академкнига», 2007, 398 с.
2. S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, S.Yu. Mironov, S.L. Semiatin, Production of submicrocrystalline structure in large-scale Ti-6Al-4V billet by warm severe deformation processing. Scripta Materialia, 51, 2004, p.1147-1151.
3. Столяров, В.В. Угурчиев У.Х., Трубицына И.Б., Прокошкин С.Д., Прокофьев Е.А. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi, ФТВД, 4, 16 (2006) С.48-51.
4. Е.А. Лесюк, В.В. Столяров, Комбинированное воздействие электропластической прокатки и ультразвуковой обработки на сплав TiNi, 2011, Технология металлов, №8, с.33-38.
5. В.В. Столяров, Роль внешних воздействий в наноструктурных титановых сплавах, Известия академии наук, серия физическая, 2012 Т. 76, № 1, с. 108–113.