

PACS: 81.40.-z, 80.40.Vw

В.Н. Варюхин, И.А. Кулик, Н.Н. Белоусов, Е.Г. Пашинская

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА 3D ДЕФОРМАЦИОННОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ КРУЧЕНИЯ И СЖАТИЯ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2013 года

*Предложен новый метод интенсивных пластических деформаций (ИПД) для получения объемных деформационно-структурированных материалов по схеме разнонаправленного знакопеременного кручения и сжатия. Создано действующее устройство, позволяющее производить деформационную обработку двумя скошенными поршнями, между которыми зажат образец.*

**Ключевые слова:** деформация, метод 3D-PT, упрочнение, сдвиг, предел текучести, разнонаправленное знакопеременное кручение

*Запропоновано новий метод інтенсивних пластичних деформацій (ИПД) для здобуття об'ємних деформаційно-структурованих матеріалів за схемою різноспрямованого знакозмінного кручення та стискування. Створено діючий пристрій, що дозволяє провадити деформаційну обробку двома скошеними поршнями, між якими затиснуто зразок.*

**Ключові слова:** деформація, метод 3D-PT, зміцнення, зсув, межа текучості, різноспрямоване знакозмінне кручення

Одной из основных особенностей современных методов ИПД является создание в объеме образца интенсивных деформаций сдвига в условиях высокого давления (или больших деформаций сжатия), способствующих повышению пластичности исходного материала. Это обуславливает актуальность исследования процессов деформационного структурообразования в экстремальных условиях высокого давления и больших пластических деформаций [1–3]. Для получения больших степеней объемных деформаций в массивных образцах и инициирования существенных структурно-фазовых изменений необходимы специальные устройства [4–6]. Кроме того, требуется разработка новых ИПД технологий для получения объемных деформационно-структурированных материалов с улучшенными свойствами, включая нано- и гибридные материалы [7,8].

Целью работы является создание новой схемы ИПД, включающей интенсивную деформацию сдвига в условиях небольшого одноосного сжатия (до предела текучести исследуемого материала) и способствующей формированию деформационно-структурированных материалов с заданными свойствами.

Для достижения поставленной цели в предлагаемом устройстве предусмотрена цельнометаллическая матрица из прочного металла со сквозным центральным отверстием, в которое входят два скошенных поршня с зажатым между ним образцом. Размеры матрицы: высота – 50 mm, диаметр – 10–20 mm в зависимости от прочностных свойств деформируемого материала. Рабочая часть поршней (диаметром 10 mm) и выступающие из матрицы части поршней изготовлены из монолитной заготовки и составляют от 1/3 до 1/2 их общей высоты. Размеры образцов: диаметр – 10 mm, толщина – 10–15 mm. Отличительной особенностью устройства является то, что скошенная поверхность поршня имеет форму эллипса, при этом ее площадь зависит от угла скоса, величина которого варьируется от 20 до 30°. Для устранения деформационной адгезии материала образца к внутренней поверхности матрицы предусмотрено периодическое знакопеременное вращение последней. Устройство может быть использовано для получения нано- и гибридных материалов, сочетающих сильно- и слабдеформированные зоны [9–11] в условиях комбинирования пластических деформаций сдвига (предельной величины) и деформаций сжатия (до предела текучести) исходного материала.

Для новой схемы деформации по аналогии с кручением в наковальнях Бриджмена, которые обычно называют «pressure torsion», предложено использовать термин «3D pressure torsion» или аббревиатуру 3D-PT.

На рис. 1 представлена действующая камера, предназначенная для 3D-PT деформации. Поскольку в предлагаемом устройстве форма отверстия матрицы и форма поршней жестко не связаны между собой, то могут быть использованы рабочие части поршней в форме сегментов параболоидов и эллипсоидов вращения. Такая форма рабочих частей поршней позволяет наиболее эффективно создавать максимальное сдвиговое напряжение в образце и осуществлять объемную деформацию.

Следует отметить, что при этом для создания нагрузки на поршни не требуется прецизионное прессовое оборудование. На верхней части поршней, имеющих грани, расположены упорные подшипники, что позволяет при их вращении осуществлять деформацию сдвига при одновременном инициировании деформации сжатия (рис. 2).

Выбранные параметры, такие как высота рабочих частей поршней и угол их скоса, позволяют обеспечить сжатие до предела текучести деформируемого материала при больших степенях деформации сдвига. При высоте рабочих частей поршней меньше 25% высоты матрицы и при угле скоса меньше 15° не удастся получить максимальные деформации. Использование рабочих частей поршней высотой более 45% высоты матрицы при тех же

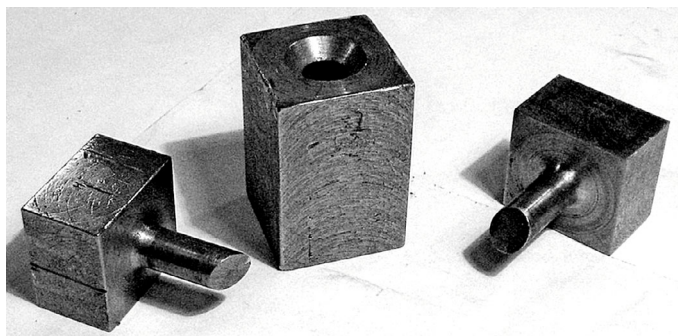


Рис. 1. Устройство для 3D-PT деформации: матрица и скошенные поршни



Рис. 2. Пресс с усилием 30 т с устройством для 3D-PT деформации

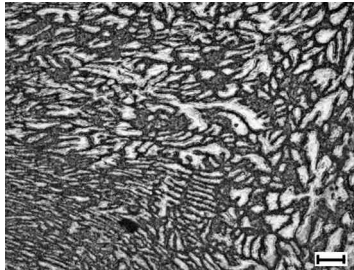
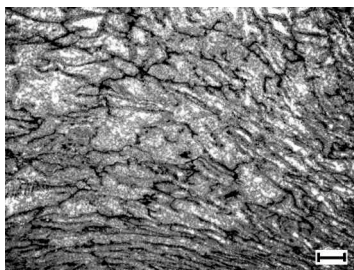
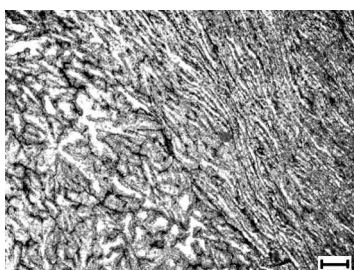
углах скоса не обеспечивает получение деформационно-структурированных образцов требуемого объема и может вызывать разрушение поршней. Установлено, что оптимальные размеры камеры 3D-PT должны быть следующими: угол скоса поршней около  $30^\circ$ , их высота – 24.6 мм, высота матрицы – 50 мм.


В табл. 1 приведены микроструктуры алюминиево-медных сплавов с различным содержанием меди, полученные методом 3D-PT обработки с различной степенью деформации. Хорошо видно, что деформация приводит к изменению структуры по объему образца. Для всех степеней деформации и всех составов фиксируются зоны неравномерного течения. Наблюдаются зоны трех типов: малодеформированные (табл. 1,а), умеренного деформирования (табл. 1,б) и интенсивного течения материала (табл. 1,в). В последней зоне течение идет по сложной винтовой траектории с максимальным измельчением структуры. Характерным для 3D-PT деформации является то, что существует резко выраженная граница между названными выше зонами. Данная особенность характерна также и для известных схем ИПД, например винтовой экструзии и равноканально-углового пресования.

Представляет интерес выяснить: как распределены указанные зоны в объеме материала, какие степени деформации могут привести к однородной структуре, а также какое место в ряду известных методов ИПД может занимать предложенный метод 3D-PT. Этот метод можно будет использовать для получения гибридных материалов деформационной природы [9–11]. Данное перспективное применение метода 3D-PT будет реализовано, если появится возможность регулировать формирование структурно-неоднородных зон по объему материала и регламентировать формирование необходимых физико-механических свойств по требованиям заказчика.

Таблица 1

**Зоны наибольшей деформации алюминиево-медных сплавов с различным содержанием меди после 3D-РТ обработки**

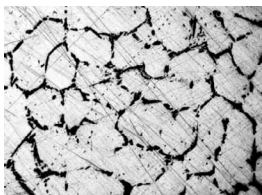
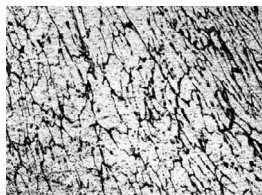
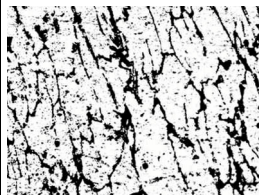
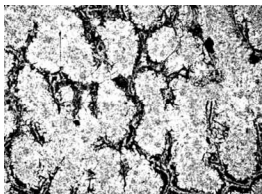
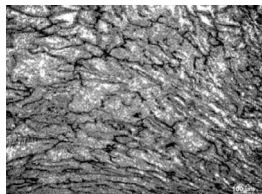
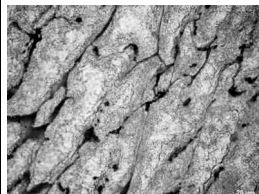
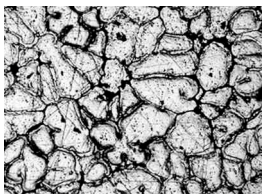
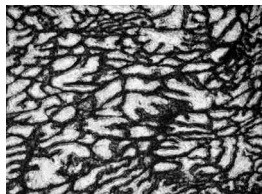
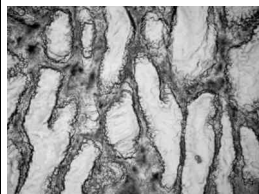
Cu, mass%	Количество оборотов	Микроструктура, ×100
2	1.5	 <i>a</i>
5	3	 <i>б</i>
6	2	 <i>в</i>

*Примечание.* Масштаб  соответствует 100 μm.

Микроструктуры алюминиево-медных сплавов, подвергнутых деформированию методом 3D-РТ, а также для сравнения в исходном недеформированном литом состоянии приведены в табл. 2. Следует отметить, что во всех сплавах независимо от степени легирования медью наблюдается измельчение структуры и вытягивание зерен вдоль оси максимальных касательных напряжений. Поскольку при такой схеме касательные напряжения прикладываются к объему материала под определенным углом, изменяющимся в каждый последующий момент времени, касательные напряжения последовательно сканируют объем деформированного материала. Очертания границ зерен меняются от прямых, четко очерченных к изогнутым, с зубчиками, прерывистым.

Таблица 2

Микроструктура алюминиево-медного сплава  
с различным содержанием меди после 3D-РТ обработки

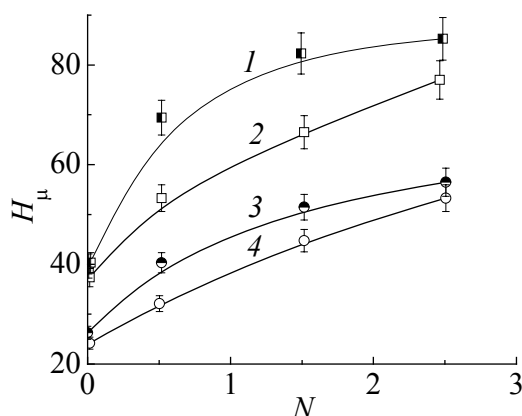
Cu, mass%	Количество оборотов	Состояние		
		исходное литое, ×100	деформированное	
			×100	×500
2	1.5			
		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>
5	3			
		<i>z</i>	<i>д</i>	<i>e</i>
6	2			
		<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>

Полученные структуры характеризуются как чрезвычайно изотропные, что может свидетельствовать об интересных особенностях формирования и развития трещин. С учетом вихревого течения такого алюминиевого сплава и формирования специфической «закрученной» структуры можно предполагать, что для развития трещин в таком материале понадобится большая энергия образования, что повысит его жизнеспособность при эксплуатации.

На рис. 3 приведена сравнительная характеристика микротвердости для различных участков образцов технического алюминия и сплава алюминия с 6% меди в исходном состоянии и после различных степеней деформации методом 3D-РТ. Хорошо видно, что при увеличении количества оборотов проявляется тенденция к однородности распределения микротвердости как в центре, так и на поверхности образцов.

**Выводы**

1. Предложен новый метод 3D-РТ для получения деформационно-структурированных материалов по схеме разнонаправленного знакопеременного кручения в условиях интенсивной деформации сдвига при воздействии напряжения сжатия, равном пределу текучести материала.



**Рис. 3.** Влияние количества оборотов  $N$  на значения микротвердости  $H_{\mu}$  в различных участках образцов после деформации в камере 3D-РТ: 1, 3 – периферия, 2, 4 – центр; 1, 2 – сплав алюминия с 6% меди, 3, 4 – технический алюминий

2. Разработано и изготовлено новое устройство, содержащее матрицу со сквозным центральным отверстием, в котором соосно расположены два поршня со скошенными поверхностями. Рабочая часть поршней и выступающие из матрицы части поршней изготовлены из монолитной заготовки. На верхней части поршней, имеющей плоскопараллельные грани, расположены упорные подшипники, что позволяет осуществлять их вращение.

3. Определены значения углов скоса деформирующих поверхностей пуансонов (в пределах 20–30°), которые обеспечивают наиболее стабильное и воспроизводимое протекание процесса деформационного структурообразования.

4. Отличительной особенностью устройства является следующее: а) для создания большой объемной деформации сдвига прикладывается не высокое давление, а напряжение сжатия, равное пределу текучести деформируемого материала; б) применяются не плоские (как в наковальнях Бриджмена), а скошенные рабочие части пуансонов; в) применяется разнонаправленное знакопеременное вращение верхней и нижней частей поршней (а при необходимости и матрицы).

5. Показано, что предложенный метод эффективен для объемного измельчения структуры.

Авторы выражают благодарность вед. инж. В.В. Руле за техническую помощь и инж. 1 кат. Н.В. Чернявской за помощь в получении микроструктур и измерении микротвердости.

1. П.В. Бриджмен, Исследование больших пластических деформаций и разрыва, Изд-во иностр. лит., Москва (1955).
2. В.В. Рыбин, Большие пластические деформации и разрушение металлов, Металлургия, Москва (1986).
3. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов, В.И. Трефилов (ред.), Наукова думка, Киев (1989).
4. Р.З. Валиев, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).

5. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Кобылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).
6. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций, ТЕАН, Донецк (2003).
7. А. Надаи, Пластичность и разрушение твердых тел, Изд-во иностр. лит., Москва (1954), т. 1.
8. О. Гофман, Е. Закс, Введение в теорию пластичности для инженеров, Машгиз, Москва (1957).
9. Р. Хоникомб, Пластическая деформация металлов, Мир, Москва (1972).
10. M.F. Ashby, Y.J.M. Bre'chet, Acta Mater. **51**, 5801 (2003).
11. M.F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design (Third Edition), Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford (2005).

V.N. Varyukhin, I.A. Kulik, N.N. Belousov, E.H. Pashinskaya

## DEVELOPMENT OF THE METHOD OF 3D DEFORMATION-INDUCED STRUCTURE FORMATION IN CONDITIONS OF COMBINED TWISTING AND COMPRESSION

A new 3D-PT method of obtaining bulk deformation-structured materials was suggested that used the scheme of multidirectional sign-alternating twisting under severe shear deformation when the compression strain was equal to the yield limit of the material.

A new equipment was designed and produced that contained a die with open central channel where two uniaxial plungers with inclined surfaces are located. The working sections and extensions of the plungers were made of a solid billet. Axial bearers are located at the upper part of the plungers that has parallel faces, to provide rotation.

The values of the slope angles of the deforming surfaces of punches (within the range of 20–30°) are estimated, that provide the most stable and repeatable current of deformational structure formation.

A distinctive feature of the equipment is as follows: a) to achieve high volume shear strain, not high pressure is applied, but compression strain equal to the yield limit; b) inclined working sections of the punches are used, not flat ones (like those of Bridgeman anvils); c) multidirectional sign-alternating rotation of the upper and bottom parts is practiced (or the die as a whole, if required).

It is shown that the suggested method is effective tools of volume reduction of the structure, tending to uniform deformation in the central and peripheral zones of the sample when the degree of deformation increases. It is established that the method allows double increase in microhardness of commercially pure aluminum and aluminum-copper alloys.

**Keywords:** deformation, 3D-PT method, strengthening, shear, yield limit, multidirectional sign-alternating twisting

**Fig. 1.** Equipment for 3D-PT deformation: the die and the oblique plungers

**Fig. 2.** Molder of 30 t in force with the equipment for 3D-PT deformation

**Fig. 3.** Effect of the number of convolutions  $N$  on microhardness  $H_{\mu}$  in different areas of the samples after deformation within the 3D-PT chamber: 1, 3 – periphery, 2, 4 – center; 1, 2 – alloy of aluminum and copper (6%), 3, 4 – commercial aluminum