

УДК 669.04:621.771

*Р.З. Валиев<sup>1,2</sup>, Г.И. Рааб<sup>2</sup>, А.В. Боткин<sup>1</sup>, С.В. Дубинина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный университет

<sup>2</sup> Институт физики перспективных материалов НИЧ УГАТУ

### ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ В РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ\*

Размер зерна поликристаллического металла играет важную роль при создании новых материалов, так как непосредственно определяет их механические свойства. Известно, что при низких температурах согласно уравнению Холла-Петча прочность значительно повышается при уменьшении размера зерна. Уменьшение размера зерна возможно и при высоких температурах: сверхпластичное течение и получение изделий при помощи сверхпластичной штамповки, как правило, реализуется при размере зерна материала меньше 10 мкм [1].

Традиционно зерна в металлах измельчают при помощи термомеханических обработок, что позволяет получать размер зерна микроструктуры порядка нескольких микрон. Однако этими методами нельзя измельчать зерна до субмикронного (0,1 – 1,0 мкм) или нанометрового (< 100 нм) размеров. Для получения таких ультрамелких размеров зерна необходимо использовать альтернативные методы обработки на основе интенсивной пластической деформации [2]. В этом случае материалы подвергаются большим деформациям при высоких давлениях, при этом не наблюдаются значительных изменений габаритных размеров заготовок [3, 4].

На сегодняшний день известно несколько методов обработки ИПД, которые активно используются для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов, их комплексное описание представлено в работах [2 – 4]. Особый интерес вызывают два метода ИПД обработки – это равноканальное угловое прессование, когда заготовка или пруток повторно продавливается через матрицу внутри канала под определенным углом, и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК), когда тонкий диск одновременно подвергается высокому давлению и деформации кручением. В начале 1990-х гг. именно эти два метода были использова-

ны в «пионерских» исследованиях по получению УМЗ материалов [3, 4]. В ходе последующих многочисленных лабораторных исследований эти методы развиты и применены для обработки разнообразных материалов, в том числе чистых металлов, металлических сплавов и композитов. Тем не менее (хотя РКУП и ИПДК являются на сегодняшний день наиболее популярными методами обработки) в обоих случаях присутствуют трудности и ограничения, сужающие сферу их практического применения.

Основная трудность обработки методом РКУП заключается в ее прерывистости. Для достижения исключительно высоких деформаций образец повторно вынимается из матрицы, вставляется в нее и продавливается в ходе дополнительных проходов. Этот процесс является трудоемким и, соответственно, не особо эффективным. Второй недостаток традиционной обработки РКУП заключается в том, что в качестве образцов обычно используется пруток или брусок, в то время как в промышленности востребованы листовые металлы. В этой связи недавно был предпринят ряд попыток по обработке пластин и листовых материалов методом РКУП, которые успешно продемонстрировали возможность применения такой обработки и для таких материалов [5, 6]. Третье ограничение – относительно небольшой размер заготовок, предназначенных для РКУП обработки: размер поперечного сечения обычно составляет порядка 10 – 15 мм. Кроме того, концы заготовок не эффективно обрабатываются в процессе РКУП, в результате количество непроизводительных расходов растет. Однако в этом вопросе также наметился прогресс в недавних исследованиях, где была подтверждена возможность масштабирования процесса РКУП для обработки заготовок с большими поперечными сечениями [7].

В настоящем исследовании рассматриваются различные подходы, разработанные за последние несколько лет, для использования РКУП как конкурентного метода обработки широкого круга применений, в частности, в промышленности.

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), а также в рамках выполнения международных проектов МНТЦ г. Москва.

Традиционная обработка РКУП представляет собой продавливание заготовки под определенным углом, зафиксированным в матрице. В этом случае уровень накопленной деформации главным образом зависит от угла  $\Phi$  пересечения каналов и в меньшей степени от угла  $\Psi$  внешней арки кривой, где пересекаются две части канала [7]. При угле пересечения каналов  $\Phi = 90^\circ$  накопленная деформация составляет порядка  $\sim 1$  при одном проходе. Следовательно, требуются повторные циклы для достижения более высоких деформаций.

Альтернативным вариантом является применение многопроходной установки: например, в работе [8] канал матрицы изогнут пять раз под углом  $90^\circ$ ; таким образом, общая деформация составляет примерно 5 за один проход через матрицу. Проведенные экспериментальные исследования [8] подтвердили возможность использования многопроходной РКУП матрицы для достижения высокой деформации за один проход, при этом не требуется удалять образец между отдельными проходами. Следует отметить, что в результате многопроходной обработки матрица подвергается очень высоким нагрузкам, соответственно, требуются специальные технические решения, особенно для труднодеформируемых и малопластичных металлов и сплавов.

В этой связи большой интерес имеет применение РКУП оснастки в параллельных каналах. На рис. 1 представлена принципиальная схема РКУП в параллельных каналах: поперечное сечение матрицы и принцип прессования в трех измерениях, когда образец можно удалить из матрицы слева и вставить справа в матрицу, как показано стрелочкой [9]. Канал (рис. 1, а) изогнут два раза под углом  $\Phi$ ; важное техническое требование заключается в том, что диаметр  $x$  канала равен горизонтальному смещению  $y$  между двумя центральными линиями каналов [10]. Обработка с помощью такой установки исследована при помощи моделирования методом конечных элементов [10]. Такую обработку применяли для различных металлов, в том числе меди, титана [10] и алюминиевых сплавов [9 – 12]. В ходе обработки степень деформации за один проход через матрицу РКУП в параллельных каналах составила примерно 2 (рис. 1).

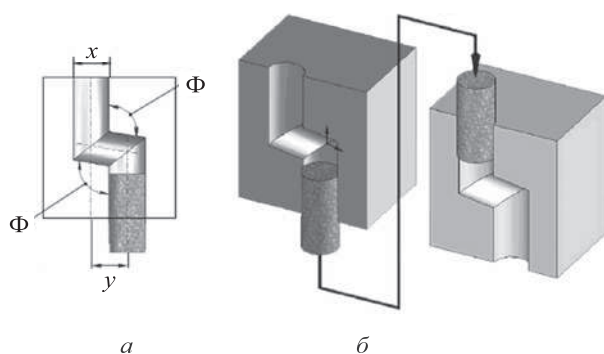


Рис. 1. Поперечное сечение матрицы (а) и принцип работы для многократных проходов [2, 10] (б) РКУП в параллельных каналах

Еще один новый технологический процесс – это сочетание РКУП и Конформ-обработки [13]. Конформ-процесс был разработан почти 40 лет назад для проведения непрерывной экструзии с последующей формовкой проволоки. По ходу этого процесса возникают силы трения между заготовкой и отсеком экструзии в форме канавки во вращающемся колесе. При разработке нового способа, сочетающего РКУП и Конформ-обработку [13], процесс РКУП был проведен на выходном канале в установке Конформ. Показано, что размер зерна технически чистого алюминия был измельчен от начального (примерно 5 – 7 мкм) размера до 650 нм [13]. Недавно были проведены исследования процесса обработки РКУП – Конформ и представлено применение этого процесса для обработки алюминиевых сплавов и технически чистого титана [14].

На рис. 2 показан принцип установки РКУП – Конформ для обработки алюминиевого сплава 6061. Вращающийся внутренний вал зафиксирован в наружной неподвижной матрице. Материал поступает во входной канал, затем продавливается в канавку с круговым поперечным сечением, продвигается вперед под действием сил трения при вращении вала и затем входит в канавку с прямоугольным поперечным сечением, вращается около оси вращения установки, и, наконец, попадает в зону сдвига, где продавливается во входном канале под углом  $90^\circ$ . При такой обработке степень деформации составляет примерно единицу за один проход через установку РКУП – Конформ.

Весьма актуальным вопросом при разработке процессов получения полуфабрикатов методами ИПД и последующего пластического формоизменения заготовок в операциях ОМД является прогнозирование разрушения металла. Решение этого вопроса важно, поскольку накапливаемые в ходе ИПД деформации велики. При этом материал заготовки, исчерпав свою способность к деформированию, начинает разрушаться после определенного числа проходов РКУП или при выполнении последующей операции ОМД.

К настоящему времени опубликовано достаточно много моделей, с помощью которых можно оценить поврежденность (или использованный ресурс пластич-

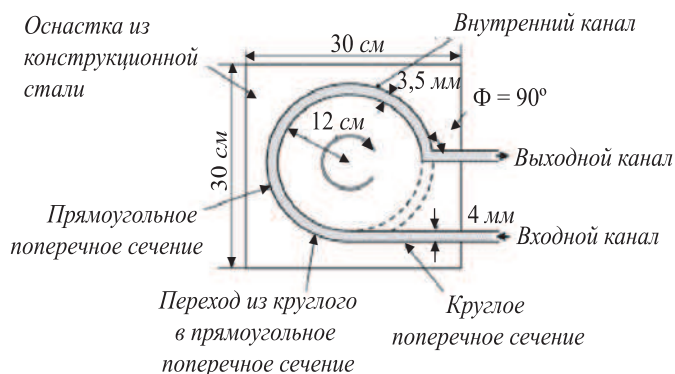


Рис. 2. Принцип РКУП – Конформ обработки

ности) металла. Интенсивно развиваются феноменологические модели деформируемости.

Вместе с тем существующие критерии позволяют удовлетворительно прогнозировать разрушение металла в процессах ОМД только тогда, когда напряженное состояние и направление деформирования не изменяются (когда справедлива линейная модель накопления повреждаемости). При «смягчении» схемы напряженного состояния (увеличении уровня сжимающих напряжений), при изменении направления деформирования, способствующего частичному уменьшению (залечиванию) повреждаемости металла, при «ужесточении» схемы напряженного состояния, способствующем дополнительному приросту повреждаемости, существующие критерии далеко не удовлетворительны в случаях деформации металла с термическими и механическими условиями, отличающимися от условий проведения испытаний образцов.

В Институте физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного университета на основе испытательной машины Инстрон разработан экспериментальный измерительный комплекс с программным управлением (рис. 3). Комплекс позволяет осуществлять программируемые (с изменяющимися во времени осевой и угловой скоростями) комбинированные нагружения: растяжение с кручением, сжатие с кручением образцов в оправке и без оправки, а также осуществлять ступенчатое нагружение образцов [15, 16].

Комплекс позволяет провести физическое деформирование образца в термических и механических условиях деформации заготовки при РКУП, с высокой точностью спрогнозировать разрушение металла, определить благоприятные термо-скоростные режимы обработки РКУП. Решение этих задач актуально для развития метода РКУП и его модификаций с точки зрения повышения их производительности и масштабирования

при обработке различных промышленных сплавов в условиях массового производства.

Рассмотренные выше разработки методов ИПД для получения объемных УМЗ металлов и сплавов в форме полуфабрикатов, прутков, проволок и листов делают эти процессы особенно привлекательными для их массового применения. Недавние исследования показали, что улучшенные свойства металлов после ИПД обусловлены не только УМЗ микроструктурой, но и другими наноструктурными особенностями, структурой границ зерен, дислокационной субструктурой, влиянием сегрегаций и выделений вторичных фаз, которые, в свою очередь, определяются режимом обработки. Области перспективных применений наноструктурных материалов очень велики: от биомедицинских устройств и до спортивного оборудования, например, велосипедов с высокими эксплуатационными данными. Кроме того, особый интерес вызывает обработка металлов методами ИПД для их применения в экстремальных средах, например, использование материалов при криогенных температурах, в нефтегазовом секторе или энергетике в арктических и субарктических условиях [17].

Многочисленные исследования свидетельствуют, что ИПД обработка с использованием РКУП позволяет достигнуть значительного измельчения зерен и обеспечить такие свойства в металлах и сплавах, которые нельзя получить при помощи традиционных методов обработки. Последние разработки в области технологии процессов ИПД позволяют ожидать уже в ближайшие годы перехода от лабораторных исследований ИПД материалов к их промышленному производству, поскольку методы ИПД обработки успешно совершенствуются для применения в серийном производстве.

**Выводы.** Традиционные методы интенсивной пластической деформации являются трудоемкими, с их использованием можно получать относительно небольшие объемы материала. Равноканальное угловое прессование является наиболее широко используемым методом ИПД для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов с улучшенными свойствами. Недавние разработки по улучшению этой технологии направлены на масштабирование процесса и повышение его эффективности. В последние годы в технике и медицине начинают применять материалы после интенсивной пластической деформации. Ожидается, что области их применения будут быстро расширяться, так как эти технологии совершенствуются и завоевывают все большую известность и распространение.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы. – М.: Академкнига, 2007. – 398 с.
3. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K. and Alexandrov I.V. // Progr. Mater. Sci. 2000. V. 45. P. 89 – 103.



Рис. 3. Экспериментальный измерительный комплекс

4. Valiev R.Z., Estrin Y., Horita Z., Langdon T.G., Zehetbauer M.J. and Zhu Y.T. // JOM. 2006. V. 58 (4). P. 33 – 39.
5. Kaibyshev R., Tagirov D., Mogudeva A. // Adv. Eng. Mater. 2010. № 12. P. 735 – 739.
6. Валиев Р.З., Рааб Г.И., Гундеров Д.В. и др. // Нанотехника. 2006. № 2. С. 32 – 42.
7. Равноканальное угловое прессование металлических материалов: достижения и направления развития / Под ред. В.М. Сегала, С.В. Добаткина, Р.З. Валиева. – Тематический выпуск. Металлы. 2004. № 1. С. 2 – 115.
8. Nakashima K., Horita Z., Nemoto M. and Langdon T.G. // Mater. Sci. Eng. A. 200. V. 1. A281. P. 82 – 87.
9. Мурашкин М.Ю., Бобрук Е.В., Кильмаметов А.Р., Валиев Р.З. // Физика металлов и металловедение. 2009. Т. 108. № 4. С. 439 – 443.
10. Raab G.I. // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. A410-411. P. 33 – 230.
11. Valiev R.Z., Murashkin M.Yu., Bobruk E.V., Raab G.I. // Mater. Trans. 2009. V. 50. P. 87 – 91.
12. Sabirov I., Perez-Prado M.T., Murashkin M., Molina-Aldareguia J.M., Bobruk E.V., Yunusova N.F., Valiev R.Z. // Int. J. Mater. Form. 2010. V. 3 (suppl. 1). P. 14 – 411.
13. Raab G.J., Valiev R.Z., Lowe T.C., Zhu Y.T. // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. A382. P. 30 – 34.
14. Raab G.I., Valiev R.Z., Gunderov D.V., Lowe T.C., Misra A., Zhu Y.T. // Mater. Sci. Forum. 2008. V. 584-586. P. 80 – 85.
15. Боткин А.В., Валиев Р.З., Степин П.С., Баймухаметов А.Х. // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 17 – 22.
16. Боткин А.В., Валиев Р.З., Дубинина С.В. и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 4. С. 38 – 42.
17. Valiev R.Z., Langdon T.G. // Adv. Eng. Mater. 2010. V. 12. P. 90 – 677.

© 2012 г. Р.З. Валиев, Г.И. Рааб,  
А.В. Боткин, С.В. Дубинина  
Поступила 1 марта 2012 г.

УДК 669.04:620.172.25

**А.А. Федоткин<sup>1,2</sup>, В.Э. Меденцов<sup>1</sup>, В.В. Столяров<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
<sup>2</sup> Московский государственный индустриальный университет

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С ТОКОМ\*

Идея управления механическим поведением твердых тел с помощью электрических полей весьма перспективна и выглядит сравнительно просто реализуемой. Этим объясняется большой интерес, проявленный исследователями к проблеме электропластического эффекта (ЭПЭ) в проводящих материалах и к технологиям, основанным на совместном или последовательном действии деформации и тока [1 – 3]. Такими технологиями являются электропластическая деформация (ЭПД) и электроимпульсная обработка (ЭИО) металлов и сплавов.

Физической основой этих технологий является ЭПЭ или взаимодействие тока высокой (100 – 1000 А/мм<sup>2</sup>) плотности (или «электронного ветра») с дефектами кристаллической решетки при деформации материалов, а также возникновение сопутствующих теплового эффекта Джоуля–Ленца и пинч-эффекта [4]. Предполагалось, что все эти эффекты отражают взаимодействие между электронами и дислокациями в металлах. Первым доказательством связи электронных свойств с динамикой дислокаций и внутренним трением была работа [5]. Позже было показано, что и механические свойства металла зависят от его электронного состояния [6 – 9].

Впервые ЭПЭ в виде скачков напряжения наблюдали при растяжении моно- и поликристаллов чистых металлов [10]. С тех пор опубликовано много работ, посвященных феноменологии ЭПЭ, т.е. зависимости от режимов деформации и тока [11 – 14]. При этом зависимость ЭПЭ от структуры не исследовалась. Первые результаты в этом направлении получены в работах [15, 16], где скачки напряжений обнаружены при растяжении с током в сплаве TiNi с размером зерен менее 100 нм.

Однако влияние структурных особенностей самого материала (морфологии структурных элементов, типа границ и размера зерен, фазовых и полиморфных превращений и т.д.) до сих пор остается не исследованным. Особую актуальность представляет изучение ЭПЭ в современных титановых сплавах: с памятью формы, наноструктурных и аморфных материалах, деформационная обработка которых затруднена. В основе деформационной обработки таких материалов может быть использована деформация с током.

Целью настоящей работы является исследование особенности проявления ЭПЭ в зависимости от размера зерен и режимов импульсного тока в различных титановых сплавах.

Исследования проводили на образцах трех титановых сплавов: никелиде титана (Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub>) с эффектом памяти формы (ЭПФ), двухфазном сплаве ВТ6 и технически чистом титане (ВТ1-0). Выбор объектов исследования и структурных состояний обусловлен

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 11-08-00327-а и государственного контракта с Министерством образования и науки РФ № 14.740.11.0825 от 01 декабря 2010 г.