

УДК 669.295

Спусканюк В. З.
Давиденко А. А.
Гангало А. Н.
Касатка Н. Г.
Коваленко И. М.
Янчев А. И.

ПРИМЕНЕНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЛИТКОВ

Актуальной проблемой металлургии Украины является повышение качества продукции. Решение этой проблемы особенно актуально в связи с обостряющейся конкуренцией продукции металлургических и машиностроительных предприятий на мировом рынке.

Одно из наиболее перспективных направлений совершенствования структуры и повышения уровня свойств металлопродукции основано на использовании новых методов интенсивной пластической деформации (ИПД) слитков или заготовок [1–3]. После такой обработки размеры деформированных заготовок практически одинаковы с исходными размерами, однако, в результате накопления интенсивных пластических деформаций достигается эффективная модификация структуры и значительное улучшение свойств материала.

Среди методов ИПД наибольшее признание и распространение получило равноканальное угловое прессование (РКУП) объемных заготовок [1, 2]. Метод РКУП обеспечивает реализацию строго регламентированных и однородных сдвиговых деформаций без изменения сечения заготовки, а неоднократное повторение операций прессования приводит к накоплению больших деформаций с соответствующими изменениями структуры и свойств деформируемого материала. При традиционных методах пластического деформирования, таких как прокатка, прессование, волочение, высокие интенсивности деформации, как известно, приводят к многократному уменьшению поперечных размеров обрабатываемых заготовок.

Методы РКУП предоставляют возможность сильного воздействия на эволюцию структуры материала, формирования более высокого уровня свойств (прочности, пластичности, сверхпроводимости и т. п.). В ряде случаев достигается уникальный комплекс свойств продукции. Хорошо установлено, что в зависимости от материала и условий обработки РКУП обеспечивает различные структурные изменения, в частности, измельчение зерна (вплоть до субмикронного уровня, иногда наноуровня, с большой долей высокоугловых граней); измельчение частиц второй фазы и включений; залечивание трещин, пор и других объемных дефектов; повышение скорости диффузии; регулирование текстуры; консолидацию и образование связей частиц материала; фазовые превращения.

Несмотря на большие перспективные возможности технология РКУП до настоящего времени не получила широкого практического применения. Одной из причин такого положения является недостаточная информация работников промышленных предприятий о технологических возможностях метода. В научно-технических публикациях основное внимание уделяется использованию метода для получения наноструктурных материалов, в то время как давно показана целесообразность применения РКУП для обработки слитков, например, с сеткой хрупкой избыточной составляющей [1, 2]. Недостаточное внимание уделяется также опытно-конструкторским разработкам устройств для РКУП.

Цель настоящей публикации – показать некоторые возможности эффективного практического применения технологии РКУП для решения проблем производственных предприятий. Освещены способ и новое устройство РКУП для интенсивной пластической деформации заготовок при повышенных температурах, даны рекомендации по использованию метода.

Условия и результаты РКУП алюминиевого сплава

В ДонФТИ НАН Украины разработан и исследован ряд новых способов и устройств для РКУП, в частности, способы равноканального многоугольного прессования (РКМУП), равноканального углового прессования с истечением материала в два боковые каналы

(Т-образного прессования), равноканальной угловой гидроэкструзии. Установлена эффективность практического использования этих способов для холодной обработки различных металлов и сплавов, в результате которой достигнуто формирование субмикроструктурного состояния материалов и значительное повышение их свойств [4–13].

Однако, низкая технологическая пластичность слитков и малодеформированных заготовок ограничивает возможности холодной их обработки методом РКУП. В связи с этим актуальным остается создание устройств и отработка технологии РКУП при повышенных температурах. Такие устройства и технологии необходимы также для решения задач консолидации порошков и гранул.

В созданном нами устройстве (рис. 1) деформация заготовки простым сдвигом осуществлялась в двух зонах с углами пересечения сегментов канала круглого поперечного сечения, равными $\Phi = 120^\circ$, причем входной и выходной сегменты параллельны и вертикальны. При использовании таких углов интенсивность деформации достаточно высокая и в то же время технологическая пластичность заготовок выше, чем в случае $\Phi = 90^\circ$. На выходе из канала установлена втулка, в которой происходит небольшое уменьшение диаметра отпрессованной заготовки, достаточное для обеспечения повторной ее загрузки в контейнер с целью многократного деформирования.

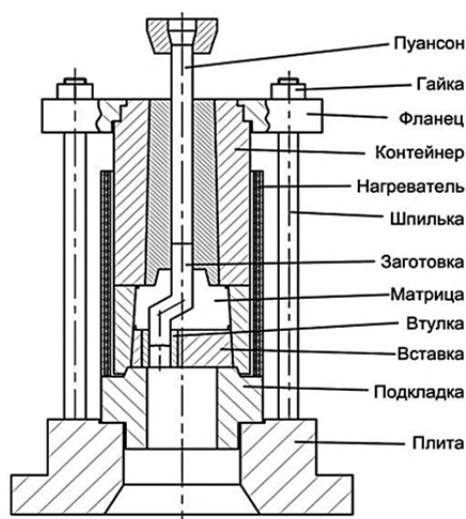


Рис. 1. Схема устройства для РКУП при повышенных температурах

Конструкция устройства предусматривает возможность использования разъемных угловых матриц. При использовании вертикального разъема значительно упрощается технология изготовления матриц. Такие матрицы изготавливаются с использованием традиционных методов механической обработки деформирующих инструментов. Кроме того, обеспечивается возможность разборки устройства с целью извлечения недопрессованной заготовки. Необходимость в этом может возникать, например, в случае остановки процесса прессования при чрезмерном повышении давления деформирования или с целью исследования характера распределения деформаций, структуры и свойств в деформируемой заготовке. На рис. 2 показана такая частично выдавленная заготовка. Бандажирование втулки контейнера обеспечивает его стойкость при высоких, до 1000 МПа, давлениях прессования.

Для нагрева контейнера и деформирующего блока РКУП изготовлен источник электропитания и нагреватель. Исполнительным прибором являлся двухпозиционный измеритель регулятор ТРМ-202 фирмы «ОВЕН» с тиристорным регулятором мощности. Для нагревателя использовалась нихромовая проволока в виде спирали, вставленной в специальные керамические пластины со сквозными отверстиями. Собранный блок плотно охватывал контейнер и деформирующий блок. Мощность нагревателя при 220 В составляла 3 кВт, что позволило нагревать контейнер до 400 °С менее, чем за 1 час.

Контроль температуры проводился в двух местах с использованием термопреобразователей типа ТП (ХА). Для этого в средней части контейнера просверливалось глухое отверстие, не достигающее до рабочего канала 10 мм. Второй термопреобразователь вводился перед нагревом в канал контейнера и непосредственно перед прессованием извлекался. Температура прутка, вышедшего из канала, измерялась контактным способом малоинерционным термопреобразователем типа ТП (ХА).

Предварительная оценка силового режима производилась с использованием разработанных нами расчетных соотношений [14] и сведений о свойствах деформируемого материала в условиях обработки. При этом учитывались как температурные, так и скоростные условия деформации.

Приближенная оценка давления РКУП производилась по выражению:

$$P = 4k \left(\text{ctg} \frac{\Phi}{2} + m\bar{z} \right), \quad (1)$$

где k – напряжение сдвига деформируемого материала;

m – фактор трения;

\bar{z} – относительная длина контакта заготовки с инструментом, равная отношению длины контакта заготовки с инструментом к диаметру канала.



Рис. 2. Частично выдавленная заготовка (а) и прессованный пруток (б)

Фактор трения определяется из выражения:

$$\tau = mk,$$

где τ – напряжение трения.

Для определения фактора трения производились предварительные эксперименты по осадке образцов в условиях, приближенных к условиям РКУП. В качестве смазки при РКУП использовалась графито-масляная смесь AZMOL (ТУ 38.301-48-34-95).

Прессование осуществлялось по схеме «заготовка за заготовкой», максимальное давление не превышало 700 МПа. Выдавленный пруток представлен на рис. 2, б.

На рис. 3 представлены микроструктуры образцов слитка силумина в исходном состоянии, перед обработкой, и после трех операций РКУП при 400 °С. В исходном состоянии наблюдается хаотическое распределение частиц кремния различной формы и размеров. Видны скопления крупных частиц, размеры которых достигают 50...80 мкм. В результате РКУП достигнуто измельчение частиц кремния, максимальные размеры которых не превышают 10 мкм. Наблюдается более равномерное распределение равноосных частиц в матрице.

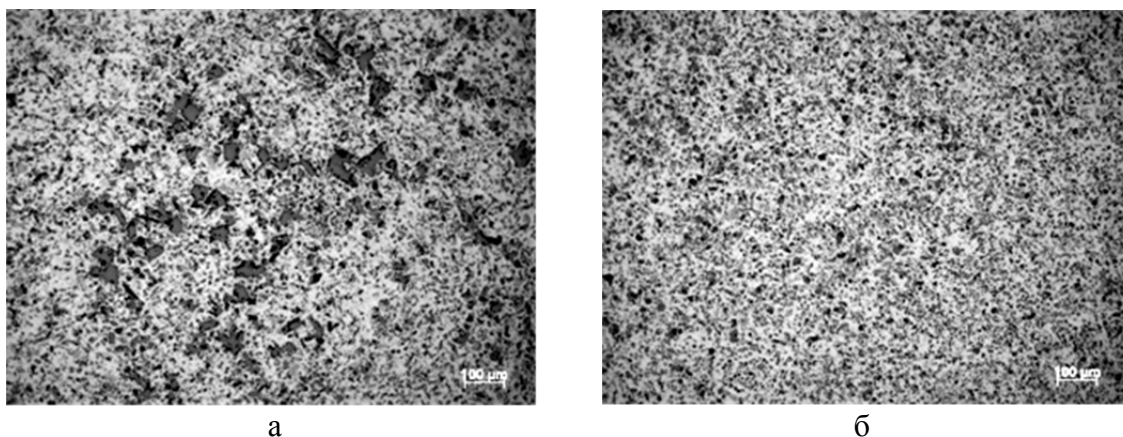


Рис. 3. Микроструктура слитка силумина:
а – исходное состояние; б – после трех переходов РКУП

Рекомендации по применению РКУП

Технология РКУП предоставляет широкое поле для различных применений в создании материалов и их обработке. Целесообразность практического использования методов РКУП может быть обусловлена достижением очевидных технических и экономических преимуществ, таких как производство продукции более высокого качества и/или снижение себестоимости. Эти требования определяют два перспективных направления в развитии и коммерциализации РКУП [1, 2].

Первое направление относится к довольно широко распространенным производственным проблемам улучшения структуры и повышения уровня свойств продукции, когда простой сдвиг представляет оптимальную схему деформации и эффективная обработка может быть реализована с малым числом операций. Примером может быть деформационное улучшение структуры слитков из различных металлов и сплавов в результате одной либо двух операций РКУП при повышенных температурах. Целью такой обработки, в частности, может быть повышение уровня служебных свойств изделий, изготавливаемых из прессовок, либо получение полуфабриката, технологическая пластичность которого достаточно повышена для последующей пластической деформации традиционными методами.

Как известно, существует ряд причин низкой технологической пластичности слитков и заготовок, например, наличие в их структуре сетки хрупкой избыточной составляющей (особенно, если сетка сплошная), наличие двух или более структурных составляющих с различными свойствами [15]. Метод горячего РКУП, особенно с противодавлением, является весьма подходящим для благоприятного преобразования структуры таких слитков и заготовок. Важным преимуществом РКУП является то, что деформация не изменяет размеры поперечного сечения прессовки. Простым способом создания противодавления при РКУП является применение фальш-заготовки из вспомогательного материала, загружаемой перед основной заготовкой, причем такие фальш-заготовки можно использовать многократно.

В существующей производственной практике для соответствующего преобразования структуры слитков и заготовок используют ковку, прессование либо прокатку. Преимущество РКУП по сравнению с этими методами может заключаться в снижении себестоимости продукции и обеспечении благоприятной структуры, высокого уровня свойств деформированного материала в заготовках более крупных сечений. Многооперационная ковка является дорогостоящей, связана с большими затратами энергии при необходимости промежуточных подогревов, времени и труда высококвалифицированных кузнецов. Основным недостатком методов прокатки и традиционного прессования, как уже отмечалось, является многократное уменьшение площади поперечного сечения прутков. Следует также отметить, что прокатка слитков и заготовок не всегда возможна из-за неудовлетворительной технологической пластичности, а если ее проводят, то применяют малые единичные обжатия с увеличенным числом проходов [15].

Ниже приведены некоторые примеры, когда РКУП уже использовано для улучшения структуры и повышения свойств обработанных материалов либо такое применение, по нашему мнению, может быть эффективно.

Осуществлено РКУП магниевых сплавов при повышенных температурах на горизонтальном промышленном прессе усилием 10МН [16]. Различные варианты РКУП магниевых сплавов осуществлялись с целью улучшения структуры литых заготовок. Применение способа многоугольного РКУП через матрицу с углами 2Φ , последовательно равными 45-90-90-45° позволило за два прохода уменьшить в заготовке диаметром 100 мм размер зерна сплава MgCa0.8 от 0,2...1 мм в исходном состоянии до 12...14 мкм после деформации.

Перспективным направлением использования горячего РКУП может быть обработка слитков легированных инструментальных сталей ледебуритного класса. В [17] показано, что горячее гидропрессование слитков стали Р6М5 электрошлакового переплава (ЭШП) с коэффициентом вытяжки $\mu = 4$ (эквивалентная деформация $\varepsilon = \ln 4 = 1,39$) привело к разрушению ледебуритной сетки, значительному улучшению карбидной неоднородности, повышению ударной вязкости материала в четыре, прочности при изгибе в два раза. Стойкость зенкеров

диаметром 21 мм, изготовленных из прессованных заготовок, в 1,5...1,8 раза выше стойкости инструмента, изготовленных из материала ЭШП без деформации. Два прохода РКУП через угловую матрицу с $\Phi = 90^\circ$ обеспечивают эквивалентную деформацию $\varepsilon = 2,3$, через матрицу с двумя зонами сдвига с $\Phi = 120^\circ$ обеспечивают $\varepsilon \approx 2,7$, т. е. более высокую, чем в [17]. Можно полагать, что обработка таких слитков методами РКУП будет эффективной и позволит получить более качественную структуру в прутках большего поперечного сечения.

Для всех стареющих высоколегированных сплавов типа ХН70ВМФТЮ, ХН75ВМФЮ, ХН62ВМКЮ минимально необходимый коэффициент вытяжки при прессовании слитка принимается равным $\mu = 3...4$. При этом после рекристаллизационного отжига обеспечивается достижение полной рекристаллизации литой структуры, получение более совершенной структуры и повышенного уровня свойств. При достаточно равномерной деформации минимальная вытяжка, при которой обеспечивается рекристаллизация литой структуры, может быть равной $\mu = 2...3$. В зонах с фактической степенью деформации, менее указанной, может сохраняться частично нерекристаллизованная (литая) структура даже после рекристаллизационного отжига [15]. Можно полагать, что в случае РКУП будет достаточно осуществить две операции.

Другим коммерчески выгодным направлением является многооперационное РКУП заготовок для формирования субмикроструктурных структур обрабатываемых материалов. Многочисленные публикации (например, [3, 18]) показывают, что деформационные технологии обеспечивают получение объемных заготовок из цветных и черных металлов, сплавов на их основе с субмикро- и наноструктурой, существенно более высокими свойствами, а в ряде случаев уникальными функциональными характеристиками. Выявлены перспективы применения таких материалов в машиностроении, энергетике, транспорте, медицине, электронике и других отраслях промышленности, приведены некоторые результаты уже осуществленного практического использования новых технологий.

Технология РКУП может быть также использована в порошковой металлургии для консолидации материалов, производства композитов, термомеханической обработки и других целей.

ВЫВОДЫ

Описаны способ и новое устройство для равноканального углового прессования слитков при повышенных температурах. В эксперименте осуществлялось равноканальное угловое прессование слитка силумина при температуре 400 °С. Прессование заготовки осуществлялось через матрицу с каналом круглого поперечного сечения диаметром 23 мм и двумя зонами сдвига с углами пересечения сегментов канала, равными $\Phi = 120^\circ$. При использовании графито-масляной смеси давление деформирования не превышало 700 МПа. После трех операций прессования слитка достигнуто измельчение частиц кремния и более равномерное их распределение в матрице (максимальные размеры равноосных частиц не превышали 10 мкм).

На основании результатов экспериментов и анализа известных публикаций метод равноканального углового прессования рекомендуется для применения на промышленных предприятиях с целью совершенствования структуры и повышения уровня свойств слитков из сплавов черных и цветных металлов. В результате интенсивной пластической деформации достигается залечивание трещин, пор и других объемных дефектов, измельчение зерна, частиц второй фазы и включений. Преимущество РКУП по сравнению с традиционными методами обработки давлением (ковка, прокатка) в этом случае заключается в сохранении размеров поперечного сечения, а также может достигаться снижение себестоимости передела слитков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пластическая обработка металлов простым сдвигом* / В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский, В. И. Копылов // *Изв. АН СССР. Металлы.* – 1981. – № 1. – С. 115–123.
2. *Segal V. M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE)* / V. M. Segal // *Mater. Sci. Eng. A* 386. – 2004. – P. 269–276.

3. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
4. Равноканальная многоугольная экструзия / В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк, Н. И. Матросов [и др.] // ФТВД. – 2002. – № 4. – С. 31–39.
5. Особенности равноканальной многоугольной экструзии / В. З. Спусканюк, А. Б. Дугадко, И. М. Коваленко [и др.] // ФТВД. – 2003. – № 4. – С. 85–96.
6. Деклар. пат. 62615A Україна, МПК В21С 1/00, В21С 23/02 (2006.01), В21J 5/00. Спосіб рівноканального багатокуткового пресування виробів / Дугадко О. Б., Матросов М. І., Варюхін В. М., Спусканюк В. З., Білошенко В. О., Медведська Е. О., Давиденко О. А., Шевченко Б. А. ; заявник і патентовласник Донецький фізико-технічний інститут Національної академії наук України. – № 2003043401; заявл. 15.04.2003 ; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.
7. Исследование процесса равноканального Т-образного прессования / Спусканюк В. З., Давиденко А. А., Гангало А. Н., Коваленко И. М., Закорецкая Т. А. // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2008. – С. 53–59.
8. Спусканюк В. З. Равноканальная угловая гидроэкструзия – эффективный метод интенсивной пластической деформации / В. З. Спусканюк, А. А. Давиденко, И. М. Коваленко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – №1 (7). – С. 179–182.
9. Равноканальная угловая гидроэкструзия – эффективный метод формирования субмикроструктурного состояния материалов / Спусканюк В. З., Константинова Т. Е., Давиденко А. А. [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 37–42.
10. Белошенко В. А. Теория и практика гидроэкструзии / В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк. – Киев : Наукова думка, 2007. – 246 с.
11. Spuskanyuk V. Development of the equal-channel angular hydroextrusion / V. Spuskanyuk, A. Spuskanyuk, V. Varyukhin // J. Mater. Process. Tech. – 2008. – № 203. – P. 305–309.
12. Пат. 83389 Україна, МПК (2006) В21С 23/00, В21С 25/00, В21J 5/00. Пристрій для зміцнення довгомірних прутків / Варюхін В. М., Спусканюк В. З., Давиденко О. А., Коваленко І. М. ; заявник і патентовласник Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України. – № a200605632 ; заявл. 23.05.2006 ; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13.
13. Пат. 32306 Україна, МПК (2006) В21С 37/00. Пристрій для напівбезперервного гідромеханічного пресування прутків необмеженої довжини / Білошенко В. О., Спусканюк В. З., Гангало О. М., Давиденко О. А., Коваленко І. М. ; заявник і патентовласник Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України. – № u200800151 ; заявл. 03.01.2008 ; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9.
14. Спусканюк В. З. Метод расчета давления равноканального углового прессования в S-образной матрице / В. З. Спусканюк, А. Н. Гангало, А. А. Давиденко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126), Ч. 2. – С. 158–162.
15. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М. Я. Дзугутов. – М. : Металлургия, 1971. – 424 с.
16. Угловое прессование магниевых сплавов на горизонтальном прессе / Головки А. Н., Данченко В. Н., Краузе К., Бах Фр.-В. // Тезиси докладов Международной научной-технической конф. «Прогрессивные технологии пластической деформации металлов». – Донецк : ДонНТУ, 2008. – С. 15.
17. Гидропрессование стали Р6М5 электрошлакового переплава / Ю. Ф. Черный, В. З. Спусканюк, А. А. Лядская [и др.] // В сб. «Проблемы специальной электрометаллургии». – Киев : Наукова думка, 1978. – Вып. 9. – С. 12–15.
18. Nanomaterials by Severe Plastic Deformation IV. Edited by Yuri Estrin and Hans Jurgen Maier. Trans Tech Publications LTD, Switzerland.UK.USA.2008, part 1 and 2.

Спусканюк В. З. – д-р техн. наук, проф. ст. науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;
Давиденко А. А. – канд. техн. наук, науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;
Гангало А. Н. – канд. техн. наук, вед. инженер ДонФТИ НАНУ;
Касатка Н. Г. – науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;
Коваленко И. М. – вед. инженер ДонФТИ НАНУ;
Янчев А. И. – вед. инженер ДонФТИ НАНУ.

ДонФТИ НАНУ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина
Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

E-mail: al-gangalo@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2012 г.