

К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов

Маркушев М.В.

mvmark@imsp.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст. Халтурина 39, 450001 Уфа

On the effectiveness of some methods of severe plastic deformation for bulk nanomaterials processing

M.V. Markushev

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa, Russia

Рассмотрены наиболее известные и используемые в лабораториях методы получения наноструктурных объемных материалов, реализующие интенсивную пластическую деформацию кручением под высоким давлением, многократной осадкой и угловым прессованием. Показаны их принципы, области наиболее эффективного применения и недостатки.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, наноструктура, кручение под высоким давлением, угловое прессование.

The most widely used laboratory methods for bulk nanomaterials processing, realizing severe plastic deformation by high pressure torsion, multiple setting and angular pressing are considered. Their main principles, areas of the most effective applications and restrictions are shown and discussed.

Keywords: severe plastic deformation, nanostructure, high pressure torsion, angular pressing.

1. Введение

Интерес последних лет к наноструктурным (НС) материалам, обусловленный необычно высоким потенциалом их служебных свойств, вызвал лавину работ по разработке способов их производства. В том числе, способов обработки серийно выпускаемых слитков и полуфабрикатов сплавов промышленных композиций с целью их наноструктурирования. Такой подход, объединенный термином «деформационное (пластическое) наноструктурирование», привел к разработке ряда методов так называемой интенсивной пластической деформации (ИПД), преимущественно реализующей сдвиг, с суммарной степенью более 2-3 [1-3].

По сути, ИПД металлов и сплавов, как процесс обработки металлов давлением, известен сравнительно давно. Однако на практике широкое применение получили лишь два метода, использующие такую деформацию: прокатка фольги и волочение тонкой проволоки. Из-за малых сечений эти полуфабрикаты мало пригодны для последующих формообразующих операций. По-

этому стояла задача разработки специальных методов обработки заготовок достаточно больших сечений, реализующих ИПД без значительных изменений их исходной формы и размеров. Анализ сути, преимуществ и недостатков нескольких такого рода методов и является предметом настоящей статьи.

2. Методы ИПД: принципы, преимущества и недостатки

Кручение под высоким давлением

Кручение под высоким давлением (КВД) (Рис. 1а) впервые было применено для обработки металлических материалов П. Бриджменом в 1935 году [4]. Свое второе рождение метод получил благодаря работам российских ученых в 70-90-е годы прошлого столетия, в которых он был использован для получения НС состояний многих чистых металлов, сплавов, интерметаллидов и керамик [3,5-12].

Данным методом, как правило, обрабатывается тонкий диск толщиной порядка 1 мм и диаметром до 20-30 мм. При этом кроме кручения, он претерпевает осадку и радиальную экструзию, вызванные приложенным давлением в несколько ГПа. Последнее, в свою очередь, обеспечивает необходимое трение на контактной поверхности образца с вращающимся инструментом, и соответственно, его кручение. При этом деформация образца имеет радиальную неоднородность, минимизировать которую можно большим количеством оборотов [3]. Методом КВД можно также обрабатывать заготовки в форме кольца, по схеме (Рис. 1б), предложенной С. Эрбелем [13].

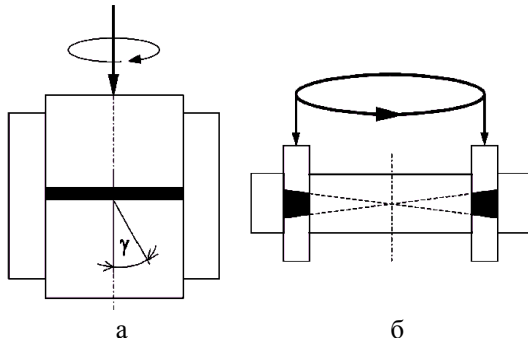


Рис. 1. Схемы кручения под высоким давлением диска (а) и кольца (б).

Для определения степени деформации при КВД обычно используют формулу расчета сдвиговой деформации (γ) на расстоянии R от оси образца:

$$\gamma = 2\pi \times R \times \frac{N}{h}, \quad (1)$$

где N – количество оборотов бойка; h – толщина образца [3,10]. А для ее сопоставления с деформациями, достигаемыми другими методами, γ преобразуют в эквивалентную деформацию (e):

$$e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

С использованием метода КВД в десятках лабораторий мира удалось получить структуру с нанометрическими размерами зерен в огромном числе материалов, изучить ее особенности и оценить ряд их механических и физических свойств [3,9-15]. Однако перспективы использования КВД, как промышленного метода, имеют существенные ограничения, обусловленные, прежде всего, малыми размерами обрабатываемых заготовок и низкой стойкостью инструмента вследствие чрезвычайно высоких нагрузок на него.

Всесторонняя изотермическая ковка

Открытая всесторонняя (многопереходная) изотермическая ковка (ВИК) широко исследовалась в ИПСМ РАН [16-22] и активно предлагается авторами как один из основных и эффективных методов наноструктурирования массивных заготовок. Принцип метода заключается в многократной деформации заготовки с изменением оси нагружения на каждом переходе (Рис. 2).

При этом измельчение структуры обрабатываемого материала достигается не только за счет аккумуляции ее изменений с накоплением деформации, но также и за счет того, что используется принцип поэтапного уменьшения размера зерен при поэтапном снижении температуры деформации, проводимой в изотермических условиях. Для достижения результата на каждом этапе ковки должно обеспечиваться измельчение зерен обрабатываемого материала за счет прохождения фрагментации и/или непрерывной динамической рекристаллизации [17,18]. Формирование же все более мелких зерен, в свою очередь, повышает технологическую пластичность материала и обеспечивает возможность его дальнейшего деформирования без разрушения при более низких температурах.



Рис. 2. Схема выполнения одного этапа открытой ковки [22].

Каждый этап ВИК состоит из нескольких высотных осадок заготовки со степенью деформации 40–60% и последующей ее протяжки на исходный размер. При этом ее ось поворачивается на 90° по отношению к предыдущему положению после каждого цикла «осадка-протяжка» (Рис. 2). Исходное структурное состояние материала и температурно-скоростной интервал его деформирования выбираются из соображений достижения максимально измельченной и однородной структуры заготовки на каждом этапе, а количество этапов определяется требуемым размером зерна. Методом ВИК получена ультрамелкая и наноструктура в заготовках весом более 50 кг из титана и его сплавов, сталей, никелевых сплавов и интерметаллидов [16-22].

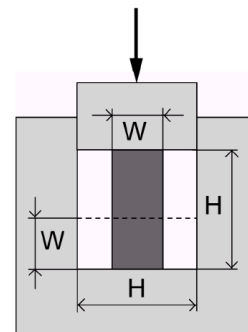


Рис. 3. Схема закрытой ковки [23].

Для этих же целей и по тому же принципу в [23] А.Гошем была предложена закрытая многопереходная ковка (Рис. 3). В этом процессе заготовка также последо-

вательно деформируется по двум или трем осям со степенью, определяемой из соотношения

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{H}{W} \right) \quad (3),$$

где H и W высота и ширина заготовки, соответственно.

Неоспоримым преимуществом обеих ковок является их простота и отсутствие необходимости использования специального дорогостоящего инструмента. Даже в закрытой схеме инструмент очень прост и дешев. Кроме того, этот процесс легко механизировать. Однако есть один непреодолимый недостаток – ограничение степени однократной деформации из-за потери устойчивости заготовки при осадке. Кроме того, осадке присуща зональная неоднородность деформации заготовки, приводящая к неоднородности ее деформационной структуры. Устранение последней требует большого числа циклов и этапов обработки.

Равноканальное угловое прессование

Равноканальное угловое прессование (РКУП) было разработано В.Сегалом с сотрудниками и запатентовано в 1973 году [24]. Принцип метода заключается в реализации простого сдвига в зоне пересечения каналов равного сечения, выполненных в монолитной матрице и расположенных под углом 2φ друг к другу, при проталкивании через них заготовки (Рис. 4). При этом заготовка удаляется из матрицы последующей заготовкой [2,24-26], а один цикл ее прессования, при условии отсутствия трения о стенки инструмента, придает материалу деформацию, равную:

$$e = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \varphi, \quad (4).$$

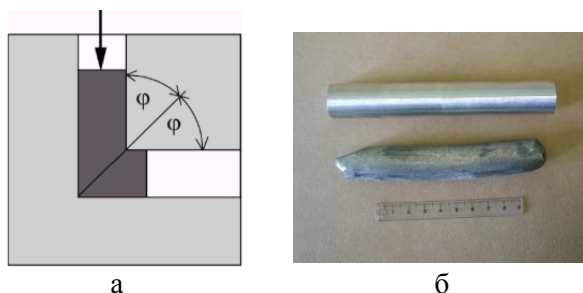


Рис. 4. Схема равноканального углового прессования (а) и внешний вид прутковых заготовок до и после РКУП (б).

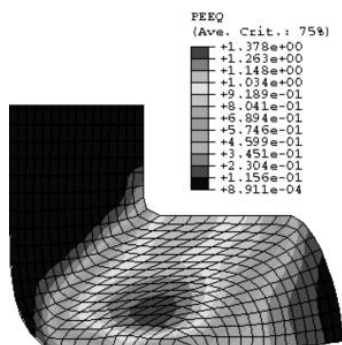


Рис. 5. Распределение деформаций в сечении деформированной заготовки при моделировании РКУП [30].

При $2\varphi=90^\circ$ ее значение составляет ~ 1.16 , что, как показано компьютерным моделированием (Рис. 5) и в экспериментах с помощью метода сеток [2,27-30], хорошо совпадает с реально наблюдаемой сдвиговой деформацией основной массы заготовки. Такая однократная деформация заготовки эквивалентна ее прямому прессованию с коэффициентом вытяжки 3 или деформации осадкой со степенью $\sim 70\%$. При многократном же повторении деформации заготовки, что как и ВИК позволяет реализовать метод РКУП, ее степень суммируется, а структурные изменения обрабатываемого материала накапливаются.

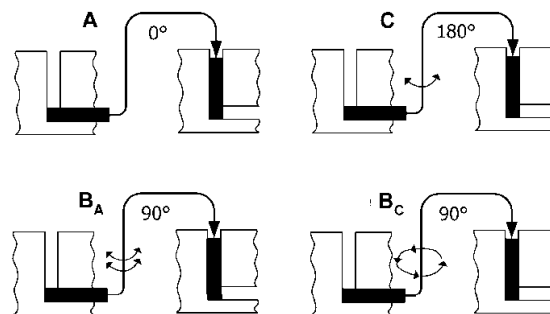


Рис. 6. Основные маршруты РКУП прутковой заготовки.

К явным преимуществам РКУП относится его простота, низкие удельные давления на инструмент и возможность придания заготовке большой сдвиговой деформации, за счет практически неограниченного числа ее повторений, для достижения регламентированной структуры и, соответственно, свойств материала. При этом заготовка может вращаться вокруг ее осей. Для прутков в литературе приняты четыре основные траектории (маршруты) деформации заготовки: А – без ее вращения, B_A – с переменным вращением на 90° по и против часовой стрелки, B_C – с вращением на 90° в одну сторону и С – с вращением на 180° (Рис. 6). Наиболее эффективным, с точки зрения получения наибольшей доли высокоугловых границ и наиболее однородной наноструктуры, является маршрут А [31].

В значительном числе работ [например, 2,26-30] показано, что сдвиговая деформация заготовки при РКУП протекает сравнительно равномерно даже при сильном трении об инструмент. При снижении же трения, например, за счет подвижных стенок его каналов или применения смазок, фиксируется лишь незначительная по размеру приконтактная область затрудненного течения в нижнем углу сочленения каналов.

При РКУП, однако, имеет место и другой эффект, на который мало кто обращает внимание – перемещение материала заготовки вдоль ее продольной оси [32]. Причина его возникновения в том, что при сдвиге происходит изменение формы и увеличение длины заготовки за счет «наклона» ее торцов. Для возвращения заготовке исходной формы, что требуется при многократном РКУП, должна реализоваться «аккомодационная» деформация заготовки. Она происходит на обоих ее концах их осадкой во входном канале на последующем цикле прессования. В результате происходит ротация поверхностных слоев в продольном сечении заготовки (Рис. 7), величина которой на каждом цикле

соизмерима с ее толщиной (диаметром). Многократное же прессование приводит к тому, что верхние и нижние слои заготовки могут меняться местами, а области у заходного и выходного концов заготовки оказаться в ее центре. Такой эффект также максимален при маршруте А и конечно же благоприятен для устранения выраженной строчечности или зональности исходной структуры обрабатываемого материала.

Теоретически объем и масса, также как и форма заготовки, при РКУП должны быть неизменны. Однако на практике сохранение целостности и качества прессуемых заготовок при формировании в них НС состояний оказалось не столь простой задачей. Первоначально большинство исследователей изготавливали и использовали оснастку согласно описаниям первых работ В.Сегала. Она, как правило, состояла из монолитной матрицы, в которой были выполнены неподвижные пересекающиеся каналы, пуансона и крепежных узлов. На первый взгляд все было сделано правильно, так как на «лабораторном» этапе работ основное внимание было сосредоточено на анализе деформируемости различных металлов и сплавов, типах получаемых в них структур и уровне достигаемых свойств. На качество же заготовок и технологичность их получения – одним из основных критериев эффективности их возможного промышленного использования, внимания практически не уделялось.



Рис. 7. Сечение заготовок с внедренной в приповерхностный слой проволокой после 2-х (а) и 5-ти (б) циклов РКУП по маршруту А. (угол между каналами 135 град) [32].

При использовании же указанных оснасток, из-за необходимости деформирования и проталкивания одновременно двух заготовок, в областях, прилегающих к концам отпрессованных заготовок, формировались дефекты типа зажим и заковы. При этом и их форма заметно отличалась от исходной (Рис. 4б). Последующее деформирование таких заготовок, требуемое для формирования наноструктур, затруднялось или было невозможным без устранения указанных дефектов механической обработкой. Это означало потерю в весе заготовки и ее удорожание из-за удлинения цикла обработки, соответственно, невысокую эффективность ее получения.

Кроме того, определенные технологические трудности вызывала работа с инструментом. В том числе, возникали проблемы из-за невозможности оперативного доступа к каналам для смазки, зачистки, контроля качества поверхности и ряд других. Поэтому, предпо-

лагая промышленное использование метода, потребовались существенные изменения принципов и способа деформирования, как и конструирования инструмента. Причем необходимость таких изменений, помимо устранения вышеуказанных недостатков, была обусловлена также необходимостью повышения однородности структуры и свойств прессованных заготовок.

В результате, были разработаны устройства РКУП с противодавлением, в которых, что было наиболее важно и принципиально, деформировалась лишь одна заготовка. При этом, за счет реализации противодействия на заготовку, схема ее деформации приближалась к чистому сдвигу, что обеспечивало большую однородность структуры по сечению заготовки. Такой эффект был достигнут за счет применения технологических вкладышей, образующих каналы [2,33], разъема матрицы [2,34] и других решений [2,35]. Среди них необходимо выделить одно наиболее заметное, предложенное В.Сегалом [36], согласно которому каналы в устройстве формировались сборной матрицей со сборным поддоном, и сборным пуансоном (Рис. 8). Данное устройство одним из первых реализовало при каждом цикле обработки деформирование одной заготовки с противодавлением, что, несомненно, заметно повысило коэффициент использования материала. Кроме того, исключение трения большинства граней заготовки о стенки каналов увеличило однородность ее деформации сдвигом (и как результат, структуры).

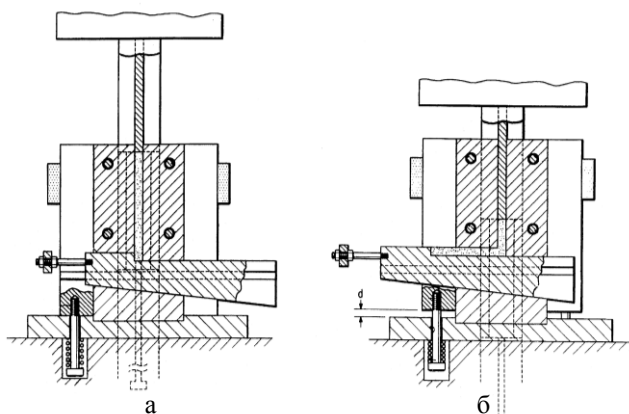


Рис. 8. Устройство РКУП с противодавлением в начале (а) и конце цикла прессования [36].

Помимо явных преимуществ необходимо отметить и некоторые недостатки, и технологические ограничения данного устройства. Например, возможность обработки заготовок только квадратного или прямоугольного сечения. Основным же недостатком является сложность конструкции, большое количество деталей, причем подвижных в процессе прессования. Такое решение требует значительных трудозатрат на изготовление устройства, подгонку его деталей и узлов по сопрягающимся плоскостям, а также на их частую замену из-за износа в процессе эксплуатации. К недостаткам следует также отнести сложность и трудоемкость выполнения операций обработки заготовки, начиная с ее размещения в заходном канале, в особенности в условиях горячей деформации. Последнее связано с тем, что места контакта с деформируемым материалом, а именно плоскости обоих каналов, образованы сопрягающимися и двигаю-

щимися относительно друг друга деталями. В процессе деформирования материал заготовки проникает в щели между указанными деталями, образуя в результате упругой деформации последних. Это приводит к формированию дефектов типа «заусенец» в углах пересечения плоскостей заготовки или на ее образующей, что значительно увеличивает затраты на ее проталкивание в каналах и удаление. В случае значительного износа трущихся поверхностей деталей, образующих каналы, удаление заготовки требует даже разборки оснастки. С увеличением же размера (массы) заготовок (масштабировании устройства), этот недостаток усугубляется.

Также ряд трудностей сопряжен с удалением обработанной заготовки из устройства. А именно, требуется выполнить определенную последовательность операций, включающих вывод поддона за пределы матрицы, что само по себе довольно сложно и трудоемко. Однако даже при перемещенном в указанное положение поддоне с заготовкой, и тем более имеющей торцевые заусенцы, удаление последней без изменения ее формы и размеров затруднительно. При проведении же нескольких циклов прессования отмеченные недостатки приводят к значительному росту трудоемкости обработки и себестоимости НС заготовок.

Комплексное угловое прессование

Способ и устройство деформационной обработки материалов, названный М.Маркушевым с соавторами комплексное угловое прессование (КУП), также основан на принципе деформирования одной заготовки [37]. КУП предназначено для обработки заготовок, имеющих преимущественно прямоугольное поперечное сечение, т.е. для заготовок в форме плиты [38]. Как и в [36] цикл обработки включает те же основные этапы: размещение заготовки в первом канале устройства, приложение усилия для ее перемещения во второй канал с деформированием угловым прессованием в области пересечения каналов и удаление заготовки. При этом он отличается тем, что заготовка помимо сдвига в зоне пересечения каналов претерпевает дополнительную деформацию в обоих каналах за счет изменения ее поперечного сечения (Рис. 9). То есть, в данном устройстве заготовка подвергается нескольким схемам деформирования при выполнении каждого цикла прессования.

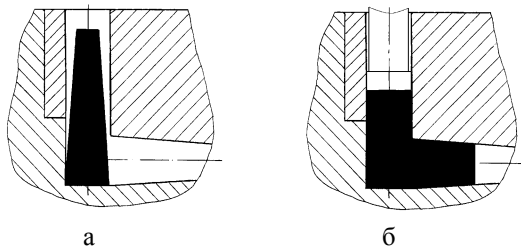


Рис. 9. Схема комплексного углового прессования. Темным показана заготовка до (а) и в процессе прессования (б).

Сначала происходит осадка заготовки в первом канале со степенью e_o , которая определяется из соотношения (3). При этом степень деформации заготовки ограни-

чена условиями ее устойчивости для выполнения этой операции. Если предполагается один цикл обработки, то осадка реализуется за счет выполнения сечения(ий) заготовки меньшим(и), чем сечение канала. При многократном же использовании устройства упомянутое(ые) сечение(я) заготовка приобретает на предыдущем цикле обработки ее формоизменением во втором канале.

Затем заготовка деформируется угловым прессованием в области пересечения каналов. При этом прессование может быть как равноканальным, так и неравноканальным, а степень деформации заготовки ($e_{уп}$) определяется из соотношения (4) и пропорциональна углу пересечения осей каналов.

На следующем этапе заготовка выдавливается во втором канале. Реализация этой операции достигается за счет переменного сечения второго канала по длине. При этом степень деформации (e_v) определяется по известным зависимостям для выдавливания.

Таким образом, при использовании КУП суммарная степень деформации заготовки выражается соотношением:

$$e = N (e_o + e_{уп} + e_v), \quad (5)$$

где N - количество циклов обработки, и данный способ при одинаковом угле пересечения каналов позволяет даже при однократном использовании придать большую, чем в других устройствах углового прессования степень деформации заготовке за счет ее последовательного деформирования в первом и втором каналах. При этом достигается большая степень преобразования (измельчения) структуры обрабатываемого материала и для придания ему наноструктуры требуется меньшее количество циклов обработки, что означает снижение трудоемкости процесса.

Переменность сечения второго канала, помимо обеспечения выполнения вышеописанных операций, приводящих к большему воздействию на структуру материала, способствует также дополнительному измельчению его структуры. Последнее обусловлено следующим. Известно, что для получения большего эффекта измельчения структуры материала необходимо, чтобы очаг деформации, в котором осуществляется сдвиг, был наименьшим, что достигается использованием противодавления на заготовку [2]. В устройстве на рис. 8 оно организуется за счет наличия торцевой стенки поддона, его скольжения по наклонной к матрице плоскости и прикрепленных к поддону гидравлических цилиндров. В случае же КУП аналогичный результат достигается более простым приемом, а именно за счет сужающегося второго канала, в котором противодавление возникает с момента попадания в него заготовки.

Отличительной особенностью устройства КУП является его простота (Рис. 10). Деформирующий узел образован цельным пуансоном (1) и матрицей, состоящей только из двух частей. Причем разъем между подвижной (2) и неподвижной (3) частями матрицы, обращенный к заготовке, имеется только в нижней части входного канала (4). В процессе деформирования заготовки (12) все узлы, за исключением пуансона, прикрепленного к траверсе пресса (10), неподвижны. При этом под-

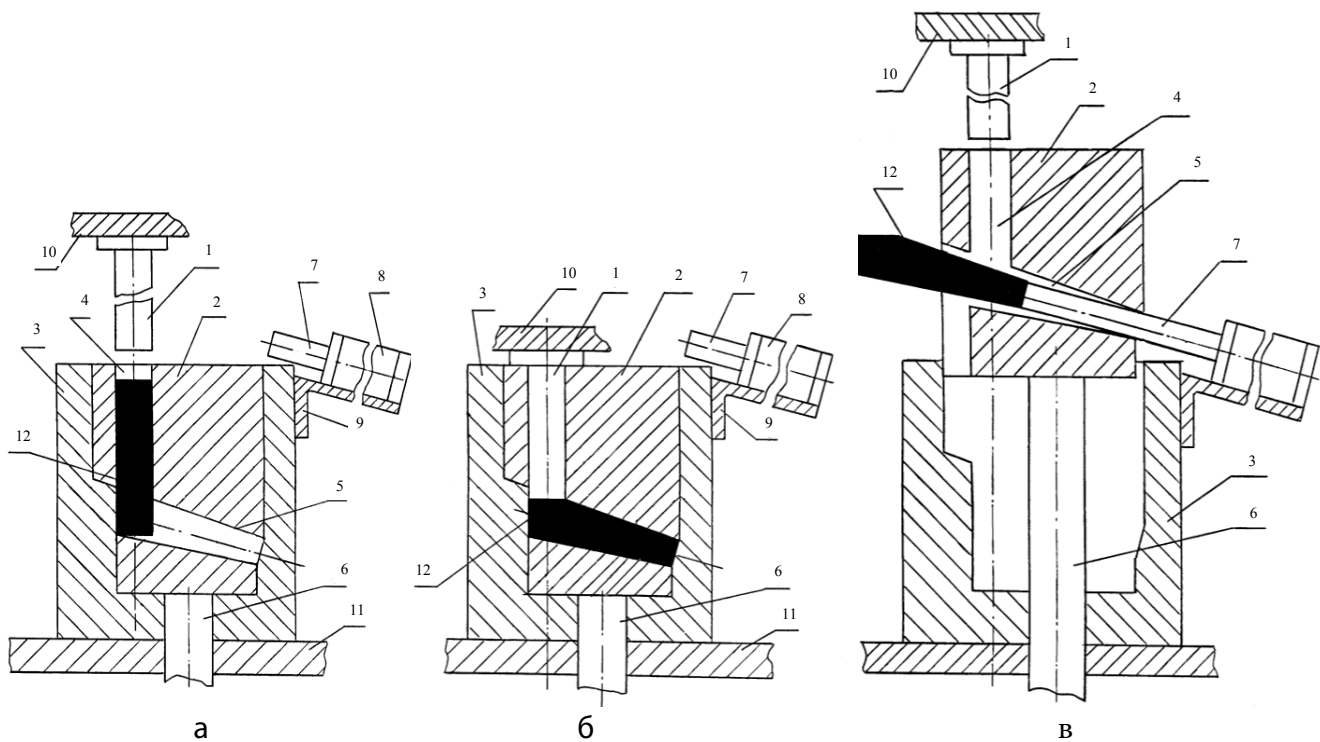


Рис. 10. Устройство КУП в моменты начала деформирования (а), конца деформирования (б) и удаления заготовки (в).

вижная часть матрицы охвачена неподвижной частью, зафиксированной на столе пресса (11), что предотвращает образование зазоров по местам их сопряжения. Такое конструктивное решение исключает образование заусенцев на гранях обрабатываемой заготовки, и, соответственно, повышает коэффициент использования материала. Отсутствие заусенцев позволяет осуществить повторный цикл обработки заготовки без дополнительных операций по ее зачистке, что означает снижение трудоемкости и повышение производительности всего процесса. Использование данного устройства обеспечивает также снижение трудоемкости, в том числе и за счет легкости удаления обработанного материала из сужающегося выходного канала (5). Для этого после цикла деформирования оба торца второго канала освобождаются за счет перемещения подвижной части матрицы на необходимую для этого величину с помощью основного выталкивателя (6). В результате обеспечивается доступ к заготовке и ее удаление из матрицы с использованием бокового выталкивателя (7) с гидроцилиндром (8), закрепленном на неподвижной части матрицы с помощью кронштейна (9).

Помимо прочего, устройство КУП позволяет использовать технологические вкладыши различной формы и конструкции, размещаемые во втором канале, по крайней мере, на части его длины, обеспечивая получение из предварительно обработанных заготовок НС изделий: профилей различной конфигурации, осесимметричных и несимметричных деталей, в том числе с разветвленной поверхностью в плане.

3. Заключение

Задача создания эффективного устройства ИПД, обеспечивающего получение с малой трудоемкостью мас-

сивных НС заготовок и изделий с улучшенными свойствами, будет, несомненно, актуальна еще длительное время. Ее решение потребует значительных, объединенных усилий конструкторов, механиков, технологов и материаловедов. Причем роль последних должна быть определяющей, так как многие известные предложения не выдерживают критики по причине слабого понимания авторами процессов, обеспечивающих формирование НС материалов и определяющих взаимосвязь их структуры, фазового состава и механического поведения при и после ИПД. В свою очередь, материаловеды должны обладать хорошими инженерными знаниями процессов и технологии обработки металлов давлением, а также понимать основы эффективного производства прессованных (штампованных) изделий. Надеюсь, что журнал «Письма о материалах» внесет заметную лепту в решение затронутых в настоящей работе вопросов.

Литература

1. R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov. Phys.Met. Metallogr. 73, 373, (1992).
2. V.M. Segal, V.I. Reznikov, V.I. Kopylov et al., Processes of Metal Structure Formation upon Plastic Deformation. Minsk, Navuka i Tekhnika (1994) 232 p. (in Russian).
3. R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov, Bulk Nanostructured Metallic Materials: Production, Structure and Properties. Moscow, Akademkniga (2007) 398 p. (in Russian).
4. P.W. Bridgman. Phys. Review 48, 825 (1935).
5. R.K. Islamgaleev, N.A. Akhmadeev, R.R. Mulyukov. Phys. Stat. Sol. (a) 118, 127 (1990).
6. R.Z. Valiev, R.R. Mulyukov, V.V. Ovinnikov, V.A. Shabashov. Scripta Mat. 25, 2717 (1991).
7. A.A. Nazarov, A.E. Romanov, R.Z. Valiev. Acta Met. 41, 1033 (1993).

8. V.Yu. Gertsman, R. Birrindger, R.Z. Valiev, H. Gleiter. *Scripta Met.* 30, 1100 (1993).
9. R.Z. Valiev. *Nanostruct. Mat.* 6, 73 (1995)
10. R.I. Kuznetsov, V.I. Bykov, V.P. Chernishov et al. Plastic deformation of solids under pressure. Sverdlovsk, IFM USC USSR (1985). 32 p. (in Russian).
11. V.A. Teplov, V.P. Pilyugin, G.G. Taluts. *Metals* 2, 109 (1992). (in Russian).
12. A.A. Popov, I.Yu. Pyshmintsev, S.L. Demakov et al. *Scripta Met.* 37, 1089 (1997).
13. S. Erbel. *Met.Tech.* 482 (1979).
14. R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov. *Mater.Sci. Eng. A* 168, 141 (1993).
15. A.P. Zhilyaev, T.G. Langdon. *Prog.Mat.Sci.* 53, 893 (2008).
16. G.A. Salischev, O.R. Valiachmetov, R.M. Galeev, S.P. Malysheva. *Metals*. 4, 86 (1996). (in Russian).
17. G.A. Salischev, R.M. Galeev, S.P. Malysheva, M.M. Myshlyaev // *Nanostruct. Mater.* 11, 407 (1999).
18. G.A. Salishchev, O.R. Valiakmetov, R.M. Galeev. *J.Mat. Sci.* 28, 2898 (1993).
19. G.A. Salishchev, O.R. Valiachmetov, V.A. Valitov, S.K. Mukhtarov. *Mat.Sci.Forum.* 170-172, 121 (1994).
20. G.A. Salishchev, R.M. Imayev, V.M. Imayev et al. *Mat.Sci. Eng. A* 286, 236 (2000).
21. S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeev et al. In: *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, eds. M. Zehetbauer, R. Z. Valiev, Wiley-VCH. 2004. P. 835.
22. O.R. Valiachmetov, R.M. Galeev, V.A. Ivan'ko et al. *Rus. Nanotechnologies* 11-12, 56 (2009). (in Russian).
23. US Patent N4721537 (1988).
24. Patent USSR N492780 (1973).
25. V.M. Segal. *Mat.Sci.Eng.A.* 197, 157 (1995).
26. V.M. Segal, V.I. Reznikov, F.E. Drobyshvskiy, V.I. Kopylov. *News.AS USSR. Metals.* 1, 115 (1981).
27. P.B. Prangnell, C. Harris, S.M. Roberts. *Scr.Mater.* 37, 983 (1997).
28. H.J. Cui, R.E. Goforth, K.T. Hartwig. *JOM.* 50, 8 (1998).
29. Y. Wu, I. Baker. *Scr.Mater.* 37, 437 (1997).
30. A. Rosochowski, A. Olejnik, M. Richert. *Proc.Int.Conf. Metal Forming 2004, Krakow. Suppl.* 35 (2004).
31. A. Gholinia, P.B. Prangnell, M.V. Markushev. *Acta Mater.* 48, 1115 (2000).
32. F.J. Humphreys, P.B. Prangnell, J.R. Bowen et al. *Trans. Royal Soc.A.* 357, 1663 (1999).
33. US Patent N5600989 (1997).
34. US Patent N5850755 (1998)
35. A. Rosochowski. *Sol.State.Phen.* 101-102, 13 (2005).
36. US Patent N5400633 (1995)
37. Patent RF N2146571 (2000) (in Russian).
38. M.V. Markushev, M.Yu. Murashkin. In: *Aluminium Alloys. Their Physical and Mechanical Properties*, eds. J.Hirsch, B.Skrotzki and G.Gottstein, DGM, v.2, 2008, P.1518.