

Г.А.Баглюк, д-р техн. наук, М.Б.Штерн, д-р техн. наук
Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины, г.Киев,
Украина

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМ ДЕФОРМАЦИИ СО СДВИГОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ПРОЦЕССАХ УПЛОТНЕНИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглядаються схеми деформування пористих заготовок, які характеризуються інтенсивними деформаціями зсуву. Приведені модифікації існуючих методів ущільнення, а також принципово нові схеми деформування, які забезпечують зниження робочих зусиль для досягнення заданої щільності з одночасним проробленням структури. У ході аналізу відомих з літератури експериментальних і теоретичних результатів показано, що сполучення стискаючих і дотичних напружень може забезпечувати бажані результати шляхом удосконалення процесів штампування, екструзії і допресовки. Обговорюються можливості досягнення необхідних властивостей шляхом вибору конфігурації заготовок. Вказуються обмеження на можливі схеми ущільнення, пов'язані з ризиком втрати стійкості деформування при надмірній перевазі дотичної складової напружень над гідростатичною.

The circuits of porous preforms deformation that are characterized by intensive shear strains are considered. Updating trends of the existing densification methods as well as the essentially new deformation circuits that ensure decrease of working efforts for achievement of needed density with simultaneous development of material structure are specified. During the analysis of known from literature experimental and theoretical data it was established, that the overlapping of compressing and shear stresses can provide desirable results by improvement of punching, extrusion and repressing processes. The opportunities of achievement the required properties are discussed on the basis of preform configuration choice. The restrictions for probable circuits of densification concerned with the risk of deformation stability loss at excessive prevalence shear component of stresses above the hydrostatic one.

Нашедшая в последнее время широкое распространение штамповка пористых заготовок имеет конечной целью, как правило, получение плотных (практически беспористых) изделий сложной формы. Этот процесс имеет много общего с классическими методами объемной штамповки компактных металлов, однако, наличие пористости обуславливает известные особенности пластического течения пористых материалов, так как, кроме формоизменения, характерного для беспористых материалов, сопровождается также необратимыми объемными изменениями. В связи с этим, наряду с обычными для компактных материалов условиями течения металла, характеризваемыми наличием свободной поверхности в деформируемой заготовке, пористые материалы могут деформироваться в замкнутых объемах, когда нормальные нагрузки на всей поверхности тела являются сжимающими [1].

Эффективность процесса штамповки пористых материалов, которая в значительной степени определяется минимизацией энергетических и материальных затрат, существенно зависит от правильности выбора геометрии и пористости исходной заготовки, а также схемы деформации, которые должны обеспечивать при обработке давлением пластическое формоизменение и уплотнение образца без разрушения по кратчайшей траектории [2]. В связи с этим, значительный интерес представляет установление зависимостей между напряженным состоянием и соотношением формоизменения и уплотнения при различных схемах деформирования, а также их влияния

на энергосиловые параметры процесса и структурные характеристики материала деформируемых заготовок. Крайне важным при разработке технологического процесса штамповки пористых заготовок является, также, правильный выбор критериев оптимизации геометрии исходной заготовки. Так, в работе [2] в качестве оптимальной принимается такая форма заготовки, которая обеспечивала бы при горячей штамповке ее максимальное пластическое формоизменение без разрушения.

В процессе решения указанных задач, в особенности для деталей сложной формы, возможны два пути: изготовление заготовки близкой по форме к поковке и ее последующая горячая допрессовка до конечных размеров и плотности, либо изготовление заготовки простой геометрии и реализация при штамповке значительных поперечных (сдвиговых) деформаций для получения конечной формы поковки. Известно, что степень поперечной деформации порошкового тела оказывает значительный эффект на поведение материала в условиях деформации, его плотность, структуру и прочность. Однако в практике штамповки пористых заготовок первый метод нашел значительно более широкое применение, так как при использовании схем штамповки, которые обеспечивают быстрый переход от схемы одноосного сжатия к схеме неравномерного всестороннего сжатия уменьшается вероятность появления трещин на боковой поверхности заготовок [3]. В то же время, в этой работе, так же, как и в [4], указывается, что при реализации такой схемы нагружения изделия, полученные допрессовкой при отсутствии ощутимых поперечных деформаций, обычно имеют остаточную пористость около 2 %. Это объясняется тем, что наиболее интенсивно закрытие пор происходит как раз при сдвиговых деформациях, а при обычной горячей допрессовке в закрытом штампе сдвиговые деформации сведены, как правило, к минимуму.

В простейшем виде приведенное выше положение может быть наглядно проиллюстрировано схемой, представленной на рис.1. Схема простого доуплотнения

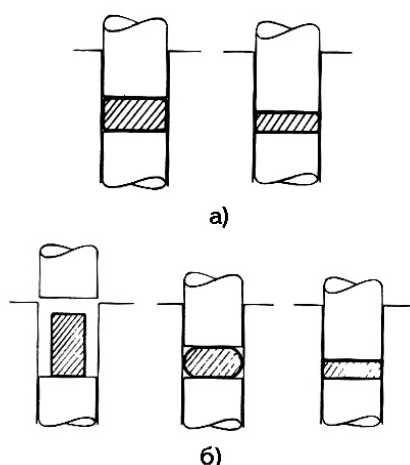


Рис.1. Схемы закрытой штамповки пористых заготовок: а – простой допрессовкой; б – с элементами осадки

(рис.1, а) отличается отсутствием или минимальным значением поперечной деформации, при которой происходит закрытие пор под действием простого осевого сжатия (рис.2, а). В случае реализации схемы штамповки с поперечной деформацией (рис.1, б) закрытие пор происходит в результате комбинации нормального давления и сдвига (рис.2, б). Такой же вывод следует из наиболее распространенных теорий деформирования пористых тел [5].

Авторами [6], по полученным в результате исследования уплотнения заготовок при различных схемах штамповки экспериментально–расчетным данным, были построены диаграммы распределения деформаций и интенсивности деформаций сдвига по объему

порошковой заготовки.

Анализ представленных результатов показывает, что штамповка в закрытом штампе с незначительной степенью поперечной деформации заготовок протекает при минимальной интенсивности деформаций сдвига и не позволяет получать изделия достаточно высокой плотности. Схема напряженно-деформированного состояния в данном случае максимально приближается к всестороннему равномерному сжатию. Увеличение интенсивности деформаций возможно только с использованием схемы всестороннего неравномерного сжатия на всех стадиях процесса, что положительно сказывается на росте плотности изделий.

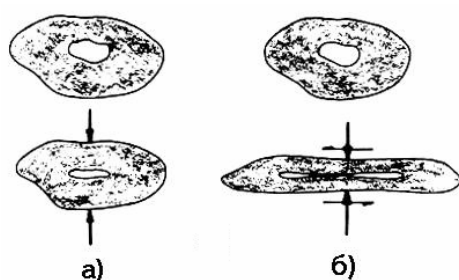


Рис.2. Схемы закрытия пор при простом доуплотнении (а) и при штамповке со сдвиговыми деформациями (б)

Высокая эффективность сдвиговых деформаций при уплотнении пористых материалов проявляется, в частности, при реализации процесса экструзии [7] или объемной штамповки пористых заготовок с элементами выдавливания [8]. В процессе экструзии уменьшение пористости происходит более интенсивно, чем при других схемах формования, так как во всех сечениях заготовки, находившихся в конической части матрицы, наряду с интенсивными сдвиговыми деформациями все главные составляющие тензора напряжений являются сжимающими.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов экструзии пористых материалов показывают, что уменьшение пористости при экструзии существенно зависит от окружающей пластической деформации заготовки, т.е. от степени ее обжатия. Возникающие при экструзии большие пластические деформации способствуют эффективному закрытию пор, причем выбор степени обжатия осуществляется, как правило, из условия обеспечения беспористой структуры заготовки [7].

Одним из направлений порошковой металлургии, где применение интенсивных сдвиговых деформаций при формировании заготовок позволяет решать сложные технологические проблемы, является прессование порошков труднодеформируемых материалов, в частности – газораспыленных порошков инструментальных и высоколегированных сталей. Сферическая форма газораспыленных порошков и их высокая исходная твердость крайне затрудняет формирование из них заготовок при холодном прессовании. Даже спрессованные под давлением 1000 МПа заготовки крайне непрочны, а дальнейшее повышение давления представляется нетехнологичным в связи с резким снижением стойкости прессовой оснастки. Авторы работы [9] предложили схему формирования с использованием сдвиговых схем деформации, которые реализуются в результате создания свободного или контролируемого движения материала в направлении поперечном по отношению к направлению приложения деформирующей нагрузки. Для реализации такой схемы уплотнения кольцевую обойму 1 (рис.3), изготовленную из стали или спеченной пористой

порошковой заготовки, устанавливали на нижний боёк 2 пресса, заполняли её порошком 3 и уплотняли под действием осевой нагрузки путем свободной осадки обоймы с порошком верхним бойком 4. Осаживаемая в процессе деформирования кольцевая обойма создает возрастающий с увеличением степени деформации радиальный подпор слою уплотняемого материала, вследствие чего реализуется схема уплотнения, при которой, наряду со значительными сдвиговыми деформациями в объеме порошка, на конечной стадии процесса возникает высокая гидростатическая составляющая тензора напряжений. Сочетание указанных факторов способствует эффективному уплотнению материала, а радиальный подпор на слой порошка со стороны деформируемой обоймы предохраняет боковые поверхности прессуемой заготовки от разрушения.

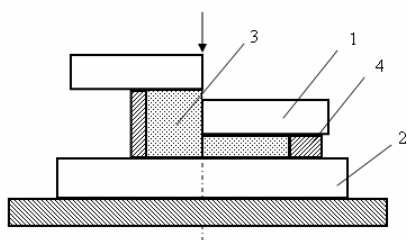


Рис.3. Схема прессования порошков труднодеформируемых материалов в условиях сдвиговых деформаций: 1 – верхний боёк; 2 – нижний боёк; 3 – уплотняемый порошок; 4 – кольцевая деформируемая обойма [9]

Применение предложенной схемы позволило получить из газораспыленных порошков быстрорежущей стали заготовки с достаточно высокой плотностью и прочностью, необходимой для транспортировки на последующие технологические операции [9].

Высокую эффективность при формировании заготовок из газораспыленных порошков трудно-деформируемых сплавов показало применение процесса гидромеханической осадки [10]. Сдвиговые деформации, реализуемые при осадке порошковой

засыпки при наличии бокового подпора, способствуют активному межчастичному схватыванию, что позволяет получать в результате использования указанного процесса прочные порошковые прессовки с высокой плотностью, пригодные для дальнейшей горячей обработки давлением по схеме традиционного металлургического передела. В работе [11] в результате теоретического анализа процесса гидромеханической осадки показано, что осевая осадка пористых заготовок при наличии бокового давления, превосходящего по величине значение радиального напряжения, которое возникало бы при уплотнении образца в жесткой матрице, но более низкое, чем при пластической деформации при радиальном сжатии, сопровождается аномальным изменением (уменьшением) радиуса заготовки.

Наличие проблем, связанных с уплотнением пористых порошковых заготовок при их горячей или холодной штамповке с применением схемы простой допрессовки в закрытом штампе, способствовало более широкому использованию схем открытой или полузакрытой штамповки, широко применяемых в обработке давлением компактных сталей и сплавов. Отмеченная тенденция обусловлена тем, что при штамповке осадкой в закрытом штампе наиболее уплотненной является центральная часть заготовки, а зоны, прилегающие к торцевым и боковым поверхностям заготовки, являются зонами затрудненной деформации и имеют минимальную плотность. Схема напряжений на

заключительной стадии процесса максимально приближается к всестороннему сжатию, что препятствует росту величины интенсивности сдвиговых деформаций и соответствующей ей конечной плотности [12]. В то же время, изменением граничных условий деформации при штамповке с элементами истечения в зонах затрудненной деформации можно регулировать распределение плотности в объеме заготовки и получать беспористый материал.

В работах [12–17] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования процессов открытой и полузакрытой штамповки пористых заготовок. Анализ полученных данных показал, что при штамповке пористых заготовок в незамкнутых объемах материал заготовки претерпевает четыре стадии деформирования. На первой стадии процесса происходит осадка заготовки, вторая стадия – заполнение полости матрицы, третья – допрессовка металла, и четвертая – истечение металла в компенсационные полости. При этом, схема напряженного состояния меняется от свободной осадки (на первой стадии процесса) до близкого к всестороннему сжатию (на конечной стадии), в результате чего достигается относительно равномерное распределение плотности материала по объему поковки [16]. На основании полученных экспериментально-расчетных данных было показано, что рост степени деформации на первой стадии при штамповке в закрытом штампе, а также увеличение коэффициента истечения при штамповке с элементами истечения приводят к повышению интенсивности деформаций сдвига и равномерности распределения плотности в объеме заготовки [17].

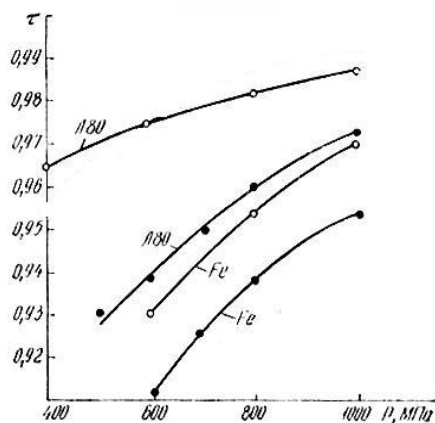


Рис.4. Зависимость относительной плотности заготовок из порошков железа и латуни Л80 от давления прессования: ●—простая допрессовка; ○—уплотнение с элементами осадки ($\Delta D/D=0,2$) [18]

С точки зрения силовых параметров процесса, схема деформирования с элементами осадки в закрытом штампе также обладает значительными преимуществами перед обычной допрессовкой. Экспериментальные данные, полученные в [12,18], показывают, что с увеличением степени поперечной деформации при одинаковых давлениях прессования плотность получаемых заготовок растет (рис.4), и это, очевидно, нельзя отнести только к снижению потерь на трение, которое имеет место при осадке. Физическая сущность данного явления заключается в облегчении истечения материала в эллиптические поры, полученные в результате сдвиговой деформации, по сравнению с истечением в поры близкие по форме к сферическим.

Микроструктурные исследования показали, что при уплотнении осадкой поры сначала приобретают эллипсоидную форму, а затем превращаются в образования тороидальной формы (рис.2) за счет сплющивания эллипсоидов [18, 19].

Анализ результатов расчетов усилия уплотнения пористых заготовок при различных схемах деформации [20] показывает, что использование схемы закрытой штамповки вызывает необходимость приложения существенно более высоких усилий для получения высокоплотных поковок. Наименьшее усилие деформации наблюдается при открытой штамповке. Обращает на себя внимание тот факт, что различие в усилиях растет с увеличением степени осевой деформации, а значит, и средней плотности поковок.

Следует отметить, что к аналогичным результатам приводят экспериментальные исследования процессов горячей штамповки порошковых образцов [12,21]. Для достижения одной и той же конечной плотности металла процессы деформирования по схеме всестороннего равномерного сжатия протекают при больших давлениях в сравнении с теми, которые характеризуются неравномерным всесторонним сжатием. Штамповка в закрытом штампе с максимально допустимой деформацией при осадке на уровне технологической пластичности протекает при минимальных давлениях. Дальнейшее уменьшение давления обеспечивается при штамповке с элементами истечения и при выдавливании [12]. Применение компенсационных щелей позволяет получить высокоплотные поковки с однородной структурой при меньшем давлении деформации по сравнению с традиционной закрытой штамповкой [21].

Следует, однако, принимать во внимание, что достигаемая плотность – не единственный критерий, определяющий формирование структуры и свойств металла. В зависимости от схемы напряженно-деформированного состояния при одинаковой конечной плотности порошкового металла изменяются, также, микроструктура, пластические свойства и, особенно, ударная вязкость [12]. Авторы работы [19] показали, что, в отличие от простой допрессовки заготовок, штамповка с поперечным течением способствует образованию более прочного металлического контакта между противоположными поверхностями поры и приводит к дроблению посторонних включений в материале. Так, если в случае применения простой допрессовки в отдельных случаях удается достичь прочности горячештампованных материалов на уровне прочности литых и деформированных сплавов аналогичных составов, то характеристики ударной вязкости порошковых материалов часто существенно уступают соответствующим характеристикам материалов, изготовленных с применением традиционных металлургических методов. В то же время, использование схемы штамповки с поперечным течением позволяет существенно повысить характеристики ударной вязкости, причем с увеличением степени поперечной деформации ударная вязкость растет [19]. Анализ фрактограмм образцов после деформации показал, что при всестороннем равномерном сжатии на границах зерен образуются скопления оксидных пленок. Количество участков хрупкого межзеренного излома в образцах убывает при переходе от равномерного к неравномерному сжатию, которое способствует более регулярному распределению оксидных пленок в объеме с ростом количества зон их разрыва и усилению диффузии в процессе деформации [12].

Влияние схемы формования на структуру и свойства материалов, полученных из железного порошка горячей штамповкой с выдавливанием и горячей двусторонней

допрессовкой было изучено в работе [22]. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что все свойства порошковых материалов существенно зависят от схемы формования. Так, в частности, прочностные характеристики материалов, полученных после штамповки с элементами выдавливания, превышали соответствующие свойства материала, полученного допрессовкой на 40 %, хотя после отжига различие свойств уменьшилась до 7,4 %.

Еще в большей степени различие проявилось в пластичности материалов. Как и значения параметров прочности, они оказались значительно выше после штамповки выдавливанием. Разница в свойствах уменьшается с увеличением температуры отжига и уменьшением температуры горячей штамповки.

Причины такого разительного улучшения свойств материала, сформированного с элементами выдавливания, кроются в его минимальной пористости, благоприятной ориентировке металлических зерен, неметаллических включений и пор. Кроме того, выдавливание обеспечило появление текстуры. В образцах же, полученных горячей допрессовкой, текстура не выявлена из-за отсутствия перераспределения материала между элементами заготовки [22].

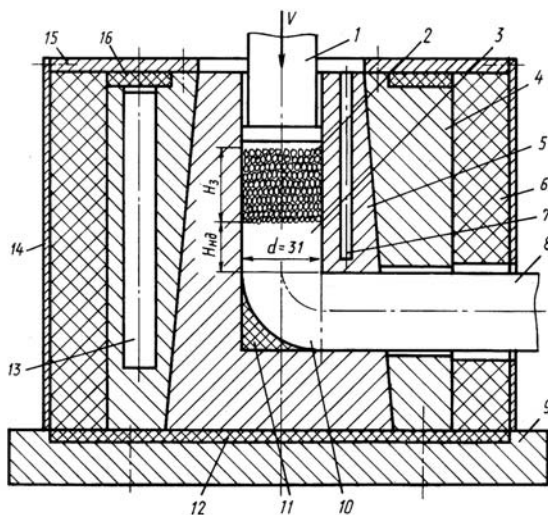


Рис.5. Пресс-форма для брикетирования гранул простым сдвигом: 1 – пуансон; 2 – уплотняемый материал; 3 – допрессованный материал; 4 – бан-даж; 5 – рабочая вставка; 6, 12, 16 – теплоизоляция; 7 – термопара; 8 – брикет; 9 – плита; 10 – область сдвига; 11 – застойная зона; 13 – электронагреватели; 14 – кожух; 15 – крышка [23]

при котором формируется компактный материал в виде прутка с хорошим качеством поверхности обладающий достаточно высокими и однородными свойствами. Такой процесс является перспективным для производства крупногабаритных брикетов с практически неограниченным отношением длины к диаметру. Кроме того, возможность значительного снижения вытяжек делает его особенно эффективным при производстве

В последние годы методы деформирования с обеспечением высокого уровня интенсивности сдвига рассматриваются также как средство достижения ультрамелкозернистой структуры (в частности – наноструктуры), и, как результат - обеспечения высокого уровня прочностных и функциональных показателей получаемых материалов. [23-26]. Реализация таких подходов при получении изделий из пористых заготовок ассоциируется, в частности, с методами равноканального углового прессования и винтовой экструзии. Так, в работе [23] приведены результаты исследования процесса горячего полунепрерывного брикетирования гранул вторичного алюминиевого сплава АК4М4 (рис.5). В результате проведенных экспериментов был разработан процесс брикетирования,

профилей больших сечений на стандартном прессовом оборудовании. Применение многоциклового обработки даже без уменьшения поперечного сечения прутка позволяет существенно увеличить прочность и пластичность получаемых материалов [23].

Сущность метода винтовой экструзии (рис.6) состоит в том, что призматическую заготовку продавливают через матрицу с винтовым каналом. Угол β наклона винтовой линии к направлению оси экструзии изменяется по высоте матрицы, причем на ее начальном и конечном участках он равен нулю. Такое построение геометрии канала матрицы приводит к тому, что при выдавливании через нее сохраняется идентичность начальной и конечной форм и размеров обрабатываемой заготовки, а это, в свою очередь, позволяет осуществлять ее многократную экструзию с целью накопления больших степеней деформаций.

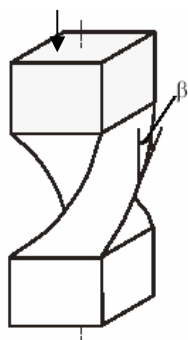


Рис.6. Схема винтового канала при винтовой экструзии [25]

Как показал металлографический анализ экструдированных образцов, с ростом количества переходов при винтовой экструзии и, следовательно, с увеличением степени накопленной деформации резко уменьшается размер зерен d получаемого материала и возрастают прочностные характеристики заготовки при снижении пластичности [25].

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о том, что применение схем деформирования пористых заготовок, характеризующихся интенсивными деформациями сдвига, является действенным средством, обеспечивающим снижение рабочих усилий при достижении заданной плотности. Эти же схемы обеспечивают проработку структуры твердой фазы пористого тела, что приводит к повышению твердости, прочности и ресурса пластичности. В то же время, при выборе схемы деформации следует принимать во внимание, что использование рассмотренных и других схем интенсивных деформаций сдвига сопряжены с риском потери устойчивости деформирования и, как следствие, формированием неоднородного поля плотности и остаточной деформации. Побочными следствиями этого может быть зарождение и развитие дефектов, приводящее к последующему разрушению заготовок при пластической деформации. Так, в работе [27] показано, что устойчивость деформирования обеспечивается только при определенных соотношениях между шаровой и девиаторной компонентами тензора напряжений. Оценка этого соотношения достаточно надежно может осуществляться в рамках известных численных методов (например распространенные версии МКЭ) теории пластичности пористых тел, включающих критерии зарождения и эволюции повреждаемости деформируемого материала.

Список литературы

1. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наук. Думка, 1982. -140 с.
2. Дорошкевич Е.А., Горохов В.М., Рябов И.Н., Звонарев Е.В. О нахождении оптимальной формы пористой заготовки при горячей штамповке // Порошковая металлургия. -1988. -№4. –С.11-15.

3. Кун Х.А. Основные принципы штамповки порошковых заготовок // Порошковая металлургия материалов специального назначения. – М.: Металлургия. –1977. –С.143-158.
4. Антес Х.В. Технология изготовления и свойства порошковых поковок // Там же. –С.159-197.
5. Штерн М.Б. Развитие теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. - № 9. - 1992. -С. 19 – 29
6. Павлов В.А., Носенко М.И. Исследование горячей деформации и уплотнения порошковых металлов // Порошковая металлургия. -1988. -№1. –С.1-6
7. Петросян Г.Л. Пластичность порошковых материалов в технологических процессах их уплотнения и формоизменения: Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Киев, 1983. – 36 с.
8. Дорофеев В.Ю. Структура и свойства порошкового материала, формируемого при горячей штамповке с элементами выдавливания // Порошковая металлургия. -1985. -№7. –С.23-27.
9. Мажарова Г.Е., Баглюк Г.А., Быков А.И., Позняк Л.А. Формование распыленных порошков быстрорежущих сталей в условиях сдвиговых деформаций // Порошковая металлургия. – 1986. - №10. – С.18-22.
10. Векшин Б.С., Капитанов Б.А., Лебедев В.Н. Гидромеханическое прессование сыпучих, не поддающихся компактированию материалов // Металлургия гранул. Вып.2. – М.: ВИЛС, 1984. –С.218-225.
11. Панфилов Ю.А., Рудь В.Д., Штерн М.Б. Влияние жесткости схемы нагружения на характер течения пористого материала при двухосных деформациях // Порошковая металлургия. – 1992. - №7. – С.14-17.
12. Павлов В.А., Носенко М.И. Исследование процессов горячей деформации пористых заготовок из порошков титана, меди, алюминия и их оптимизация // Порошковая металлургия. -1993. -№9-10. – С.23-28.
13. Баглюк Г.А., Юрчук В.Л. Расчет пластического течения пористого материала при штамповке в открытом штампе // Там же. – 1997. - № 7/8. – С.1-7.
14. Баглюк Г.А. Моделирование процесса деформации пористой заготовки в открытом штампе // Там же. – 1997. - № 9/10. – С.5-7.
15. Баглюк Г.А. Уплотнение пористого материала при горячей штамповке в закрытом штампе с компенсатором // Порошковая металлургия. – 1998. - № 5/6. – С.14-18.
16. Сердюк Г.Г. Пластическое деформирование порошковых изделий в незамкнутых объемах // Порошковая металлургия. - 1995. -№5/6. –С.25-31.
17. Павлов В.А., Носенко М.И. Влияние деформированного состояния на уплотнение порошковых металлов при горячей штамповке // Порошковая металлургия. -1992. -№2. –С.8-12.
18. Довыденков В.А., Довыденкова А.В., Клименко А.И. Изготовление деталей ответственного назначения из распыленных порошков сплавов на основе меди и алюминия с применением холодной пластической деформации // Металлургия гранул. Вып.2. – М.: ВИЛС, 1984. –С.393-397.
19. Kuhn H.A., Downey C.L. How Flow and Fracture Affect Design of Preforms for Powder Forging // The International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology. – 1974. –Vol.10, No.1. –P.59-66.
20. Баглюк Г.А. Сравнение энергосиловых параметров горячей штамповки пористых заготовок при различных схемах деформации // Порошковая металлургия.. – 1998. - №9/10. – С.12-15.
21. Павлов В.А., Ляшенко А.П., Анохин В.М. Исследование уплотнения порошкового титана в процессе горячей штамповки // Исследования в области горячего прессования в порошковой металлургии. - Новочеркасск, 1984. - С.61-67.
22. Дорофеев В.Ю. Структура и свойства порошкового материала, формируемого при горячей штамповке с элементами выдавливания // Порошковая металлургия. -1985. -№7. –С.23-27.
23. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука і техника, 1994. – 232 с.
24. Валиев Р.З. Получение наноструктурных материалов с уникальными свойствами // Тез. докладов II Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». ПРОСТ 2004. – Москва, МИСиС, 22 – 24 апреля 2004г. - С.23 -36.
25. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. –Донецк: ТЕАН, 2003г. – 84с.
26. Gleiter H. Nanocrystalline materials. – Progr. Mater. Sci., 1989, 33, p223 – 230.
27. Штерн М.Б., Дудунов В.Д. Определение ресурса пластичности порошковых материалов на основе модели пластического течения пористых тел. I. Критерий исчерпания ресурса пластичности //Порошковая металлургия. – 1999. – №11/12. – С.31-40.