

Систематизация процессов интенсивного пластического деформирования для формирования ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в объемных заготовках

Алтухов А.В.[†], Тарасов А.Ф., Периг А.В.

[†]astratsl@gmail.com

Донбасская государственная машиностроительная академия, ул. Шкадинова 72, 84313 Краматорск

Systemization of Severe Plastic Deformation processes for the production of ultrafine-grained and nanocrystalline structures within bulk workpieces

A.V. Altukhov, A.F. Tarasov, A.V. Perig

Donbass State Engineering Academy, Shkadinova St. 72, 84313 Kramatorsk, Ukraine

Выполнен анализ и систематизация современных методов и штамповой оснастки для процессов интенсивного пластического деформирования (ИПД). Установлено, что перспективными направлениями для дальнейшего совершенствования схем технологических процессов и оснастки являются: повышение выхода годного, снижение неравномерности распределения деформаций по объему заготовки, выбор схем процессов ИПД с учетом технологической пластичности материала для уменьшения удельных усилий при получении заготовок. При этом дальнейшее развитие расчетной базы должно основываться на совместном учете упруго-вязко-пластического характера течения с учетом фрагментации деформируемого материала.

Ключевые слова: ИПД, систематизация, ультрамелкозернистые, наноструктурные материалы.

Extensive analyses and systemization of contemporary techniques and die tooling for severe plastic deformation (SPD) processes have been carried out. It has been found that a high potential exists for improvements in material utilization ratio and decreases in strain nonuniformity within the workpiece volume through the modification of process schemes and die tooling and taking materials plasticity into account for punch pressure minimization. Further development of computational techniques should be focused on combined accounting of elastic viscous-plastic flow character by taking into account the fragmentation of the workpiece materials.

Keywords: SPD, systemization, ultrafine-grained, nanocrystalline materials.

1. Введение

За последние годы целый ряд новых материалов получил широкое распространение практически во всех областях народного хозяйства, причем наблюдается устойчивая тенденция к повышению требований по основным показателям качества изделий и заготовок из классических конструкционных материалов. Одним из перспективных направлений повышения качества конструкционных материалов: металлов, сплавов, порошковых материалов и высокомолекулярных соединений, является интенсивное пластическое деформирование (ИПД). Процессы ИПД относятся к современным и развивающимся методам обработки материалов давле-

нием, позволяющим обеспечивать формирование ультрамелкозернистых (УМЗ), субмикро- и нанокристаллических структур в объемных заготовках. В настоящее время методы ИПД находят широкое опытно-промышленное применение в заготовительном производстве машиностроительных и металлургических предприятий, а также в производстве высокомолекулярных полимерных материалов [1-5]. В процессах ИПД металлов, сплавов и композитов обеспечивается формирование УМЗ структур материалов с повышенными показателями усталостной прочности при сохранении высокой удельной прочности и технологической пластичности в области эксплуатационных температур для деталей авиационной техники, оборудования химической про-

мышленности, медицинских имплантатов и т.д. При ИПД полимерных материалов обеспечиваются существенные структурные изменения исходного материала, связанные с раздроблением ламеллярной структуры, разрушением сферолитов и их трансформаций в пакеты кристаллических ламелей, что обеспечивает повышение всего комплекса механических свойств заготовок, среди которых повышение ударной прочности, квазистатической трещиностойкости при сохранении оптической прозрачности аморфно-кристаллических и аморфных полимеров, а также полимерных композитов.

В тоже время существующие методы ИПД характеризуются рядом конструктивно-технологических недостатков, ограничивающих возможности их широкого промышленного применения, среди которых следует отметить прерывность деформирования, высокие неравномерности распределений деформаций и механических напряжений по сечению и длине заготовок, значительные неоднородности структуры деформируемого материала, большие макроскопические ротации и углы поворота главных осей течения материала и, как результат, низкий коэффициент использования материала, неравномерность проработки и анизотропия свойств деформированных заготовок [6-10].

Все вышеизложенное показывает необходимость дальнейшего совершенствования существующих и разработки новых схем ИПД, конструктивно-технологические особенности которых исключают некоторые из указанных недостатков. Кроме того, дальнейшее усложнение технологических схем ИПД требует развития соответствующих расчетных подходов к описанию основных особенностей пластического течения материалов, учитывающих отсутствие единой кривой [4-10].

В качестве метода исследований принят комплексный системный анализ существующих схем ИПД, позволяющий систематизировать весь спектр решений и выделить ключевые конструктивно-технологические параметры процесса деформирования и штамповой оснастки, оптимизация которых дает возможность рационального управления основными параметрами качества получаемых изделий.

2. Технологические особенности базовых процессов ИПД

Сравнительно давно, благодаря работам зарубежных и отечественных исследователей, получен математический аппарат и выработаны методы (схемы) деформирования относительно тонких профилей. Такие технологические процессы реализуются прокаткой или волочением. В дальнейшем исследователи столкнулись с проблемой получения наноструктурного состояния в объемных заготовках [2,4,8,11].

Получение УМЗ и наноструктур с помощью методов интенсивной пластической деформации относится к одному из способов получения наноструктурных материалов [2]. В частности, методами кручения под давлением получают наиболее мелкозернистую структуру – 100-300 нм для заготовок из меди и никеля [3,4]. Использование равноканального углового прессования (РКУП) по-

зволяет достичь аналогичных размеров зерна в заготовках из меди [12-20]. В качестве исходных материалов для ИПД используют две группы [3,4]: металлы и их сплавы; порошковые металлические и керамические материалы. При этом использование порошковых материалов позволяет получить более мелкозернистую структуру заготовки 100-150 нм, близкую к наноструктурам.

Базовыми процессами ИПД являются: кручение под высоким давлением, РКУП, всесторонняя изотермическая ковка, винтовая экструзия и др. [3-4,6-7,9-10]. Приведенные методы ИПД находят применение в области машиностроения, но они имеют технологические недостатки и ограничения, а в ряде случаев их применение невозможно по различным причинам. Кручение под высоким давлением позволяет получать только детали небольших размеров круглой формы (типа дисков) из многих материалов, при этом исследователи выделяют низкую стойкость инструмента вследствие чрезвычайно высоких нагрузок [5,20]. Угловое прессование дает возможность получать детали из различных материалов вытянутой формы с прямоугольным или квадратным сечением при использовании относительно простой конструкции штамповой оснастки, однако возникают сложности с установкой и извлечением заготовки. Кроме этого происходит изменение формы торцевой зоны заготовки, обусловленное особенностью деформационного процесса, что затрудняет повторное деформирование для накопления необходимой степени деформации без промежуточной механической обработки. Всесторонняя изотермическая ковка применяется для получения большой степени деформации в заготовках цилиндрической или прямоугольной формы из различных материалов в условиях деформирования нагретой заготовки в замкнутом пространстве штампа со сменой оси нагружения на каждом переходе. Одновременно производится поэтапное снижение температуры, что обеспечивает накопление деформации и измельчение размера зерна, однако при этом возникают зональные неоднородности структуры заготовки, а также требуется многократная обработка [12-20]. Винтовая экструзия выполняется в каналах прямоугольной формы, при этом средняя часть сечения канала образована вращением поперечного сечения канала относительно его продольной оси, обеспечивая поворот каждого сечения заготовки при прохождении через канал, что схоже с кручением под большим давлением, но дает возможность обрабатывать заготовки больших размеров. Ограничением в данном случае является длина обрабатываемой заготовки [21].

3. Классификация процессов ИПД по схеме и энергосиловым параметрам деформирования

Для поиска новых технологических схем необходим анализ особенностей существующих методов и выявление их фактического влияния на процессы ИПД.

Развитие методов ИПД идет в следующих направлениях: получение равномерной структуры и уменьшение размера зерна; повышение коэффициента выхода годного за счет равномерной обработки объема заготовки;

упрощение технологических процессов и оборудования; расширение спектра используемых материалов.

Дополнительная систематизация процессов ИПД по всему спектру конструктивно-технологических параметров позволит находить наиболее рациональные схемы деформирования в каждом отдельном случае. В работе проанализированы существующие и перспективные процессы ИПД, выделены факторы, влияющие на процесс деформирования. Результаты проведенного анализа представлены на рис. 1-2. Все факторы можно разделить на следующие группы:

1. Вид и исходное состояние деформируемого материала. Большинство исследователей [22,23] для экспериментов используют заготовки из стали и цветных металлов в виде слитков [23] или проката [24]. По изменению формы от исходной заготовки до конечной детали можно выделить процессы, в которых они совпадают [22] и отличаются [24].

2. Технологическое назначение процессов ИПД, которые направлены: на фрагментацию структуры материала (повышение пластичности), упрочнение (с сохранением пластичности).

3. Прерывность процесса деформирования, которая определяется характером движения инструмента: возвратно-поступательное используется в работах [22-26], вращательное и комбинированные процессы (одновременно вращательное и возвратно-поступательное) [22,28].

4. Характер нагружения: квазистатический или динамический. Рассмотрев характер нагружения в процессах ИПД можно выделить схемы с различной скоростью деформирования: от статического нагружения [22,23,25], до квазистатического [24], а также деформирование ударными нагрузками и взрывом [27].

5. Направление течения металла при деформировании. В процессах ИПД наблюдается большое многообразие схем с разным направлением течения металла при деформировании, например, схемы в которых угол 2θ

пересечения каналов штампа составляет 90° [22], а также больше 90° [28] или меньше 90° , течение в две стороны (Т-экструзия), обратное. В нескольких схемах РКУП применяется многоугольное течение на плоскости [28] и в пространстве.

6. Форма сечения канала: может быть постоянной и переменной по длине канала (сужение или расширение канала) и по его поперечному сечению, например переход от квадратного к круглому сечению или наоборот. Часто в процессах ИПД используют изменение формы (площади) сечения по длине или ширине канала [22], кроме этого форма сечения может быть неизменной [23-28].

7. Трение, которое возникает между заготовкой и инструментом может быть разделено на реактивное (деформирование с неподвижной матрицей) [22-28], процессы в которых трение меняется по длине канала деформирования [22] и активное, которое включает различные схемы с подвижными частями матрицы или инструмента.

8. Температурный режим: предусматривает холодное и горячее деформирование и их варианты, например снижение температуры в процессе последовательных этапов формоизменения или деформирование в изотермических условиях [24-26]. В некоторых схемах используют промежуточную термическую обработку [23].

9. Наличие дополнительных процессов деформирования, которые обеспечивают совмещение процесса ИПД с другими операциями формоизменения заготовки, например РКУП с выдавливанием (симметричное и асимметричное), выдавливание с кручением и подпором [23], деформирование с вращением очага деформации и различные схемы подпора заготовки, выдавливание через сужающийся канал с нанесением на его поверхность винтовой линии [22], двухугольное выдавливание с промежуточным кручением.

10. Охват очагом деформации объема заготовки – процесс деформирования можно охарактеризовать сте-

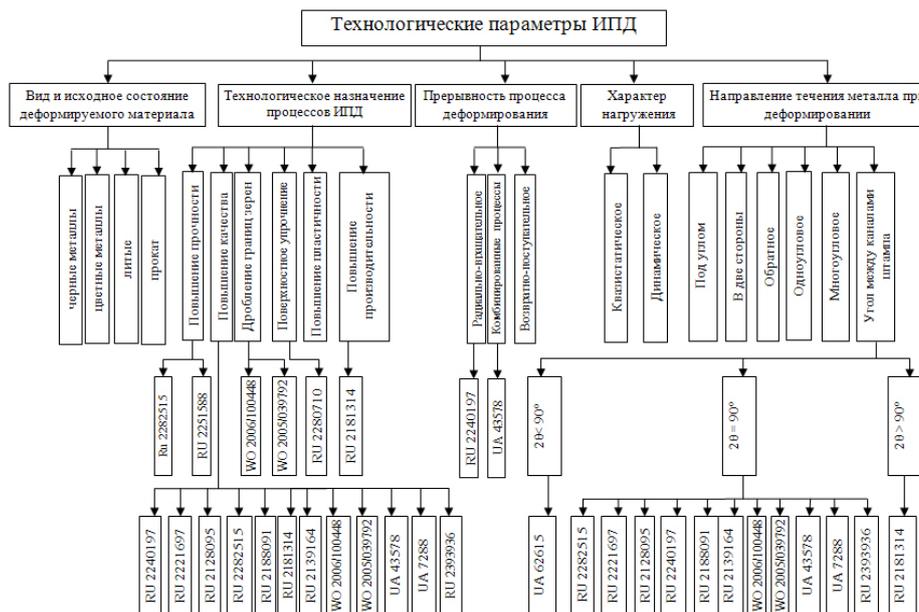


Рис. 1. Классификация процессов ИПД по назначению, особенностям процесса и кинематическим признакам.

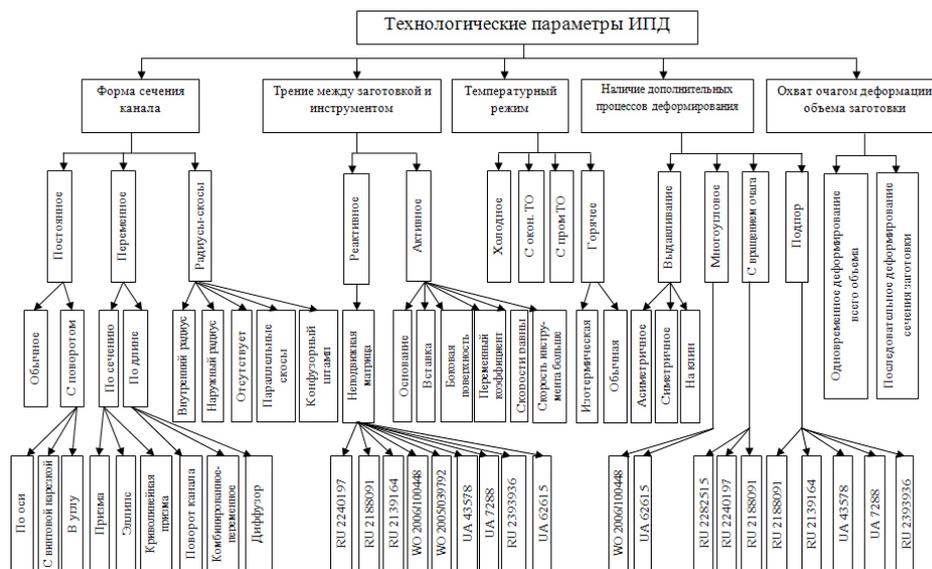


Рис. 2. Классификация процессов ИПД по энергосиловым признакам.

пению охвата очагом деформации объема заготовки, при котором можно разделить методы ИПД на две группы. К первой группе относятся методы, в которых заготовка по всей длине и всему объему одновременно подвержена деформированию [25,26], в эту группу входят – всесторонняя изотермическая ковка и кручение под давлением. Ко второй группе относятся схемы, где очаг деформирования последовательно проходит вдоль одной из осей заготовки [22-24], к этой группе относятся – РКУП и винтовая экструзия. Охват всего объема заготовки очагом деформации влияет на равномерность напряженного состояния по объему и служит основой для получения заготовок с одинаковыми механическими свойствами в разных сечениях и повышения коэффициента использования металла. Следует отметить, что созданию равномерного по объему напряженно- деформированного состояния при реализации этих процессов мешает трение.

Учитывая сложность рассмотренных схем деформирования, следует отметить большую математическую сложность и принципиальную некорректность описания динамики пластического течения основных конструкционных материалов в процессах ИПД с использованием классических методов инженерной теории пластичности, таких как методы верхней оценки и полей линий скольжения. Дополнительные расчетные сложности при использовании классических методов инженерной теории пластичности к анализу течения материалов при ИПД обусловлены геометрической сложностью промышленных штампов. Так, в работе [16] используется метод линий скольжения, причем анализируется течение материала через штамп с внешним закруглением, что вызывает ряд расчетных сложностей, обусловленных нарушением условия линейности задачи, на котором основаны существующие способы построения линий скольжения. Как результат, в работе [16] для закругленного штампа строится кинематически допустимое поле линий скольжения, которое оказывается статически недопустимым из-за нарушения граничного

условия по трению в верхней точке симметричного вее-ра. Кроме того, современные гипотезы о существовании аналогии между пластическим течением поликристаллов при ИПД и турбулентным течением жидкостей [29] не в полной мере согласуются с классической теорией пластичности.

Основные геометрические особенности пластического течения деформируемых материалов в процессах ИПД можно проанализировать с использованием таких геометрических методов, как метод маркеров [30] либо метод исходных кольцевых сеток [31], причём для возможного описания течения деформируемых материалов с эффектами вязкости в первом приближении представляется перспективным развитие математических подходов, связанных с решением краевых задач для уравнений Навье-Стокса [30,32]. При этом применение уравнений Навье-Стокса в формах уравнений переноса импульса [30] и переноса вихря [32] не учитывает переменной вязкости в каждой точке материала заготовок при вязких, вязко-пластических, вязко-упругих и упруго-вязко-пластических течениях деформируемых сред, а также кинетики деформирования и особенностей структурообразования металлов и высокомолекулярных соединений в процессах ИПД в рамках классических методов феноменологической механики сплошных сред и математического анализа непрерывных процессов [33-36]. Целесообразность применения методов современной дискретной математики и нейросетевых технологий к моделированию процессов ИПД высокомолекулярных соединений также обусловлена сложностью структурообразования полимеров, поскольку при их деформировании имеет место непрерывное динамическое перераспределение процентного соотношения между аморфной и кристаллитной фазами обрабатываемого материала [34,37-39].

Отмеченные факты указывают на необходимость дальнейшего развития математических подходов, обеспечивающих корректное феноменологическое и мезоме-

ханическое описание течения основных конструкционных материалов в технологических процессах ИПД.

4. Выводы

1. Таким образом, на основе анализа существующих и перспективных методов ИПД выделены факторы и выполнена систематизация процессов и конструктивных решений, оказывающих влияние на технологические особенности деформирования объемных заготовок. Это необходимо при выборе наиболее подходящих схем процессов ИПД с учетом технологической пластичности материала для уменьшения удельных усилий при получении заготовок.

2. Проведенный анализ выявил необходимость в совершенствовании технологических решений, обеспечивающих получение гомогенных субмикроструктур с равномерным распределением деформаций по всему объему заготовки, что приводит к повышению коэффициента использования материала. Перспективными направлениями для дальнейшего совершенствования процессов ИПД являются конструктивное упрощение технологических схем и оснастки с одновременным управлением трением при сохранении показателей качества деформируемых заготовок, а также реализация контроля механических свойств по объему заготовок и повышение выхода годного обрабатываемого материала.

3. Дальнейшее совершенствование расчетной базы для моделирования технологических процессов ИПД требует развития количественных подходов к учету упруго-вязко-пластического течения с учетом фрагментации материалов заготовок, технологических маршрутов обработки, истории многопроходного деформирования и переменности механико-реологических свойств по длине и по сечению заготовок из реальных деформируемых материалов.

Литература

1. M.V. Markushev. Letters on Materials **1**(1), 36 (2011) (in Russian) [М.В. Маркушев. Письма о материалах **1**(1), 36 (2011)].
2. G.L. Kovtun, A.L. Verevkin. Nanomaterials: Materials Science and Technology: An Overview. – Kharkov: NSC KIPT, 2010. – 73 p. (in Russian) [Г.Л. Ковтун, А.Л. Веревкин. Наноматериалы: технологии и материаловедение: Обзор. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. - 73 с.].
3. Nanomaterials, nanocoatings, nanotechnology: Textbook/ Azarenkov N.A., Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Malikov L.V., Turbin P.V. – Kharkov: KNU named after V.N. Karamzin, 2009. – 209 p. (in Russian) [Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: Учебное пособие/ Азаренков Н.А., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Маликов Л.В., Турбин П.В. – Х.: ХНУ имени В.Н. Карамзина, 2009. – 209 с.].
4. Nanostructured materials: Textbook. / R. A. Andrievsky, A.V. Ragulya. – Moscow: Publishing center “Academy”, 2005. – 192 P. (in Russian) [Наноструктурные материалы: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведе-
- ний/ Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Изд. Центр «Академия», 2005. – 192 с.].
5. R.A. Andrievsky. Russ. Chem. J. **46**(5), 50 (2002) [Р.А. Андриевский. Рос. хим. ж. XLVI(5), 50 (2002)].
6. R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov. Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation. – Moscow: Logos Pub., 2000. – 272 p. (in Russian) [Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.].
7. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Prog. Mater. Sci. **45**, 103 (2000).
8. V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskii, V.I. Kopylov. Izv. AN SSSR. Metallurgy (Russian Metallurgy). **1**, 115 (1981) (in Russian) [В.М. Сегал, В.И. Резников, А.Е. Дробышевский, В.И. Копылов. Известия АН СССР. Металлы. **1**, 115 (1981)].
9. R.Z. Valiev. High Pressure Physics and Technics **16**(4), 9 (2006).
10. O.A. Kaibyshev Superplasticity, Structure Refinement and Treatment of Hard-to-Deform Alloys / O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyachev. – Moscow: Nauka, 2002. – 438 p. (in Russian) [О.А. Кайбышев. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов/ О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев; отв. ред. О.А. Банных. – М.: Наука, 2002. – 438 с.].
11. R.Z. Valiev. High Pressure Physics and Technics. **18**(4), 12 (2008) (in Russian) [Р.З. Валиев. Физика и техника высоких давлений. **18**(4), 12 (2008)].
12. V.M. Segal. Mater. Sci. Eng. **A476**, 178 (2008).
13. R.Z. Valiev, T.G. Langdon. Prog. Mater. Sci. **51**(7), 881 (2006).
14. A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen et al. CIRP Ann.-Manuf. Techn. **57**(2), 716 (2008).
15. M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. J. Mater. Sci. **36**, 2835 (2001).
16. V.M. Segal. Mater. Sci. Eng. **A271**, 322 (1999).
17. V.M. Segal. Mater. Sci. Eng. **A345**, 36 (2003).
18. V.M. Segal. Mater. Sci. Eng. **A386**, 269 (2004).
19. S. Ferrasse, V.M. Segal, F. Alford et al. Mater. Sci. Eng. **A493**, 130 (2008).
20. J.-P. Mathieu, S. Suwas, A. Eberhardt et al. J. Mater. Process. Tech. **173**(1), 29 (2006).
21. Beygelzimer Y. Twist Extrusion - a Process for Accumulating Deformations/ Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, D. Orlov, S. Sinkov. – Donetsk: TEAN, 2003. – 87 p. (in Russian) [Винтовая экструзия - процесс накопления деформаций / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков. - Донецк: ТЕАН, 2003. - 87 с.].
22. Patent of Russian Federation RU 2240197 /Method for combination type intensified plastic deformation of blanks/ R.Z. Valiev, Kh.Sh. Salimgareev, G.I. Raab, N. A. Krasilnikov, N.M. Amirkhanov (in Russian) [Патент 2240197 РФ С2 МПК В21J5/00 / Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовок/ Р.З. Валиев, Х.Ш. Салимгареев, Г.И. Рааб, Н.А. Красильников, Н.М. Амирханов. - № 2002123183/02; Заявл. 22.07.2003; Опубл. 20.11.2004. Бюл. № 23].
23. Patent of Russian Federation RU 2282515 / Apparatus for

- plastic deforming of materials/ A.F. Ivanov, R.Z. Valiev, G.I. Raab, E. S. Lukin (in Russian) [Патент 2282515 РФ С2 МПК В21С25/00 / Устройство для обработки металлов давлением/ А.М. Иванов, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, Е.С. Лукин. - № 2004125214/02; Заявл. 17.08.2004; Оpubл. 27.08.2006. Бюл. № 24].
24. Patent of Russian Federation RU 2237109/ Method for producing of ultra fine-grained titanium blanks/ R.Z. Valiev, Kh.Sh. Salimgareev, V.V. Stoljarov, Y.E. Beygelzimer, D.V. Orlov, S.G. Synkov, A.V. Reshetov (in Russian) [Патент 2237109 РФ С2 МПК С1С22F1/18 / Способ получения ультрамелкозернистых титановых заготовок/ Р.З. Валиев, Х.Ш. Салимгареев, В.В. Столяров, Я.Е. Бейгельзимер, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков, А.В. Решетов. - № 2003113094/02; Заявл. 05.05.2003; Оpubл. 27.09.2004. Бюл. № 21].
 25. Patent of Russian Federation RU 2306997 / Apparatus for upsetting blank at shearing it/ A.D. Khvan, D. V. Khvan, M.A. Dikarev, A.A. Gorjachev, S.I. Bakhmatov, O.A. Sokolova, A.V. Popov (in Russian) [Патент 2306997 РФ С2 МПК В21J5/06 / Устройство для осадки со сдвигом заготовки/ А.Д. Хван, Д.В. Хван, М.А. Дикарев, А.А. Горячев, С.И. Бахматов, О.А. Соколова, А.В. Попов. - № 2006107344; Заявл. 09.03.2006; Оpubл. 27.09.2007. Бюл. № 27].
 26. Patent of Russian Federation RU 2393936 / Method of producing ultra-fine-grain billets from metals and alloys / V.A. Shundalov, V.Ju. Ivanov, V.V. Latysh, I.N. Mikhajlov, S.P. Pavlinich, A.V. Sharafutdinov (in Russian) [Патент 2393936 РФ С22F1/18 МПК В21J5/06/ Способ получения ультрамелкозернистых заготовок из металлов и сплавов/ В.А. Шундалов, В.Ю. Иванов, В.В. Латыш, И.Н. Михайлов, С.П. Павлинич, А.В. Шарафутдинов. - № 2009110937/02; Заявл. 25.03.2010; Оpubл. 10.07.2010. Бюл. №54].
 27. Patent of Russian Federation RU 2283717 / Method for dynamic deforming of metals/ E.V. Shorokhov, I.N. Zhgilev, R.Z. Valiev (in Russian) [Патент 2283717 РФ С2 МПК В21J5/04 / Способ динамической обработки материалов/ Е.В. Шорохов, И.Н. Жгилев, Р.З. Валиев. - № 2004131484/02; Заявл. 28.10.2004; Оpubл. 20.09.2006. Бюл. №26].
 28. Patent of Ukraine UA 77493/ Device for equal-channel multi-angle pressing of long billets/ V.N. Varykhin, N.I. Matrosoy, E.A. Medvedskaya, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Chishko (in Ukrainian) [Патент 77493 України С22 МПК В21С1/00 / Устройство равноканального многоугольного прессования длиномерных заготовок/ В.Н. Варюхин, Н.И. Матросов, Э.А. Медведская, В.З. Спусканюк, В.В. Чишко. - № 20040807013, Заявл. 21.04.2004; Оpubл. 15.12.2006. Бюл. №8].
 29. Ya.E. Beygelzimer. High Pressure Physics and Technics **18**(4), 77 (2008) (in Russian) [Я.Е. Бейгельзимер. Физика и техника высоких давлений. **18**(4), 77 (2008)].
 30. A.V. Perig, A.M. Laptev, N.N. Golodenko, A.Yu. Loshmanov, M.G. Litvinov. Processing materials by pressure. **1**(20), 57 (2009) (in Russian) [А.В. Периг, А.М. Лаптев, Н.Н. Голоденко, А.Ю. Лошманов, М.Г. Литвинов. Обработка материалов давлением: Тематич. сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА. **1**(20), 57 (2009)].
 31. A.V. Perig, A.M. Laptev, A.V. Tyshkevich, E.A. Bondarenko, S.V. Podlesny. Press-forging production. Processing materials by pressure. **2**, 14 (2010) (in Russian) [А.В. Периг, А.М. Лаптев, А.В. Тышкевич, Е.А. Бондаренко, С.В. Подлесный. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением **2**, 14 (2010)].
 32. A.V. Perig, A.M. Laptev, N.N. Golodenko, Yu.A. Erfort, E.A. Bondarenko. Mater. Sci. Eng. **A527**, 3769 (2010).
 33. Beloshenko V. A. Theory and Practice of Hydroextrusion/ V.A. Beloshenko, V.N. Varyukhin, V.Z. Spuskanyuk. – Kiev: Naukova Dumka. – 2007. – 246 p. (in Russian) [Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии/ В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк; НАН Украины, ДонФТИ им А. А. Галкина. – К: Наукова думка, 2007. – 246 с. – Библиогр.: с. 226-244].
 34. V.A. Beloshenko. Polymer solid state extrusion/ V.A. Beloshenko, Y.E. Beygelzimer, V.N. Varyukhin. – Kiev: Naukova Dumka. – 2008. – 207 p. (in Russian) [Белошенко В.А. Твердофазная экструзия полимеров/ В.А. Белошенко, Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин; НАН Украины, ДонФТИ им А.А. Галкина. – К: Наукова думка, 2008. – 207 с.]
 35. D.S. Svyetlichnyy. Comp. Mater. Sci. **50**, 92 (2010).
 36. D.S. Svyetlichnyy. Mater. Sci. Forum **638-642**, 2772 (2010).
 37. P.G. de Gennes. Scaling concepts in polymer physics. Ithaca & London: Cornell university press, 1979. – 319 p. [П. де Жен. Идеи скейлинга в физике полимеров. М.: Мир, 1982. – 368 с.].
 38. B. Aour, F. Zaïri, R. Boulahia, M. Naït-Abdelaziz, J.M. Gloaguen, J.M. Lefebvre. Comp. Mater. Sci. Proceedings of the IWCMM-17. **45**(3), 646 (2009).
 39. E. Ghorbel. Int. J. Plasticity **24**(11), 2032 (2008).