

УДК 621.7 : 620:18

Тарасов А. Ф.
Алтухов А. В.
Даниленко Н. И.
Рудык Н. Д.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕВЕРСИВНОГО СДВИГА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕМНЫХ ЗАГОТОВОК

Развитие процессов интенсивного пластического деформирования объемных заготовок (ИПД) проходило в несколько этапов, связанных с изучением экспериментальных схем деформирования и развития промышленных технологий [1]. Известные процессы ИПД позволяют получать заготовки с улучшенными физико-механическими свойствами [2], но возможности этих процессов не всегда соответствуют требованиям качества материала по всему объему, кроме этого испытывают сложности с долговечностью технологической оснастки и не позволяют обрабатывать черные металлы, а в ряде случаев требуют дорогостоящее оборудование [3, 4]. Необходимы новые процессы с меньшими ограничениями технологических возможностей.

Целью работы является разработка схем ИПД на основе реверсивного объемного сдвига заготовок (РС), при котором весь объем заготовки деформируется одновременно и одинаково в каждой плоскости поперечного сечения.

Первые высокодеформированные состояния были получены П. Бриджменом при одновременном сжатии и кручении (рис. 1, а) [5]. В работе [6] для получения однородной деформации во всем объеме по такой схеме обрабатывали тонкие образцы.

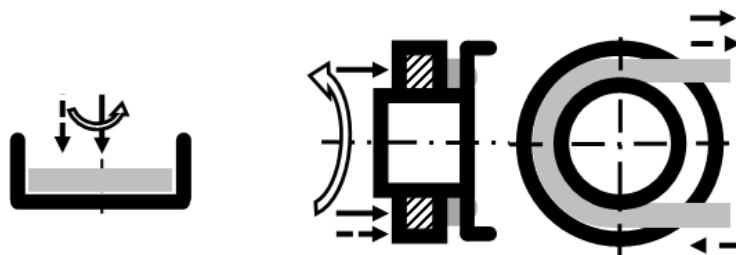


Рис. 1. Схемы процесса кручения под высоким давлением (НРТ):

а – базовая схема; б – для заготовок большой длины; \leftarrow – направление деформирующего усилия; $\leftarrow - -$ – направление скорости течения металла; \curvearrowright – направление вращения инструмента

Эти эксперименты показали технологические возможности и перспективы развития процессов ИПД [4]. Развитие этого метода деформирования осуществлялось в нескольких направлениях [7] для заготовок различных типов: объемные заготовки [8], осесимметричные листовые детали [9], длинномерные листовые детали (рис. 1, б) [10] и полосы [11]. Это позволило разработать полупромышленные и промышленные технологии получения изделий из субмикроструктурной структурой для ряда цветных металлов и сплавов. Ограничением для такой технологии является соотношение размеров поперечного сечения (толщина заготовки). Недостатком этого способа является также различие линейных скоростей на поверхности вращающегося инструмента, что создает различные условия деформирования по радиусу заготовки.

Сдвиговые деформации при использовании данного метода обеспечиваются за счет силы трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки, несмотря на вид движения инструмента (поступательное, вращательное). Особенностью деформирования длинномерных заготовок является перемещение очага деформации по длине заготовки в процессе обработки.

Следующий этап развития методов ИПД связан с появлением схем равноканального углового прессования (РКУП) [12] и винтовой экструзии (ВЭ) [13]. В первом случае (рис. 2, а) в плоскости пересечения каналов создается схема простого сдвига, в результате которого за ряд проходов для накопления деформации образуется структура металла, характеризующаяся наличием высокоугловых границ между субзернами и субмикроструктурой [14].

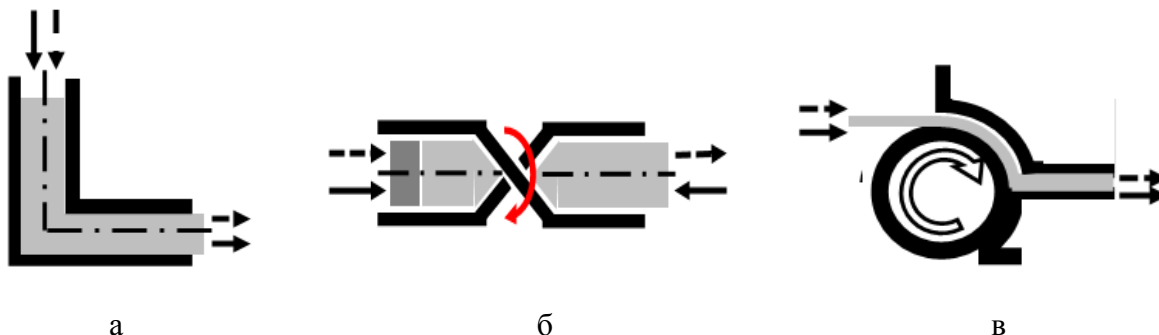


Рис. 2. Схемы процессов:

а – равноканального углового прессования (ЕСАЕ); б – винтовой экструзии (ВЭ); в – Conform процесса на основе РКУП

Вторым направлением совершенствования процесса ИПД, характеризующимся существенными сдвиговыми деформациями является винтовая экструзия [15]. Процесс характеризуется существенными сдвиговыми деформациями в поперечном сечении заготовки, которые создаются за счет ее скручивания на входе в винтовой канал с последующим спрямлением винтовой части и восстановлением исходной формы заготовки. При ВЭ (рис. 2, б) сдвиговые деформации в поперечном сечении заготовки создаются за счет скручивания заготовки на входе в винтовой канал с последующим спрямлением винтовой части и восстановлением исходной формы [16], может быть реализована и схема ВЭ [17].

Промышленное распространение получил комбинированный процесс РКУП с использованием вращательного движения вала для подачи длинномерной заготовки в очаг деформации (рис. 2, в) [18] и его разновидности [19].

Комбинирование процесса ИПД с прессованием или другими процессами обработки давлением позволяет на первом этапе изменить структуру металла, а затем получить требуемую форму изделия, чтобы расширить номенклатуру продукции [20].

Разновидностью метода ВЭ является способ скручивания (сдвига) поперечного сечения заготовки за счет вращения части матрицы, что эффективно для уплотнения порошковых материалов [21].

В обоих методах очаг деформации перемещается по длине заготовки независимо от ее размеров, что, в принципе, делает данные схемы пригодными для обработки длинномерных заготовок.

Разновидностью метода винтовой экструзии с изменением площади поперечного сечения заготовки является прессование через матрицу, на конической части которой имеются винтовые канавки различного профиля, обеспечивающие вращательное движение металла при прессовании [22].

Ограничением данной группы методов для получения объемных заготовок с субмикроструктурой является площадь поперечного сечения заготовок [22]. Кроме того, эти методы получили распространение в основном для цветных металлов и малолегированных сплавов, поскольку нагрузки на инструмент в процессе обработки близки к предельно допустимым для известных на сегодня материалов. Высокие удельные нагрузки возникают вследствие создания высоких гидростатических давлений для повышения пластичности материалов, а также трения на поверхности инструмента. При этом возможности снижения трения, создания режима активного трения ограничены конструктивными особенностями оснастки и технологическими возможностями оборудования [23].

Наиболее близкими к обычным процессам ОМД являются схемы объемного деформирования заготовок с использованием операций осадки в условиях плоского деформированного состояния [24], высадки в различных направлениях [25] (рис. 3).



Рис. 3. Схемы процессов ABC –ковки (MAF и CCDF соответственно)

Достоинством процесса является одновременная деформация всего объема заготовки, возможность комбинировать различные операции на последующих последовательных этапах деформирования [26]. Кроме того, в этом случае проще регулировать уровень гидростатического давления в деформируемой заготовке, что снижает удельные нагрузки на инструмент и обеспечивает возможность деформирования черных металлов и сплавов [27].

Сложностью в реализации данной технологии является подбор такой последовательности операций, которая обеспечивает равномерность свойств по объему заготовки [28].

Перспективными для реализации являются схемы реверсивного объемного сдвига заготовок (РС) [29]. Суть способа в создании одинаковой плоской схемы деформирования по длине заготовки с последовательным изменением углов в плоскости поперечного сечения заготовки от острых к тупым и наоборот (рис. 4 а, б). Для наглядного представления о характере деформирования приведены результаты для образцов из пластилина (рис. 4, с, д) на нечетных и четных этапах нагружения соответственно.

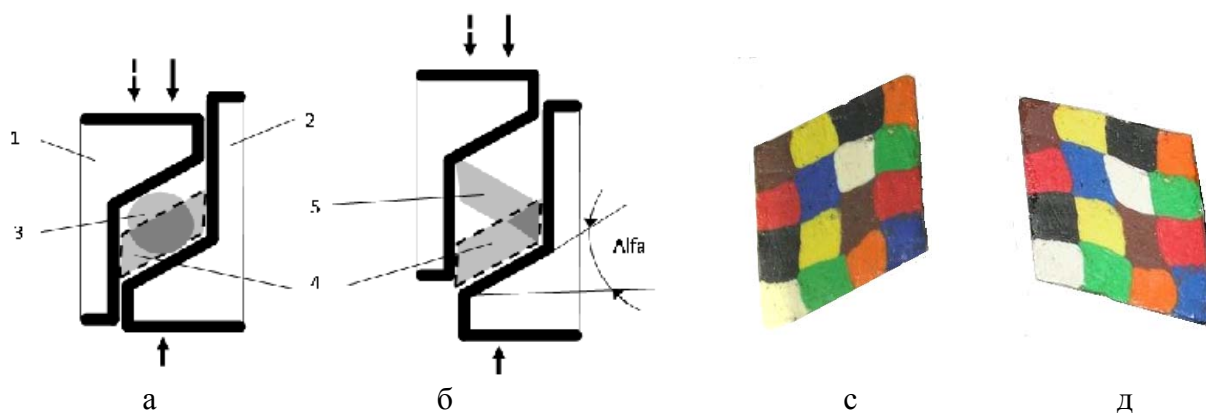


Рис. 4. Базовая схема процесса реверсивного сдвига [30]:

а, б – первый и второй переходы; с, д – вид деформированной сетки

Ограничением на применение метода является пластичность материала заготовки. Управление гидростатическим давлением заготовки возможно путем выбора соотношения поперечных размеров сечения заготовки и угла сдвига Alfa . Обеспечение равномерности свойств по сечению, а, следовательно, и в объеме заготовки, осуществляется путем ее поворота в пространстве между этапами деформирования, а также выбора технологической последовательности операций.

Возможно и комбинированное применение РС с другими методами ИПД и обычными методами ОМД для расширения номенклатуры изделий.

Экспериментальные исследования технологии РС проводили на образцах из меди М1. Образцы деформировали 4 раза при комнатной температуре на гидравлическом прессе с номинальным усилием 500 кН. Усилие деформирования фиксировалось по манометру, установленному на пресс и составило 320 кН для первой операции и 350–370 кН для последующих операций.

Использовали пуансоны с углами наклона деформирующей поверхности $\text{Alfa} = 25^\circ$ и 30° (рис. 5, а). После каждой операции заготовку извлекали из инструмента, выполняли измерение размеров, на приборе ПМТ-3 микротвердости, снимали данные координатной сетки и устанавливали заготовку в штамп с поворотом в пространстве в соответствии со схемой (рис. 4, а, б) для последующей операции. Перед выполнением деформирования на рабочие поверхности пуансонов наносили смазку на основе графита. Использование смазки позволило улучшить заполнение углов штамповой оснастки и уменьшить дефекты на поверхности заготовки (рис. 5, б).

Накопленная степень деформации, определенная по методике Ренне И. П., в центре заготовки в результате деформирования составила 2–2,5 для $\text{Alfa} = 25^\circ$. При последующем деформировании без изменения схемы нагружения заготовки наблюдалось разрушение образцов в центральной части.

РС существенно расширяет технологические возможности ИПД, так как при равных удельных усилиях на пуансоны исключается проблема обеспечения их устойчивости по сравнению с РКУП и ВЭ. Поскольку деформирование осуществляется вдоль продольной оси заготовки длина заготовки может быть существенно увеличена.

Для получения заготовки из меди в виде пластины проведена последующая обработка на прокатном стане при комнатной температуре. В результате 3-х операций прокатки получена пластина толщиной 4 мм (рис. 5, в). Дополнительная степень деформации по высоте составила 75 %.



Рис. 5. Инструмент для деформирования заготовки методом реверсивного сдвига (а) и заготовки после деформирования (б) и прокатки (в)

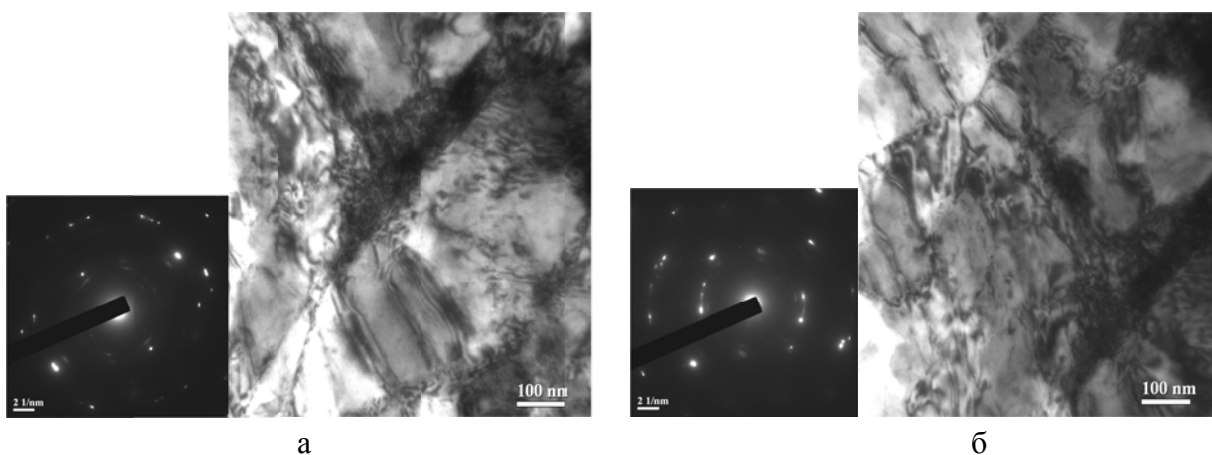


Рис. 6. Микроструктура образцов М1, обработанных по схеме реверсивного сдвига

Микроструктура полученных образцов приведена на рис. 6. Фольги были вырезаны из центра (рис. 6, а) и угла (рис. 6, б) заготовки. В процессе деформации в материале сформировалась ячеистая структура с размером ячеек 300–500 нм (рис. 6, а, б).

ВЫВОДЫ

1. Предложенная схема РС позволяет регулировать объем очага деформации, уровень гидростатического давления в заготовке при деформировании за счет выбора геометрии заготовки и инструмента, что позволяет также регулировать удельные нагрузки на пуансоны при реализации ИПД. В отличие от РКУП и ВЭ исключается проблема обеспечения устойчивости пуансонов. В целом, схема РС создает принципиальную возможность обрабатывать черные металлы и сплавы.

2. Таким образом, предложенные схемы реверсивного сдвига могут быть перспективными для деформирования черных металлов при условии контроля степени использования ресурса пластичности.

3. Для расширения номенклатуры изделий могут применяться комбинированные схемы деформирования с применением обычных методов ОМД в условиях, при которых не происходят рекристаллизационные процессы в обрабатываемом материале.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З. *Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства* / Р. З. Валиев, И. В. Александров – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Estrin Y. *Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science* / Y. Estrin, A. Vinogradov // *Acta Materialia*, 2013. – Vol. 61. – P. 782–817.
3. *Severe plastic deformation (SPD) processes for metals* / A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen [et al.] // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008. – Vol. 57. – N 2. – P. 716–735.
4. Маркушев М. В. *К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов* / М. В. Маркушев // *Письма о материалах т.1*, 2011. – С. 36–42.
5. Bridgman P. W. *Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure* / P. W. Bridgman – *Phys. Rev.* 48, Issue 10, 1935. – P. 825–844.
6. *On the relation between the microstructure and the mechanical behavior of pure Zn processed by high pressure torsion* / B. Srinivasarao, A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, M. T. Pe'rez-Prado, *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 562. – P. 196–202.
7. *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation* / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, *Progress in Materials Science*, 2000. – Vol. 45. – P. 103–189.
8. Michael Zehetbauer; Roland Grössinger; Heinz Krenn; Maciej Krystian; Reinhard Pippan; Peter Rogl; Thomas Waitz; Roland Würschum *Bulk Nanostructured Functional Materials By Severe Plastic Deformation* / *Advanced Engineering Materials*, 2010. – Vol 12 (8). – P. 692–700.
9. *Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes* / Ghader Faraji, Alireza Babaei, Mahmoud Mosavi Mashhadi, Karen Abrinia. *Materials Letters*, 2012. – Vol. 77. – P. 82–85.
10. *A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime* / G. Angella, B. Esfandiar Jahromi, M. Vedani, *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 559. – P. 742–750.
11. *Generation and suppression of local severe plastic deformation in sectional multi-point forming* / Wei Liu, Shu-Sheng Jia, Chaun-Min Zhang, Ming-Zhe Li. // *Int J Adv Manuf Technol*, 2007. – Vol. 32. – P. 705–710.
12. *Процессы пластического структурообразования металлов* / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов [и др.] – Минск : Наука и техника, 1994. – 232 с.
13. *Distribution of Mechanical Properties by Volume in Titanium Billets Processed by Twist Extrusion* / A. Reshetov, A. Korshunov, A. Smolyakov, Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, I. Kaganova, A. Morozov, *Materials Science Forum*, 2011. – Vols. 667–669. – P. 851–856.
14. *A new approach to a description of structural phase transformations under a very severe plastic deformation* / A. M. Glezer, *Russian Physics Journal*, 2008. – Vol. 51. – No. 5. – P. 480–491.
15. *Анализ влияния повторной деформации на механическое поведение образцов титана, продеформированных методом винтовой экструзии* / Ю. Н. Подрезов, В. И. Даниленко // *Электронная микроскопия и прочность материалов : сб. научн. тр. – К. : ИПМ НАН України, 2009. – Вып. 16. – С. 68–79.*
16. *Planar Twist Extrusion versus Twist Extrusion* / Y. Beygelzimer, D. Prilepo, R. Kulagin, V. Grishaev, O. Abramova, V. Varyukhin, M. Kulakov. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. – Vol. 211. – P. 522–529.
17. *Гвинтова екструзія – процес накопичення деформації. (Російською мовою)* / Я. Ю. Бейгельзімер, В. М. Варюхін, Д. В. Орлов, С. Г. Синков – Донецьк : ТЕАН, 2003. – 87 с. – ISBN 966-7507-16-5.
18. *Numerical and experimental analysis of twist channel angular pressing (TCAP) as a SPD process* / Radim Kocich, Lenka Kuncicka, Milan Mihola, Kateřina Skotnicova. *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 563. – P. 86–94.

19. Equal channel angular pressing with converging billets - Experiment / A. Rosochowski, L. Olejnik, J. Richert, M. Rosochowska, M. Richert // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 560. – P. 358–364.
20. Effect of Combined Deformation on the Structure and Properties of Copper and Titanium Alloys / V. V. Stolyarova, E. G. Pashinskayab, Ya. E. Beigel'zimer // *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2010. – No. 10. – P. 904–909.
21. Segal V. M. *Metal Processing by Severe Plastic Deformation* ISSN 0036-0295, *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2006. – No. 5. – P. 474–483. © Pleiades Publishing, Inc., 2006. Original Russian Text © V.M. Segal, 2006, published in *Metally*, 2006. – No. 5. – P. 130–141.
22. A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion / M. Shahbaz, N. Pardis, R. Ebrahimi, B. Talebanpour. *Materials Science and Engineering A*, 2011. – Vol. 530. – P. 469–472.
23. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // *Progress in Materials Science*, 2006. – Vol. 51. – P. 881–981.
24. Softening of Al during multi-axial forging in a channel die/ R. Kapoor, A. Sarkar, R. Yogi, S. K. Shekhawat, I. Samajdar, J. K. Chakravarty // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 560. – P. 404–412.
25. Enhanced microstructure homogeneity and mechanical properties of AZ31–Si composite by cyclic closed-die forging / Wei Guo, Qudong Wang, Bing Ye, Hao Zhou. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013. – Vol. 552. – P. 409–417.
26. Severe plastic deformation of copper and Al–Cu alloy using multiple channel-die compression / A. K. Parimi, P. S. Robi, S. K. Dwivedy // *Materials and Design*, 2011. – Vol. 32. – P. 1948–1956.
27. Microstructure evolution in AISI 201 austenitic stainless steel during the first compression cycle of multi-axial compression / Bingfeng Wang, Zhaolin Liu, Juan Li // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 568. – P. 20–24.
28. Патент 76206 Україна, МПК B22F 3/03. Спосіб багаторазової інтенсивної пластичної деформації заготовки зі зміною напрямку деформування / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов. №u201207396; заявл. 18.06.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.
29. Патент 74317 України, МПК G 22 F 1/16, B 21 J 5/00 /Спосіб одержання ультрадрібнозернистих заготовок із металів та сплавів / О. Ф. Тарасов, О. В. Періз, О. В. Алтухов. № u 201204007; заявл. 02.04.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
30. Патент 88811 Україна, МПК B22F 3/00. Спосіб багаторазової реверсивної інтенсивної пластичної деформації заготовки / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов. №a 2013 07911; заявл. 21.06.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.

REFERENCES

1. Valiev R. Z. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva* / R. Z. Valiev, I. V. Aleksandrov – M. : IKC«Akademkniga», 2007. – 398 s.
2. Estrin Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science / Y. Estrin, A. Vinogradov // *Acta Materialia*, 2013. – Vol. 61. – P. 782–817.
3. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals / A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen [et al.] // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008. – Vol. 57. – N 2. – P. 716–735.
4. Markushev M. V. *K voprosu ob jeffektivnosti nekotoryh metodov intensivnoj plasticheskoy deformacii, prednaznachennyh dlja poluchenija ob'emnyh nanostrukturnyh materialov* / M. V. Markushev // *Pis'ma o materialah t.1*, 2011. – S. 36–42.
5. Bridgman P. W. *Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure* / P. W. Bridgman – *Phys. Rev.* 48, Issue 10, 1935. – P. 825–844.
6. *On the relation between the microstructure and the mechanical behavior of pure Zn processed by high pressure torsion* / B. Srinivasarao, A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, M. T. Pe'rez-Prado, *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 562. – P. 196–202.
7. *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation* / R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, *Progress in Materials Science*, 2000. – Vol. 45. – P. 103–189.
8. Michael Zehetbauer; Roland Grössinger; Heinz Krenn; Maciej Krystian; Reinhard Pippan; Peter Rogl; Thomas Waitz; Roland Würschum *Bulk Nanostructured Functional Materials By Severe Plastic Deformation / Advanced Engineering Materials*, 2010. – Vol 12 (8). – P. 692–700.
9. Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes / Ghader Faraji, Alireza Babaei, Mahmoud Mosavi Mashhadi, Karen Abrinia. *Materials Letters*, 2012. – Vol. 77. – P. 82–85.
10. *A comparison between equal channel angular pressing and asymmetric rolling of silver in the severe plastic deformation regime*/ G. Angella, B. Esfandiar Jahromi, M. Vedani, *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 559. – P. 742–750.
11. *Generation and suppression of local severe plastic deformation in sectional multi-point forming* / Wei Liu, Shu-Sheng Jia, Chaun-Min Zhang, Ming-Zhe Li. // *Int J Adv Manuf Technol*, 2007. – Vol. 32. – P. 705–710.
12. *Processy plasticheskogo strukturoobrazovanija metallov* / V. M. Segal, V. I. Reznikov, V. I. Kopylov [i dr.] – Minsk : Nauka i tehnika, 1994. – 232 s.
13. *Distribution of Mechanical Properties by Volume in Titanium Billets Processed by Twist Extrusion* / A. Reshetov, A. Korshunov, A. Smolyakov, Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, I. Kaganova, A. Morozov, *Materials Science Forum*, 2011. – Vols. 667–669. – P. 851–856.

14. *A new approach to a description of structural phase transformations under a very severe plastic deformation* / A. M. Glezer, *Russian Physics Journal*, 2008. – Vol. 51. – No. 5. – P. 480–491.
15. *Analiz vlijanija povtornoj deformacii na mehanicheskoe povedenie obrazcov titana, prodeformirovannyh metodom vintovoj jekstruzii* / Ju. N. Podrezov, V. I. Danilenko // *Jelektronnaja mikroskopija i prochnost' materialov : sb. nauchn. tr. – K. : IPM NAN Ukraïni, 2009. – Vip. 16. – S. 68–79.*
16. *Planar Twist Extrusion versus Twist Extrusion* / Y. Beygelzimer, D. Prilepo, R. Kulagin, V. Grishaev, O. Abramova, V. Varyukhin, M. Kulakov. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011. – Vol. 211. – P. 522–529.
17. *Gvintova ekstruzija – proces nakopichennja deformacii. (Rosijs'koju movoju)* / Ja. Ju. Bejgel'zimer, V. M. Varjuhina, D. V. Orlov, S. G. Sinkov – Donec'k : TEAN, 2003. – 87 s. – ISBN 966-7507-16-5.
18. *Numerical and experimental analysis of twist channel angular pressing (TCAP) as a SPD process* / Radim Kocich, Lenka Kuncicka, Milan Mihola, Kateřina Skotnicova. *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 563. – P. 86–94.
19. *Equal channel angular pressing with converging billets - Experiment* / A. Rosochowski, L. Olejnik, J. Richert, M. Rosochowska, M. Richert // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 560. – P. 358–364.
20. *Effect of Combined Deformation on the Structure and Properties of Copper and Titanium Alloys* / V. V. Stolyarova, E. G. Pashinskayab, Ya. E. Beigel'zimer // *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2010. – No. 10. – P. 904–909.
21. *Segal V. M. Metal Processing by Severe Plastic Deformation* ISSN 0036-0295, *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2006. – No. 5. – P. 474–483. © Pleiades Publishing, Inc., 2006. Original Russian Text © V.M. Segal, 2006, published in *Metally*, 2006. – No. 5. – P. 130–141.
22. *A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion* / M. Shahbaz, N. Pardis, R. Ebrahimi, B. Talebanpour. *Materials Science and Engineering A*, 2011. – Vol. 530. – P. 469–472.
23. *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement* / Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon // *Progress in Materials Science*, 2006. – Vol. 51. – P. 881–981.
24. *Softening of Al during multi-axial forging in a channel die* / R. Kapoor, A. Sarkar, R. Yogi, S. K. Shekhawat, I. Samajdar, J. K. Chakravarty // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 560. – P. 404–412.
25. *Enhanced microstructure homogeneity and mechanical properties of AZ31–Si composite by cyclic closed-die forging* / Wei Guo, Qudong Wang, Bing Ye, Hao Zhou. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013. – Vol. 552. – P. 409–417.
26. *Severe plastic deformation of copper and Al–Cu alloy using multiple channel-die compression* / A. K. Parimi, P. S. Robi, S. K. Dwivedy // *Materials and Design*, 2011. – Vol. 32. – P. 1948–1956.
27. *Microstructure evolution in AISI 201 austenitic stainless steel during the first compression cycle of multi-axial compression* / Bingfeng Wang, Zhaolin Liu, Juan Li // *Materials Science & Engineering A*, 2013. – Vol. 568. – P. 20–24.
28. *Patent 76206 Ukraïna, MPK B22F 3/03. Sposib bagatorazovoi intensivnoi plastichnoi deformacii zagotivki zi zminuju naprjamku deformuvannja* / O. F. Tarasov, O. V. Altuhov. №u201207396; zajavl. 18.06.2012; opubl. 25.12.2012, Bjul. № 24.
29. *Patent 74317 Ukraïni, MPK G 22 F 1/16, V 21 J 5/00 /Sposib oderzhannja ul'tradribnozernistih zagotivok iz metaliv ta splaviv* / O. F. Tarasov, O. V. Perig, O. V. Altuhov. № u 201204007; zajavl. 02.04.2012; opubl. 25.10.2012, Bjul. № 20.
30. *Patent 88811 Ukraïna, MPK B22F 3/00. Sposib bagatorazovoi reversivnoi intensivnoi plastichnoi deformacii zagotivki* / O. F. Tarasov, O. V. Altuhov. №a 2013 07911; zajavl. 21.06.2013; opubl. 10.04.2014, Bjul. № 7.

Тарасов А. Ф. – д-р техн. наук, проф. ДГМА
Алтухов А. В. – ст. преп. ДГМА
Даниленко Н. И. – ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук ИСМ АНУ
Рудык Н. Д. – ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук ИСМ АНУ

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;
ИСМ АНУ – Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля Академии наук
Украины, г. Киев.

E-mail: tarasov50@inbox.ru; tsl@ukr.net; myd3@ukr.net

Статья поступила в редакцию 12.02.2015 г.