

РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.7

Бейгельзимер Я. Е.
Эстрин Ю. З.
Кулагин Р. Ю.

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ: НОВАЯ ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Интенсивная пластическая деформация (ИПД) (Severe Plastic Deformation (SPD)), представляет собой устоявшийся термин, обозначающий группу процессов обработки металлов давлением, которые позволяют осуществлять большую пластическую деформацию материалов практически без изменения размеров образца. Величина эквивалентной деформации, определяющая изменение структуры и свойств материала, на порядок и более превышает при ИПД значения, характерные для таких традиционных процессов обработки давлением, как прокатка, волочение, штамповка и т.д. Значительное увеличение деформации достигается, в основном, благодаря двум факторам: 1) немонотонному, чаще всего – циклическому нагружению материала, 2) высокому гидростатическому давлению в очаге деформации. За время развития ИПД в исследовательских лабораториях получены СМК материалы с замечательными физико-механическими характеристиками. В последние несколько лет начались работы по их промышленному применению в медицине, электронике и аэрокосмической технике [1].

В настоящей статье мы предлагаем научному сообществу рассмотреть новую, не менее увлекательную область применения указанных процессов, – создание высокоэффективных сплавов и гибридных материалов. Мы постараемся показать, что к этому имеются достаточно веские основания; что развитие ИПД в предлагаемом направлении инициирует постановку захватывающих научных задач и раскроет новые горизонты в прикладном материаловедении.

Новое применение процессов ИПД базируется на механохимическом синтезе, осуществляемом в пластически деформируемой среде под давлением. Пока что он реализуется, в основном, при обработке материалов в высокоэнергетических мельницах [2], а также при синтезе порошков путем сдвига под давлением в наковальнях Бриджмена [3]. Совершенно новые возможности для механохимического синтеза открывают следующие три эффекта, достоверно обнаруженные в процессах ИПД: (i) аномально быстрый массоперенос в объеме деформируемого твердого тела, (ii) захват веществ его поверхностью, (iii) значительное изменение взаимного расположения материальных точек внутри деформируемого тела, происходящее несмотря на то, что после каждого цикла обработки размеры образца возвращаются к исходным.

Благодаря указанным эффектам возможна доставка нужных веществ в заданные точки деформируемого образца и синтезирование в них соответствующих соединений. В результате, в объеме образца могут быть образованы области из разных сплавов. Управление этим процессом позволит создавать внутри твердого тела конструкции со сложной архитектурой из разных сплавов, иными словами, получать гибридные материалы с совершенно новыми свойствами.

Введение различных веществ в образец возможно как путем предварительного их внедрения в его объем до ИПД, так и в процессе деформации, через его поверхность. Если

ИПД осуществлять в специальной жидкой или газовой среде, либо наносить на заготовки перед деформацией покрытия из поверхностно активных сред, то атомы этих сред будут проникать в поверхностные слои образца, а затем разноситься по его объему. Попадание веществ через поверхность образца существенно облегчается, когда в ходе деформации ее площадь циклически изменяется, как, например, в процессе винтовой экструзии (ВЭ).

С нашей точки зрения, работы по ИПД-синтезу инициируют постановку целого ряда вызывающих задач о твердофазных реакциях в интенсивно деформируемой пластической среде и раскроют широкие возможности по созданию новых материалов методами ИПД.

Статья состоит из четырех разделов. В первых трех показан инструментарий ИПД-синтеза: указанные выше три эффекта ИПД проиллюстрированы, в основном, на примере процесса ВЭ. Последний, четвертый раздел, посвящен некоторым наиболее интересным, с нашей точки зрения, задачам механики и физики пластичности, постановку которых инициируют работы по ИПД-синтезу.

1. «Программирование» заготовок для ИПД-синтеза

Прежде всего, проанализируем эффект (iii). Он важен потому, что открывает возможность синтезировать целые конструкции, «программируя» исходный образец, т.е. закладывая нужные материалы в точки заготовки, положение которых предварительно рассчитывается. Проиллюстрируем это на конкретных примерах.

В работе [4] исследовано поперечное перетекание обрабатываемого металла при ВЭ, благодаря которому изменяется взаимное расположение материальных точек в пределах поперечного сечения образца. Показано, что с ростом числа проходов, формируется вихрь, охватывающий все сечение образца. Им можно воспользоваться для создания спиралевидных включений. Согласно работам [5, 6], включения такой формы значительно увеличивают деформацию до образования шейки при одноосном растяжении. Введение их в образец с субмикроструктурной (СМК) структурой позволяет избавиться от главного недостатка таких материалов – малой устойчивости при удлинении.

На рис. 1 показано изменение при ВЭ геометрии волокна, предварительно введенного в исходный образец под углом к его оси. Расчет выполнен в пакете DEFORM 3D, для условий, приведенных в работе [4].

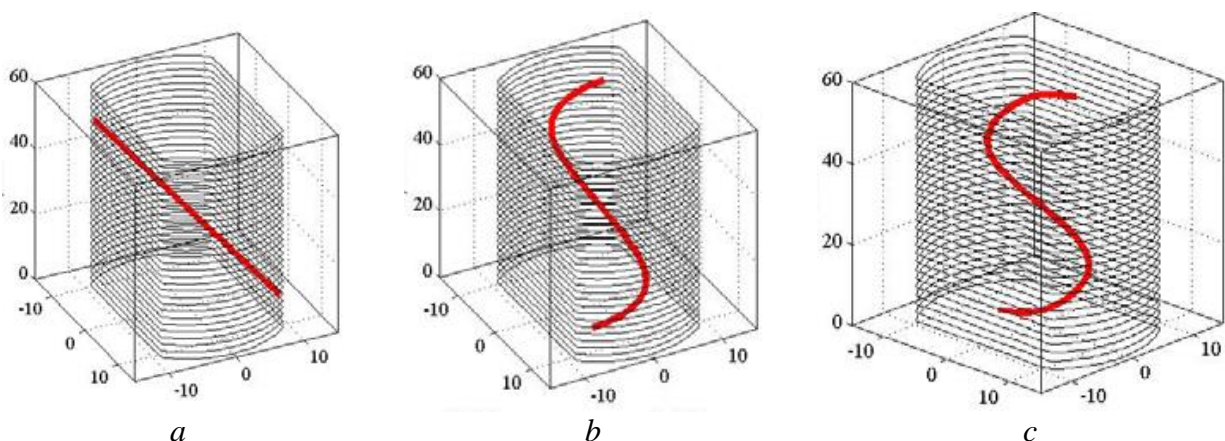


Fig. 1. Shape transformation of an inclined fiber that takes place during multi-pass TE: a – initial arrangement and shape; b – after 3 passes; c – after 5 passes (условия расчета те же, что и в работе [4])

После 5 проходов ВЭ прямолинейное волокно принимает выраженную спиралевидную форму (см. рис. 1с). Опыт показывает (см., напр., [7]), что такого числа проходов ВЭ, как правило, достаточно и для формирования СМК структуры в алюминиевых, медных и титановых сплавах. Следовательно, методом ВЭ могут быть получены СМК материалы со спиралевидными включениями, имеющие как высокую прочность, так и большие значения равномерного относительного удлинения.

В рассмотренном примере «программирование» исходного образца заключалось в расчете положения прямолинейных каналов, их формировании в заготовке и внедрении в них волокон из необходимых материалов. Как видим, при «программировании» решается обратная задача: по конструкции, которую нужно получить в результате ИПД-синтеза, создается ее заготовка. В простейших случаях речь идет лишь о расчете геометрии и положения включений. Если необходимо, чтобы между включением и основой материала в ходе процесса возникли определенные связи, то на этапе «программирования» должна быть определена технология обработки поверхностей включения и канала (очистка от окисных пленок, нанесение специальных покрытий и т.д.).

Если геометрия и состав «запрограммированной» заготовки оказываются сложными, то для ее изготовления можно привлечь методы порошковой металлургии: собирать заготовку как пространственную мозаику из различных порошков, которые будут взаимодействовать в процессе ИПД-синтеза.

Большие возможности в плане формирования исходных заготовок открывает 3D-печать. Проиллюстрируем это примером. Предположим, мы решили создать внутри СМК материала армирующую конструкцию в виде Шуховской башни из другого материала. Эта конструкция имеет большую прочность на осевую и боковую нагрузки, поэтому можно ожидать, например, что гибридный материал из легкой матрицы с Шуховской конструкцией внутри будет иметь выдающуюся удельную прочность.

На рис. 2 представлены заготовка и конечный образец, полученный из нее четырьмя проходами ВЭ. Расчет выполнен при тех же условиях, что для рис. 1.

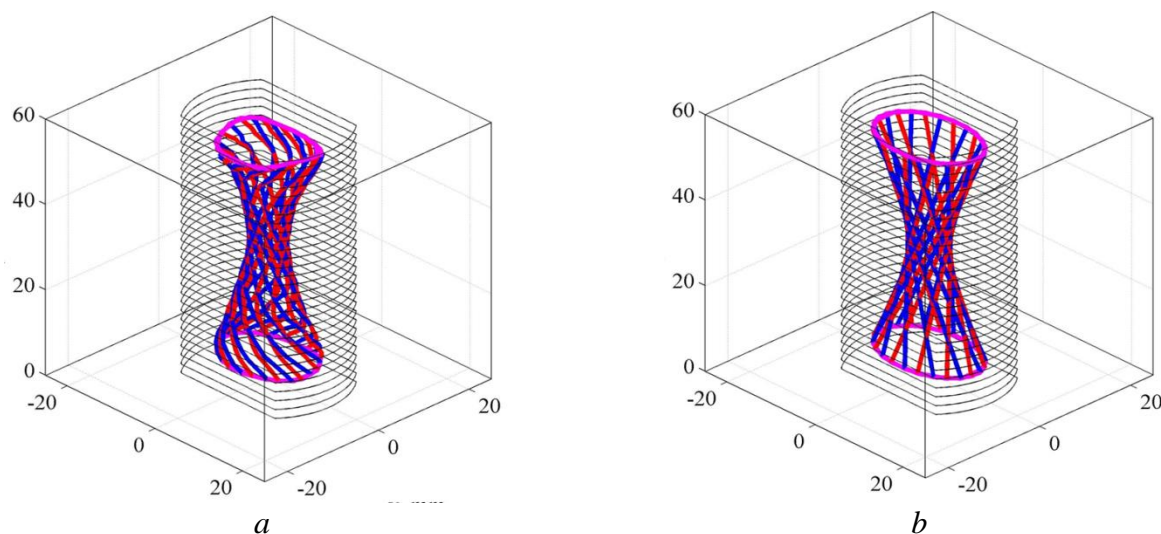


Рис. 2. Получение методом ВЭ гибридного материала «легкая матрица с Шуховской башней внутри»:

а – заготовка; б – конечный образец после 4 проходов ВЭ (условия расчета те же, что и в работе [4])

Заготовка рис. 2а может быть создана методом 3D-печати из соответствующих материалов.

2. Введение веществ для ИПД-синтеза через поверхность деформируемого тела

Некоторые участки поверхности очага деформации в процессах ИПД могут быть свободными, как например, при 3D-ковке, в основном же деформируемое тело контактирует в этой зоне с инструментом. Введение вещества через поверхность возможно в обоих случаях. В работе [8], например, показана возможность проникновения молекул азота в железо через свободную поверхность образца при осадке. Но гораздо больший интерес для ИПД-синтеза представляет случай контактной поверхности, где осуществляется трение между образцом и инструментом.

Уже давно убедительно показано, что при трении твердых тел, в зоне их контакта происходят различные явления, приводящие к переносу атомов одного тела в другое, причем если трение осуществляется в газах или жидкостях, то в поверхностные слои внедряются атомы и этих веществ (см., напр., [9])

Рассматриваются различные механизмы, по которым возможно затягивание веществ в поверхностные слои тела. В работе [10], например, анализируются вихревые движения, приводящие к этому. В работах [11, 12] представлены модели, согласно которым атомы диффундируют через дислокационные трубки, которые работают как насос.

Пластическая деформация тела безусловно вносит существенные особенности в явления, происходящие на его поверхности при трении. Пока что они исследованы совершенно недостаточно. Но с большой долей уверенности можно сказать, что периодическое увеличение, с последующим уменьшением площади поверхности тела при пластической деформации, должно приводить к более активному проникновению наружного вещества вовнутрь тела. Основание для этого, на наш взгляд, следующее. При увеличении поверхности происходит выход на нее атомов из приповерхностных слоев. Они становятся центрами захвата атомов окружающего вещества. Последующее уменьшение поверхности должно приводить к частичному перемещению этого вещества во внутренние слои тела.

Циклическое изменение площади поверхности образца происходит, например, при ВЭ. Простыми вычислениями легко показать, что в винтовом участке матрицы площадь может увеличиваться на 30–50% по сравнению с прямолинейными участками. Это должно приводить к дополнительному перемешиванию материала и затягиванию вещества в приповерхностные слои образца. Простая модель рис.3 иллюстрирует сказанное.

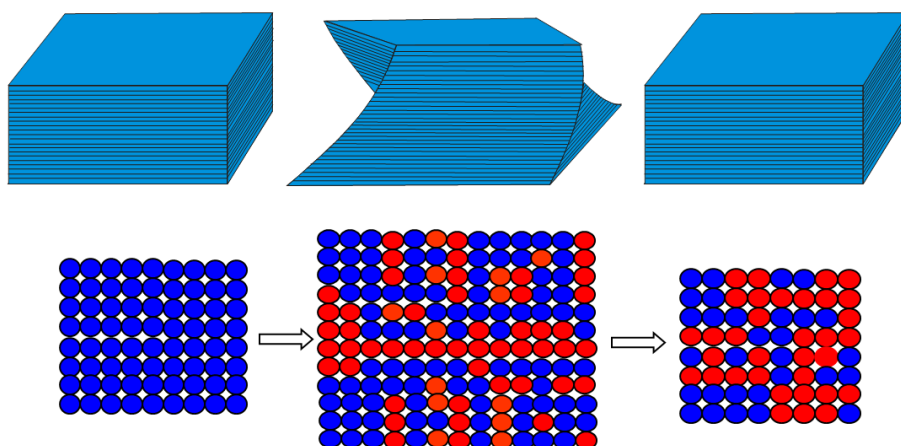


Рис. 3 Модель, иллюстрирующая дополнительное перемешивание материала, приводящее к затягиванию вещества в приповерхностные слои образца при ВЭ. Ряд рисунков сверху показывает изменение геометрии образца при прохождении винтового участка матрицы. Три нижних рисунка иллюстрируют выход приповерхностного материала (красные кружочки) на поверхность и уход вовнутрь материала с поверхности (синие кружочки)

3. Доставка вещества для ИПД-синтеза

Явление anomalно быстрого массопереноса в объеме деформируемого тела зафиксировано достаточно надежно и описано в большом числе публикаций. Единого мнения о его механизмах в настоящее время нет. В основном, полагают, что массоперенос обусловлен диффузией по разным каналам. Большие значения коэффициентов диффузии связывают со значительной кривизной дислокационных линий [12]; упругими искажениями решетки атомами внедрения [13]; высокой концентрацией хаотически распределенных дислокаций [14], границами зерен и нанопорами [15].

В объеме пластически деформируемого тела anomalно быстрый массоперенос приводит к перемешиванию атомов различных веществ [16], к образованию пространственных структур [17], к диспергированию хрупких включений [7]. Скорость

движения вещества в последнем случае можно оценить по диаметру области, занимаемой включением. Согласно данным, приведенным в [18], за 2 прохода ВЭ его увеличение составляет 20–100 мкм. При том, что характерное для одного прохода ВЭ время пребывания материала в зоне интенсивного сдвига составляет 1 с, получаем, что скорость распространения фрагментов включений может составлять десятки микрон в секунду. Этого вполне достаточно для того, чтобы за вполне реальное время обработки образца гомогенизировать его состав [19], либо же наоборот, создать определенные структуры. Последнее возможно сделать как путем самоорганизации в хаотическом потоке [20], так и программируя образец, предварительно закладывая в его объем «ловушки», где должен происходить синтез.

4. Некоторые нерешенные задачи, связанные с ИПД-синтезом

ИПД-синтез может привести к постановке «вызывающих» проблем как исследовательского, так и инженерного характера. Приведем лишь некоторые, наиболее интересные, на наш взгляд.

Ряд проблем связан с описанием процесса в рамках механики континуума. Например, если в сплошной среде выделить некоторую замкнутую односвязную область Ω , то при деформации она такой и должна оставаться. Область может сколь угодно деформироваться (например, вытягиваться), но материальные точки, в ней исходно расположенные, не могут выйти за ее пределы. Очевидно, что в рамках такого подхода нельзя описать, например, распыление включения, когда оно распадается на не связанные друг с другом части. Пока что эту проблему решают путем введения критериев разрушения и искусственных разрывов.

С предыдущей, неразрывно связана проблема описания массопереноса в пластически деформируемом теле. Как уже указывалось выше, сейчас, в основном полагают, что он обусловлен диффузией. Но как тогда можно объяснить перенос не атомов, а отдельных фрагментов вещества? В работах [18, 21] предложен механизм переноса, основанный на случайном вихревом поле скоростей, в определенном смысле аналогичном турбулентному движению жидкостей. Такой механизм объясняет быстрый массоперенос, но требует экспериментального обоснования.

С возможными разрывами смещений в пластически деформируемом теле связана следующая проблема. На микроскопическом уровне металлы имеют кристаллическую решетку, которая может испытывать лишь упругие деформации, по порядку величины не превышающие 10^{-3} . Отсюда следует, что на микроуровне, пластическую деформацию можно считать изометрическим отображением, не изменяющим длин отрезков. К таким преобразованиям относят перемещение, поворот и симметрическое отражение. Согласно теореме о почти-изометрических преобразованиях [22], непрерывное отображение, изометрическое в малой окрестности каждой точки, является изометрическим во всей области. Поэтому, для того, чтобы привести к изменению длин на макроскопических масштабах, пластическая деформация должна принадлежать к классу изометрических преобразований с особенностями (piecewise isometric transformation) [23]. В работе [21], что на основе этой идеи можно наметить путь описания массопереноса в пластически деформируемом поликристалле.

ВЫВОДЫ

Процессы ИПД открывают широкие перспективы для механохимического синтеза гибридных материалов. Возможность нового применения этих процессов обусловлена тремя эффектами: (i) аномально быстрым массопереносом в объеме деформируемого твердого тела, (ii) захватом веществ его поверхностью и (iii) значительным изменением взаимного расположения материальных точек внутри деформируемого тела, происходящим несмотря на то, что после каждого цикла обработки размеры образца возвращаются к исходным.

В статье кратко проанализированы указанные эффекты. Более подробный анализ, с примерами конструкций гибридных материалов, дан нами в работе [24].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Estrin Y. *Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science* / Y. Estrin, A.V. Vinogradov // *Acta Materialia*. – 2013. – 61. – P. 782–817.
2. Mahbub U. *Surfactant-assisted ball milling: a novel route to novel materials with controlled nanostructure - a review* / U. Mahbub, A.Eaqub, A.Hamid, S.Bee // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2014. – 37. – 1–2. – P. 1–14.
3. Boldyrev V.V. *Mechanochemistry and mechanical activation of solids* / V.V Boldyrev // *Uspekhi khimii*. – 2006. – 75. – 3. – P. 203–216.
4. Kulagin R. *Cross Flow During Twist Extrusion: Theory, Experiment, and Application* / R. Kulagin, M. Latypov, H.S.Kim, V. Varyukhin, Y.Beygelzimer // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2013. – 44. – P. 3211–3220.
5. Bouaziz O. *Architecturing of Metal-Based Composites with Concurrent Nanostructuring: A New Paradigm of Materials Design* / O.Bouaziz, H.S.Kim, Y.Estrin // *Adv. Eng. Mat.* – 2013. – 15. – 5. – P.336–340.
6. Hoddam S. *Torsional and compressive behavior of a spiral fiber reinforced metal matrix composite* / S. Hoddam, Y. Estrin, H.S. Kim, O. Bouaziz // *Materials and Design*. – 2015. – 85. – P. 404–411.
7. Beygelzimer Y. *Useful properties of twist extrusion* / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – 503. – P. 14–17.
8. Klyavin O.V. *Influence of the deformation type and medium on the mechanodynamic penetration of nitrogen molecules into surface layers of armco iron* / O.V. Klyavin, V.I. Nikolaev, O.F. Pozdnyakov, B.I. Smirnov, Y.M. Chernov, V.V. Shpeizman // *Physics of the Solid State*. – 2010. – 52. – P. 2496–2500.
9. *Surface effects in adhesion friction wear and lubrication* / By Donald H. Buckley. – Elsevier Scientific Publication Company. – 1981. – 625 p.
10. Rigney D.A. *The Evolution of Tribomaterial During Sliding: A Brief Introduction* / Rigney D.A., Karthikeyan S. // *Tribology Letters*. – 2010. – 39. – 1. – P.3–7.
11. Schwarz R. B. *Microscopic model for mechanical alloying* / R. B. Schwarz // *Mater. Sci. Forum*. – 1998. – 665. – P. 269–272.
12. Estrin Y. *Pipe diffusion along curved dislocations: an application to mechanical alloying* / Y. Estrin, E. Rabkin // *Scripta Materialia*. – 1998. – 39. – 12. – P.1731–1736.
13. Skakov Y.A. *High-energy cold plastic deformation, diffusion, and mechanochemical synthesis* / Y.A. Skakov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2004. – 46. – 3. – P.137–145.
14. Streletskii A. N. *The Kinetics and Mechanism of Mechanochemical Dissolution of Chromium in Nickel* / A. N. Streletskii, P. Yu. Butyagin // *Kolloidnyi Zhurnal*. – 2013. – 75. – 3. – P. 373–378.
15. Divinski S.V. *Ultra-fast diffusion channels in pure Ni severely deformed by equal-channel angular pressing* / S.V. Divinski, G.Reglitz, H.Rosner, Y.Estrin, G.Wilde // *Acta Materialia*. – 2011. – 59. – P.1974–1985.
16. Wang M. *Forced atomic mixing during severe plastic deformation: Chemical interactions and kinetically driven segregation* / M. Wang, N.Q.Vo, M. Campion, T.D. Nguyen, D. Setman, S. Dillon, P. Bellon, R.S. Averback // *Acta Materialia*. – 2014. – 66. – P.1–11.
17. Wang M. *Chemical mixing and self-organization of Nb precipitates in Cu during severe plastic deformation* / M.Wang, R.S. Averback, P. Bellon, S.Dillon // *Acta Materialia*. – 2014. – 62. – P. 276–285.
18. Beygelzimer Y. *Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation* / Y. Beygelzimer // *Materials Science Forum*. – 2011. – 683. – P.213–224.
19. *Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов* / Шевелев А.И., Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Сынков С.Г., Рябичева Л.А., Решетов А.В. // *Донецк. – ДонФТИ НАН Украины*. – 2011. – 327 с.
20. Muzzio F.J. *Chemical reactions in chaotic flows* / F.J.Muzzio, M.Liu // *Chemical Engineering Journal*. – 1996. – 64. – 1. – C. 117–127.
21. Beygelzimer Y. *Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries* / Y. Beygelzimer, N.Lavrinenko // *arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci]*. – 2012.
22. Люстерник Л. А. *Элементы функционального анализа* // Люстерник Л. А., Соболев В. И. – М.: Наука, 1965. – 350 с.
23. Jonathan H. B.D. *Piecewise Isometries: Applications in Engineering* / Jonathan H. B. D. // *Meccanica*. – 2006. – 41. – 3. – P. 241–252.
24. Beygelzimer Y. *Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of SPD Processing* / Y. Beygelzimer, Y. Estrin, R. Kulagin // *Adv. Eng. Mater.* – 2015. – 17. – 12. – P. 1853–1861.

REFERENCES

1. Estrin Y. *Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science* / Y. Estrin, A.V. Vinogradov // *Acta Materialia*. – 2013. – 61. – P. 782–817.
2. Mahbub U. *Surfactant-assisted ball milling: a novel route to novel materials with controlled nanostructure - a review* / U. Mahbub, A.Eaqub, A.Hamid, S.Bee // *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2014. – 37. – 1–2. – P. 1–14.
3. Boldyrev V.V. *Mechanochemistry and mechanical activation of solids* / V.V Boldyrev // *Uspekhi khimii*. – 2006. – 75. – 3. – P. 203–216.

4. Kulagin R. *Cross Flow During Twist Extrusion: Theory, Experiment, and Application* / R. Kulagin, M. Latypov, H.S.Kim, V. Varyukhin, Y.Beygelzimer // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2013. – 44. – P. 3211–3220.
5. Bouaziz O. *Architecturing of Metal-Based Composites with Concurrent Nanostructuring: A New Paradigm of Materials Design* / O.Bouaziz, H.S.Kim, Y.Estrin // *Adv. Eng. Mat.* – 2013. – 15. – 5. – P.336–340.
6. Hoddam S. *Torsional and compressive behavior of a spiral fiber reinforced metal matrix composite* / S. Hoddam, Y. Estrin, H.S. Kim, O. Bouaziz // *Materials and Design*. – 2015. – 85. – P. 404–411.
7. Beygelzimer Y. *Useful properties of twist extrusion* / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov // *Materials Science and Engineering A*. – 2009. – 503. – P. 14–17.
8. Klyavin O.V. *Influence of the deformation type and medium on the mechanodynamic penetration of nitrogen molecules into surface layers of armco iron* / O.V. Klyavin, V.I. Nikolaev, O.F. Pozdnyakov, B.I. Smirnov, Y.M. Chernov, V.V. Shpeizman // *Physics of the Solid State*. – 2010. – 52. – P. 2496–2500.
9. *Surface effects in adhesion friction wear and lubrication* / By Donald H. Buckley. – Elsevier Scientific Publication Company. – 1981. – 625 p.
10. Rigney D.A. *The Evolution of Tribomaterial During Sliding: A Brief Introduction* / Rigney D.A., Karthikeyan S. // *Tribology Letters*. – 2010. – 39. – 1. – P.3–7.
11. Schwarz R. B. *Microscopic model for mechanical alloying* / R. B. Schwarz // *Mater. Sci. Forum*. – 1998. – 665. – P. 269–272.
12. Estrin Y. *Pipe diffusion along curved dislocations: an application to mechanical alloying* / Y. Estrin, E. Rabkin // *Scripta Materialia*. – 1998. – 39. – 12. – P.1731–1736.
13. Skakov Y.A. *High-energy cold plastic deformation, diffusion, and mechanochemical synthesis* / Y.A. Skakov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2004. – 46. – 3. – P.137–145.
14. Streletskii A. N. *The Kinetics and Mechanism of Mechanochemical Dissolution of Chromium in Nickel* / A. N. Streletskii, P. Yu. Butyagin // *Kolloidnyi Zhurnal*. – 2013. – 75. – 3. – P. 373–378.
15. Divinski S.V. *Ultra-fast diffusion channels in pure Ni severely deformed by equal-channel angular pressing* / S.V. Divinski, G.Reglitz, H.Rosner, Y.Estrin, G.Wilde // *Acta Materialia*. – 2011. – 59. – P.1974–1985.
16. Wang M. *Forced atomic mixing during severe plastic deformation: Chemical interactions and kinetically driven segregation* / M. Wang, N.Q.Vo, M. Campion, T.D. Nguyen, D. Setman, S. Dillon, P. Bellon, R.S. Averback // *Acta Materialia*. – 2014. – 66. – P.1–11.
17. Wang M. *Chemical mixing and self-organization of Nb precipitates in Cu during severe plastic deformation* / M.Wang, R.S. Averback, P. Bellon, S.Dillon // *Acta Materialia*. – 2014. – 62. – P. 276–285.
18. Beygelzimer Y. *Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation* / Y. Beygelzimer // *Materials Science Forum*. – 2011. – 683. – P.213–224.
19. *Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминия содерzhashhih othodov* / Shevelev A.I., Bejgel'zimer Ja.E., Varjuhina V.N., Synkov S.G., Rjabicheva L.A., Reshetov A.V. // *Doneck. – DonFTI NAN Ukrainy*. – 2011. – 327 s.
20. Muzzio F.J. *Chemical reactions in chaotic flows* / F.J.Muzzio, M.Liu // *Chemical Engineering Journal*. – 1996. – 64. – 1. – C. 117–127.
21. Beygelzimer Y. *Perfect plasticity of metals under simple shear as the result of percolation transition on grain boundaries* / Y. Beygelzimer, N.Lavrinenko // *arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci]*. – 2012.
22. Ljusternik L. A. *Jelementy funkcional'nogo analiza* // Ljusternik L. A., Sobolev V. I. – M. : Nauka, 1965. – 350 s.
23. Jonathan H. B.D. *Piecewise Isometries: Applications in Engineering* / Jonathan H. B. D. // *Meccanica*. – 2006. – 41. – 3. – P. 241–252.
24. Beygelzimer Y. *Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of SPD Processing* / Y. Beygelzimer, Y. Estrin, R. Kulagin // *Adv. Eng. Mater.* – 2015. – 17. – 12. – P. 1853–1861.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр. ДонФТИ

Эстрин Ю. З. – директор Центра перспективных гибридных материалов, Факультет материаловедения Университета Монаш, Клейтон, Австралия; заведующий Лабораторией гибридных наноструктурированных материалов, НИТУ МИСиС, Россия

Кулагин Р. Ю. – научн. сотр. Института нанотехнологий, Технологический институт Карлсруэ, Германия

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, г. Киев.

E-mail: yanbeygel@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г.