

УДК 623.451:519.6

ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бейгельзимер Я.Е.

Донецкий Физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, г. Киев, Украина

***Аннотация.** В работе представлен краткий обзор исследований по интенсивной пластической деформации и проанализированы перспективы практического применения субмикроструктурных материалов. Показано, что наибольший эффект может быть получен при их использовании для изготовления прецизионных изделий малых размеров: электрических мини- и микромоторов для роботов и дронов, мини- и микродвигателей внутреннего сгорания, мини газотурбинных двигателей, миниредукторов, упругих элементов электромеханических систем, медицинских имплантатов и т.д.*

***Ключевые слова:** интенсивная пластическая деформация, новые материалы, субмикроструктурные материалы, изотермические преобразования, теорема о почти-изометрических преобразованиях.*

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

В докладе представлен краткий обзор исследований по ИПД и проанализированы перспективы практического применения СМК материалов. Показано, что наибольший эффект может быть получен при их использовании для изготовления элементов различных механизмов и устройств малых размеров (от ~10 мкм до ~10 мм), к которым предъявляются высокие требования по прочности и точности. Например: элементы электрических мини- и микромоторов для роботов и дронов; элементы мини- и микродвигателей внутреннего сгорания для авиамodelей; элементы мини газотурбинных двигателей для электрогенераторов индивидуального пользования; элементы миниредукторов; упругие элементы электромеханических систем; медицинские имплантаты и т.д.

Основное внимание в докладе сосредоточено на новом применении ИПД – создании сплавов и гибридных материалов [3]. Развитие процессов в этом направлении базируется на механохимическом синтезе и трех эффектах ИПД: (i) аномально быстром массопереносе в объеме деформируемого твердого тела, (ii) захвате веществ его поверхностью и (iii) значительном контролируемом изменении взаимного расположения материальных точек внутри деформируемого тела, происходящем 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, получают 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 наностить на заготовки перед деформации порытия 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) [4].

В докладе показано, что развитие ИПД в указанном направлении раскрывает новые горизонты в прикладном материаловедении и инициирует постановку захватывающих научных задач. Приведем лишь некоторые, наиболее интересные, на наш взгляд.

Ряд проблем связан с описанием процессов ИПД в рамках механики континуума. Например, если в сплошной среде выделить некоторую замкнутую односвязную область Ω , то при деформации она таковой и должна оставаться. Область может сколь угодно деформироваться (например, вытягиваться), но принадлежащие ей в начале деформации материальные точки 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.

С предыдущей, неразрывно связана проблема описания массопереноса в пластически деформируемом теле. Сейчас, в основном, полагают, что он обусловлен диффузией. Но как тогда можно объяснить перенос не атомов, а отдельных фрагментов вещества? В работе [5] 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 [6], 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) [7]. В работе [5] показано, что на основе этой идеи можно наметить путь описания массопереноса в пластически деформируемом поликристалле.

Список использованной литературы:

1. Estrin Y. *Acta Mater* / Y.Estrin, A.Vinogradov.-2013. 61.-P.782
2. Valiev R.Z. *JOM* / R.Z.Valiev, Y.Estrin, Z.Horita, T.G.Langdon, M.J.Zehetbauer, Y.T.Zhu.- 2016.- 68.-P.1216
3. Beygelzimer Y. *Adv. Eng. Mater* / Y.Beygelzimer, Y.Estrin, R.Kulagin. -2015.-17.- 12.-P.1853
4. Beygelzimer Y. / Y.Beygelzimer, R.Kulagin, Y.Estrin at el. // *Advanced Engineering Materials*. –2017. –Vol. 19, Issue 8. – P. 321
5. Beygelzimer Y. *arXiv:1206.5055v1 [cond-mat.mtrl-sci]*/ Y. Beygelzimer, N.Lavrinenkoю- 2012.
6. Люстерник Л.А. *Элементы функционального анали за* // Люстерник Л. А., Соболев В. И.// М.:Наука, 1965. -350 с.
7. Jonathan H.B.D. *Meccanica* / H.B.D. Jonathan.- 2006.- 41.- 3.- P.241.