

УДК 621.7

Бейгельзимер Я.Е. (Донецк, ДонФТИ НАНУ)

О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ МОДЕЛЯХ В ТЕОРИИ ОМД: ОТ МЕХАНИКИ КОНТИНУУМА К МИКРОМЕХАНИКЕ И ОБРАТНО

Анализируются две попытки установления связи между макро- и микроописанием пластической деформации. Первая состоит в построении определяющих соотношений, структура и параметры которых несут в себе информацию о микроповрежденности и механизмах деформации представительного объема материала. Вторая – в обобщении таких понятий, как поверхность текучести и отображающая точка в пространстве напряжений, путем введения в них информации о микроструктуре материала.

We describe two approaches to investigating the relationship between macro- and micro-descriptions of plastic deformation. The first approach is based on building a set of constitutive relations whose structure and parameters capture the micro-defects and deformation mechanisms of the representative volume of the material. The second approach rests on a generalization of such concepts as the yield surface and the reflective point in stresses-space. The generalization is done via introducing some information about the microstructure of the material.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основной научный интерес теории ОМД лежит в области прогноза показателей качества деформированных заготовок. При этом важнейшей задачей является разработка физических соотношений определяющих свойства представительного объема материала и условия контактного трения.

Классические модели теории пластичности, основанные на условии текучести Мизеса и ассоциированном с ним законе течения, не позволяют учесть такие эффекты как микроразрушение металла при деформации, текстурообразование, деформационную анизотропию и т.д., которые, в основном, и определяют искомые показатели качества продукции. Это делает бессмысленным, в ряде случаев, использование в расчетах мощных вычислительных методов, например таких пакетов, как ABAQUS, MARK и т.д.

Ситуацию иллюстрирует следующий наглядный образ: модель процесса ОМД подобна уличному фонарю (рис.1), который, опираясь на малый участок земли (калибровочный эксперимент), позволяет осветить большую площадь (осуществить прогноз). В этом образе высота столба соответствует глубине моделей деформируемого материала и контактного трения, а мощность лампочки фонаря - силе вычислительного метода. Чем выше столб и мощнее лампочка, тем большую площадь можно осветить. Однако при низком столбе сильная лампочка не эффективна.

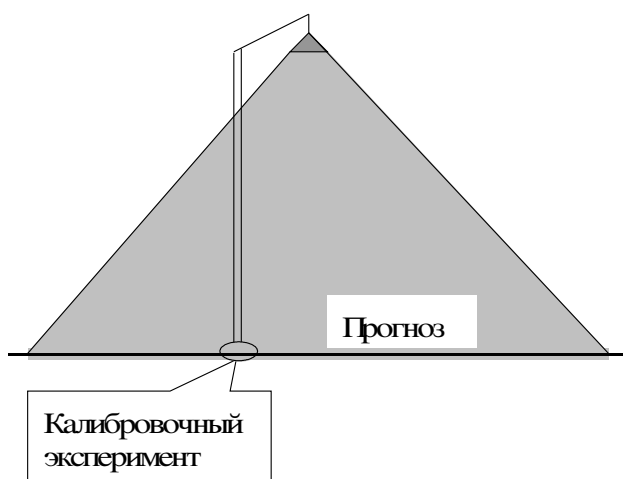


Рис.1 Наглядный образ модели в теории ОМД

Развитие моделей пластичности идет, в основном, по двум направлениям. Первое, математическое, связано с разработкой общей теории реологических соотношений (см.напр. [1,2,3]), второе, физическое (см.напр. [4]), - с созданием моделей представительного объема, основанных на физических предпосылках о механизмах деформации. В рамках первого направления формализуются данные макроскопических экспериментов; в рамках второго - обобщаются результаты физических исследований, выполненных на разных масштабных уровнях, охваченных процессом пластической деформации.

Каждое из указанных направлений имеет свои достоинства. В феноменологических теориях - это математическая простота и лаконичность определяющих соотношений, позволяющая использовать их при практических вычислениях. Однако математические модели этого направления не могут претендовать на общность и пригодны лишь для описания ограниченного класса процессов деформирования.

С другой стороны, физические теории, основанные на описании реальных механизмов пластической деформации, обладают большой объясняющей и прогнозирующей способностью, но лишены математической простоты и лаконичности. В этом случае реологические соотношения материала заменяются компьютерной моделью представительного объема и для «связывания» тензора скоростей деформаций с тензором напряжений в каждой точке образца необходимо решать громоздкую задачу деформации представительного объема материала. Таким образом, в ходе решения задачи на макроуровне (на уровне заготовки) параллельно и взаимосвязано с ней необходимо решать задачи микроуровня для представительных объемов материала. По сути, такой многоуровневый подход представляет собой компьютерную реализацию метода СН-ЭВМ, предложенного А.А.Ильюшиным [5]. При этом испытательный комбайн, осуществляющий сложное нагружение реальных образцов, заменяется компьютером, работающим в многозадачном режиме, а сами образцы - моделью представительного объема материала, разработанной на основе физических представлений о его механизмах деформации.

Подход, безусловно, эффективен, причем с ростом быстродействия и объема оперативной памяти вычислительных машин, его эффективность будет возрастать. Однако для качественного анализа процессов, который чаще важнее количественного, необходимо иметь лаконичное отражение «микроэффектов» на «макроязыке».

Прекрасным примером моделей с таким отражением являются работы В.В.Новожилова и Ю.И.Кадашевича [6], в которых микронапряжения, возникающие в материале при пластической деформации, представляются некоторым «макротензором».

В настоящей работе автор описывает две попытки такого отражения, в разработке которых он принимал непосредственное участие. Первая состоит в построении определяющих соотношений, структура и параметры которых несут в себе информацию о микроповрежденности и механизмах деформации представительного объема материала [7-12]. Вторая – в обобщении таких понятий, как поверхность текучести и отображающая точка в пространстве напряжений, путем введения в них информации о микроструктуре материала [13-16].

Указанные попытки достаточно подробно освещены в печати, в этой же статье, носящей, в основном, обзорный характер, мы остановимся на их физических предпосылках, возможностях и перспективах.

КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА С ДЕФЕКТАМИ ТИПА МИКРОПОР: ПОПЫТКА №1

Предполагается, что материал состоит из взаимосвязанных структурных элементов, а его деформация осуществляется путем смещения, вращения и деформации каждого из них. При этом они вынуждены подстраиваться друг к другу. Способность к такой аккомодации (подстройке) определяется действующими в данный момент механизмами пластической деформации. Если они обеспечивают произвольное формоизменение структурных элементов, то возможна их полная аккомодация, в противном случае - лишь частичная. В последнем случае между элементами будут появляться микронесплошности (если элементы в исходном состоянии были плотно подогнаны друг к другу), что соответствует разрыхлению материала. С другой стороны, если микронесплошности имелись, то при определенных условиях они могут исчезать, так как структурные элементы имеют возможность подстраиваться друг к другу.

Таким образом, предполагаемый материал является пористым и может демонстрировать как зарождение, так и залечивание микронесплошностей. Этим он отличается от традиционных моделей пористых тел, где полагается, что каркас (матрица) материала не имеет собственной структуры и деформируется как сплошная среда. Последнее соответствует предельной ситуации, когда структурные элементы в предложенной выше модели материала могут полностью аккомодировать друг к другу при совместной пластической деформации.

С целью количественного описания процесса введем некоторую меру ограничений на совместную пластическую деформацию отдельных структурных элементов и охарактеризуем ее эффективным параметром α . Положим величину $\alpha = 0$ в случае, если имеется возможность полной аккомодации структурных элементов друг к другу при деформации. При этом величина α растет с увеличением числа ограничений на совместную пластическую деформацию. То есть, чем менее эффективны механизмы аккомодации пластической деформации структурных элементов, тем выше величина α .

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что увеличение гидростатического давления приводит к включению новых каналов аккомодации. При этом имеется ряд критических давлений, при превышении которых включаются новые механизмы

деформации. Данное обстоятельство приводит к тому, что величина α должна убывать с ростом давления, а в интервалах между критическими давлениями α от P не зависит.

В работах [7,8], на основе описанной выше физической модели, предложены определяющие соотношения для представительного объема структурно-неоднородного материала (См. Табл.1, где для сопоставления также приведены определяющие соотношения для бесструктурного материала, подчиняющегося условию пластичности Мизеса).

Сопоставление модели с экспериментом приведено в работах [7-11], в которых показано, что с помощью соотношений Табл.1 могут быть описаны процессы пластической деформации и разрушения многих компактных и некомпактных материалов.

В работе [12] предложена модель контактного трения при ОМД, опирающаяся на представление о «третьем теле», реология которого также определяется соотношениями Табл.1.

В определяющих соотношениях Табл.1 «полпредами микромира» на макроуровне являются, прежде всего, величина пористости θ и параметр аккомодации α . Пористость отражает поврежденность структуры металла дефектами типа микропор, а параметр аккомодации интегрально отражает эффективность механизмов деформации структурных элементов. При смене механизмов деформации, величина этого параметра резко изменяется [9].

В связи с рассмотренной моделью возникает резонный вопрос: почему удается описать поведение такой сложной системы как деформируемый материал в рамках достаточно простой модели и всегда ли это возможно?

В частности, вызывает удивление тот факт, что представив ансамбль дефектов на макроуровне единственным скалярным параметром θ и охарактеризовав эффективность механизмов деформации структурных элементов параметром α , мы получили возможность моделировать такие эффекты как вязкое разрушение, локализация деформации и т.д.

Подобное же удивление вызывают и другие прецеденты, связанные с возможностью простого описания сложных систем. Например: наличие в ряде случаев, единой кривой упрочнения материала, не зависящей от вида нагружения; возможность расчета некоторых характеристик турбулентного потока путем решения небольшого числа уравнений для среднего размера вихрей, плотности турбулентной энергии и т.д. [17].

Согласно представлениям синергетики [18], возможность упрощенного описания связана с тем, что при определенных условиях в сложной системе возникает самоорганизация, приводящая к резкому сокращению числа степеней свободы. В ряде случаев удается выделить несколько степеней свободы, к которым подстраиваются все остальные, которые и определяют динамику процессов и поэтому называются параметрами порядка. При математическом исследовании сложных систем оказывается, что режимы с усеченным числом степеней свободы представляют собой автомодельные решения соответствующей задачи [17, 19].

Табл.1 Физические соотношения для представительного объема структурно-неоднородного материала

Физические соотношения для	Физические	
----------------------------	------------	--

структурно-неоднородного материала	соотношения для бесструктурного материала (по Мизесу)	Комментарии
$f = \frac{\sigma^2}{\psi(\theta)} + \frac{\tau^2}{\varphi(\theta)} - (1-\theta)(k_0 - \alpha\sigma)^2$	$f = \tau - k_0$	Функция нагружения
$\frac{\sigma^2}{\psi(\theta)} + \frac{\tau^2}{\varphi(\theta)} = (1-\theta)(k_0 - \alpha\sigma)^2$	$\tau = k_0$	Условие пластичности
$\frac{\dot{\epsilon}\tau}{\varphi(\theta)} = \dot{\gamma} \left(\frac{\sigma}{\psi(\theta)} + \alpha(1-\theta)(k_0 - \alpha\sigma) \right)$	$\dot{\epsilon} = 0$	Условие градиентальности
$\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}\delta_{ij} = \frac{\dot{\gamma}}{\tau}(\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij})$	$i \neq j$	
$\theta = \theta_c$	--	Критерий макроразрушения
$\frac{d\tau}{d\gamma} \leq 0$	--	Критерий неустойчивости и локализации деформации

Примечания: $\psi(\theta) = \frac{(1-\theta)^{2n-1}}{6a\theta^m}$, $\varphi(\theta) = (1-\theta)^{2n-1}$, θ - пористость, $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_{ik}\delta_{ik}$, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{ik}\delta_{ik}$,

$$\tau = \sqrt{\left(\left(\sigma_{ik} - \frac{1}{3}\sigma\delta_{ik} \right) \left(\sigma_{ik} - \frac{1}{3}\sigma\delta_{ik} \right) \right)}, \dot{\gamma} = \sqrt{\left(\left(\dot{\epsilon}_{ik} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}\delta_{ik} \right) \left(\dot{\epsilon}_{ik} - \frac{1}{3}\dot{\epsilon}\delta_{ik} \right) \right)}, k_0, \alpha, a, m, n -$$

параметры материала.

По-видимому, с такой самоорганизацией сложной многоуровневой системы, которую представляет собой деформируемый материал, связан ответ на поставленный выше вопрос. В пользу этого свидетельствуют такие факты, как автомодельность развития ансамбля дефектов, образование различных устойчивых дефектных структур при монотонном нагружении, близком к простому, разрушение данных структур при резком изломе траектории деформирования, с последующим установлением новых структур (см. [20]).

Проявлением синергетического поведения, с нашей точки зрения, является принцип запаздывания [5], отражающий результаты многочисленных экспериментов по пластической деформации материалов и состоящий в том, что ориентация тензора напряжений относительно тензора скоростей деформаций определяется не всей историей деформирования, а лишь небольшим участком траектории, непосредственно прилегающим к данной точке. Этот принцип, по сути, является конкретным выражением общего свойства сложных нелинейных систем - «забывания» деталей начальных данных [19]. Это свойство

заключается в том, что через некоторое время после начала воздействия в системе возникает самоорганизация, в результате чего система начинает эволюционировать в соответствии с одним из возможных для нее «сценариев». Набор возможных «сценариев» невелик и определяется самой системой, в частности, ее симметрией. Отсюда, кстати, можно заключить, что, если удастся определить возможные «сценарии» поведения для реальных материалов, связать их например, с симметрией кристаллической решетки, концентрацией примесей и т.д., а также найти группы траекторий нагружения, выводящих на тот или иной «сценарий», то указанным свойством можно было бы воспользоваться для целенаправленного формирования дефектной структуры и, следовательно, характеристик материала.

Если вышесказанное предложение верно, и простота поведения материала связана с самоорганизацией, то отсюда вытекает первое ограничение на область применимости модели: она может использоваться для описания больших пластических деформаций при монотонном нагружении без резких изломов траектории деформирования.

Процессы сложного нагружения рассмотрены нами в рамках второй попытки построения многоуровневой модели материала, к которой мы и перейдем.

КЛЕТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИКРИСТАЛЛА, ТОЛСТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ТЕКУЧЕСТИ И ОБЛАКО ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ: ПОПЫТКА №2

Предполагаем, что представительный объём поликристалла состоит из совокупности взаимосвязанных элементов-клеток, каждая из которых может быть либо простой, либо сложной. Простые клетки моделируют монокристаллы и не имеют в своём составе других клеток. Сложные клетки, в свою очередь, состоят из простых и/или сложных. В качестве составляющих, сложная клетка может содержать себе подобные, что позволяет моделировать фрактальные структуры.

Мы использовали сложные клетки, имеющие структуру кубической решётки и состоящие из 27 (3×3×3) клеток меньших размеров. В общем случае возможны другие пространственные структуры и иное количество составляющих.

Приведенное выше описание задает многоуровневую иерархическую структуру материала.

Пластическая деформация сложного элемента осуществляется путём совместной деформации и поворотов составляющих его элементов. Простой элемент необратимо деформируется посредством движения дислокаций и образования двойников. При этом материал, согласно Тейлору [21], течёт через кристаллическую решётку, в то время как последняя может необратимо поворачиваться.

Кинематика пластического деформирования элементов характеризуется градиентом скорости L (см. [22])

$$L = \dot{D} + \dot{\Omega}$$

где \dot{D} – симметричный тензор скоростей пластического растяжения; $\dot{\Omega}$ – антисимметричный тензор скоростей поворота.

Тензор $\dot{\Omega}$ разлагается на две составляющие:

$$\dot{\mathbf{\Omega}} = \dot{\mathbf{\Omega}}^p + \dot{\mathbf{\Omega}}^*,$$

первая из которых (помечена индексом «р») обусловлена только пластическим скольжением, а вторая (помечена значком «*») – поворотами кристаллической решётки.

Для простых элементов:

$$\dot{\mathbf{D}} = \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{P}^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)},$$

$$\dot{\mathbf{\Omega}}^p = \sum_{\alpha=1}^k \mathbf{W}^{(\alpha)} \dot{\gamma}^{(\alpha)},$$

где

$$\mathbf{P}^{(\alpha)} = \frac{1}{2} (\mathbf{s}^{(\alpha)} \mathbf{m}^{(\alpha)} + \mathbf{m}^{(\alpha)} \mathbf{s}^{(\alpha)});$$

$$\mathbf{W}^{(\alpha)} = \frac{1}{2} (\mathbf{s}^{(\alpha)} \mathbf{m}^{(\alpha)} - \mathbf{m}^{(\alpha)} \mathbf{s}^{(\alpha)});$$

$\mathbf{m}^{(\alpha)}$ и $\mathbf{s}^{(\alpha)}$ – соответственно единичные векторы нормали к плоскости скольжения и направления скольжения, в совокупности определяющие систему скольжения α ; $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ – скорость сдвига по системе скольжения α .

Величина $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ определяется касательным напряжением τ^α , действующим на соответствующей системе скольжения [23]:

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{\gamma}_0^\alpha \exp \left\{ -\frac{\Delta F}{kT} \left[1 - \left(\frac{|\tau^\alpha|}{\tau_c^\alpha} \right)^p \right]^q \right\} \cdot \frac{\tau^\alpha}{\tau_c^\alpha},$$

где ΔF – энергия активации, необходимая для преодоления препятствий в отсутствие внешних напряжений; τ_c^α – критическое касательное напряжение для системы α ; p и q – параметры, зависящие от механизма, контролирующего движение дислокации ($0 \leq p \leq 1$, $1 \leq q \leq 2$); k – постоянная Больцмана; T – температура; $\dot{\gamma}_0^\alpha$ – параметр, характеризующий систему α .

Касательное напряжение находится по формуле

$$\tau^{(\alpha)} = \mathbf{m}^{(\alpha)} \mathbf{s}^{(\alpha)} : \mathbf{\Sigma},$$

где $\mathbf{\Sigma}$ – тензор напряжений, действующих на рассматриваемый простой элемент.

Тензоры $\dot{\mathbf{D}}^n$ и $\dot{\mathbf{\Omega}}^{p,n}$, характеризующие какой-либо сложный элемент n -го уровня, определяем путём осреднения

$$\dot{\mathbf{D}}^n = \frac{1}{27} \sum \dot{\mathbf{D}}^{n+1},$$

$$\dot{\Omega}^{p,n} = \frac{1}{27} \sum \dot{\Omega}^{p,n+1},$$

где суммирование производится по 27 элементам (n+1)-уровня, составляющим выбранный элемент n-го уровня. Соотношения для определения $\Omega^{*,n}$ получены в работе [16].

Из-за неоднородного строения материала его элементы деформируются по-разному. В результате между ними возникают напряжения, в том числе и моментные, стремящиеся развернуть элементы друг относительно друга.

По этой причине тензор Σ , определяющий напряжённое состояние элементов, является несимметричным и представляется в виде:

$$\Sigma = \sigma + \mathbf{r},$$

где σ и \mathbf{r} – соответственно симметричная и антисимметричная части Σ .

Величина этих напряжений определяется на основе подхода «самосогласованного поля» [4, 24], причём при вычислении напряжённого состояния произвольного элемента (n+1)-уровня, в качестве среднего поля напряжений принимается напряжённое состояние сложного элемента n-го уровня, в состав которого входит этот элемент. С другой стороны, градиент скорости сложного элемента определяется путём осреднения по составляющим его подэлементам. Тем самым моделируется взаимосвязь между различными уровнями пластической деформации.

Уравнения теории самосогласованного поля используются в обобщенном виде, учитывающем конечные повороты элементов. В частности, для симметричной части тензора напряжений они имеют вид:

$$\overset{\nabla}{\sigma}^{n+1} - \overset{\nabla}{\sigma}^n = \mathbf{M} : (\dot{\mathbf{D}}^n - \dot{\mathbf{D}}^{n+1})$$

Последнее соотношение связывает характеристики напряжённо-деформированного состояния произвольного сложного элемента n-го уровня с входящими в его состав элементами (n+1)-уровня. В этом соотношении значком ∇ обозначена производная Яуманна вдоль осей координат, поворачивающихся вместе с элементами n-го уровня; \mathbf{M} – в общем случае, четырёхвалентный тензор «эффективных» упругих модулей, который учитывает неупругую податливость окружения, связанную с межзёрненной аккомодацией.

Описанная выше модель материала задает взаимосвязь между напряженным и деформированным состоянием представительного объема, в том числе и при немономонном нагружении. Помимо этого, модель позволяет описать текстурообразование и учесть анизотропию материала при пластических деформациях.

Для компактного отражения «микропроцессов» на «макроуровне» в работах [14,15] введены в рассмотрение два новых объекта:

- облако внутренних напряжений (ОВН) - область, в пространстве напряжений, отображающую напряженное состояние элемента с учетом его неоднородности;

•толстая поверхность текучести (ТПТ)- область, в пространстве напряжений, обладающая тем свойством, что когда в ней находится ОВН элемента, в последнем происходит пластическая деформация.

На рис. 2 представлена структура ОВН и ТПТ, проявляющаяся при последовательном разбиении RVE на все более мелкие элементы. При этом ОВН и ТПТ более высокого масштабного уровня каждый раз расщепляются на соответствующие объекты более низкого уровня. Таким образом получают структуры, которые в случае скейлинга (самоподобия), по-видимому, являются фракталами [25].

Подробнее остановимся на введенных объектах. В принципе, они могут рассматриваться и вне связи с клеточной моделью поликристалла и являются развитием понятий поверхность текучести и отображающая точка в пространстве напряжений.

Отообразим в пространстве напряжений поверхности текучести отдельных элементов так, как если бы они не были связаны между собой. Очевидно, поверхность текучести одной системы скольжения отобразится парой параллельных плоскостей. Точка, отображающая напряженное состояние этой системы может находиться либо между указанными плоскостями (в этом случае система не активна) либо лежать на них (в этом случае система активна).

Объединение плоскостей текучести всех систем скольжения простого элемента образует геометрический объект, который мы назовем толстой поверхностью текучести этого элемента. Отметим, что термин «поверхность текучести» мы используем не в классическом понимании. Классическим вариантом была бы поверхность текучести, представляющая собой границу пересечения упругих областей всех систем скольжения рассматриваемого элемента.

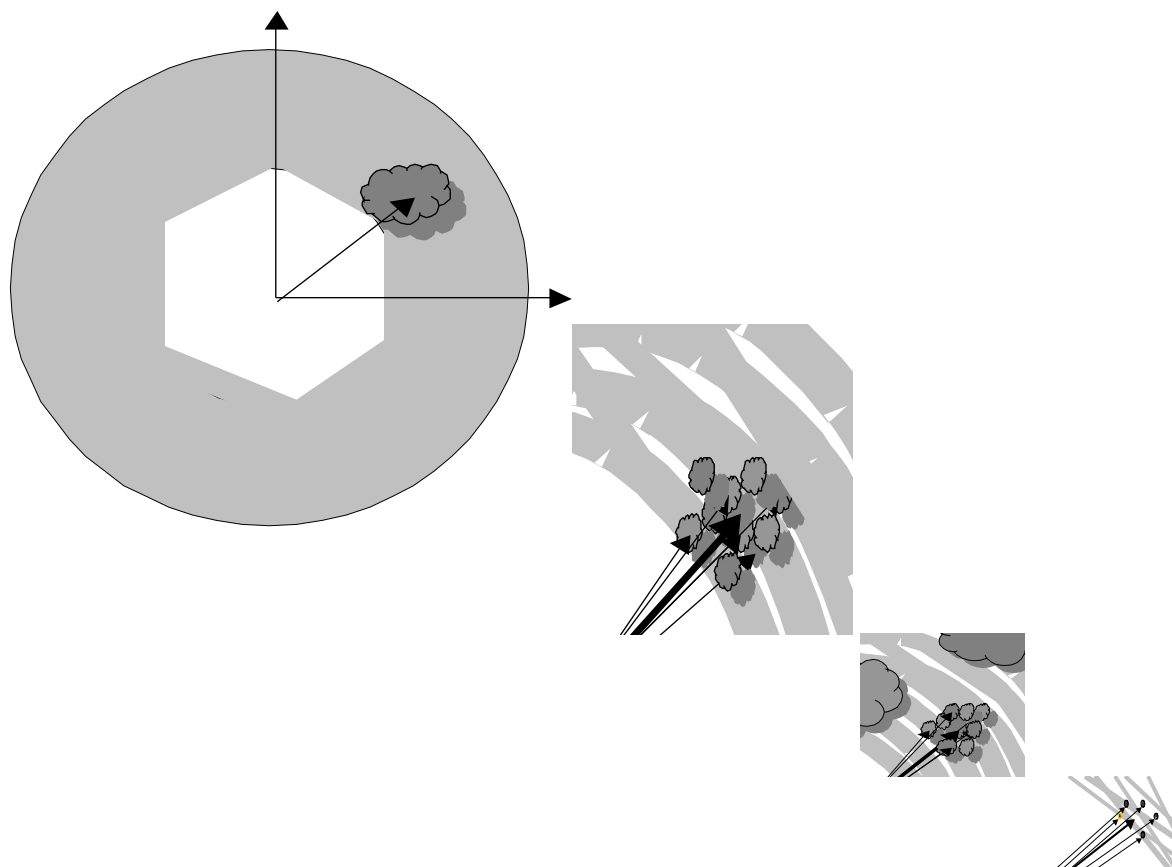


Рис.2 Структуры Толстой поверхности текучести и Облака внутренних напряжений

Толстой поверхностью текучести составного элемента n -го уровня назовем геометрический объект, образованный объединением толстых поверхностей текучести составляющих его подэлементов $(n+1)$ -го уровня. В результате такого построения в пространстве напряжений образуется самоподобный геометрический объект, который мы и назовем ТПТ поликристалла.

В отличие от классической поверхности текучести, ТПТ имеет внутреннюю структуру. Точка, отображающая напряженное состояние представительного объема материала, может проникать внутрь этой “поверхности”. При этом она “расщепляется” на множество точек, отображающих напряженные состояния элементов первого уровня. Каждая из них может находиться лишь в пределах ТПТ своего элемента, внутри которой она, в свою очередь, “расщепляется” на точки, соответствующие напряженным состояниям элементов второго уровня и т.д. В конечном счете, напряженное состояние представительного объема поликристалла отображается множеством точек O , которое и является облаком внутренних напряжений (ОВН).

Очевидно диаметр O является количественной мерой внутренних микронапряжений в материале. В работе [15] представлена эволюция ОВН при нагружении одного и того же материала по различным траекториям. Расчет выполнен с помощью клеточной модели поликристалла.

Каждое проникновение ОВН в ТПТ приводит к его искажению, причем начало пластического течения материала связано с первыми признаками такого искажения. Эффект Баушингера проявляется в том, что при нагружении обратного знака ОВН начинает искажаться при меньшем уровне внешних напряжений, чем при первоначальном прямом

нагрузении.

При увеличении глубины проникновения в ТПТ диаметр ОВН растет, так как каждая из отображающих точек может перемещаться лишь по своей плоскости текучести. Этому, согласно сказанному выше, соответствует рост внутренних напряжений.

Известно, что последние с ростом деформации выходят на насыщение и перестают увеличиваться. Это означает, что при достаточно глубоком проникновении в ТПТ должен происходить поворот либо излом плоскостей текучести, наиболее значительно растягивающих ОВН. Первому из указанных эффектов соответствуют развороты элементов, а второму - разбиение простых элементов на части, повернутые друг относительно друга (фрагментация зерен). При этом на внутренней границе ТПТ образуется углубление, которое в экспериментах может фиксироваться как угловая точка на классической поверхности текучести.

Классическая поверхность текучести посредством закона ассоциированного течения определяет приращение пластической деформации на каждом этапе нагружения. Легко видеть, что подобными свойствами обладает и введенная нами выше ТПТ. Отличие состоит в том, что в этом случае макроскопический вектор приращения пластических деформаций представительного объема получается путем суммирования векторов приращений микродеформаций отдельных элементов. Приращение же пластических деформаций, обусловленное отдельной системой скольжения, определяется вектором, ортогональным соответствующей плоскости текучести.

Скорость приращения пластической деформации поликристалла зависит от структуры участка ТПТ, занятой ОВН, и направления вектора приращения макронапряжений, определяющего эволюцию ОВН.

Рассуждения и расчеты, подобные тем, что сделаны выше, позволили найти геометрические образы ряда эффектов пластической деформации [14], некоторые из которых суммированы в Табл.2.

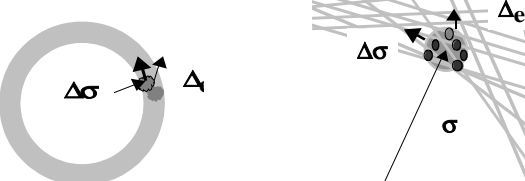
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение еще раз воспользуемся введенным в начале статьи наглядным образом. Для того, чтобы осветить большую площадь необходимо установить высокий столб. Но чем выше столб, тем глубже его нужно вкапывать. Иными словами, хороший прогноз в ОМД должен базироваться на «глубоких» моделях материала, опирающихся на представления о механизмах деформации нижних масштабных уровней (микро- и мезоуровней).

В принципе возможно непосредственное использование моделей микромеханики во взаимосвязи с моделями макроуровня. Но для качественного анализа процессов ОМД желательно иметь определяющие соотношения, параметры которых имеют определенное физическое содержание. По образному выражению В.В.Новожилова микроуровни должны посылать своих представителей в макромоделли.

В настоящей работе автор описал две попытки такого отражения, в разработке которых он принимал непосредственное участие. Первая состоит в построении определяющих соотношений, структура и параметры которых несут в себе информацию о микроповрежденности и механизмах деформации представительного объема материала. Вторая – в обобщении таких понятий, как поверхность текучести и отображающая точка в пространстве напряжений, путем введения в них информации о микроструктуре материала

Табл.2 Геометрические образы некоторых эффектов при пластической деформации поликристаллических материалов

 <p style="text-align: center;"> упругий пластический </p>	<p style="text-align: center;"><u>Упруго-пластическая деформация и пластическое течение представительного объема (ПО).</u></p> <p>По мере нагружения материала все больше элементов ПО вовлекается в пластическую деформацию. При этом ОВН разрастается, все большее число его составляющих «входит» в свои поверхности нагружения. Пластическое течение начинается в момент разрыва упругого кластера, пронизывающего ПО. В этот момент определенная доля составляющих ОВН находится в своих поверхностях нагружения.</p>
	<p style="text-align: center;"><u>Упрочнение, связанное с ростом внутренних напряжений.</u></p> <p>Увеличение диаметра ОВН при нагружении материала без фрагментации зерен.</p>
	<p style="text-align: center;"><u>Фрагментация зерен при больших деформациях.</u></p> <p>Разбиение зерна на два субзерна, вызванное большими внутренними микронапряжениями. При этом диаметр ОВН уменьшается, происходит частичная релаксация внутренних напряжений.</p>
	<p style="text-align: center;"><u>Образование текстуры.</u></p> <p><u>Потеря устойчивости деформирования с образованием полосы скольжения.</u></p> <p>При разворотах зерен, в ТПТ образуется угловая точка, а ОВН стягивается к этой точке.</p>
	<p style="text-align: center;"><u>Деформация при нагружении вдоль ТПТ</u></p>

ЛИТЕРАТУРА

1.Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред.-М.: Мир, 1975.-592 с.

- 2.Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1.-М.:Наука, 1976.-535 с.
- 3.Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов.-М.: Металлургия, 1976.-488 с.
- 4.Raabe D. Computational Material Science. The Simulation of Materials Microstructures and Properties.-New York: Wiley-VCH, 1998.-379 p.
- 5.Ильющин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М.: Изд-во АН СССР, 1963, 271 с.
- 6.Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах.-Л.: Машиностроение, 1990.- 223с.
- 7.Бейгельзимер Я.Е., Палант Ю.А. О пластическом изменении объема // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. - N 11. – С. 54-57.
- 8.Бейгельзимер Я.Е. "Физические модели в исследовании и разработке процессов гидростатической обработки материалов", Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук (Донецк) - 1994. - 34с
- 9.Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Эфрос Б.М. Физическая механика гидростатической обработки материалов. -Донецк: ДонФТИ НАНУ, 2000.-192 с.
- 10.Бейгельзимер Я.Е., Эфрос Б.М., Шишкова Н.В. Деформация и разрушение металлических материалов в условиях высоких гидростатических давлений// Известия РАН, Металлы.- 1995.- N1.- С. 121-126.
- 11.Beygelzimer Y.Y., Efros B.M., Varyukhin V.N., Khokhlov A.B. Continuum model of the structural - inhomogeneous porous body and its application for the study of stability and viscous fracture of materials deformed under pressure// Engineering Fracture Mechanics - 1994 - v.48 - N5.-P. 629 - 640.
- 12.Бейгельзимер Я.Е., Миланин А.А., Спусканюк В.З. Об одной континуальной модели контактного трения при обработке металлов давлением// Трение и износ , 1993 - т.14 - N3.-С. 471 - 478.
- 13.Бейгельзимер Я.Е., Спусканюк А.В., Варюхин В.Н., Эфрос Б.М. Моделирование произвольной деформации поликристаллов методом клеточных автоматов// Журнал технической физики.-1998.-N11.-С. 987-998.
- 14.Beygelzimer Y.Y., Spuskanyuk A.V., Varyukhin V.N. On The Loading Surface of Microinhomogeneous Materials/Recent Development in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes, IOS Press, 2001.- P.17-28
- 15.Beygelzimer Y.Y., Spuskanyuk A.V. The thick yield surface: idea and approach for investigating its structure//Philosophical Magazine A.- 1999.- V. 79.- No. 10.- P. 2437-2459.
- 16.Бейгельзимер Я.Е., Спусканюк А.В., Варюхин В.Н., Эфрос Б.М. Компьютерное моделирование пластической деформации поликристаллических материалов//Физика металлов и металловедение.- 1999.- Т. 87.- №6.- С. 38-48.
- 17.Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике.- Л.: Гидрометиздат, 1978.- 207 с.
- 18.Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. – М.: Мир,1990.– 342 с.
- 19.Нестационарные структуры и диффузионный хаос / Т.С. Ахромеев, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий и др.- М.: Наука, 1992. – 541 с.
- 20.Панин В.Е. Основы физической мезомеханики// Физическая мезомеханика.- 1998.- Т.1.- №1.- С.5-21.
- 21.Taylor G.I. Plastic Strain in Metals. – J. Inst. Metals.- 1938.- V.62.- P. 307-324.
- 22.Asaro R.J. Crystal Plasticity. – Trans. ASME, Ser. E, J. Appl. Mech.- 1983.- V.50.- № 4b.- P. 921-934.
- 23.Frost H.J., Ashby M.F. Deformation – Mechanisms Maps. – Pergamon Press,1982, 425 p.
- 24.Kroner E. On the Plastic Deformation of Polycrystals// Acta Met.- 1961.-V.9.- P.155-161.
- 25.Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H.Freeman and Company, 1983. – 468 p.