

УДК 539.4

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОМЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
 МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

АРЕФЬЕВ Б. А., ПАНОВКО В. М.

Вопросы деформирования твердых тел рассматриваются обычно на базе механики континуума (макроуровень) или с привлечением представлений о дефектах кристаллической решетки (микроуровень). Ниже дается описание предлагаемой модели поведения макротела под нагрузкой с позиций микромеханики [1, 2], то есть исходя из представлений о передаче нагрузки между структурными элементами через границу их соединения. При таком подходе любую металлическую систему предполагается рассматривать как совокупность структурных элементов (субзерен, зерен, частиц в порошковых компактах и т. п.), соединенных межструктурной прослойкой (субзеренная, межзеренная, межчастичная и т. п. границы, соответственно).

Рассмотрим объект цилиндрической формы диаметром D и длиной L , находящийся под воздействием внешних растягивающих сил. Согласно модели П. В. Тихомирова и С. П. Юшанова [3], примем, что объект состоит из N структурных элементов, представляющих собой коаксиальные цилиндры со стенкой толщиной d_0 , в центре которых расположен сплошной цилиндр диаметром d_0 . Одним из важнейших параметров, характеризующих распределение напряжения в структурных элементах объекта, является длина области передачи нагрузки (l_j) или такое расстояние от концов структурного элемента, на котором растягивающие напряжения в нем достигают напряжений течения материала τ .

Тогда, обозначив i номер структурного элемента (слоя), имеем $d_i = (2i - 1)d_0$, где $i = 1 \dots N$ и с учетом того, что на поверхности $i = N$, $N = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{d_0} + 1 \right)$. При $L \gg D$ нормальное напряжение, возникающее в структурном элементе (слое) по обоим его концам, может быть оценено, исходя из модели Розена [4] как:

$$\sigma_j = \tau \frac{S_j}{2F_i} \quad (1)$$

где $F_i = \frac{\pi}{4} (d_i^2 - d_{i-1}^2) = 2\pi d_0^2 (i - 1)$ — площадь поперечного сечения слоя, $S_j = \pi d_i l_j$ — контактная поверхность. Выражение (1) дает воз-

возможность подсчитать длину области передачи нагрузки $l_j \gg l_j$, на которой, вследствие действия касательных напряжений в межструктурной прослойке возникают нормальные напряжения σ_j . С учетом подстановок максимальная длина области передачи нагрузки на поверхностном слое (элементе) при $i=N$ будет

$$l_j^N = 4\sigma_j d_0 (N-1) / \tau (2N-1) \quad (2)$$

Иными словами: поверхностный слой равномерно нагруженного цилиндрического объекта упруго деформирован на длине $l_j^N \leq l_j^N$ от обоих концов и пластически — на длине $l_j^N > l_j^N$, где $\sigma_j = \sigma_j$.

В любом из нижележащих слоев $k+1$ ($k=N-1$) длина упруго-деформированных концов определяется выражением

$$l_j^{k+1} = l_j^k + \Delta l_j^{k+1} \quad (3)$$

Это выражение получено на основании представлений о том, что длина упруго-деформированного нагружаемого слоя ($k+1$ -слой) складывается из соответствующей длины нагружающего k -слоя (l_j^k) и некоторой дополнительной длины Δl_j^{k+1} , на протяжении которой упругие напряжения σ_j в слое возрастают до пластических, меняясь по закону (1). Так как взаимодействием слоев на участке $l_j^k < l_j^k$ также нельзя пренебречь, принимается, что участок $l_j^{k+1} < l_j^{k+1}$ загружен со стороны участка $l_j^k < l_j^k$ средним напряжением $\sigma_j/2$. Тогда Δl_j^{k+1} находится из (1), в котором $\sigma_j^{i-1} = \frac{\sigma_j}{2}$, а S_j^{k+1} и F_j^{k+1} определяются на основании введенных представлений, согласно которым $k+1$ геометрически равнозначна $i-1$. Тогда для каждого из k -слоев, лежащих под поверхностным N -слоем при $k=1 \dots N-2$ имеем

$$\Delta l_j^{k+1} = \frac{2\sigma_j}{\tau} \frac{i-1}{2i-1} d_0 = \frac{\sigma_j}{\tau} \frac{N-k-1}{N-k-1/2} d_0 \quad (4)$$

Для центрального (сплошного) слоя $i=1$, $k=N-1$ и $\Delta l_j^{N-1}=0$, то есть увеличения упруго-деформированной длины слоя не происходит. Тогда, подставив (2) и (4) в (3) и заменив $\tau = \sigma_j/2$ получим:

$$\Delta l_j^{k+1} = l_j^N + \sum_{k=1}^{N-2} \Delta l_j^k = 2pd_0 \left(\frac{N-1}{N-1/2} + \sum_{k=1}^{N-2} \frac{N-k-1}{N-k-1/2} \right) \quad (5)$$

Выражение (5) дает способ подсчета упруго-деформированной длины слоя в зависимости от общего числа слоев N , положения слоя относительно поверхности k , его толщины d_0 и качества межструктурной прослойки p . Величины N , k и d_0 имеют определенный геометрический смысл, тогда как физический смысл параметра p остается во многом неясным. Обычно при вычислении касательного напряжения

через нормальное принимают $\tau = \frac{\sigma_f}{2}$, что означает $\rho=1$. Однако такое допущение корректно лишь в случае, когда свойства прослойки равны свойствам структурного элемента, а передача нагрузки идет через всю геометрически определяемую поверхность контакта. Поскольку оба эти предположения не вполне корректны, в первом приближении можно допустить, что ρ может принимать любое значение, являясь в этом смысле характеристикой качества межструктурной прослойки и ее связи со структурным элементом.

Если принять d_0 равное размеру зерна в поликристалле, то $N = \frac{D}{d_0} \gg 1$ и первое слагаемое выражения (5) в скобках равно 2. Также примерно постоянным (0,86...0,99) выражение, стоящее под знаком Σ во втором слагаемом, что позволит выражение (5) существенно упростить и записать следующим образом:

$$\Delta l_f^{k+1} = 2\rho d_0(2 + k\xi) \quad (5a)$$

где k — число слоев, равное порядковому (от наружного) номеру слоя, на котором прекращается суммирование; $\xi = 0,95$ — коэффициент, учитывающий фактическую зависимость $(N - k - 1)/(N - k - 1/2)$ от k .

С помощью (5) или (5a) можно найти положение границы, разделяющей области упругой и пластической деформации в образце и затем оценить объемы упругой и пластической деформаций. Угол наклона границы раздела определяется выражением

$$\alpha = \arctg \frac{2l_f^{k-1-2}}{D} = \arctg \frac{2\rho[2 + 0,95(N-2)]}{(2N-1)} = \arctg p \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что угол наклона, определяющий положение границы упругих и пластических зон в материале, практически однозначно определяется качеством межструктурной прослойки и границы соединения ее со структурным элементом.

Вычисление упруго и пластически деформированных объемов по данному значению угла α производится на базе представлений о наличии конусов упругой деформации, основание которых совпадает с торцами рассматриваемого тела. Примером таких конусов для нагруженного с поверхности цилиндра является фигура АВДЕ на фиг. 1. Для случая, когда конусы упругой деформации пересекаются, общий объем упругих зон в материале равен удвоенному объему усеченного конуса АВДЕ и

$$V_{\text{упр.}}/V_2 = 1 - c/\text{tg}\alpha + 1/2(c/\text{tg}\alpha)^2 \quad (7)$$

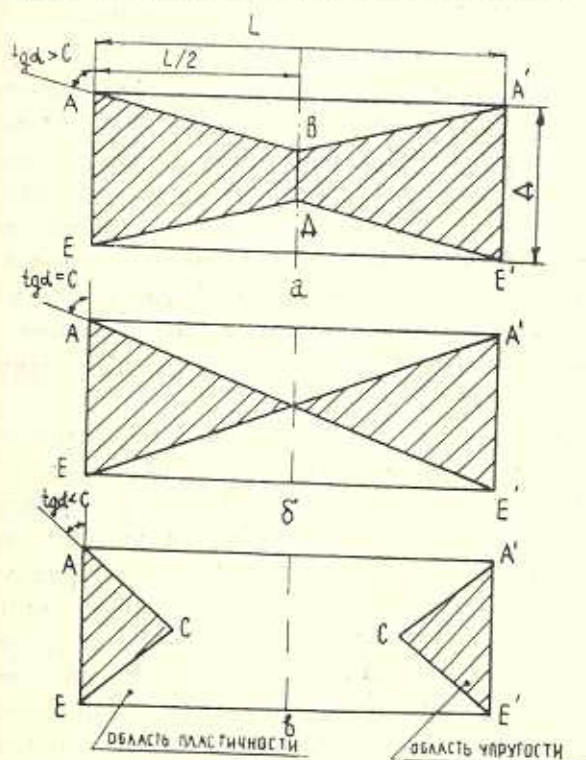
где $c = L/D$. Очевидно, что ситуация соответствует условию $\text{tg}\alpha > c$. Если $\text{tg}\alpha = c$, конусы упругой деформации касаются вершинами, то есть возникает предельный случай пересечения. При этом упруго-деформируемый объем составляет 33% общего. Если $\text{tg}\alpha < c$, упруго-деформированный объем вычисляется как удвоенный объем конуса АСЕ (фиг. 1), поскольку конусы упругой деформации не касаются друг друга. В этом случае

$$V_{\text{упр}}/V_2 = \text{tg} \alpha / 3c \quad (8)$$

Подставив теперь (6) в (8), получим окончательно:

$$V_{\text{упр}}/V_2 = p/3c \quad (9)$$

Выведенные выше соотношения позволяют связать физико-химические особенности строения границы соединения или межструктурной прослойки структурных элементов в твердых телах (p) с геометрическими параметрами деформируемого объема ($c = L/D$), объяснив характер поведения материала под нагрузкой как результат взаимодействия существующих зон упругости и пластичности, а также описать ряд широко известных экспериментальных наблюдений.



Фиг. 1

Пример влияния условия компактирования (изменения сдвиговой прочности и соотношения геометрических размеров) порошков на поведение компакта под нагрузкой приведен нами в работе [5]. Особый интерес представляет предлагаемая модель для рассмотрения процессов связанных со значительными пластическими деформациями твердого тела при обработке давлением. Так, наличие зон упругости вблизи торцов нагружаемых с поверхности заготовок можно объяснить независимость абсолютного уширения от ширины деформируемой заготовки при прокатке широких полос, что нашло свое выражение в описанной И. М. Павловым [6] теории уширения Бласса. Действительно, согласно

выше приведенного выражения (6), угол наклона границы упругих областей зависит только от качества границы соединения структурных элементов, то есть при $\operatorname{tg}\alpha < c$ объем «призм скольжения» — упругих зон располагается по ширине прокатываемой полосы, так как это представлено на фиг. 1в. При этом граница между упругими и пластическими зонами располагается под углом около 45° и так же, как предполагал Бласс, металл при прокатке деформируется путем скальвания по границе. Предполагается, что тотчас же, как только металл входит в валки, образуются две плоскости скольжения АС и СЕ, а соответствующая треугольная призма АСЕ начинает скользить по этим плоскостям и двигаться в сторону уширения.

Согласно А. И. Целикову [7] экспериментально установленным фактом является, что при прокатке высоких полос из металлов и сплавов ($l_g/h_{cp} = 0,5 \dots 1,0$, где l_g — длина дуги захвата, h_{cp} — средняя высота заготовки) деформация не проникает через все сечение, а локализуется в зонах, прилегающих к контактным поверхностям валков. Выше показано, что условие касания конусов областей упругой деформации $\operatorname{tg}\alpha = p = c$. При $p > c$ конусы областей упругой деформации пересекаются, то есть пластическая деформация материала не проникает на всю глубину сечения заготовки. Если $p = 1$, условие проникновения пластической деформации по всему сечению заготовки $c = l_g/h_{cp} > 1$, что соответствует экспериментальным данным А. И. Целикова.

Следующим примером, иллюстрирующим плодотворность модели, являются экспериментальные данные по обработке давлением неспеченных порошков, представляющий собой типичный пример материалов с искусственно создаваемой поверхностью соединения структурных элементов. Неспеченная порошковая заготовка характеризуется слабой связью между частицами, то есть высокими значениями p . Снижению p способствует пластическая деформация частиц в процессе компактирования заготовки, однако для ее осуществления необходимо, чтобы частицы попали в очаг деформации (например, при прокатке свободно засыпанных частиц). Согласно выражению (9), радикальным способом уменьшения протяженности (объема) зон упругости является повышение c (l_g/h_{cp}). Поэтому, например, при прокатке неспеченных порошков отношение l_g/h_{cp} выбирается обычно много большим, чем при прокатке монолитов [8].

Приведенные примеры показывают, что предложенная модель микромеханики деформирования позволяет проводить количественную оценку поведения материалов в условиях их получения обработкой давлением и эксплуатации. Добиваясь перераспределения соотношения упругих и пластических зон путем регулирования параметров обработки можно достичь направленного изменения свойств материала как в очаге деформации, так и в получаемом объекте, что открывает возможности создания научных основ конструирования материалов. Следует, однако,

иметь в виду, что полученные соотношения по оценке объема зон упругости и пластичности выведены при ряде упрощающих допущений. На практике, с учетом специфики нагружения, зеренной структуры материалов, отдельные элементы которых имеют различные размеры и ориентацию относительно внешних сил, реальных размеров очага деформации и т. п. элюры загрузки отдельных объемов макротела, существенно усложняется. Указанное приводит к хаотическому чередованию упругих и пластических зон и перераспределению соотношений между ними. Решение подобной задачи для этих случаев может быть осуществлено на базе натуральных экспериментов с использованием математического моделирования.

PHYSICAL MODEL OF MICRO-MECHANICS OF METAL SYSTEMS DEFORMATION

B. A. AREPHEV, V. M. PANOVKO

ՄԵՏԱԳԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՆԻ ԳԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ՄԻԿՐՄԵԿԱՆԻԿԱՅԻ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ

Բ. Ա. ԱՐԵՅԵՎ, Վ. Մ. ՊԱՆՈՎԿՈ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Կառուցվածքային էլեմենտների միջև նրանց միացման սահմանագծով բերի փոխանցման մասին պատկերացումների հիման վրա ցույց է արված բնակավորված մետաղական նյութերի վարքի քանակական դիսկրետային հնարավորությունը՝ դեֆորմացիայի տարբեր մակարդակների դեպքում: Բերված են փորձարարական հետազոտությունների օրինակներ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Браутман Л., Крок Р. Современные композиционные материалы.—М.: Мир, 1970. 672 с.
2. Келли А. Высокопрочные материалы.—М.: Мир, 1976. 261 с.
3. Тихомиров П. В., Юшанов С. П. Распределение напряжений при разрыве группы волокон в однонаправленном композите // Механика композ. материалов, Рига: РПИ, 1980, с. 28—43.
4. Розен Б. Механика упрочнения композиций // Волокнистые композиционные материалы.—М.: Мир, 1967, с. 54—96.
5. Арепьев Б. А., Пановко В. М. Формирование механических свойств порошковых материалов // Проблемы прочности, № 8, 1990, с. 64—67.
6. Павлов И. М. Теория прокатки.—Л.: Ленинград. мет. ин-т, 1934, 367 с.
7. Целихов А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах.—М.: Металлургия, 1962. 494 с.
8. Виноградов Г. А., Каташинский В. П., Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул.—М.: Металлургия, 1979, 224 с.

Институт металлургии им. А. А. Байкова

Поступила в редакцию
6.II.1990