

УДК 539.3

## Численный и статистический анализ влияния размера зерна на характеристики деформационного рельефа в поликристаллических образцах

О.С. Зиновьева<sup>1,2</sup>, В.А. Романова<sup>1</sup>, Р.Р. Балохонов<sup>1,3</sup>, Т.В. Емельянова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634055, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

Методами численного моделирования исследовано влияние размера зерна на характеристики деформационного рельефа, возникающего на поверхности поликристаллических образцов в условиях одноосного растяжения. Показано, что размер зерна влияет на высоту и ширину рельефных складок, возникающих на свободной поверхности. Проведен анализ эволюции рельефных образований в процессе нагружения с использованием методов математической статистики.

*Ключевые слова:* поликристаллические материалы, деформационный рельеф, численное моделирование, трехмерные модели, напряженно-деформированное состояние

## Numerical and statistical analysis of grain size effects on deformation-induced surface in polycrystalline specimens

O.S. Zinovieva<sup>1,2</sup>, V.A. Romanova<sup>1</sup>, R.R. Balokhonov<sup>1,3</sup>, and T.V. Emelianova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634055, Russia

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

The paper reports on numerical study that shows that the grain size affects qualitative and quantitative characteristics of the deformation relief formed on the surface of polycrystalline specimens under uniaxial tension. The evolution of relief patterns under loading is analyzed by methods of mathematical statistics.

*Keywords:* polycrystalline materials, deformation-induced surface roughness, numerical simulation, three-dimensional models, stress-strain state

### 1. Введение

Для активного использования в промышленности новых конструкционных материалов необходимо точно предсказывать их поведение в широком диапазоне нагрузок. Важными областями исследования и анализа являются поверхность материала и ее морфологические изменения в процессе нагружения [1–11]. Деформационный рельеф, формирующийся на изначально плоской, свободной от нагрузки поверхности в процессе нагружения, оказывает отрицательное влияние на характеристики деталей конструкций. Шероховатость поверхности негативно сказывается на отражательной способности, свариваемости и других физико-механических свойст-

вах материала. С другой стороны, существует точка зрения, что характеристики рельефа поверхности могут быть использованы для оценки внутреннего состояния материала [12]. Таким образом, изучение процессов, связанных с морфологическими изменениями поверхности в процессе нагружения, представляет не только фундаментальный, но и практический интерес.

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических данных (например [1–11]) механизмы формирования деформационного рельефа и факторы, влияющие на эти процессы, остаются предметом дискуссии среди ученых. Одним из важных факторов, оказывающих влияние на деформационный рельеф по-

верхности, является микроструктура материала. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования влияния на шероховатость таких микроструктурных параметров, как размер зерна, кристаллографическая ориентация, текстура (см., например, [3–5, 13]), подчеркивают актуальность исследований в данном направлении. В работе [13] было показано, что, хотя период и высота рельефных складок явным образом не коррелируют с параметрами микроструктуры, причиной возникновения деформационного рельефа является сложное напряженно-деформированное состояние, вызванное неоднородной внутренней структурой. В работах [3, 4] авторы экспериментально попытались установить корреляцию между кристаллографической ориентацией зерен, характеристиками деформационного рельефа и локализацией пластической деформации. В [3] было показано, что возможность возникновения деформационных складок определяется локальной кристаллографической ориентацией. На основании этого был сделан вывод, что локализация пластической деформации с одинаковой вероятностью возможна как на границах, так и во внутренних областях зерен, благоприятным образом ориентированных по отношению к приложенной нагрузке. Этот вывод, однако, опровергается данными работы [4], где было экспериментально показано, что определяющим фактором возникновения деформационных складок и локализации пластической деформации является не локальная кристаллографическая ориентация, а разориентация соседних зерен. Именно вдоль границ зерен, наиболее сильно отличающихся кристаллографической ориентацией, наблюдались экстремальные значения высот и впадин рельефных образований.

Ранее авторами [14, 15] для численного исследования изменения морфологии поверхности была разработана трехмерная конечно-разностная модель на прямоугольной кубической сетке. С использованием данной модели были изучены основные закономерности формирования и развития складчатых структур на поверхности высокопрочной стали ЭК-181 (16X12В2ФТар).

В настоящей работе с использованием структурно-механической модели, разработанной в [14] и модифицированной для описания поведения образцов с различным размером зерна, проведен анализ эволюции поверхностного деформационного рельефа, влияющего на данный процесс напряженно-деформированного состояния при растяжении.

## 2. Трехмерная модель поликристаллических образцов и условия численного эксперимента

Деформация поликристаллических образцов моделируется в трехмерной постановке, что позволяет рассмотреть свободную поверхность в явном виде. Для описания процессов деформирования используется структурно-механическая модель, предложенная в [14]. Моделирование упругопластического поведения сред со структурой проводится на основе моделей механики сплошных сред, т.к. процесс пластической деформации предполагает сохранение сплошности среды на мезо- и макроуровнях. Для расчета напряженно-деформированного состояния исследуемых структур решается общая система уравнений механики сплошных сред, включающая законы сохранения массы, количества движения, соотношения для скоростей деформации и определяющие уравнения, задающие связь между тензорами напряжений и деформаций. Подробная математическая формулировка и особенности численной реализации для сред с внутренними границами раздела приведены в [16, 17].

Внутренняя структура поликристаллического материала учитывается в явном виде, через зависимость констант материала (плотность, модули упругости и т.п.) от пространственных координат. Трехмерные структуры смоделированы методом пошагового заполнения. Подробно алгоритм работы метода изложен в [17]. Поликристаллы с периодической структурой генерировались на равномерной сетке с кубическими ячейками  $250 \times 100 \times 250$  с шагом 1 мкм (рис. 1). Предполагалось, что рост всех зерен подчиняется сферическому закону и происходит с одинаковой скоростью. Для

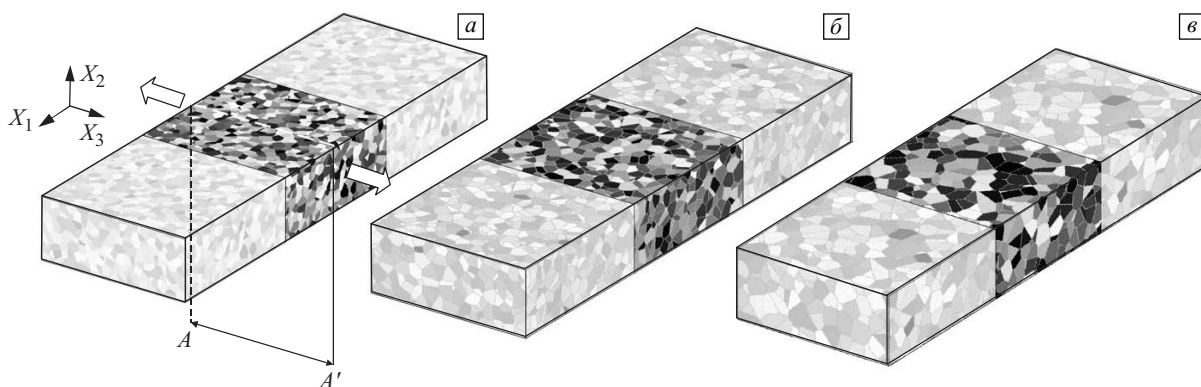


Рис. 1. Трехмерные модели поликристаллических структур со средним размером зерна 15 (а), 20 (б) и 30 мкм (в). Стрелками указано направление растяжения

этого на каждом  $n$ -м шаге генерации для всех зерен задавался закон приращения радиуса  $R_i^n = R_i^{n-1} + dr_i$ ,  $i = 1, \dots, N_g$ . Затем путем последовательного перебора ячеек с нулевым структурным индексом проверялось условие их попадания в область какого-либо растущего зерна:

$$(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2 \leq R_i^2, \quad (1)$$

где  $X_j, Y_j, Z_j$  и  $X_i, Y_i, Z_i$  — координаты  $j$ -й ячейки с нулевым индексом и  $i$ -го зерна соответственно. В случае выполнения условия (1)  $j$ -я ячейка присоединяется к  $i$ -му зерну, а ее индекс становится равным индексу зерна. Критерием окончания процедуры заполнения является отсутствие в рассматриваемой области ячеек с нулевым индексом. Для получения периодической структуры в заданном направлении для приповерхностных зерен проверялось дополнительное условие. Если зерно в процессе роста выходило за пределы поверхности, его рост продолжался на противоположной стороне объема путем параллельного переноса.

Средний диаметр зерна в моделях варьировался от 15 до 30 мкм, а их количество от 3537 до 442. В рамках численной реализации диаметр зерна рассчитывался как диаметр сферы такого же объема:

$$V_g = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = h_m \sqrt[3]{\frac{6N_c}{\pi}},$$

где  $V$  — объем сферы;  $N_c$  — число расчетных ячеек, приходящихся на зерно;  $h_m$  — шаг расчетной сетки.

Для строгого описания упругопластического отклика материала в рамках многоуровневого подхода необходимо использовать модели физической теории пластичности, которые в явном виде учитывают кристаллографическую ориентацию зерен и плоскостей скольжения и, соответственно, явно опираются на физику взаимодействия дислокаций и дислокационных структур [18–20]. Такие модели необходимо замыкать определяющими уравнениями на микроуровне, используя большое количество констант, полученных из независимых экспериментов. Необходимость учета выше-названных констант приводит к существенному усложнению математической задачи и численного решения. В случае малых деформаций, когда зерно практически не меняет свою ориентацию по отношению к приложенной нагрузке, зависимость напряжений течения от ориентации зерна по отношению к нагрузке можно заменить постоянной функцией текучести, зависящей только от степени деформации. Учет деформационного упрочнения таким образом осуществляется в рамках феноменологической теории пластичности, описывающей процессы микроуровня неявно, путем аппроксимации кривых нагружения.

В настоящей работе для исследования выбран модельный материал со свойствами, соответствующими высокопрочной стали ЭК-181 [15]. Согласно экспери-

Таблица 1

Механические свойства стали [15]

Характеристика	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\mu$ , ГПа	$K$ , ГПа	$\sigma_0$ , МПа
16X12B2ФТаР	7.8	82.03	159.09	498.66

ментальным данным, упругопластические характеристики монокристаллов железа в зависимости от ориентации могут отличаться на 50%. Однако сталь является гораздо более сложным материалом, зерно которого фактически представляет собой композит, содержащий разные фазы, и рассматривать поликристаллическую сталь как конгломерат монокристаллов железа не вполне корректно. Поэтому при построении модели разброс упругопластических характеристик зерен определялся по результатам измерения микротвердости и составлял 20%. Средние значения характеристик материала (плотность  $\rho$ , модуль сдвига  $\mu$ , модуль объемного сжатия  $K$ , начальный предел текучести  $\sigma_0$ ) приведены в табл. 1. В соответствии с цветовой шкалой, использованной на рис. 1, чем темнее зерно, тем выше его характеристики. На границе зерен выполняется условие идеального механического контакта, т.е. непрерывность смещений. Модель упругопластического поведения стали учитывает деформационное упрочнение через зависимость напряжений течения зерен от накопленной пластической деформации, полученную путем аппроксимации экспериментальных данных [15].

Эволюция деформационного рельефа и механическое поведение поликристаллических образцов исследовали в условиях одноосного растяжения. Схема нагружения структуры, периодической в направлении оси  $X_1$ , приведена на рис. 1, а. На боковых поверхностях образцов  $x_3 = 0$  и  $x_3 = L_3$  заданы постоянные смещения со скоростью  $v$ , имитирующие одноосное растяжение в направлении оси  $X_3$ :

$$U_3 \Big|_{x_3=0} = -v, \quad U_3 \Big|_{x_3=L_3} = v,$$

где  $x_i$  — пространственные координаты;  $U_i = \dot{x}_i$  — компоненты вектора скорости;  $L_i$  — размеры расчетной области в соответствующих координатных направлениях. На нижней поверхности выполняются условия симметрии относительно плоскости  $(x_1, 0, x_3)$ , верхняя свободна от внешней нагрузки. На боковых поверхностях  $x_1 = 0$  и  $x_1 = L_1$  задаются периодические граничные условия. Численное моделирование механического поведения поликристаллических структур осуществлялось методом конечных разностей, адаптированным для трехмерных структурно-неоднородных сред [16, 17, 21].

### 3. Анализ и обсуждение результатов

Результаты расчетов приведены на рис. 2–8. Сравнительный анализ результатов, полученных для поликристаллов со средним размером зерна 15, 20, 25 и 30 мкм,

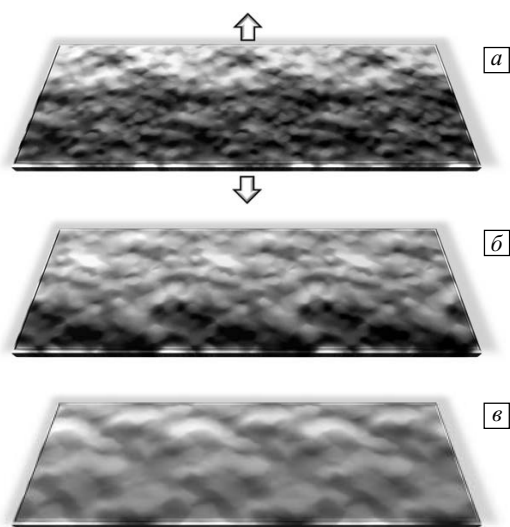


Рис. 2. Деформационный рельеф на поверхности модельных поликристаллов со средним размером зерна 15 (а), 20 (б) и 30 мкм (в),  $\epsilon = 2.9\%$ , стрелками указано направление растяжения

показал, что размер зерна оказывает существенное влияние на характеристики рельефных образований. При этом в процессах формирования деформационного рельефа наблюдаются как общие тенденции, так и отличия. На рис. 2 приведены картины рельефа на поверхностях поликристаллов со средним размером зерна 15, 20 и 30 мкм при растяжении образцов до 2.9 %. Соответствующие профили поверхности, снятые вдоль средних линий  $A-A'$  (см. рис. 1, а), приведены на рис. 3, а–в. Во всех образцах деформационный рельеф на свободной поверхности формируется с самого начала пластического течения в виде системы складок различного масштаба. Самые мелкие рельефные образования, наблюдающиеся в структуре крупных складок, связаны со смещением отдельных зерен друг относительно друга. Размер и форма таких образований явным образом коррелируют с размером и формой зерна. С увеличением размера зерна мелкие складки в структуре крупных исчезают.

Более крупные складки образованы группами зерен, вовлеченных в совместное смещение перпендикулярно свободной поверхности. Такие складки относятся к мезоскопическим образованиям. Хотя локальная микропластическая деформация осуществляется за счет движения дислокаций или точечных дефектов, процессы коллективного поведения зерен имеют недислокационную природу. Они обусловлены наличием границ зерен — геометрических дефектов более крупного масштаба по сравнению с дефектами кристаллической решетки. С точки зрения математической модели неоднородную структуру материала можно описать кусочно-

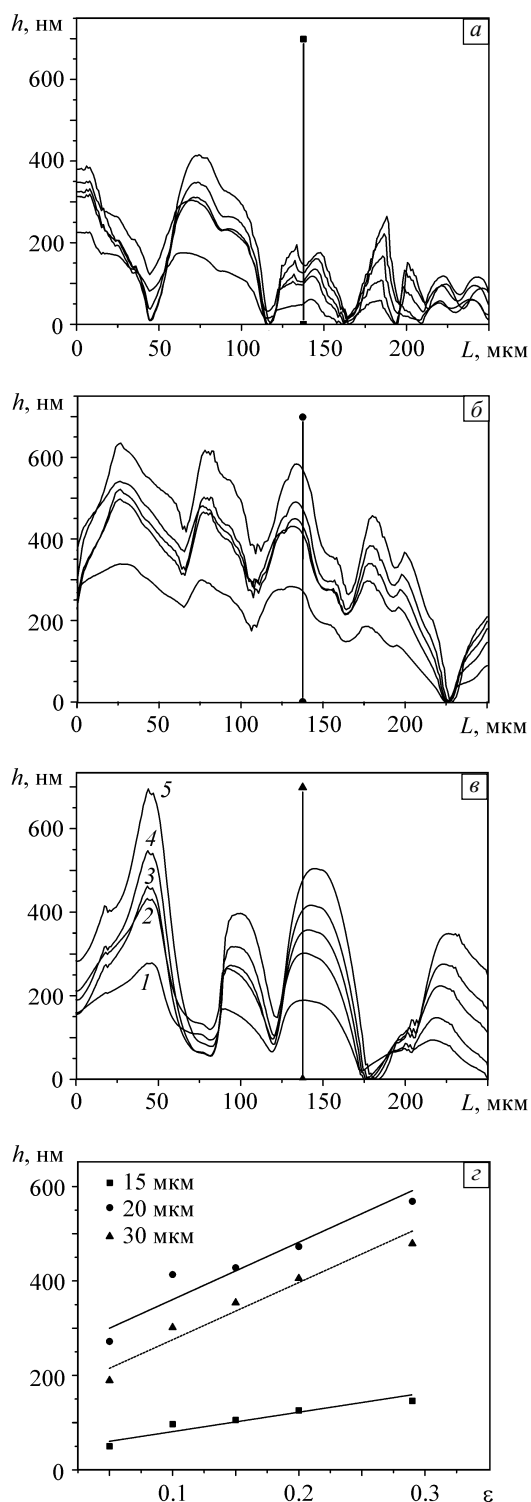


Рис. 3. Профили поверхности, снятые вдоль средней линии  $A-A'$  (см. рис. 1, а) образцов с размером зерна 15 (а), 20 (б) и 30 мкм (в) при различных степенях деформации  $\epsilon$  (цифры в порядке возрастания соответствуют  $\epsilon = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.9\%$ ) и зависимости высоты рельефа  $h$  в точках, указанных соответствующими символами на кривых (а–в), от степени полной деформации

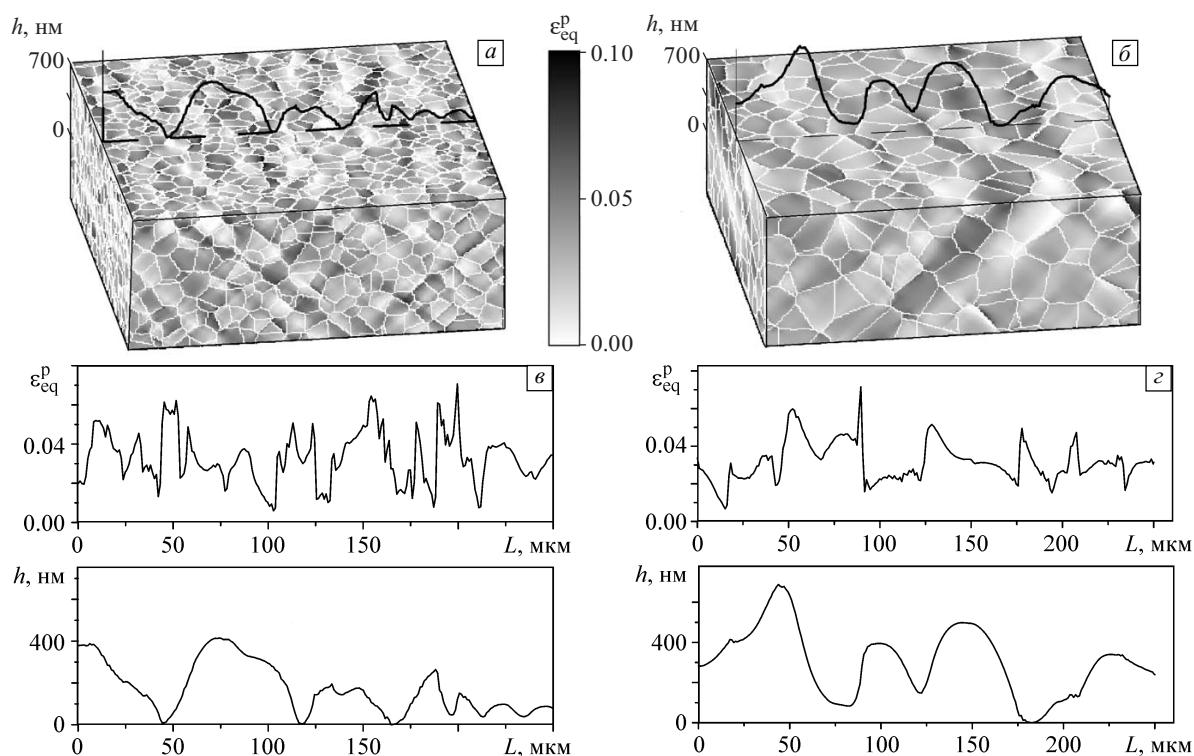


Рис. 4. Интенсивность пластической деформации в поликристаллических образцах с размером зерна 15 (а) и 30 мкм (б) и соответствующие профили поверхности и пластической деформации, снятые вдоль средней линии образцов (в, з);  $\epsilon = 2.9\%$

непрерывной функцией от координат и накопленной деформации или времени. В качестве начальных условий зеренная структура недеформированного материала может быть описана кусочно-постоянной функцией от координат — в пределах каждого зерна свойства однородные и меняются только при переходе через границу. В процессе нагружения, когда деформация отлична от нуля, функции упругопластического отклика, определенные в пределах зерна, в общем случае являются нелинейными. Пространственная нелинейность физико-механических свойств в процессе нагружения приводит к возникновению специфических нелинейных мод деформационного поведения на мезоуровне и коллективным эффектам. В условиях одноосного растяжения и стесненной деформации в направлении боковых поверхностей мезоскопический рельеф формируется в виде складок, высота которых увеличивается с увеличением размера зерна (рис. 2, 3). При этом поперечный размер складок от размера зерна зависит слабо. Чем мельче зерно, тем больше кристаллитов участвуют в формировании складки (рис. 4, а, б). Поскольку формирование мезоскопических складок осуществляется за счет относительного движения зерен, складка, содержащая большее количество зерен, характеризуется лучшей способностью к аккомодации. Средняя высота таких складок растет медленнее с ростом пластической деформации (рис. 3, з). Наличие мелких складок в

структуре крупных коррелирует с возникновением большего количества областей локализации пластической деформации (рис. 4, в, з). Поскольку градиенты смещений внутри складок определяют деформацию, в локализации пластического течения также выделяется иерархия полос, связанных с деформацией по границам зерен и формированием мезоскопических областей локализации, образованных за счет смещения протяженных фрагментов материала.

Во всех образцах рельефные образования, возникшие на ранней стадии пластического течения, качественно слабо меняются с ростом степени деформации, а высота складок растет по линейному закону (см. рис. 3). Зависимости высот поверхности от степени деформации, аппроксимированные линейными функциями, приведены на рис. 3, з.

Для выявления закономерностей эволюции деформационного рельефа и для количественного сравнения образцов с разным размером зерна был проведен статистический анализ характеристик деформационного рельефа на разных стадиях нагружения. Для исследуемых образцов на разных стадиях нагружения были построены гистограммы распределения высот всех точек поверхности, которые были аппроксимированы соответствующими плотностями распределения вероятностей (рис. 5, 6). При степени деформации  $\epsilon = 2.9\%$  были проверены статистические гипотезы о виде закона рас-

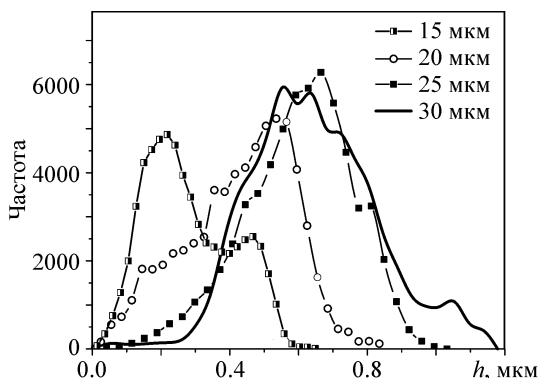


Рис. 5. Распределение высот точек поверхности образцов с размером зерна 15, 20, 25 и 30 мкм

пределения. Для проверки использовался критерий  $\chi^2$ . Результаты показали, что распределение параметра средней высоты точек поверхности во всех случаях, за исключением образца со средним размером зерна 15 мкм, не противоречит нормальному закону на уровне значимости 0.01 (рис. 5). Для структуры со средним размером зерна 15 мкм гистограммы распределения высот являются мультимодальными (рис. 6). Гистограмма высот, соответствующая степени деформации образца  $\epsilon = 0.5\%$  (рис. 6, а), демонстрирует тримодальное распределение с четко выраженными модами 0.07, 0.15 и 0.22 мкм, что говорит о наличии трех основных систем складок и является показателем наличия иерархии рельефных складок на поверхности. При увеличении степени деформации распределение эволюционирует в бимодальное (рис. 6, б), что говорит о слиянии мелких складок.

Для количественной характеристики полученного деформационного рельефа были рассчитаны следующие параметры статистического распределения высот точек поверхности  $h$ :

среднее

$$\bar{h} = \frac{1}{nm} \sum_0^n \sum_0^m h,$$

среднеквадратическое отклонение

$$h_{\text{rms}} = \frac{1}{nm} \sqrt{\sum_0^n \sum_0^m (h - \bar{h})^2},$$

коэффициент асимметрии

$$h_{\text{sk}} = \frac{1}{nmh_{\text{rms}}^3} \sum_0^n \sum_0^m (h - \bar{h})^3,$$

коэффициент эксцесса

$$h_{\text{kur}} = \frac{1}{nmh_{\text{rms}}^4} \sum_0^n \sum_0^m (h - \bar{h})^4 - 3,$$

где  $n$  и  $m$  — количество точек поверхности вдоль осей  $X_1, X_3$  (см. рис. 1, а).

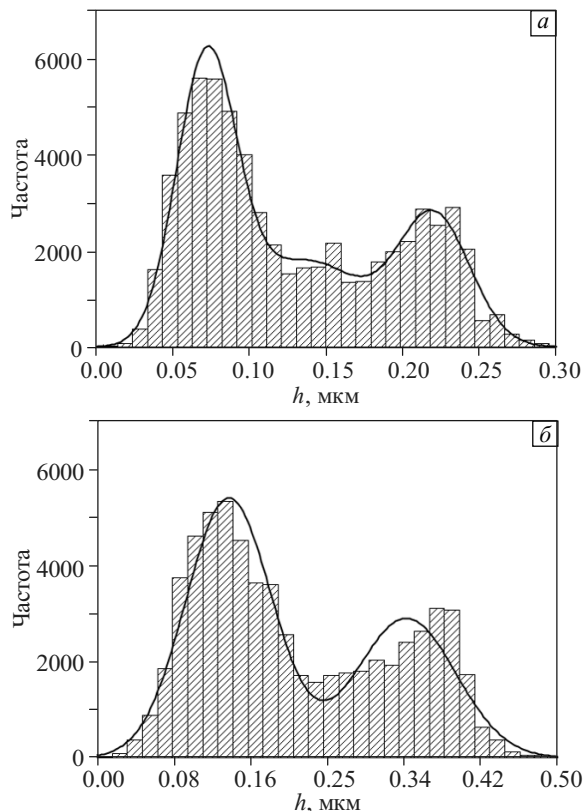


Рис. 6. Гистограммы распределения высот точек поверхности образца с размером зерна 15 мкм,  $\epsilon = 0.5\%$  (а),  $1.2\%$  (б)

Результаты анализа для степени деформации  $\epsilon = 2.9\%$  приведены в табл. 2. Средняя высота  $\bar{h}$  и ее среднеквадратическое отклонение  $h_{\text{rms}}$  растут с увеличением размера зерна, что согласуется с данными работы [5]. Коэффициент асимметрии  $h_{\text{sk}}$  характеризует асимметрию распределения рассматриваемой случайной величины. Величина коэффициента асимметрии положительна, если правый хвост распределения длиннее левого, отрицательна в противном случае, а в случае симметрии распределения относительно математического ожидания равна нулю. Как показано в табл. 2, в

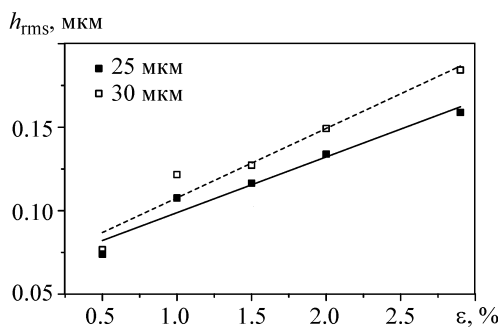


Рис. 7. Зависимости среднеквадратических отклонений высот точек поверхности образцов с размером зерна 25 и 30 мкм от степени полной деформации

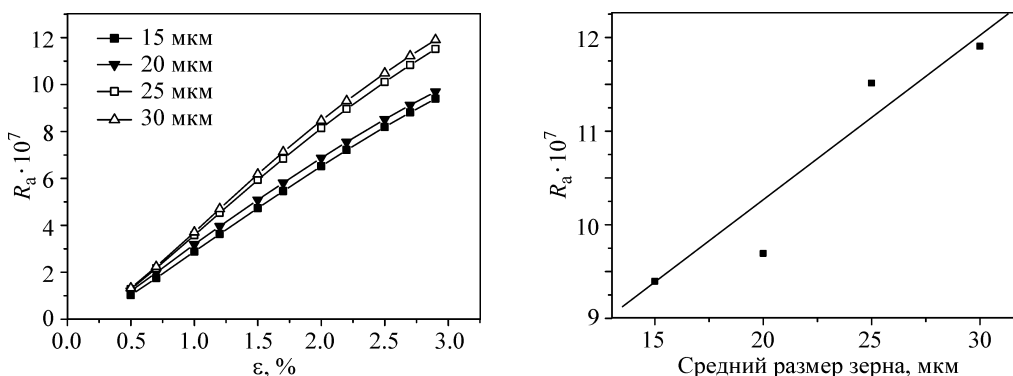


Рис. 8. Зависимости среднего значения шероховатости  $R_a$  модельных образцов со средним размером зерна 15, 20, 25 и 30 мкм от степени полной деформации  $\epsilon$  (а), от среднего размера зерна при растяжении до 2.9 % (б)

случае образцов 1 и 2 он отрицателен, что свидетельствует о преобладании высот ниже средней. Если за нулевой уровень поверхности принять среднюю линию и считать точки поверхности ниже средней линии впадинами, а выше средней линии — пиками, то отрицательный коэффициент асимметрии говорит о преобладании впадин над пиками. В случае образца со средним размером зерна 30 мкм положительный коэффициент асимметрии свидетельствует об обратном. Хотя такая трактовка впадин и пиков является достаточно спорной, именно такая методика используется для анализа рельефных образований в экспериментах [4, 5, 7, 8]. Коэффициент эксцесса  $h_{kur}$  (или коэффициент островершинности) является мерой остроты пика распределения случайной величины. В случае первого образца отрицательная величина  $h_{kur}$  говорит о более гладком пике и более коротких хвостах, чем у идеального гауссовского распределения. Для образцов 2 и 3 значения коэффициента эксцесса положительны, соответственно, у распределений наблюдаются более острые пики и более длинные хвосты.

В табл. 3 приведены данные статистической обработки эволюции высот в процессе деформирования в образце со средним размером зерна 30 мкм. Средняя высота  $\bar{h}$  и ее среднеквадратическое отклонение  $h_{rms}$

(рис. 7) растут с увеличением степени деформации образца, что согласуется с данными работы [7]. В работе [8] экспериментально было показано, что в случае наблюдения деформационного рельефа на поверхности образца в условиях плоской деформации и двусосного растяжения величина  $h_{rms}$  выходит на насыщение, в отличие от случая одноосного растяжения, в котором величина среднеквадратического отклонения высот точек поверхности продолжает расти пропорционально степени нагружения. Коэффициент асимметрии  $h_{sk}$  распределения, за исключением самого начала пластического течения, положителен, что свидетельствует о преобладании пиков над впадинами. С увеличением степени деформации коэффициент асимметрии пропорционально растет. Коэффициент эксцесса  $h_{kur}$  положителен и, в отличие от предыдущих величин, не отражает никаких систематических изменений в зависимости от степени деформации.

Существует множество различных методик оценки шероховатости поверхности (например, [9]). Зачастую для характеристики шероховатости поверхности используются параметры, зависящие только от высоты точек поверхности (например, среднее арифметическое шероховатости [10]), поскольку они просты для оценки как в экспериментах, так и в расчетах. В настоящей ра-

Таблица 2

Анализ высот поверхности поликристаллов с различным размером зерна при  $\epsilon = 2.9 \%$

№	Размер зерна, мкм	$\bar{h}$ , мкм	$h_{rms}$ , мкм	$h_{sk}$	$h_{kur}$
1	20	0.43062	0.15856	-0.38298	-0.48108
2	25	0.60149	0.15888	-0.45705	0.07196
3	30	0.64268	0.18427	0.22712	0.17623

Таблица 3

Анализ высот поверхности поликристалла со средним размером зерна 30 мкм при различных степенях деформации

$\epsilon, \%$	$\bar{h}$ , мкм	$h_{rms}$ , мкм	$h_{sk}$	$h_{kur}$
0.5	0.29790	0.07665	-0.05921	0.30445
1.0	0.46121	0.12162	0.03280	0.28208
1.5	0.48810	0.12723	0.13482	0.37862
2.0	0.54806	0.14920	0.17488	0.27026
2.9	0.64268	0.18427	0.22712	0.17623

боте для количественного сравнения рельефных образований, полученных в разных расчетах, предлагается использовать безразмерный параметр шероховатости  $R_a$ , представленный в виде отношения площади поверхности деформированного образца  $S_f$  к площади ее горизонтальной проекции  $S_f$ :

$$R_a = \frac{S_f}{S_f} - 1.$$

Такая формулировка имеет ясный физический смысл — чем больше величина  $R_a$ , тем более выраженный рельеф образуется на поверхности. Кроме того, представление шероховатости в безразмерном виде делает возможным сравнение рельефных образований разного масштаба. Анализ значений параметра шероховатости в зависимости от степени деформации показал, что зависимость носит нелинейный характер (рис. 8, а). Увеличение среднего диаметра зерен приводит к увеличению значения параметра шероховатости (рис. 8, б), что согласуется с результатами работ [5, 11]. В работе [5] с помощью методов статистического анализа было показано, что рост параметра шероховатости происходит за счет слияния малых рельефных образований в более крупные. Результаты численного анализа, проведенного в настоящей работе, подтверждают этот вывод и согласуются с экспериментальными данными ряда других работ. В [2, 14, 15] рельефные складки такого типа наблюдались на поверхности деформируемых сталей и титановых сплавов и характеризовались как двойные и одинарные спирали. Подобные рельефные образования характерны и для алюминиевых сплавов. В ряде работ (см., например, [6]) описаны рельефные складки, имеющие форму «косичек», ориентированных перпендикулярно оси растяжения, возникающие на поверхности в процессе формовки.

#### 4. Заключение

В работе исследовано влияние размера зерна на количественные и качественные характеристики деформационного рельефа, возникающего на поверхности поликристаллических образцов в условиях одноосного растяжения. Построены трехмерные структурно-механические модели с разным размером зерна. Проведены расчеты деформации образцов в условиях одноосного растяжения методом конечных разностей. Деформационный рельеф поверхности, полученный в результате расчетов, исследован с использованием методов статистического анализа.

Результаты моделирования показали, что во всех рассмотренных случаях деформационный рельеф формируется с самого начала пластического течения в виде складок, ориентированных перпендикулярно оси нагружения. Самые мелкие рельефные образования, наблюдающиеся в структуре крупных складок, связаны со смещением отдельных зерен друг относительно друга.

Более крупные мезоскопические складки образованы группами зерен, вовлеченных в совместное смещение перпендикулярно свободной поверхности. Поскольку градиенты смещений определяют деформацию, в локализации пластического течения также выделяется иерархия полос, связанных с пластическим течением по границам отдельных зерен и формированием мезополос локализации, связанных с коллективным движением групп зерен.

С увеличением среднего размера зерна поликристалла деформационный рельеф поверхности становится более сглаженным за счет исчезновения мелких складок, обусловленных движением отдельных зерен друг относительно друга. Высота складок уменьшается с уменьшением размера зерна, тогда как поперечный размер складок от размера зерна зависит слабо.

Для структуры со средним размером зерна 15 мкм было показано, что гистограммы распределения высот всех точек поверхности наилучшим образом аппроксимируются мультимодальными распределениями, что подчеркивает наличие иерархии рельефных складок на поверхности. По мере увеличения нагрузки распределение эволюционирует из тримодального в бимодальное, что позволяет сделать вывод о слиянии двух систем складок. Совокупность высот рельефа на поверхности образцов с размером зерна от 20 до 30 мкм подчиняется нормальному закону распределения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 14-19-00766).

#### Литература

1. *Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах* / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.  
*Surface Layers and Internal Interfaces in Heterogeneous Materials* / Ed. by V.E. Panin. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2006. – 520 p.
2. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физ. мезомех. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7–16.  
*Panin V.E., Panin A.V. Effect of the surface layer in a solid under deformation* // Phys. Mesomech. – 2005. – V. 8. – No. 5–6. – P. 7–14.
3. Raabe D., Sachtleber M., Weiland H. et al. Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining // Acta Mater. – 2003. – V. 51. – No. 6. – P. 1539–1560.
4. Stoudt M.R., Levine L.E., Creuziger A., Hubbard J.B. The fundamental relationships between grain orientation, deformation-induced surface roughness and strain localization in an aluminum alloy // Mater. Sci. Eng. A. – 2011. – V. 530. – P. 107–116.
5. Stoudt M.R., Ricker R.E. The relationship between grain size and the surface roughening behavior of Al-Mg alloys // Metall. Mater. Trans. A. – 2002. – V. 33. – No. 9. – P. 2883–2889.
6. Wittridge N.J., Knutsen R.D. A microtexture based analysis of the surface roughening behavior of an aluminum alloy during tensile deformation // Mater. Sci. Eng. – 1999. – V. 269. – No. 1–2. – P. 205–216.
7. Stoudt M.R., Hubbard J.B. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet // Acta Mater. – 2005. – V. 53. – No. 16. – P. 4293–4304.
8. Stoudt M.R., Hubbard J.B., Iadicola M.A., Banovic S.W. A study of the fundamental relationships between deformation-induced surface



- roughness and strain localization in AA5754 // Metall. Mater. Trans. A. – 2009. – V. 40. – No. 7. – P. 1611–1622.
9. *Valkonen A.E.* Plastic Deformation and Roughness of Free Metal Surfaces. – Columbus, OH: Ohio State University, 1987. – 459 p.
  10. *Thomas T.R.* Rough Surfaces. – London: Longman, 1982. – 261 p.
  11. *Dai Y.Z., Chiang F.P.* On the mechanism of plastic deformation induced surface roughness // J. Eng. Mater. Technol. – 1992. – V. 114. – No. 4. – P. 432–438.
  12. *Кузнецов П.В., Панин В.Е., Левин К.В. и др.* Фрактальная размерность и эффекты корреляции мезоструктуры пластически деформированных поликристаллов кремнистого железа и аустенитной коррозионно-стойкой стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 3. – С. 4–10.  
*Kuznetsov P.V., Panin V.E., Levin K.V. et al.* Fractal dimensions and correlation effects of mesostructure in plastically deformed polycrystalline silicon iron and corrosion resistant austenitic steel // Metalloved. Term. Obr. Met. – 2001. – No. 3. – P. 4–10.
  13. *Romanova V.A., Balokhonov R.R., Schmauder S.* Numerical study of mesoscale surface roughening in aluminum polycrystals under tension // Mater. Sci. Eng. A. – 2013. – V. 564. – P. 255–263.
  14. *Романова В.А., Зиновьева О.С., Балохонов Р.Р., Ковалев В.А.* Формирование мезоскопического рельефа на поверхности стальных образцов при одноосном растяжении: эксперимент и моделирование // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 5. – С. 32–40.  
*Romanova V.A., Zinovieva O.S., Balokhonov R.R., Kovalev V.A.* Mesoscopic relief formation on the surface of steel specimens in uniaxial tension // Deform. Razr. Mater. – 2012. – No. 5. – P. 32–40.
  15. *Панин А.В., Романова В.А., Балохонов Р.Р., Перевалова О.Б., Сиячкова Е.А., Емельянова О.С., Леонтьева-Смирнова М.В., Карпенко Н.И.* Формирование мезоскопических складчатых структур на поверхности поликристаллов стали ЭК-181 в условиях одноосного растяжения // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 57–68.  
*Panin A.V., Romanova V.A., Balokhonov R.R., Perevalova O.B., Sinyakova E.A., Emelyanova O.S., Leontieva-Smirnova M.V., Karpenko N.I.* Mesoscopic surface folding in EK-181 steel polycrystals under uniaxial tension // Phys. Mesomech. – 2012. – V. 15. – No. 1–2. – P. 94–103.
  16. *Wilkins M.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. – Berlin: Springer-Verlag, 1999. – 265 p.
  17. *Romanova V., Balokhonov R., Makarov P. et al.* Simulation of elasto-plastic behavior of an artificial 3D-structure under dynamic loading // Comp. Mat. Sci. – 2003. – V. 28. – No. 3–4. – P. 518–528.
  18. *Barbe F., Decker L., Jeulin D., Cailletaud G.* Intergranular and intragranular behavior of polycrystalline aggregates. Part 1: F.E. model // Int. J. Plast. – 2001. – V. 17. – No. 4. – P. 513–536.
  19. *Трусов П.В., Швейкин А.И.* Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Прямые модели // Физ. мезомех. – 2011. – Т. 14. – № 5. – С. 5–30.  
*Trusov P.V., Shveykin A.I.* Multilevel crystal plasticity models of single and polycrystals. Direct models // Phys. Mesomech. – 2013. – V. 16. – No. 2. – P. 99–124.
  20. *Трусов П.В., Волегов П.С., Швейкин А.И.* Конститутивная упруго-вязкопластическая модель ГЦК-поликристаллов. Теория, алгоритмы, приложения. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 156 с.  
*Trusov P.V., Volegov P.S., Shveykin A.I.* Constitutive Elastic-Ductile-Plastic Model of fcc Polycrystals. Theory, Algorithms, Application. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 156 p.
  21. *Romanova V.A., Soppa E., Schmauder S., Balokhonov R.R.* Mesomechanical analysis of the elasto-plastic behavior of a 3D composite-structure under tension // Comput. Mech. – 2005. – V. 36. – No. 6. – P. 475–483.

Поступила в редакцию  
28.06.2014 г.

Сведения об авторах

Зиновьева Ольга Сергеевна, инж.-иссл. ИФПМ СО РАН, асп. ТГУ, emelyanova@ispms.tsc.ru  
 Романова Варвара Александровна, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, varvara@ispms.tsc.ru  
 Балохонов Руслан Ревович, д.ф.-м.н., внс ИФПМ СО РАН, снс ТПУ, rusy@ispms.tsc.ru  
 Емельянова Татьяна Вениаминовна, ст. преп. ТГУ, tv\_em@mail.ru