

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ И С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Зиновьева О.С.^{1,2}, Романова В.А.¹, Емельянова Т.В.²

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, emeljanova@ispms.tsc.ru

Целью настоящей работы является численное исследование влияния модифицированного слоя на развитие шероховатости поверхности модельных поликристаллов в условиях одноосного растяжения. Численное моделирование проводилось на образцах, соответствующих по механическим характеристикам стали ЭК-181 (16X12B2ФТaP) [1] в основном состоянии и с модифицированным поверхностным слоем.

Механизмы возникновения и развития шероховатости поверхности образцов поликристаллической стали ЭК-181 экспериментально исследованы в [1]. В качестве характеристик модельного поликристалла в основном состоянии были приняты характеристики стали после закалки и старения, для модельного образца с модифицированным поверхностным слоем – характеристики стали после закалки, старения и ультразвуковой обработки [1]. В связи с существенной (на 2 порядка) разницей в размерах зерна в основном материале и модифицированном слое зеренная структура поверхности в явном виде не вводилась.

Для моделирования процессов деформации мезомасштабного уровня применен подход механики сред со структурой. Математическая постановка трехмерной динамической задачи подробно приведена в [2]. Генерация поликристаллических структур осуществлялась при помощи метода пошагового заполнения [3]. С целью задания периодических граничных условий базовый алгоритм метода пошагового заполнения [3] был модифицирован для генерации периодической структуры (рис. 1).



Рис. 1. Модельный поликристалл с периодической структурой, сгенерированный на сетке $200 \times 63 \times 200$, стрелками указано направление растяжения

Кристаллографическая разориентация зерен учитывалась через разброс упругих и пластических свойств в пределах 10 %. Функция деформационного упрочнения получена путем аппроксимации экспериментальных данных [1]:

$$\sigma'_i = \sigma'_0 + 529 - 539 \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon_{pl}^i}{0.015854}\right) \text{ [МПа]},$$

где σ'_0 – начальный предел текучести i -го зерна, ε_{pl}^i – интенсивность накопленной пластической деформации. В случае образца с модифицированным поверхностным слоем за-

давалось линейное изменение механических характеристик от максимальных на поверхности до соответствующих основному материалу. Толщина модифицированного поверхностного слоя варьировалась от 5 до 15 мкм. Трехмерные расчеты проводились методом конечных разностей [2].

Расчеты показали, что на начальной стадии пластического течения на свободной поверхности формируется деформационный рельеф в виде периодических спиралевидных складок шириной в несколько размеров зерна и высотой до 150 нм (рис. 2). На начальной стадии пластического течения основного материала, деформация на поверхности протекает практически однородно, поскольку модифицированный слой остается упругим. Пластическое деформирование поверхностного слоя обуславливает формирование складчатых структур спиралевидной формы, ориентированных перпендикулярно к направлению растяжения. Показано, что рельеф образца с модифицированным поверхностным слоем более сглажен: чем толще слой, тем меньше в структуре крупных складок проявляются мелкие, связанные с совместным движением зерен друг относительно друга (рис. 3).

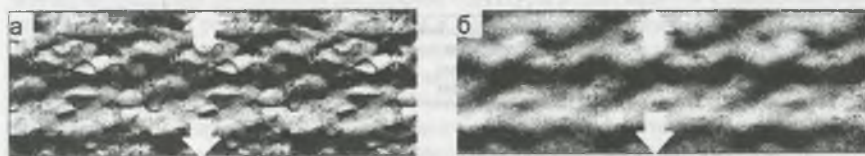


Рис. 2. Деформационный рельеф на поверхности модельного поликристалла высокопрочной стали в основном состоянии (а) и с модифицированным поверхностным слоем толщиной 10 мкм (б), $\varepsilon = 2.4\%$

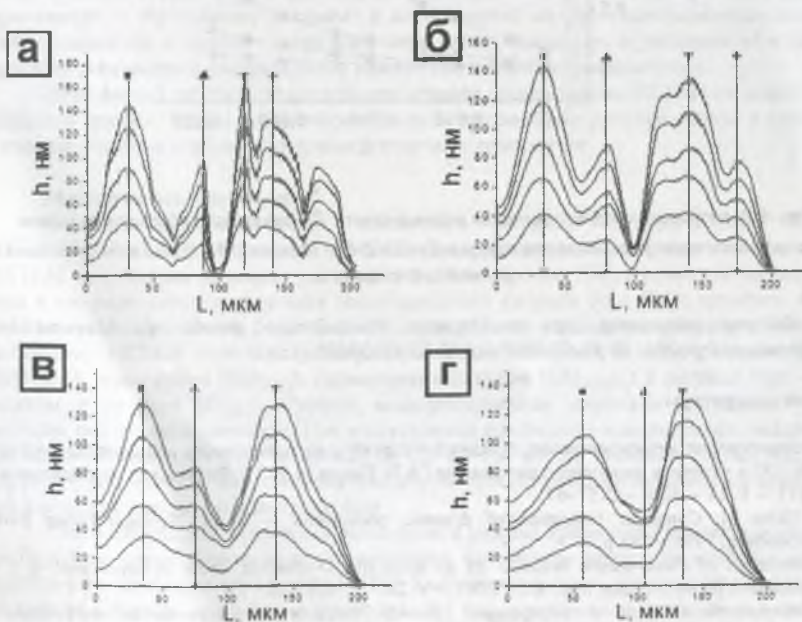


Рис. 3. Профили поверхности вдоль средней линии образца в основном состоянии (а) и с модифицированным поверхностным слоем толщиной 5 (б), 10 (в) и 15 мкм (г) при различных степенях деформации ε (цифры в порядке возрастания соответствуют $\varepsilon = 0.5; 1; 1.5; 2; 2.4$)

Ширина крупных складок практически не изменяется по сравнению с образцом в основном состоянии. Продемонстрировано, что параметр шероховатости R_a поверхности модельного поликристалла растет по линейному закону с увеличением степени полной деформации. Параметр шероховатости рассчитывался по следующей формуле:

$$R_a = \frac{S_r}{S_f} - 1,$$

где S_r и S_f – площадь шероховатой и плоской поверхностей. Полученная картина отлично согласуется с результатами вышеописанного эксперимента, а также с результатами других экспериментов (см., например, монографию [4]).

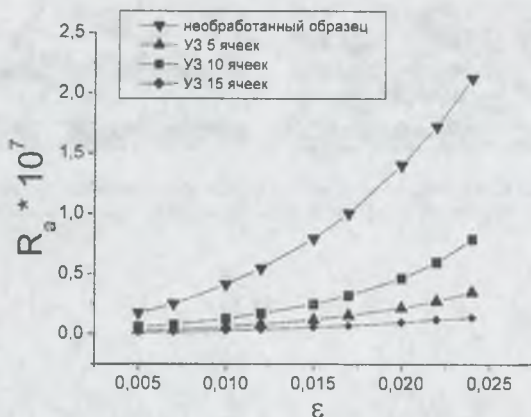


Рис. 4. Зависимости среднего значения шероховатости R_a модельного образца в основном состоянии и с модифицированным поверхностным слоем толщиной 5, 10 и 15 мкм от степени полной деформации ε

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-08-00084-а, № 12-01-00436-а).

Список литературы

- 1 Формирование мезоскопических складчатых структур на поверхности поликристаллов стали ЭК-181 в условиях одноосного растяжения / А.В. Панин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т 14. – № 4. – С. 57–67.
- 2 Wilkins M. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. – 265 p.
- 3 Simulation of elasto-plastic behavior of an artificial 3D-structure under dynamic loading / V Romanova [et al] // Comp. Mat. Sci. – 2003. – V. 28. – P. 518–528.
- 4 Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балохонов [и др.]; под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с. – (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 8).