

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭВОЛЮЦИИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МАТЕРИАЛЕ С ПОКРЫТИЕМ**

С.А. Мартынов.

Научный руководитель: в. н. с. д.ф.-м.н. Р.Р. Балохонов
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии
наук (ИФПМ СО РАН),
Россия, г.Томск, пр. Академический 2/4, 634021
E-mail: martynov@ispms.tsc.ru

**NUMERICAL MODELING OF OF EVOLUTION STRESS-STRAIN STATE IN COATED
MATERIALS.**

S.A. Martynov.

Scientific Supervisor: I. r. s, Dr R.R Balokhonov
Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS,
Russia, Tomsk, 2/4, pr. Akademicheskii, 634021,
E-mail: martynov@ispms.tsc.ru

***Abstract.** The interfacial mechanisms of the stress concentration in materials with modified surface layers are investigated. A dynamic boundary-value problem in a plane-strain formulation is solved numerically by the finite-difference method. The geometry of a curvilinear interface corresponds to the configuration found experimentally and is explicitly accounted for in the calculations. Both the experimentally observed microstructure of a sample with an serrated coating-substrate interface and a model microstructure with an ideal sinusoidal shape of this boundary were considered. The constitutive model assumes that the modified surface layers are elastic, while the elasticity of the base material is followed by plastic flow which provides isotropic strain hardening. Serrated and wavy base material-surface layer interfaces observed experimentally are assigned explicitly in calculations. Two stages in the evolution of the stress concentration are found to occur due to irregular interfacial geometry. The stress concentration in near-interfacial regions turns out to depend on the parameters of sinusoidal wavy interface and coating thickness.*

Введение. Управляя механическими свойствами поверхностных слоёв, можно добиться существенного повышения эксплуатационных характеристик материалов и конструкций. Большинство современных материалов – это функционально–градиентные материалы или материалы с покрытием. Технологии поверхностного упрочнения широко применяются в различных отраслях промышленности, включая нефтеэнергетический комплекс, авиа– и автомобилестроение, сельское хозяйство и т.д., для повышения срока службы, а также восстановления изношенных деталей машин и механизмов [1]. Целью настоящей работы является - методами численного моделирования выявить особенности и закономерности деформирования композиции «пластичная подложка–хрупкое прочное покрытие», исследовать влияние структуры и геометрических характеристик покрытия на характер локализованного пластического течения в стальной подложке и разрушения боридного покрытия при растяжении.

Постановка задачи и результаты моделирования. Сталь с керамическим покрытием, полученным с помощью метода диффузионного борирования, обладают ярко выраженной границей раздела. Решение задачи о деформировании такого рода материалов аналитическими методами не представляется возможным, поэтому для исследований выбран численный метод конечных разностей. Он позволяет с высокой точностью исследовать поведение композиции при различных видах нагрузки и спрогнозировать его поведение и прочностные характеристики в целом. Для описания деформирования материалов с криволинейной границей раздела «подложка – покрытие» используется общая система уравнений механики, включающую законы сохранения количества движения, массы, соотношения для деформаций и определяющие уравнения, описывающие среду. Система, дополненная граничными и начальными условиями, позволяет моделировать деформацию исследуемой композиции. В данном случае введены модели упругопластического поведения стальной подложки с учетом деформационного упрочнения, а также модель хрупкого разрушения покрытия. Краевая динамическая задача решается численно методом конечных разностей в постановке плоской деформации.

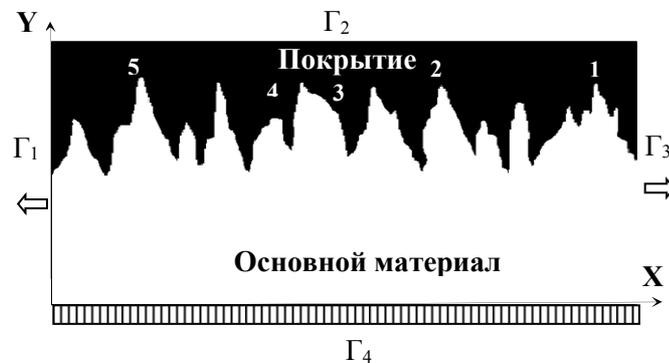


Рис.1 Схематическое изображение расчетной области и граничных условий.

Результаты моделирования. При нагружении композиции «стальная подложка – боридное покрытие» (рисунок 2) вдоль криволинейной границы раздела формируются концентрации напряжений различной мощности в зависимости от локальной геометрии.

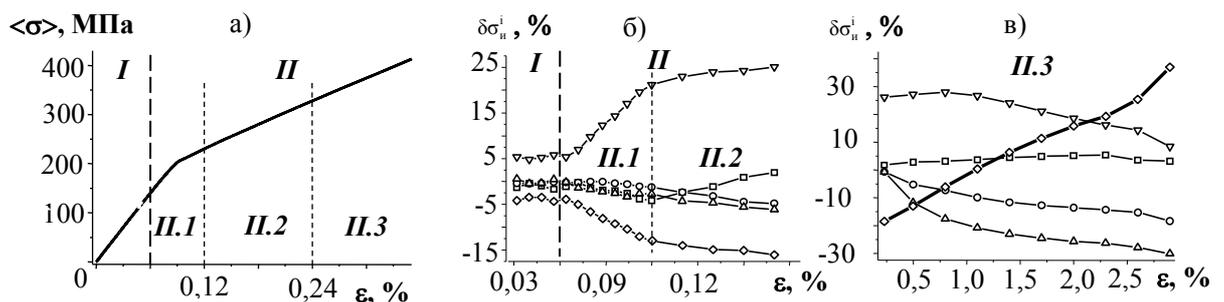


Рис.2 Кривая течения (а) и отклонение интенсивности напряжений в областях концентрации 1–5 от средней по данным областям на различных стадиях деформирования (б, в)

Выявлены три стадии пластического течения в стальной подложке: На стадии II.1 пластические сдвиги локализуются у основания зубьев, а основной объем подложки деформируется упруго (рис. 3а) и распространяются вглубь материала, первоначально заполняя пространство между зубьями и, далее, образуя полосы локализованного течения в основном материале. Данные полосы развиваются от

концентраторов напряжений в области границы раздела и локализуются в сопряженных направлениях под углом к оси нагружения. В момент образования полос макроскопическая кривая течения резко изменяет наклон (рис. 2а). Стадия II.1 заканчивается, когда основная часть подложки переходит в пластическое состояние и система полос сдвига окончательно сформирована.

При дальнейшем нагружении степень локализации в полосах сдвига усиливается – реализуется стадия II.2. Общий характер распределения интенсивности пластических деформаций меняется слабо, но система полос сдвига к окончанию данной стадии проявляется более четко. Смена механизма локализации пластического течения на стадии II.3 (рис. 3, а–б) приводит к тому, что локализация напряжённого состояния на данной стадии развивается нелинейно (рис. 2в), причём в том месте, где на стадиях II.1 и II.2 концентрация напряжений была минимальной и локализация была подавлена (рис. 3, в–г).

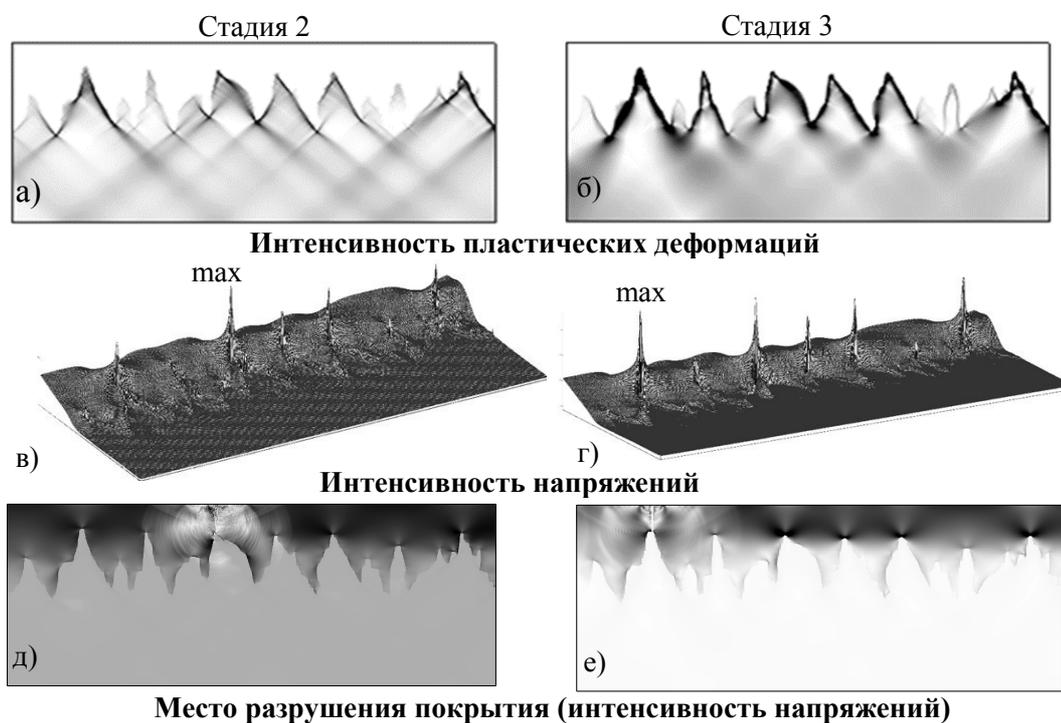


Рис. 3 Взаимосвязь эволюции концентраций напряжений и места разрушения покрытия со стадиями пластического течения в подложке

Таким образом, установлено, что максимальная концентрация напряжений может наблюдаться в различных местах вдоль границы раздела «покрытие–подложка» в зависимости от стадии деформирования композиционного материала. Это означает, что место разрушения может зависеть от того, на какой стадии деформирования оно произойдёт. Иными словами, предел прочности покрытия может определять место разрушения (рис. 3, д–е).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокомпозитных покрытий // Успехи физических наук. – 2009. – Т.179. – С. 35–64.