

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА ПОДЛОЖКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МАТЕРИАЛА С ПОРИСТЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ**

А.В. Зиновьев^{1,2}, С.А. Мартынов^{1,2}, О.С. Зиновьева^{1,3}

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Р.Р. Балохонов^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г.Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

³Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина 36, 634050

E-mail: zav@ispms.tsc.ru

**EFFECT OF SUBSTRATE GRAIN SIZE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A
MATERIAL WITH POROUS CERAMIC COATING**

A.V. Zinoviev^{1,2}, S.A. Martynov^{1,2}, O.S. Zinovieva^{1,3}

Scientific Supervisor: Dr. R.R. Balokhonov^{1,2}

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,

Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634021

²Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

³Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: zav@ispms.tsc.ru

Annotation. *In this work we numerically investigate the deformation and fracture in a material with a porous ceramic coating and a polycrystalline steel substrate. The internal structure of the porous coating and microstructure of the substrate is accounted for explicitly in the calculations. To describe an internal geometry of the composite, we introduce a curvilinear mesh generation algorithm. To generate the polycrystalline structure of the substrate we use the cellular automata method with original modifications introduced. The steel substrate exhibits an elastic-plastic behavior, while the ceramic coating is elastic-brittle. To account for the grain size effect on the initial yield stress we use the Hall – Petch relationship. The boundary-value problem in the plane strain formulation is solved numerically by the finite difference method. Numerical investigations on uniaxial tension, compression, and surface loading of two-dimensional specimens are conducted. Four samples investigated are characterized by an average substrate grain size of 2, 5, 15 and 30 μm . The complex stress-strain state taking place in loaded composite is analyzed. In the case of tension or compression, cracks are shown to originate in the local regions experiencing tensile loading. The influence of the substrate grain size on the fracture behavior of the composite is examined.*

Работа посвящена исследованию деформации и разрушения материала с пористым керамическим покрытием. Исследовался фактор влияния размера зерна подложки на механические свойства композита. Рассматривались композиты со средними диаметрами зерна подложки 2, 5, 15 и 30 мкм (рис. 1). Композит подвергался одноосному сжатию и растяжению, а также рассматривался случай приложения

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

нагрузки к поверхности. Исследовались процессы формирования сложного напряженно-деформированного состояния, зарождения и развития разрушения. Внутренняя структура образца задавалась в расчетах явно. Для лучшего учета внутренней геометрии был разработан подход генерации регулярной криволинейной расчетной сетки на основе метода механической аналогии [1-3]. Зеренная структура стальной подложки генерировалась методом клеточных автоматов с оригинальными модификациями. Краевая задача механики в постановке плоской деформации решена численно с помощью метода конечных разностей [4]. Механический отклик стальной подложки описывается упругопластической моделью изотропно упрочняющегося материала. Начальный предел текучести был задан для каждого зерна соотношением Холла – Петча. Для покрытия применялась модель хрупкого разрушения с использованием энергетического критерия Губера – Мизеса, учитывающего зарождение трещин в областях объемного растяжения.

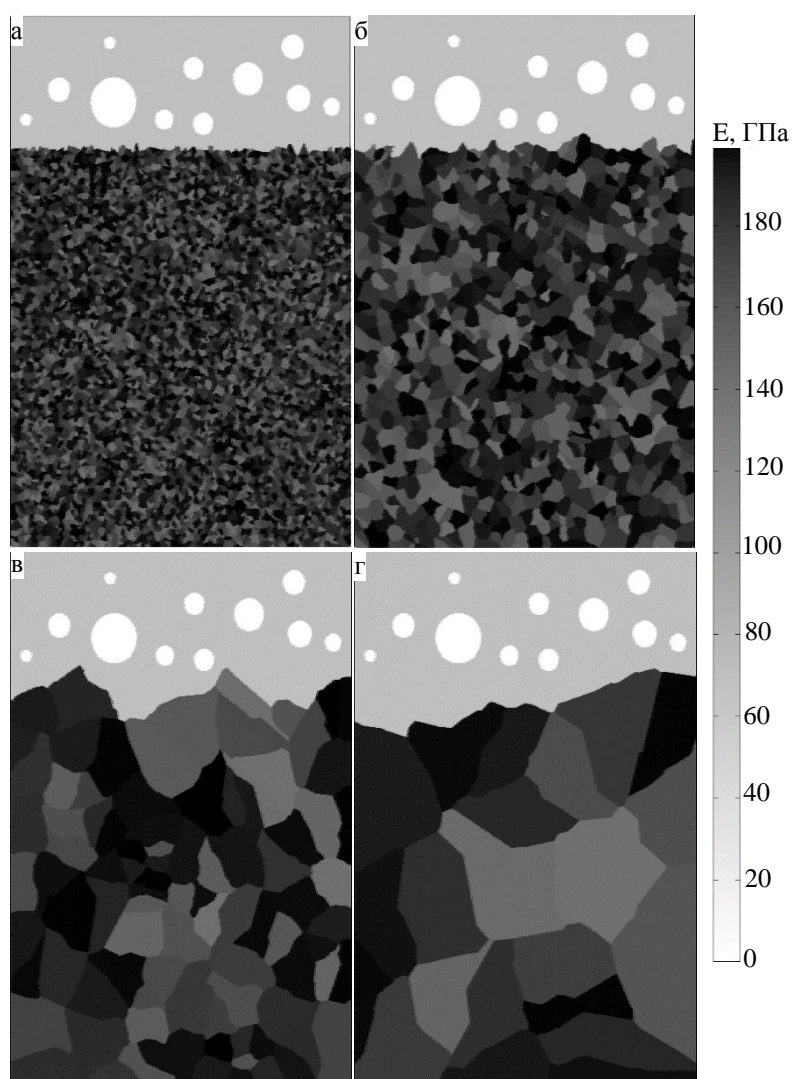


Рис. 1. Модельные образцы материала с покрытием. Средний диаметр зерна составляет 2 (а), 5 (б), 15 (в) и 30 мкм (г)

Проанализировано сложное напряженно-деформированное состояние, возникающее при нагружении композита. Концентрация напряжений происходит на границах раздела «пора – покрытие» и «покрытие – подложка». Как при внешнем растяжении, так и при внешнем сжатии в таких местах возникают как

области объемного растяжения, так и области объемного сжатия. Показано, что при дальнейшем нагружении трещины возникают именно в местах объемного растяжения. Стоит отметить, что в случае единичной поры области концентрации напряжений будут симметричны относительно оси, проходящей через центр поры параллельно оси нагружения, однако из-за взаимного влияния пор и границы раздела «покрытие – подложка» эта симметрия нарушается и создается сложное напряженно-деформированное состояние.

Чем больше размер зерна, тем при большей деформации подложка начинает деформироваться пластически (при деформациях 0.112, 0.137, 0.192, 0.28 % для образцов со средним диаметром зерна 30, 15, 5 и 2 мкм, соответственно) и тем ниже расположена кривая течения. В некоторых случаях, если ранее не началось разрушение, композит достигает «квазиоднородного» состояния, при котором разница напряжений на границе раздела «покрытие – подложка» сводится к минимуму. Возникновение «квазиоднородного» состояния связано с тем, что при развитом пластическом течении в подложке возникает момент, когда эффективные свойства контактирующих материалов выравниваются.

При нагружении, приложенном к поверхности композита, в зависимости от размера зерна подложки трещины зарождаются в различных местах и характер их развития также значительно отличается. В материале с мелким зерном подложки первые трещины зарождаются у пор, когда в материале с более крупным размером зерна – на границе раздела «покрытие – подложка». Показано, что деформация, при которой покрытие теряет свои функциональные свойства, в значительной мере зависит от размера зерна подложки. В композитах с размерами зерна подложки 2 и 5 мкм разрушение практически сразу после начала выходит на критический режим, а в композитах с размерами зерна подложки 15 и 30 мкм трещины развиваются постепенно и выход разрушения на критический режим происходит при значительно более высокой деформации. Таким образом, можно сделать вывод, что композиты с более крупным зерном подложки выдерживают более высокие деформации без потери функциональных свойств покрытия.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, Российской академии наук и в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zinoviev A., Balokhonov R., Martynov S., Romanova V., Zinovieva O., Numerical simulation of deformation and fracture in a coated material using curvilinear regular meshes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 71. – P. 012072.
2. Зиновьев А.В., Балохонов Р.Р., Романова В.А., Мартынов С.А., Шваб Е.А., Моделирование деформации материала с пористым покрытием // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 7-3. – С. 158-160.
3. Зиновьев А.В., Балохонов Р.Р., Моделирование поведения материалов с пористыми покрытиями под нагрузкой // Материалы Первой Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Томск, 2013. – С. 115-117.
4. Wilkins M. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. – 266 p.