

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения  
Российской академии наук

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**Перспективные материалы  
с иерархической структурой  
для новых технологий  
и надежных конструкций**

**19 - 23 сентября 2016 г.**

**Томск, Россия**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

### 3. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

#### НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ ПОКРЫТИЕ-ПОДЛОЖКА ПОСЛЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОКРЫТИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ

Люкшин П.А.<sup>1</sup>, Бочкарева С.А.<sup>1,2</sup>, Гришаева Н.Ю.<sup>1,2</sup>,  
Люкшин Б.А.<sup>1,2,3</sup>, Матолыгина Н.Ю.<sup>1,2</sup>, Панин С.В.<sup>1,4</sup>

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

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия,

<sup>3</sup> НИ Томский государственный университет, Россия,

<sup>4</sup> НИ Томский политехнический университет, Россия,

petrljuk@ispms.tsc.ru, svetlanab7@yandex.ru, lba2008@yandex.ru

В термобарьерном покрытии под действием теплового удара возникают сжимающие напряжения. Это связано с тем, что за относительно короткое время приложения тепловой нагрузки материал тонкого покрытия успевает прогреться и стремится расширяться, а непрогретая подложка препятствует этому. Под действием возникающих сжимающих напряжений в покрытии оно может потерять устойчивость.

Покрытие на подложке моделируется пластинкой на упругом основании Винклера. Устойчивость пластинки под действием сжимающих напряжений рассматривается в рамках концепции Эйлера. В дифференциальных уравнениях нейтрального равновесия производные аппроксимируются конечно-разностными соотношениями. Однородная система возникающих линейных алгебраических уравнений допускает нетривиальное решение при определенном уровне сжимающих нагрузок, которые принимаются за критические значения, соответствующие потере устойчивости. Для этого необходимо, чтобы определитель однородной системы линейных алгебраических уравнений обращался в ноль.

После получения критических напряжений потери устойчивости пластинки на упругом основании определяется форма потери устойчивости, при этом значения прогибов находятся с точностью до постоянного множителя. Чтобы вычислить величины прогибов, делается предположение, что линейные размеры пластинки с первоначальной длиной  $L_0$  при нагревании на  $\Delta T$  увеличиваются на величину  $L_0\alpha\Delta T$ , где  $\alpha$  - коэффициент линейного температурного расширения. Зная форму потери устойчивости и изменение линейного размера пластинки при нагревании, можно найти конкретные значения нормальных прогибов  $w$  пластинки после потери устойчивости. Для этого достаточно приравнять длину синусоиды (которая определяет форму пластинки после потери устойчивости) новому линейному размеру пластинки. Соотношения теории пластин и оболочек позволяют определить напряжения в покрытии после потери устойчивости. Отмечается, что после потери устойчивости в покрытии возникают как сжимающие, так и растягивающие напряжения.

После потери устойчивости форма пластинки становится криволинейной. Во всех случаях картина распределения вмятин и выпучин покрытия напоминает шахматную доску. Если амплитуда волн, возникающих при потере устойчивости, определяется, как отмечено выше, перепадом температур и коэффициентом линейного температурного расширения, то конкретная форма, в частности, размеры клеток «шахматной доски», зависит от толщины покрытия и критических напряжений, связанных, в свою очередь, с упругими свойствами подложки. Деформация покрытия вызывает деформацию упругого основания, или подложки, в которой возникают зоны экструзии и интрузии. Эти зоны определяются воздействием покрытия после потери устойчивости. Для упругого основания методом конечных элементов решается плоская задача теории упругости, в которой на одной из границ задаются перемещения, определенные из решения задачи о прогибах пластинки при потере устойчивости покрытия. Наибольший интерес вызывают параметры напряженно деформированного состояния

### 3. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

на контакте подложка-покрытие, которые можно использовать для оценки прочности этого контакта.

Таким образом, полный анализ поведения термобарьерного покрытия включает в себя несколько задач. На первом этапе решается задача о распределении температуры в системе покрытие-подложка при тепловом ударе. Далее решается задача о потере устойчивости покрытия при действии сжимающих напряжений, возникающих за счет нагрева тонкого слоя покрытия при относительно холодной подложке. Определяется форма потери устойчивости и значения прогибов, которые задают, в свою очередь, граничные условия для задачи о параметрах НДС подложки. Наконец, анализ напряжений на контакте дает возможность определить возможность отслоения покрытия от подложки.

#### ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В БЕЙНИТНЫХ СТАЛЯХ

Иванов Ю.Ф.<sup>1,2</sup>, Громов В.Е.<sup>3</sup>, Никитина Е.Н.<sup>3</sup>, Аксенова К.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

<sup>2</sup> НИ Томский государственный университет, Томск, Россия,

<sup>3</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия  
yufi55@mail.ru, gromov@physics.sibsiu.ru

В условиях интенсивной пластической деформации для сталей характерной особенностью является формирование вытянутых областей с ультрадисперсной структурой – каналов деформации [1, 2].

Целью работы является исследование локализации пластической деформации бейнитной стали.

В качестве материала исследования была использована конструкционная сталь 30Х2Н2МФА. Аустенизацию стали проводили при температуре 960 °С, 1,5 час.; охлаждение осуществляли на воздухе [3]. Деформацию стали проводили одноосным сжатием со скоростью  $\sim 7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  столбиков размерами 4x4x6 мм<sup>3</sup> на испытательной машине типа «Инстрон». Сжатие, как способ деформации, было удобно использовать, поскольку в этом случае удается достигать более глубоких деформаций. Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор ЭМ-125) [4].

Выявлено формирование в процессе деформации стали каналов локализованной деформации – особых состояний материала, располагающихся вдоль границ раздела соседних пластин бейнита или границ зерен.

Канал деформации имеет слоистое строение, напоминая этим структуру пакета мартенсита. Слои сформированы кристаллитами, размеры которых изменяются в пределах (50-100) нм. Кольцевое строение микроэлектроннограммы, полученной с области локализации канала деформации, указывает на преимущественно большеугловую разориентацию кристаллитов, формирующих его. С ростом степени деформации объем материала, занятый каналами деформации возрастает, достигая на момент разрушения стали нескольких десятков процентов.

Особенностью каналов деформации являются значительные поля напряжений, локализованные внутри них и в прилегающих к ним областях. Отмечены два механизма релаксации этих полей напряжений [1, 2]. Во-первых, путем фрагментации. В этом случае образуются цепочки фрагментов малых размеров и близкой ориентации, расположенные вдоль канала деформации. Во-вторых, путем развития микротрещин.

#### Литература:

1. Громов В.Е., Козлов Э.В., Панин В.Е., Иванов Ю.Ф. и др. Каналы деформации в условиях электропластического стимулирования// Металлофизика. - 1991. - Т.13, №11. - С.9-13.