



9-я Всероссийская школа-семинар  
«Новые материалы. Создание, структура, свойства»

# НАНОСТРУКТУРНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

*академик РАН В.Е. Панин,  
профессор В.Е. Егорушкин*

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,  
ИФПМ СО РАН**

*E-mail: [paninve@ispms.tsc.ru](mailto:paninve@ispms.tsc.ru)*

**Томск, ТПУ, 9-11 июня 2009**

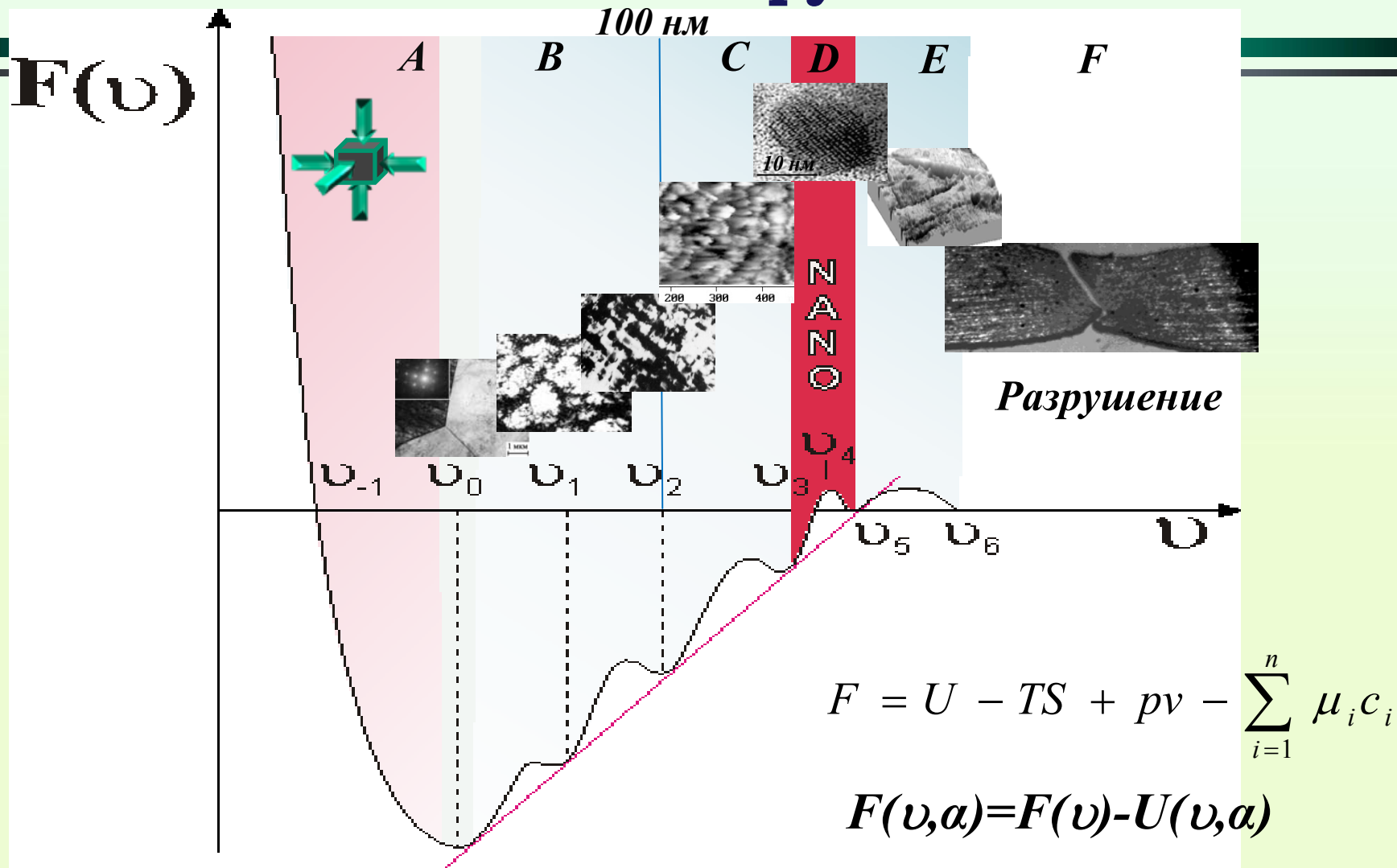


# 9-я Всероссийская школа-семинар «Новые материалы. Создание, структура, свойства»

## Содержание:

- **Что такое наноструктурные состояния?**
- **Неравновесная термодинамика локальных структурных превращений в твердых телах в неоднородных полях внешних воздействий. Ключевая роль производства энтропии.**
- **Локальные зоны гидростатического растяжения как термодинамическая основа зарождения всех видов дефектов, пор, трещин и изменения структурно-фазового состояния.**
- **Роль квазиаморфной фазы в стабилизации наноструктурных кристаллических состояний.**
- **Заключение.**

# Неравновесная термодинамика твердого тела под нагрузкой



Зависимость термодинамического потенциала Гиббса  $F(v)$  от молярного объема  $v$  с учетом локальных зон гидростатического растяжения различного масштаба.

# Нелинейная волновая теория

## В.Е. Егорушкина

### Производство энтропии

$$\sigma_S = \frac{\chi(\nabla T)^2}{T^2} + \rho \frac{\tilde{c}j\bar{\sigma}}{T} - \frac{\rho}{T^2} \left( [\bar{\alpha} \cdot \bar{v}], \nabla T \right)$$

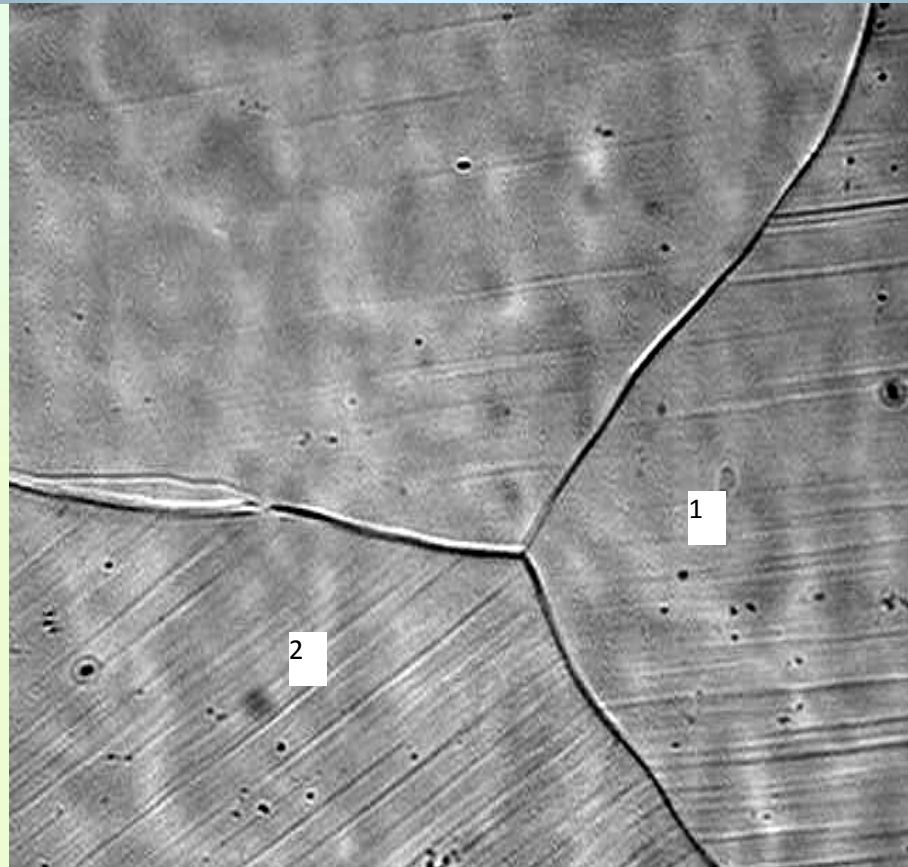
$\frac{\chi(\nabla T)^2}{T^2}$  – выделение тепла;

$\rho \frac{\tilde{c}j\bar{\sigma}}{T}$  – работа потока нанокластеров при их движении в поле градиентов нормальных напряжений,

$\frac{\rho}{T^2} \left( [\bar{\alpha} \cdot \bar{v}], \nabla T \right)$  – поток энергии механического поля через интерфейс,

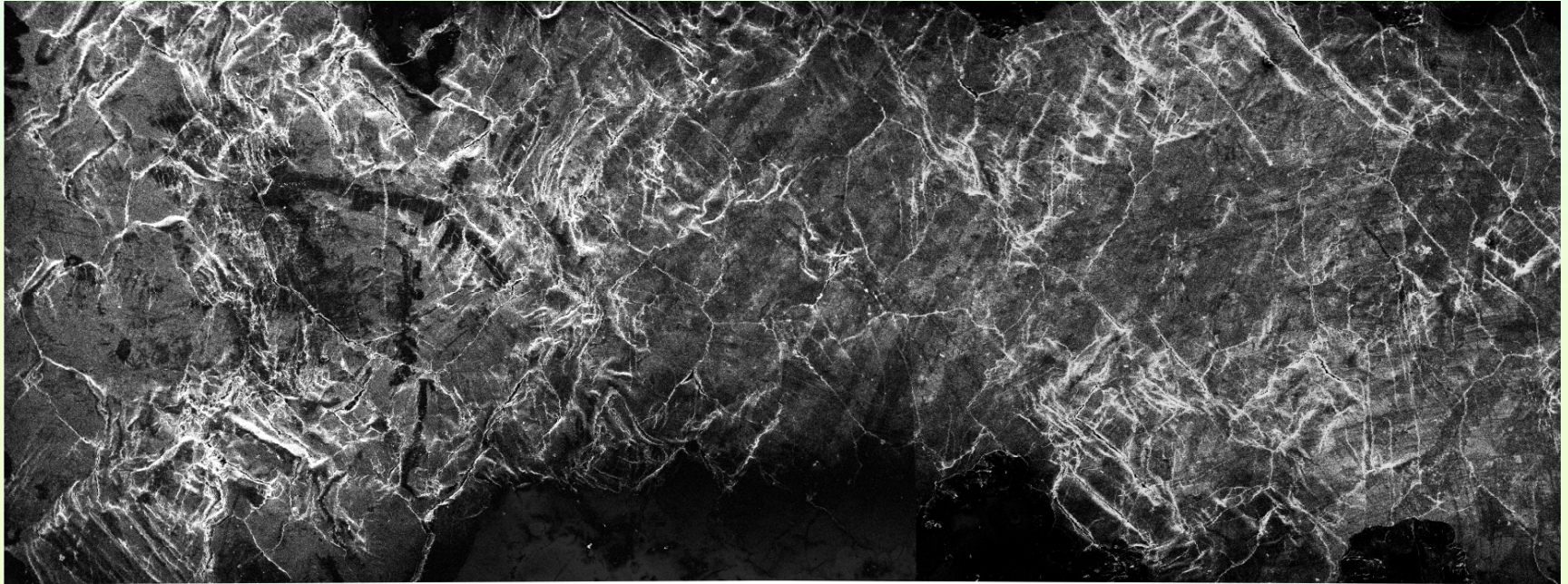
$\bar{\sigma}$  – градиент нормальных напряжений.

# Single slip in grains of the polycrystal



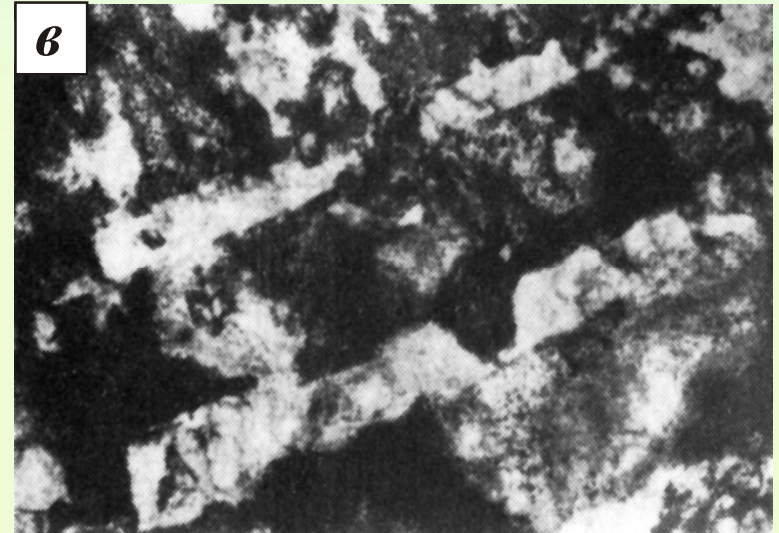
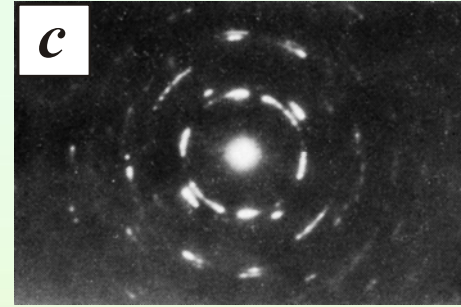
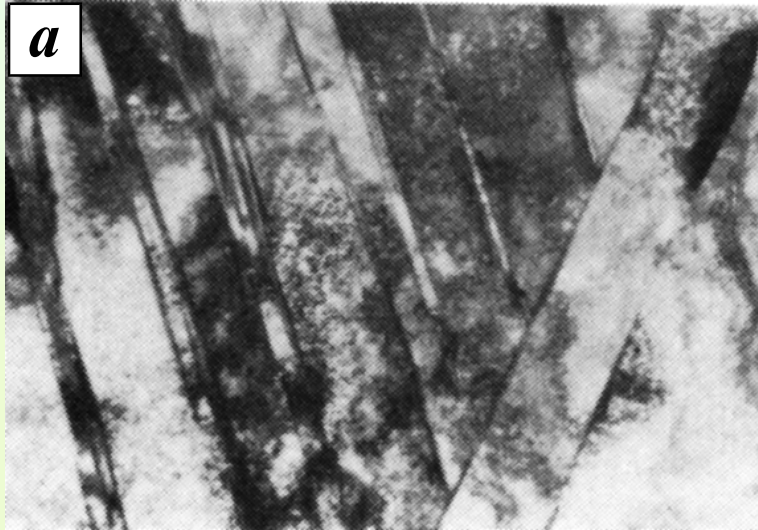
**A999/ A7 composite. Single slip in grains of the polycrystal, T=293K, N=3.2·10<sup>3</sup> cycles, ×160.**

# Фрагментация образца на мезоуровне



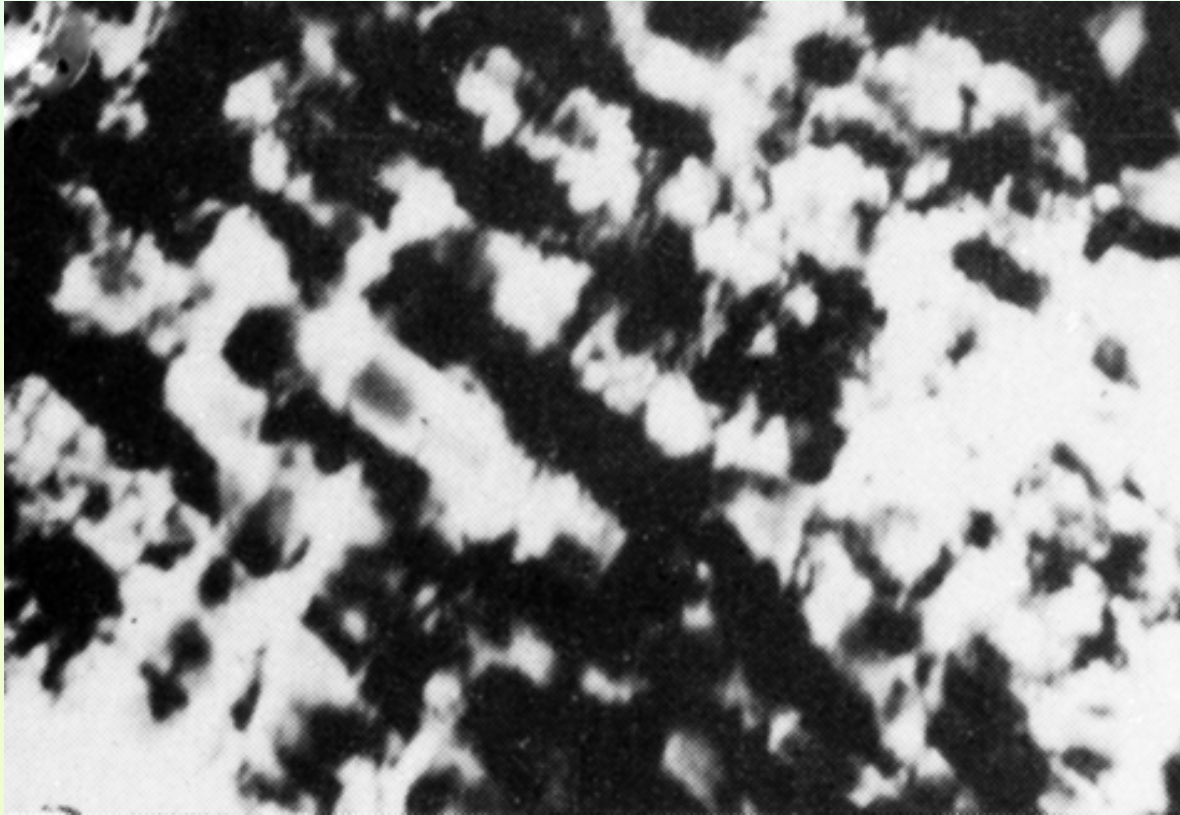
**Композит ВТ1-0/А999, циклическое нагружение знакопеременным изгибом; частота нагружения 7 гц, T=293 К, N=2,9×10<sup>6</sup>, × 20.**

# Evolution of band structure during SPD



The first (a) and the second (b) stages of band structure formation in high nitrogen austenite steel; microdiffraction pattern for macrobands (c); Cold rolling,  $T=293$  K,  $\epsilon=95\%$ ; TEM,  $\times 19230$  (a),  $\times 18160$  (b)

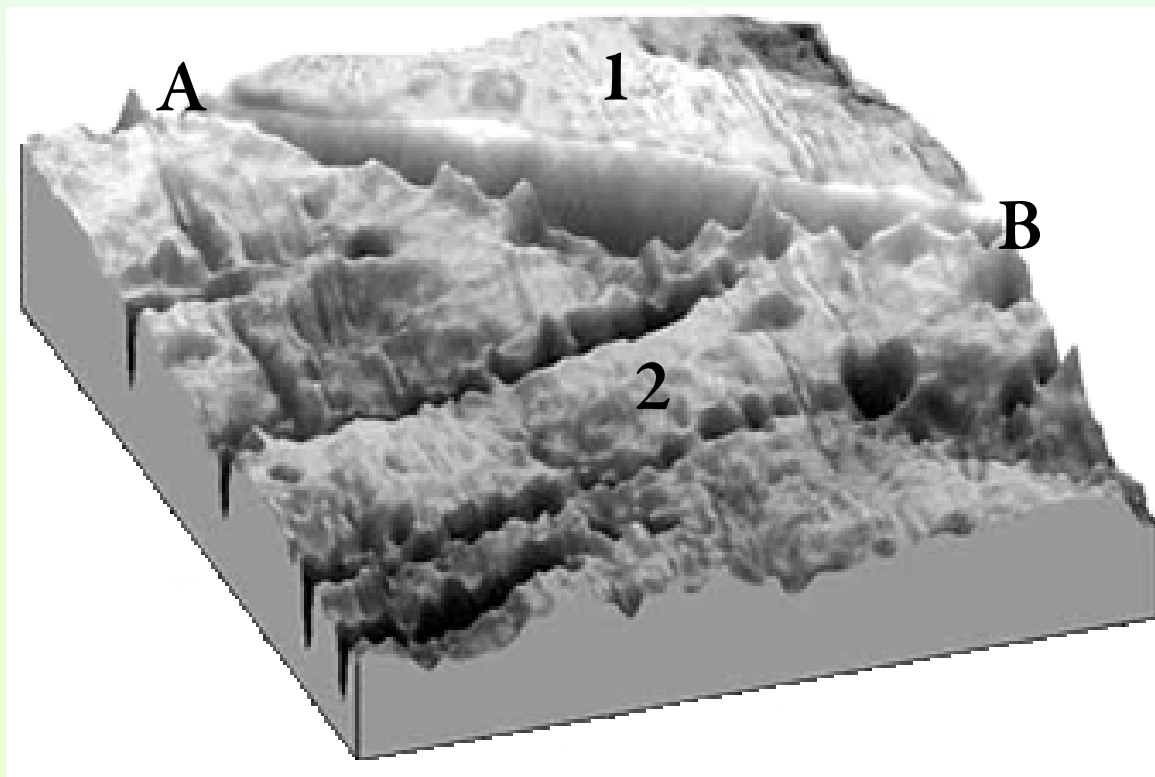
# Fragmentation of macrobands accompanied by formation of submicrocrystalline structure



High nitrogen austenite steel, cold rolling,  $T=293$  K,  $\epsilon > 95\%$ ;  
TEM,  $\times 16000$ .

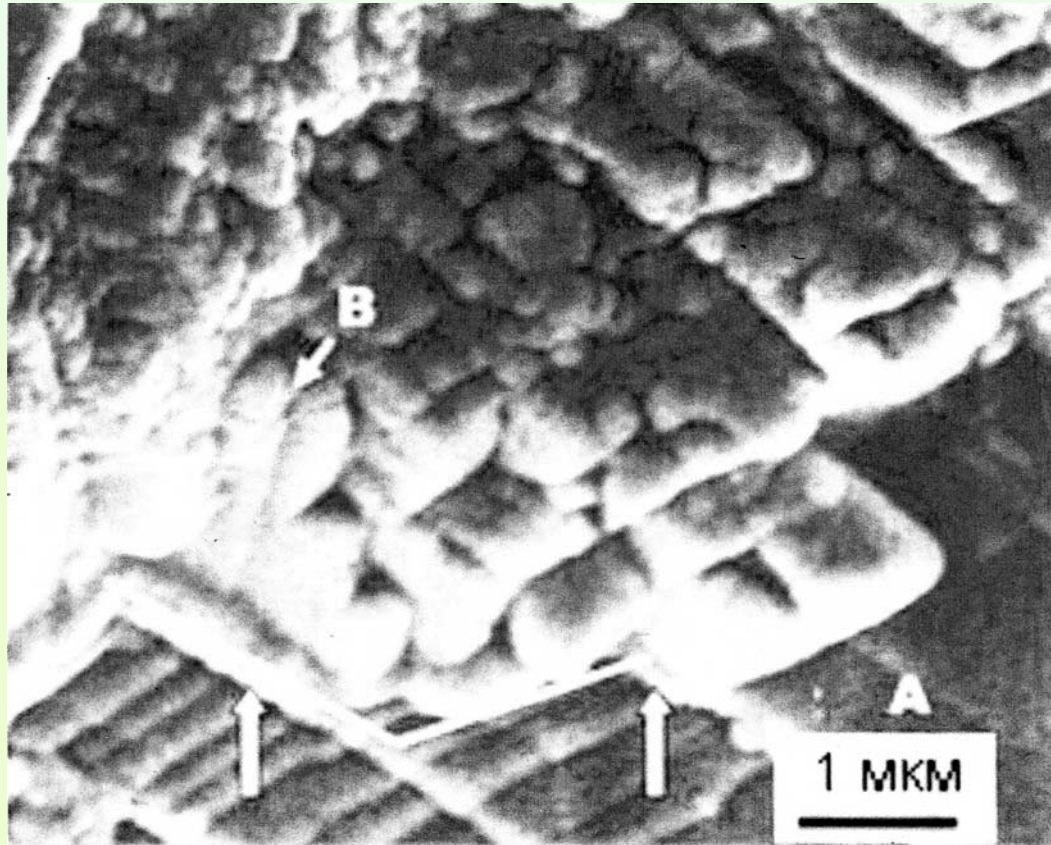


# Образование цепочек микропор при локализации пластической деформации



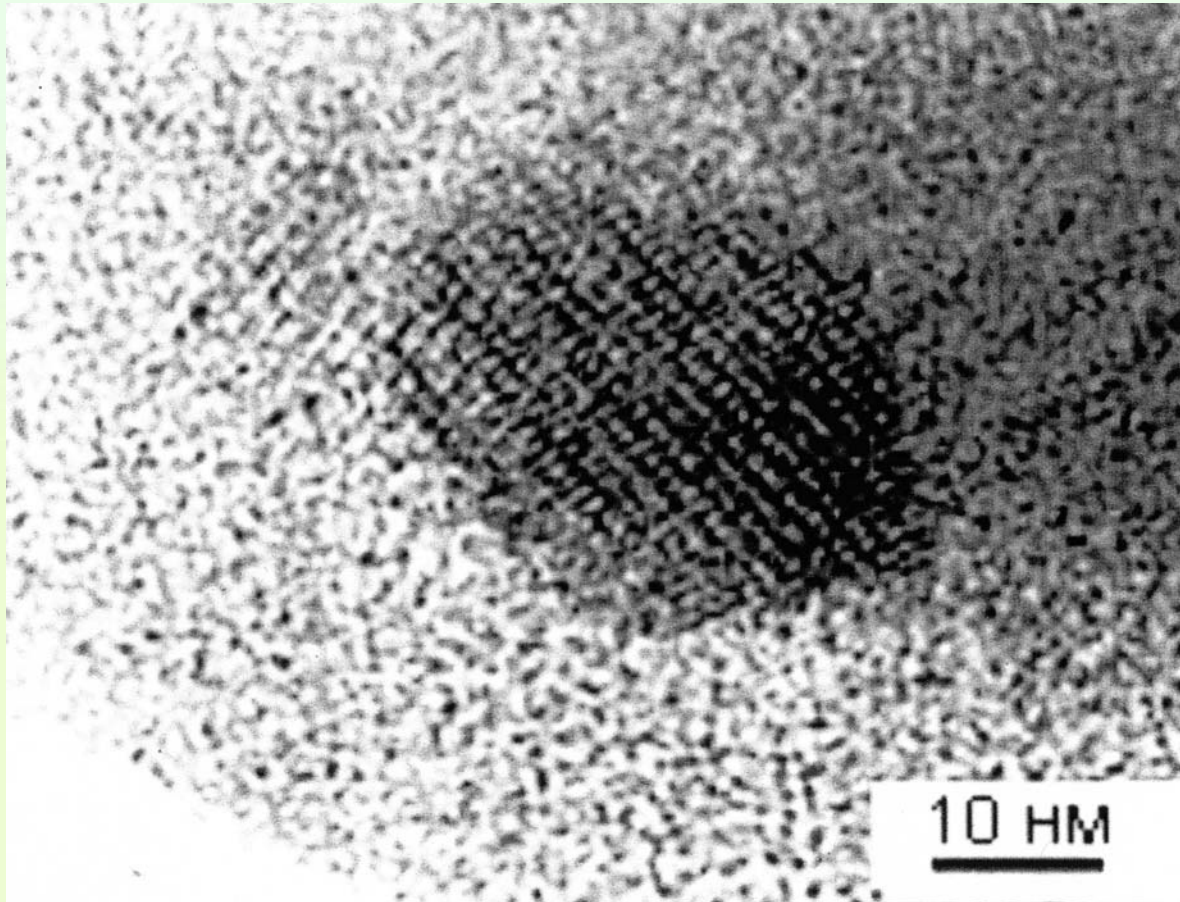
Образование цепочек микропор вдоль мезополос локализованной деформации и объединение микропор в форме двугранного угла на границе АВ зерен 1 и 2; пластина высокочистого А1 толщиной 180мкм, наклеенная на плоский образец технического А1; знакопеременный изгиб при  $T=293K$ ; число циклов  $N=17.55 \cdot 10^6$ .

# Разрез царапины в системе $(0001)$ $[11\bar{2}0]$ монокристалла апатита, нагрузка 0,5 Н



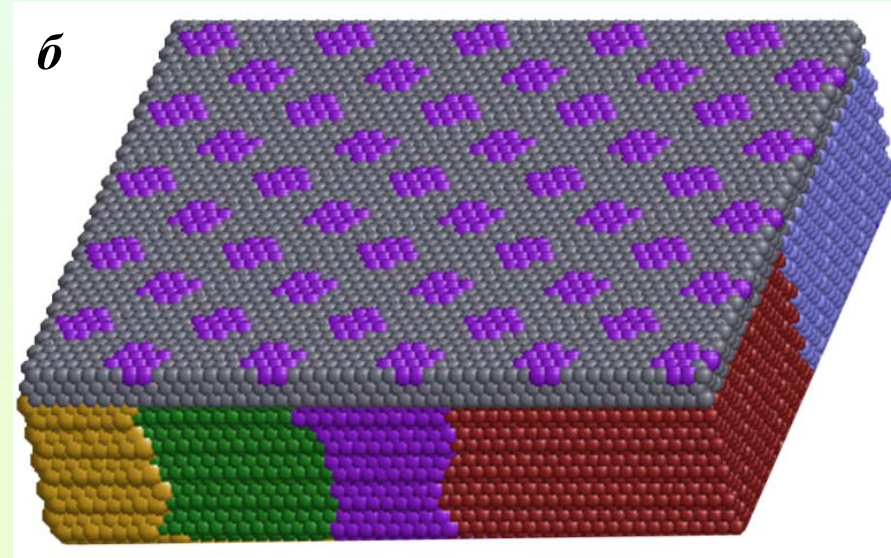
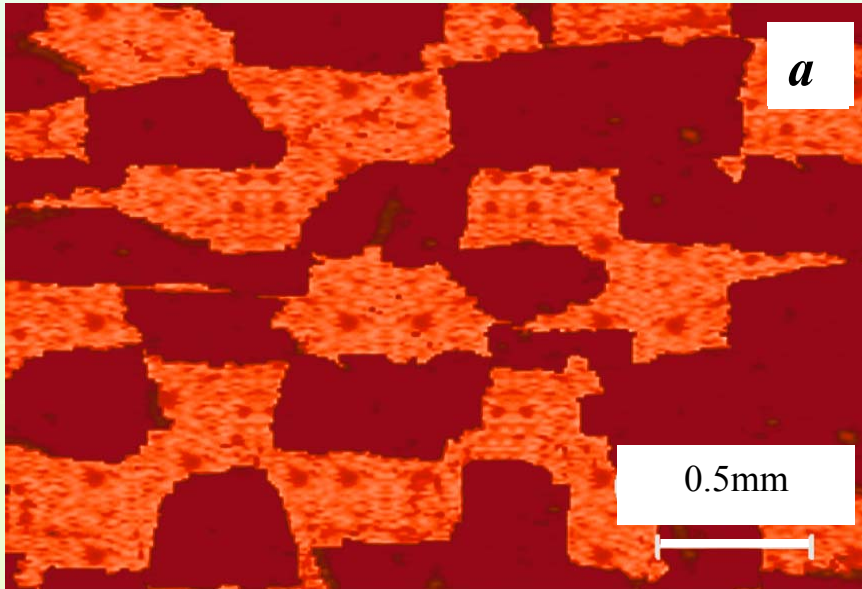
**Зона В – пластическая деформация (верхняя часть царапины), зона А – фрагментация (нижняя часть царапины).**

# Наночастица в аморфной массе вещества (пластическая зона царапины)



ТЕМ высокого разрешения вещества, извлеченного из пластической зоны царапины; монокристалл апатита, система  $(10\bar{1}0)$   $[\bar{1}2\bar{1}0]$ , нагрузка 0,5 Н.

# «Шахматный» характер фрагментации и отслоения покрытия в условиях термоциклической нагрузки

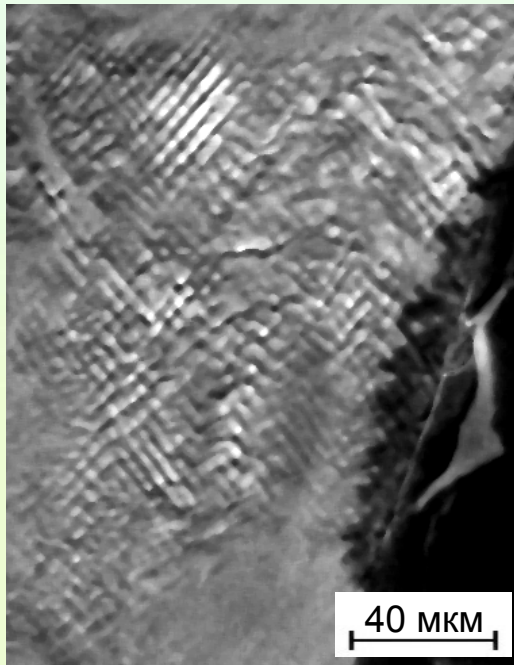


Эксперимент по термоциклированию покрытия  
Si-Al-N на медной подложке

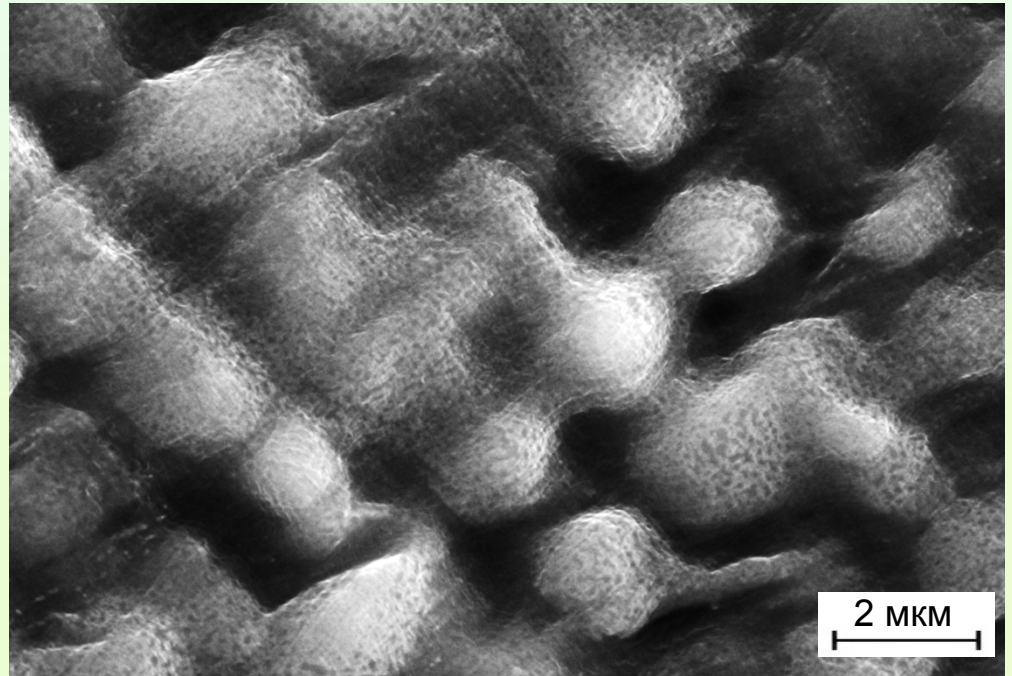
Результат моделирования  
дискретно-континуальным методом

Разработан дискретно-континуальный подход на основе объединения теории Мурнагана в континуальной механике и метода возбудимых клеточных автоматов, описывающего концентрационные волны перераспределения упругой энергии и плотности материала на интерфейсе двух разнородных сред в нагруженном состоянии

# Твидовая структура на лицевой стороне алюминиевой фольги



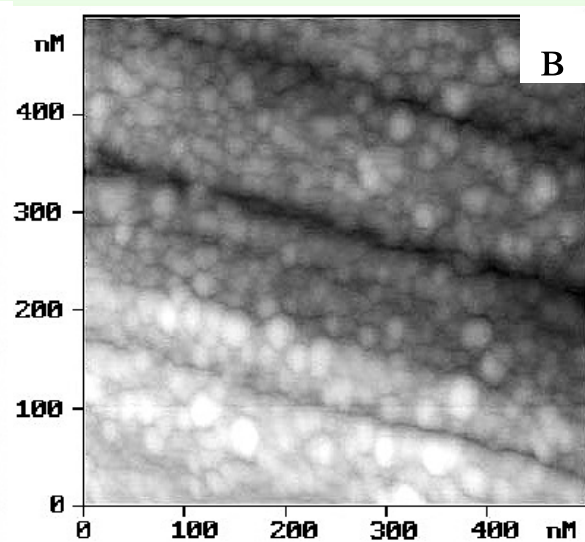
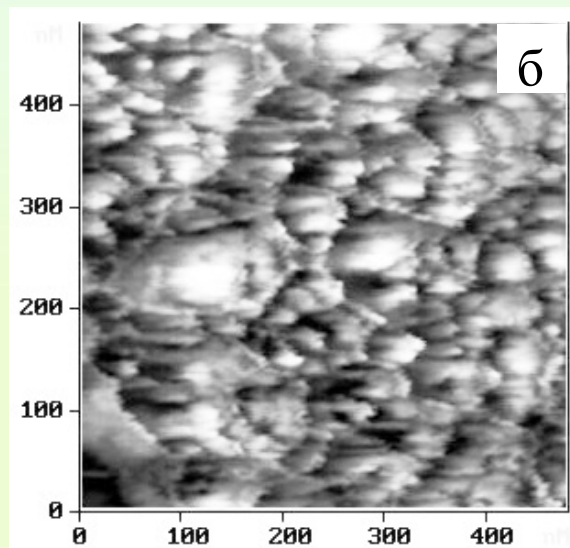
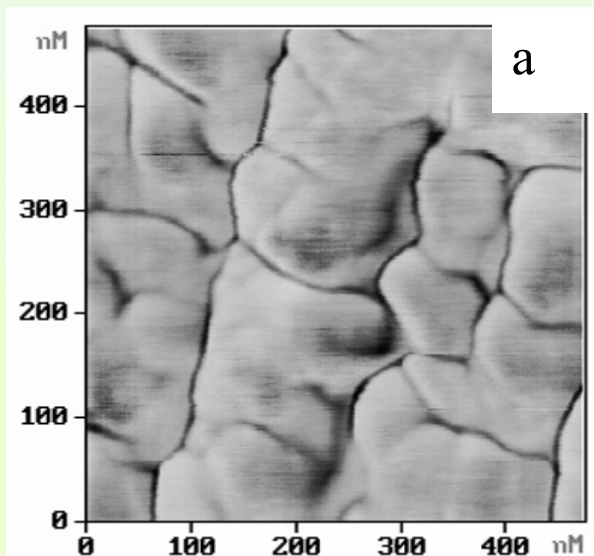
а



б

Твидовая структура на лицевой стороне фольги толщиной 35 мкм под отслоившейся поверхностной плёнкой (а); крупный план шаровидных выступов твидовой структуры (б),  $N=2,9 \cdot 10^6$  циклов.

# Морфология (АСМ) покрытий Ti-Al-N, осажденных с помощью магнетронного распыления

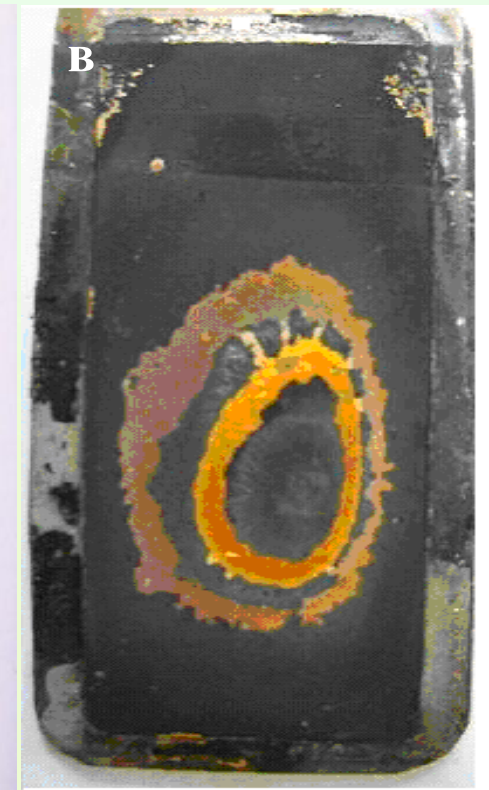
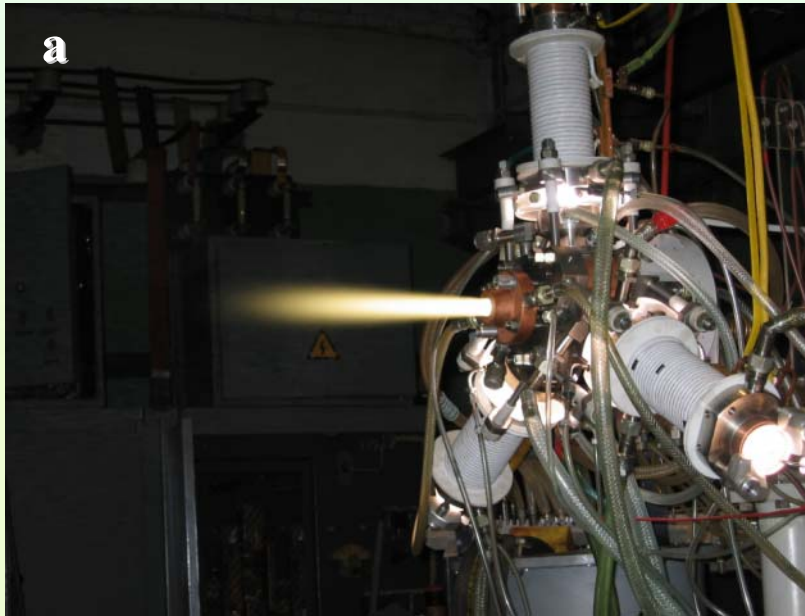


**а – на подложку в исходном состоянии, осаждение без ионной бомбардировки,**

**б – на подложку в исходном состоянии, осаждение с ионной бомбардировкой,**

**в – на наноструктурированную ионным пучком подложку, осаждение с ионной бомбардировкой.**

# Принципы нанотехнологии создания наноструктурных защитных покрытий для работы ответственных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации



Испытание теплозащитных покрытий в высокотемпературных плазменных потоках плазмотрона мегаваттного класса (а): сохранившееся многослойное наноструктурное покрытие (б), стандартное покрытие с образовавшимися кольцевыми отслоениями (в).

# Заключение

1. **Наноструктурные состояния возникают в сильно неравновесных твердых телах вблизи нуля термодинамического потенциала Гиббса и являются предпереходными структурно-фазовыми состояниями, в которых сосуществуют нанокристаллы и квазиаморфная фаза.**
2. **Стабильность наноструктурных состояний определяется производством энтропии при возрастании молярного объема кристалла до критических значений вблизи структурно-фазового перехода «кристалл - квазиаморфная среда».**



# Заключение

**3. Создание наноструктурных состояний во всем объеме твердого тела при высокоэнергетическом воздействии сопровождается его диспергированием с образованием наночастиц с квазиаморфной оболочкой. Создать и сохранить в объеме материала консолидированную наноструктуру можно в полях гидростатического сжатия со сдвигом или в поверхностном слое твердого тела за счет термодинамической стабильности субмикрористаллической подложки.**

# Благодарю за внимание!

XXI - ВЕК

