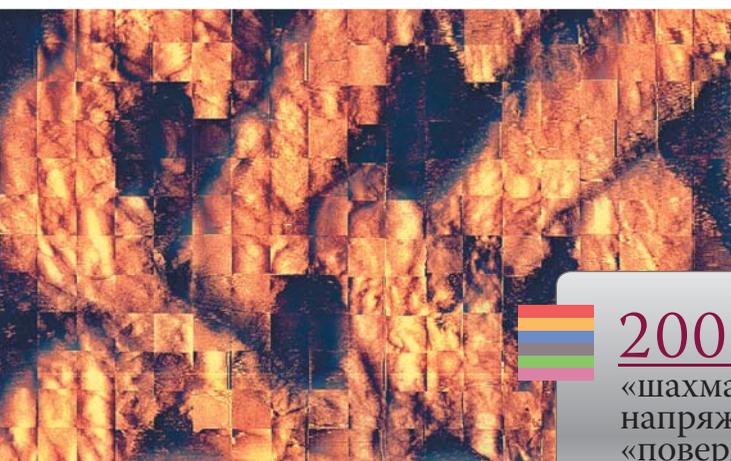


Наноструктурные покрытия:

эффект «шахматной доски»

В последнее время во всех развитых странах мира интенсивно ведется разработка наноструктурных конструкционных материалов новых поколений. Высокие характеристики прочности, износостойкости, усталостной долговечности, коррозионной стойкости позволяет таким материалам занять доминирующее место в материаловедении XXI века

Образование полос локализованного пластического течения при растяжении в наноструктурированном поверхностном слое малоуглеродистой стали. Сканирующая туннельная микроскопия



существует проблема сохранения наноструктуры в сварных соединениях; а также проблема, связанная с резким падением прочности наноструктурных материалов в зонах локальных перегрузок.

Тем не менее подход к решению этих проблем существует, и заключается он в специальном наноструктурировании исключительно поверхностных слоев конструкционных материалов. Научные основы таких технологий были разработаны в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН; здесь было создано и необходимое для этого оборудование. И осуществить это удалось благодаря открытию, сделанному при изучении формирования наноструктур в многослойных поверхностных слоях и покрытиях. Суть его заключается в том, что на границе раздела двух сред (на интерфейсе) образуется особая регулярная структура, причем характер и параметры этой структуры определяют новые свойства, которые приобретает испытуемый образец.

Несмотря на впечатляющие успехи, достигнутые в области «наноматериаловедения», на пути создания объемных наноструктурных материалов, их сварных соединений и сложных конструкций стоят серьезные трудности. Отсутствуют технологии для создания однородной наноструктуры в больших объемах материала;

2005 Экспериментально показано существование эффекта «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсе «поверхностный слой — подложка»

На границе

Следует отметить, что граница любых разнородных сред, имеющих разные значения модулей упругости, коэффициенты термического расширения и химического состава, в поле внешних воздействий характеризуется неоднородным распределением напряжений, деформаций и химического потенциала.

Экспериментальные исследования и теоретические расчеты показали, что распределение напряжений и деформаций на интерфейсах в твердых телах является периодическим. Для плоской границы раздела это распределение имеет вид «шахматной доски», на которой клетки, испытывающие сжимающие нормальные напряжения, чередуются с клетками, испытывающими растягивающие нормальные напряжения. Касательные напряжения также имеют «шахматное» распределение, но сдвинутое в пространстве по фазе на $\pi/2$.

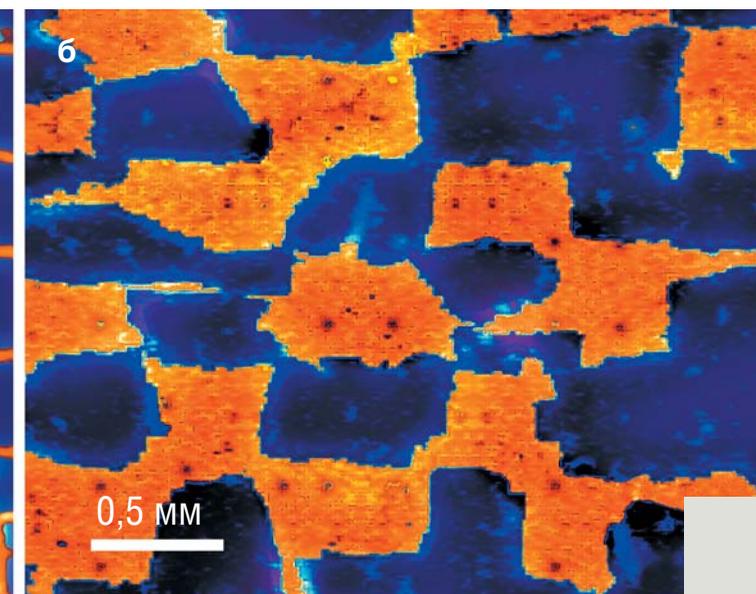
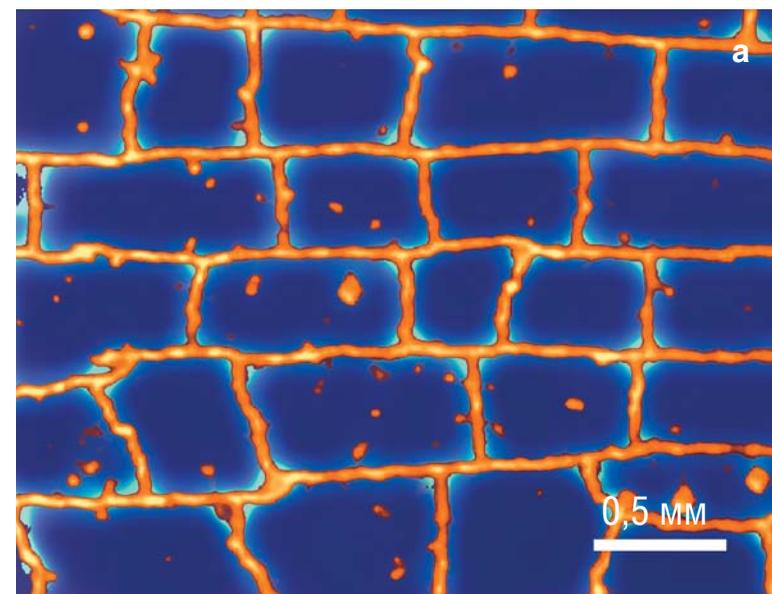
Влияние этого эффекта на прочностные характеристики образца можно объяснить, рассмотрев механизмы пластического течения и разрушения твердого тела при его нагружении выше предела упругости. Все опреде-



Подробнее на: <https://scfh.ru/> в разделе «Физико-технические науки»

выделяется как самостоятельная подсистема. «Родной» и наноструктурированные поверхностные слои ведут себя по-разному по отношению к возникающим в них дислокациям (дефектам). В первом случае поверхностный слой функционирует как своего рода «насос», закачивающий дислокации внутрь нагруженного материала и ускоряющий его разрушение. В то же время наноструктурированный поверхностный слой можно назвать «насосом наоборот», который задерживает накопление деформационных дефектов в объеме материала, тем самым увеличивая эксплуатационный ресурс работы.

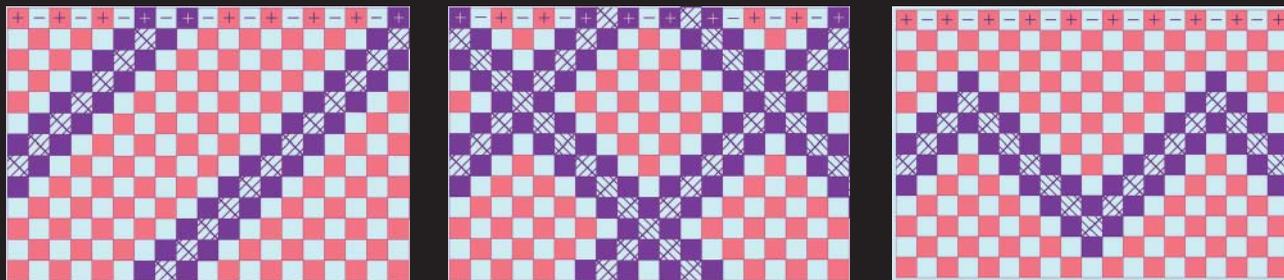
Пластическая деформация в твердых телах может зарождаться и распространяться только в зонах растягивающих нормальных напряжений. Именно здесь возникают условия, необходимые для зарождения



ляется локальной потерей сдвиговой устойчивости, поэтому центральной задачей в методологии описания пластического течения и разрушения твердого тела является системный анализ сдвиговой устойчивости всех возможных подсистем в нагруженном материале.

Известно, что наименьшую сдвиговую устойчивость в нагруженном твердом теле имеет поверхностный слой, который можно рассмотреть как особое состояние вещества. В физической мезомеханике он даже

Покрытие Si-Al-N на медной подложке после процесса термоциклирования (поверхностный слой подложки перед нанесением покрытия был наноструктурирован пучком ионов Cu^+):
а – после 34 циклов термоциклирования;
б – после 55 циклов



Три принципиально возможные схемы стационарного гофрирования поверхностного слоя деформируемого твердого тела (структура интерфейса в виде «шахматной доски»)

и распространения ядер дислокаций (или любых других дефектов кристаллической решетки). Поэтому получается, что «шахматный» характер распределения растягивающих нормальных напряжений на интерфейсе «поверхностный слой — подложка» обуславливает «мозаичную» локализацию зарождения пластических сдвигов в поверхностном слое деформируемого материала.

Чем меньше размер участков локализации деформации, тем больший объем материала одновременно вовлекается в пластическое течение и тем выше прочностные механические характеристики нагруженного материала. Более однородное распределение напряжений, создающееся в образце, препятствует возникновению макроконцентраторов напряжений, где зарождается магистральная трещина и начинается разрушение материала.

Прочность и долговечность

Наноструктурирование поверхностных слоев нагруженных твердых тел и нанесение на них наноструктурных покрытий с учетом эффекта «шахматной доски» может стать эффективным способом упрочнения материалов. В Институте физики прочности и материаловедения это проверено и доказано экспериментально. Кроме того, можно дополнительно улучшить эксплуатационные характеристики инструментальных материалов, используя многоуровневое наноструктурирование поверхностных слоев материала, когда сначала проводится наноструктурирование подложки, а затем наносится само покрытие.

В институте разработан ряд методов наноструктурирования поверхностных слоев конструкционных материалов; подробно исследовано изменение макромеханических характеристик различных сталей и сплавов на основе Ti, Al, Ni при наноструктурировании их поверхностных слоев путем ударной ультразвуковой обработки. Результаты этих работ свидетельствуют

о возможности значительно улучшить макромеханические характеристики материала, не меняя при этом состав поверхностного слоя. Особенно эффективным является наноструктурирование сварных соединений высокопрочных сталей и сплавов. Их характеристики, в том числе и усталостная долговечность, могут возрастать при этом многократно.

Особый интерес представляют интерметаллические и химические соединения, которые имеют очень высокую твердость. Однако их высокая термодинамическая стабильность затрудняет формирование наноструктуры. Эту трудность можно преодолеть разными путями. Во-первых, использовать многокомпонентные композиции, в которых могут формироваться смеси нескольких соединений различных конфигураций. Во-вторых, использовать максимально мелкую «шахматную» структуру интерфейса «покрытие — подложка», которая позволяет синтезировать в клетках растягивающих нормальных напряжений кластеры соединений различных модификаций, а границы их раздела удерживать в клетках сжимающих нормальных напряжений. Кроме того, можно облучать осаждаемое покрытие высокоэнергетическими пучками газовых ионов, которые способствуют распределению кластеров различных композиций по клеткам «шахматной доски» на интерфейсах «покрытие — подложка».

На основе научных исследований в ИФПМ СО РАН были разработаны нанотехнологии нанесения сверхтвердых наноструктурных покрытий на материалы самого разного конструкционного и инструментального назначения. Широкое промышленное применение этих результатов должно стать делом не далекого будущего, а сегодняшнего дня.

*Академик РАН В. Е. Панин, к. ф.-м. н. В. П. Сергеев
(Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН, Томский научный центр)*