МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

ЛЕКЦИЯ 10

Измерение механических свойств наноматериалов

Наноиндентация, твёрдость и модуль упругости

Кратко: Наноиндентация характеризует сопротивление локальному проникновению наконечника.

Цель лекции и ожидаемые результаты

Понимать

Объяснить: Понятие нанотвёрдости. Наноиндентация характеризует сопротивление локальному…

Сопоставлять

Объяснить: Метод Оливера–Фарра. Начальная жёсткость разгрузки позволяет оценивать приведённый модуль…

Применять

Объяснить: Ограничения механических испытаний. Одна величина твёрдости не описывает все механические свойства…

В этой лекции научные определения связываются с измеряемыми величинами, схемами и примерами обработки данных.

Понятие нанотвёрдости

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 01 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Наноиндентация характеризует сопротивление локальному проникновению наконечника.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

На результат влияют материал, микроструктура и размеры области деформации.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Геометрия индентора

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 02 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Форма наконечника определяет связь глубины проникновения и контактной площади.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для Берковича и сферических инденторов используют разные геометрические модели.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Кривая нагрузка–глубина

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 03 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

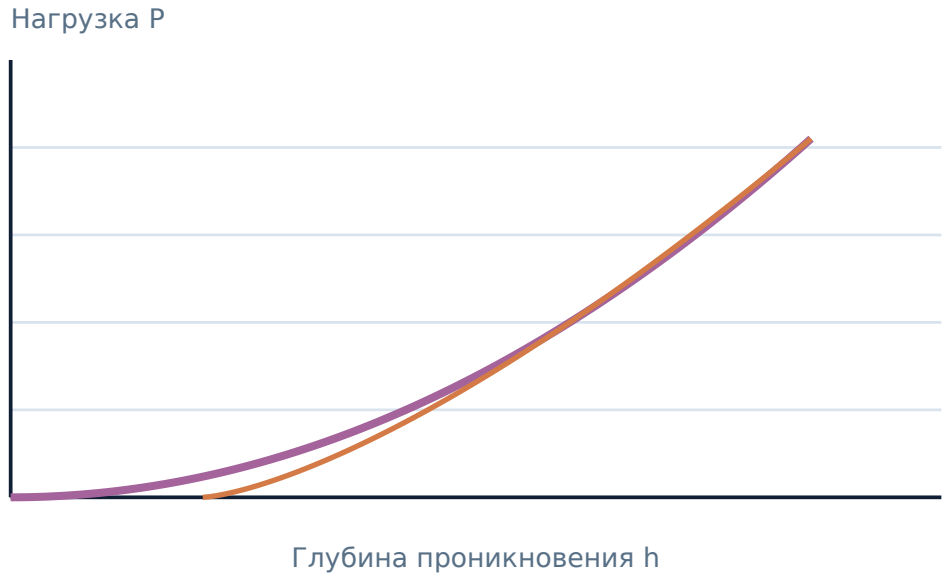
При нагружении регистрируют глубину проникновения, а разгрузка характеризует упругий отклик.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Остаточная глубина указывает на необратимую деформацию.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Определение твёрдости

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 04 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

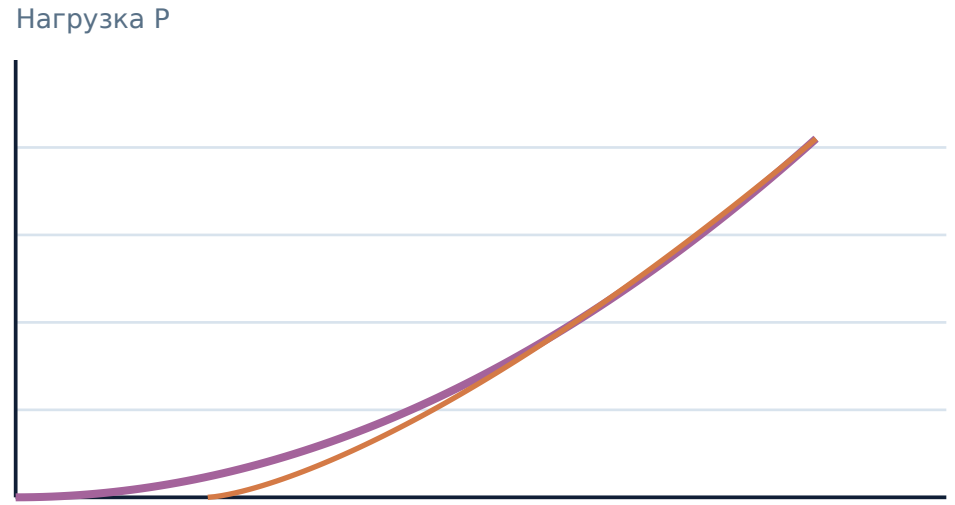
Индентационная твёрдость равна максимальной нагрузке, делённой на проекцию площади контакта.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Площадь контакта не всегда совпадает с видимой площадью отпечатка.

СООТНОШЕНИЕ

$$H = P_{max}/A_c$$



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Функция площади Берковича

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 05 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

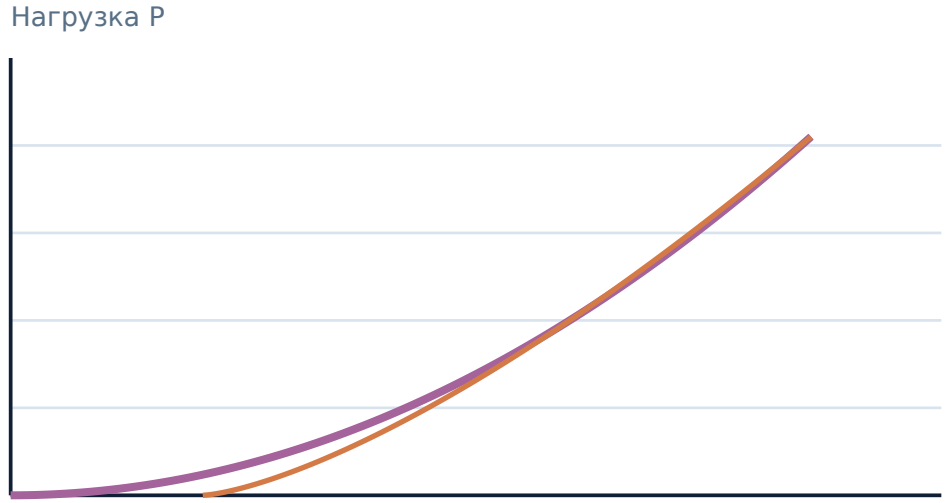
Для идеального наконечника Берковича контактная площадь пропорциональна квадрату контактной глубины.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для реального притуплённого наконечника используют калиброванную функцию площади.

СООТНОШЕНИЕ

$$A_c \approx 24{,}5 h_c^2 \quad \text{(идеальный Беркович)}$$



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Метод Оливера–Фарра

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 06 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

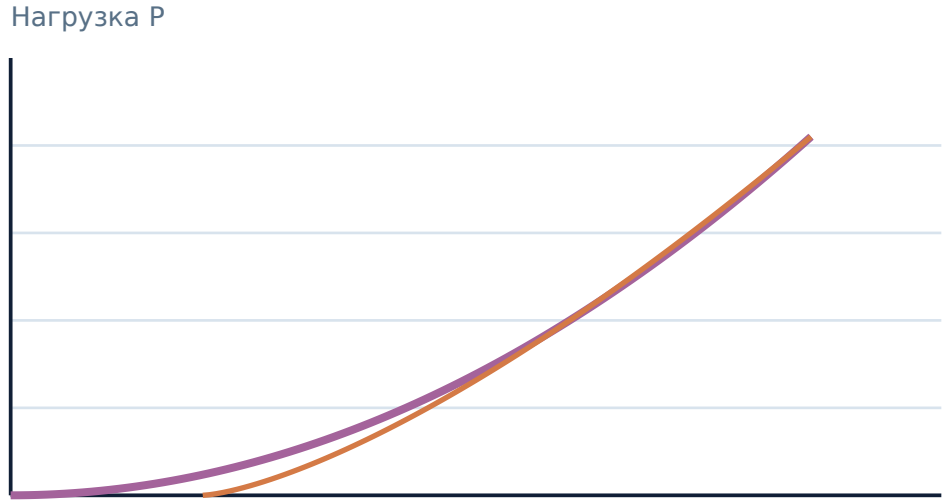
Начальная жёсткость разгрузки позволяет оценивать приведённый модуль упругости.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Применимость метода зависит от формы контакта и механизмов деформации.

СООТНОШЕНИЕ

$$E_r = (\sqrt{\pi}/2\beta)\cdot S/\sqrt{A_c}$$



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Модуль упругости

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 07 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Приведённый модуль учитывает деформацию и образца, и индентора.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Для вычисления модуля образца необходимы его коэффициент Пуассона и параметры индентора.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Микротвёрдость и наноиндентация

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 08 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Микроиндентация обычно исследует большие объёмы материала, чем наноиндентация.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Сравнение методов требует учёта масштаба и геометрии отпечатка.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Влияние подложки на тонкую плёнку

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 09 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

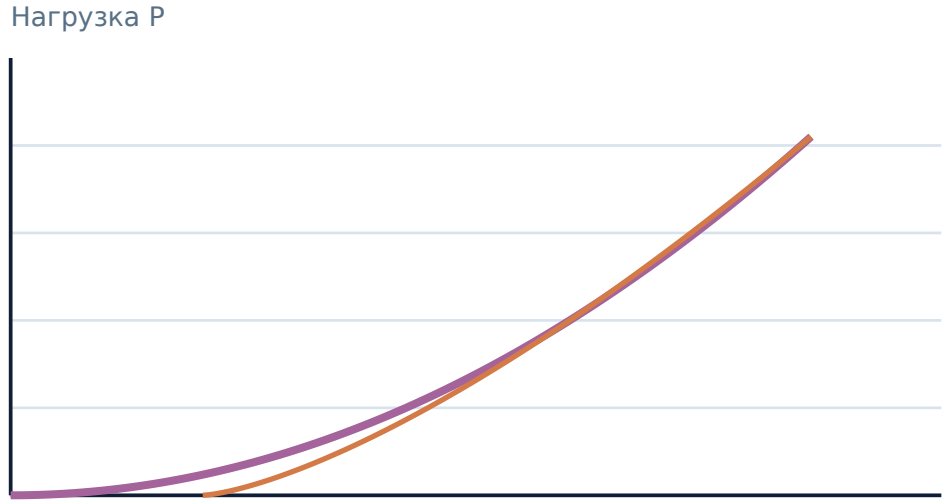
При увеличении глубины внедрения возрастает влияние подложки на измеренный отклик.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Правило небольшой относительной глубины — лишь приближённый критерий.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Качество поверхности

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 10 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

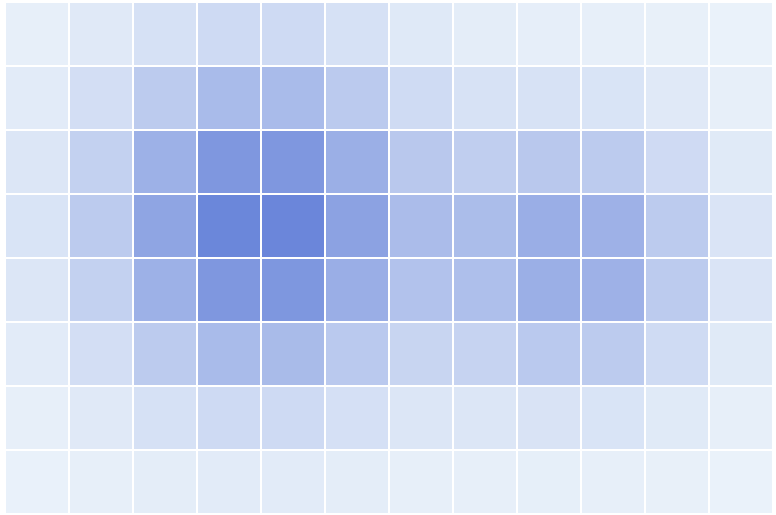
Шероховатость и загрязнения изменяют определение точки первого контакта.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Перед измерением проверяют подготовку поверхности и повторяемость кривых.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



AFM-карта высот: модельный пример

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Термодрейф и пластические эффекты

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 11 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

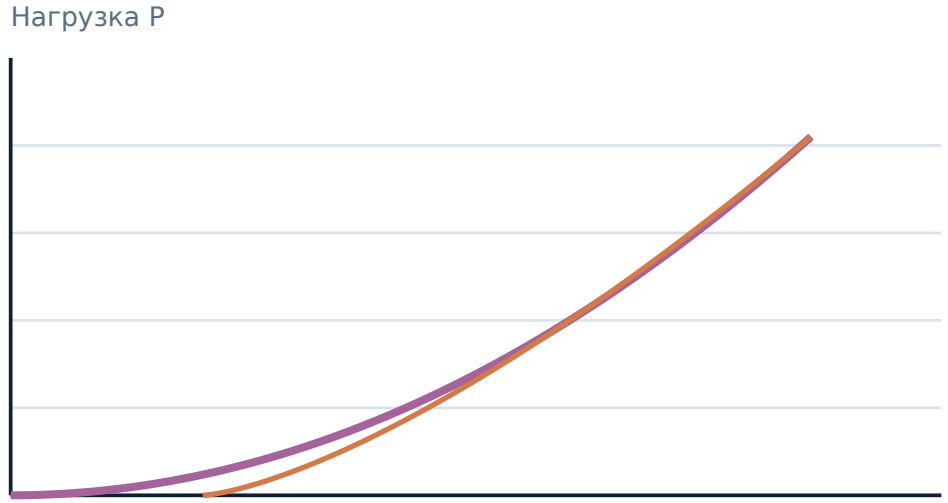
Термодрейф меняет записанную глубину даже при постоянной нагрузке.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Навал материала (pile-up) и втягивание (sink-in) влияют на контактную площадь.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Условия опыта · повторяемость



Нагружение / разгрузка

МОДЕЛЬ / СХЕМА

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Планирование серии измерений

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 12 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Измерения проводят в нескольких удалённых друг от друга точках с контролем шагов и нагрузок.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Среднюю твёрдость сопровождают разбросом и числом отпечатков.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Структура · состав · свойства



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Ограничения механических испытаний

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ · 13 / 13

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ

Одна величина твёрдости не описывает все механические свойства наноматериала.

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ

Выводы проверяют с учётом вязкоупругости, трещин и структуры материала.

ПРАКТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ

Измерение · калибровка · вывод



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ

Схема или расчётная кривая; не реальные измерения.

Разбор расчётного примера: Расчёт индентационной твёрдости

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Максимальная сила $P = 2$ мН, проекция площади $A_c = 0{,}5$ мкм².

РЕШЕНИЕ

$$H = 2 \times 10^{-3} / (0{,}5 \times 10^{-12}) = 4 \times 10^{9}\ \text{Па}.$$

КАК ПОНИМАТЬ РЕЗУЛЬТАТ

Индентационная твёрдость равна 4 ГПа при заданной контактной площади.

Итоги лекции: главные выводы

Принцип

При нагружении регистрируют глубину проникновения, а разгрузка характеризует упругий отклик. Остаточная глубина...

Применение

Микроиндентация обычно исследует большие объёмы материала, чем наноиндентация. Сравнение методов требует учёта...

Ограничения

Одна величина твёрдости не описывает все механические свойства наноматериала. Выводы проверяют с учётом...

Главный итог: обоснованный научный вывод требует корректной физической модели и проверки измерений.

Контрольные вопросы и литература

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем твёрдость отличается от модуля упругости?
2. Почему нужна калибровка контактной площади?
3. Как подложка влияет на тонкоплёночную индентацию?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bhagyaraj et al. Characterization of Nanomaterials, 2018

2. Srinivasan et al. Experimental Techniques, 2024

Материалы курса, 2026

Самостоятельное задание: назовите измеряемый параметр, предложите метод и укажите возможный источник ошибки.