



Автоматизация неразрушающей диагностики  
прочностных свойств элементов  
металлоконструкций методом кинетического  
индентирования с применением мобильного  
комплекса ИВК «Индентор»

Институт машиноведения УрО РАН

Коновалов Дмитрий Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник  
Перунов Евгений Николаевич, ведущий инженер

## Цель задачи

Сопротивление деформации, связывающее напряжение одноосного растяжения или сжатия с накопленной степенью деформации, является важной характеристикой свойств металла. Часто его геометрическую интерпретацию называют кривой деформационного упрочнения. На ее основе можно определить напряженно-деформированное состояние при моделировании процесса изготовления деталей или эксплуатации изделий, выполнить анализ деформируемости металла и оценить склонность материала к разрушению.

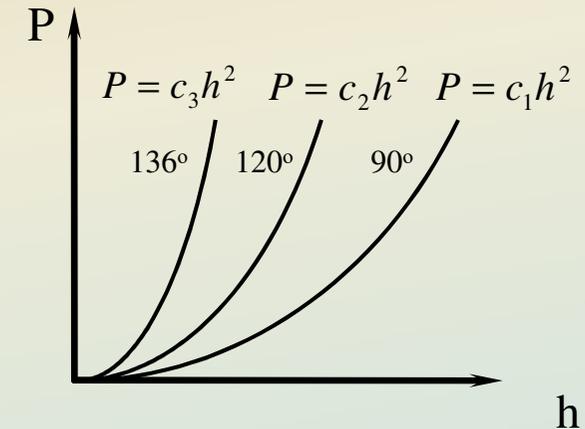
Для определения механических свойств (кривой деформационного упрочнения) металлов в основном применяют три стандартизованных испытания: растяжение, сжатие и кручение образцов. Эти методы дают достоверную информацию о свойствах материалов. Для изготовления образцов необходимо вырезать часть материала из заготовки, изделия или элемента конструкции, поэтому данные испытания относятся к, так называемым, разрушающим методам. Однако в некоторых случаях изготовить образцы необходимых размеров или в необходимом количестве либо не представляется возможным, либо нецелесообразно по экономическим или техническим причинам. Это справедливо для конструкций и машин, находящихся в эксплуатации, когда необходимо сделать оценку текущего состояния технических объектов для определения возможности их дальнейшей эксплуатации.

Многократное моделирование процесса вдавливания инденторов в упруго-пластическую среду

$$\sigma_s = \sigma_0(1 + a\varepsilon)^b \quad (1)$$

Материал	Модуль E, ГПа	Диапазон изменения параметров		
		$\sigma_0$ , МПа	$a$	$b$
Алюминий	70	30 ÷ 600	20 ÷ 400	0.2 ÷ 0.5
Латунь	95	100 ÷ 800		
Медь	110	70 ÷ 600		
Сталь	210	200 ÷ 1300		

Конические и пирамидальные инденторы



Зависимость коэффициента  $C$  от параметров аппроксимации  $\sigma_0, a, b$

$$c_i = \varphi_1 a^{\varphi_2}$$

$$\varphi_1^i = (x_1^i \sigma_0 + x_2^i) \cdot b + x_3^i \sigma_0 + x_4^i \quad (2)$$

$$\varphi_2^i = (x_5^i \sigma_0 + x_6^i) \cdot b + x_7^i \sigma_0 + x_8^i$$

Индекс  $i$  определяет значения коэффициентов  $x_1 - x_8$  для соответствующего угла индентора

Решение системы (2) находится методом подбора путем минимизации невязки  $\rho(\sigma_0, a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (c_i - c_{i\theta})^2}$

Оборудование на котором проводились эксперименты по растяжению тестовых материалов и вдавливанию алмазных наконечников в тестовые материалы

3

### Тестовые материалы

Сталь: Ст3, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т,  
12Х18Н10Т, 45.

Медь М0. Латунь.

### Instron 8801



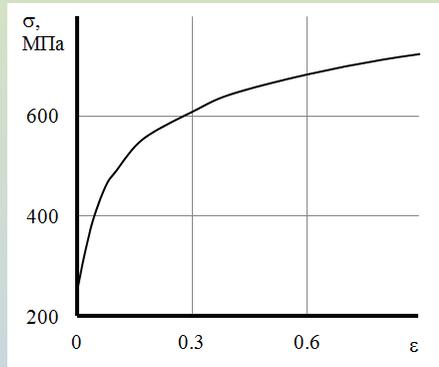
Максимальное усилие – 100 кН

### Zwick/Roell Z2.5

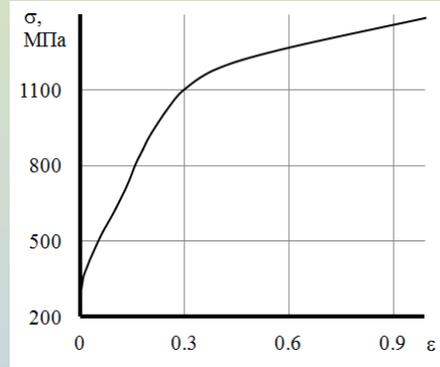


Максимальное усилие – 2,5 кН

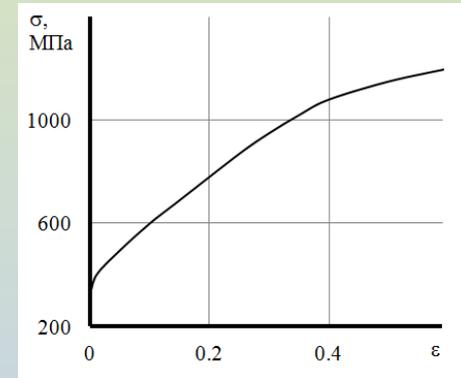
# Кривые упрочнения тестовых материалов



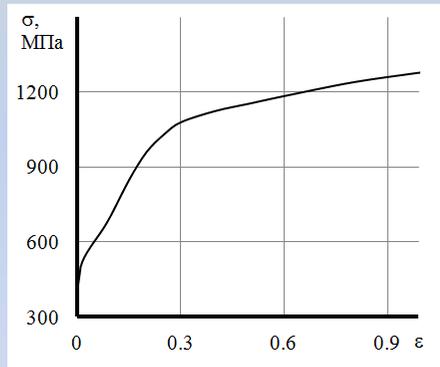
Сталь Ст3



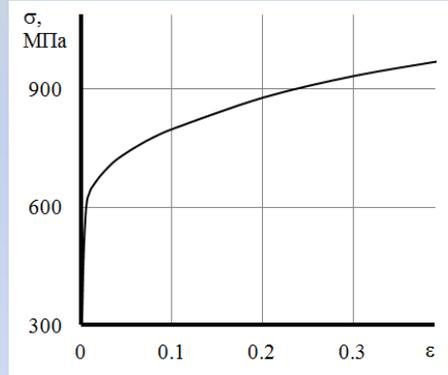
Сталь 08X18H10T



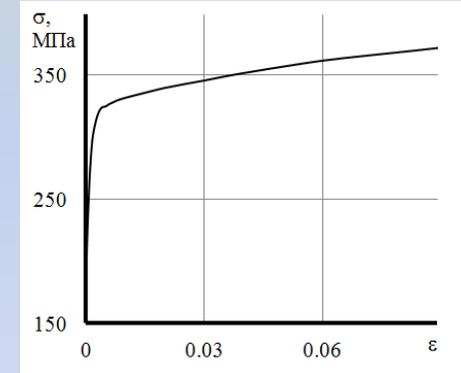
Сталь 10X17H13M3T



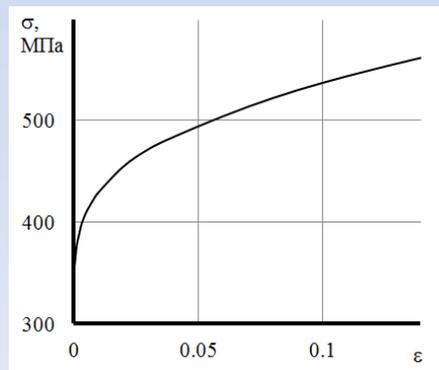
Сталь 12X18H10T



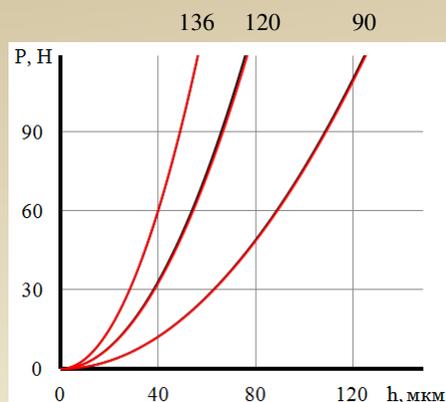
Сталь 45



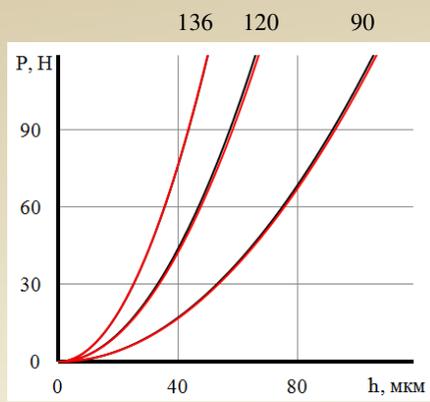
Медь М0



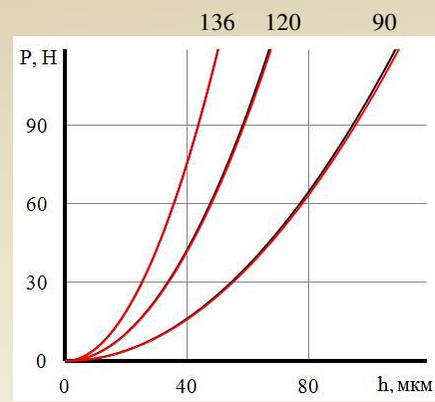
Латунь



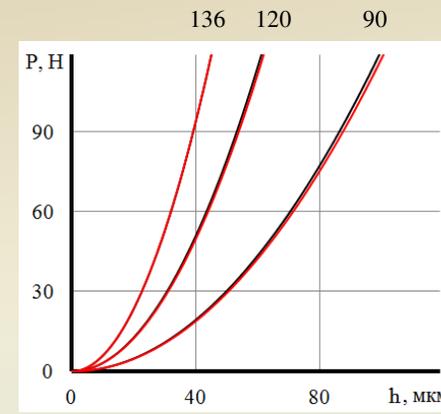
Сталь Ст3



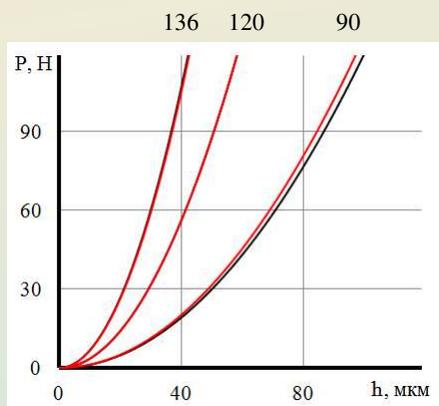
Сталь 08X18H10T



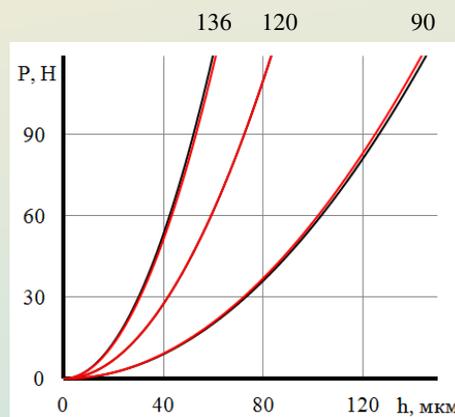
Сталь 10X17H13M3T



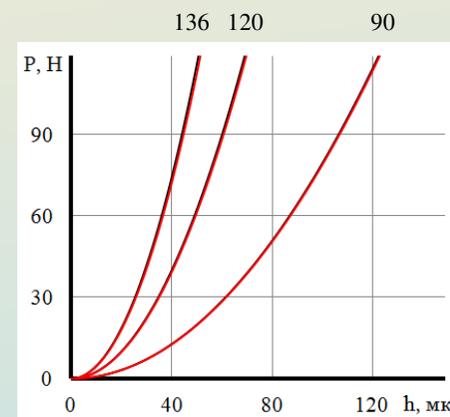
Сталь 12X18H10T



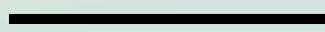
Сталь 45



Медь М0



Латунь

 Эксперимент на Zwick/Roell Z2.5

 Расчет на Ansys

Усилие, Н

dH, мкм

Кол-во кривых

Номера файлов с кривыми

<input checked="" type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> 11	<input type="checkbox"/> 16
<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/> 12	<input type="checkbox"/> 17
<input checked="" type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 8	<input type="checkbox"/> 13	<input type="checkbox"/> 18
<input checked="" type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 9	<input type="checkbox"/> 14	<input type="checkbox"/> 19
<input checked="" type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 10	<input type="checkbox"/> 15	<input type="checkbox"/> 20

Min усилие

dH

Кик средний     Кэф-нт вариации Кика, %     Сдвиг средний

Кик средней кривой

Усилие, Н

dH, мкм

Определение кривой упрочнения

**Экспериментальные данные**

Сталь       Медь  
 Алюминий       Латунь

Модуль Юнга E  МПа

Угол индентора      Коэффициенты диаграмм

<input checked="" type="radio"/> Пирамида	<input type="text" value="90"/>	<input type="text" value="7660"/>
<input type="radio"/> Конус		
<input checked="" type="radio"/> Пирамида	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="20771"/>
<input type="radio"/> Конус		
<input checked="" type="radio"/> Пирамида	<input type="text" value="136"/>	<input type="text" value="37490"/>
<input type="radio"/> Конус		

**Параметры аппроксимации**

$\sigma_{0,2}$   МПа

$\sigma_0$   МПа

a1

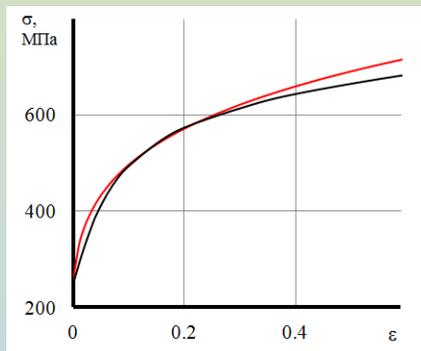
a2

	Сигма, МПа	Степ.деформ
1	276	0
2	280.9	0.001
3	285.6	0.003
4	290.2	0.004
5	294.6	0.005
6	298.8	0.007
7	303	0.008
8	307	0.009
9	310.9	0.011
10	314.7	0.012
11	318.3	0.013
12	321.9	0.015
13	325.4	0.016
14	328.9	0.017
15	332.2	0.019
16	335.5	0.02
17	338.7	0.021
18	341.8	0.023
19	344.9	0.024
20	347.9	0.025
21	350.9	0.027
22	353.8	0.028
23	356.7	0.029

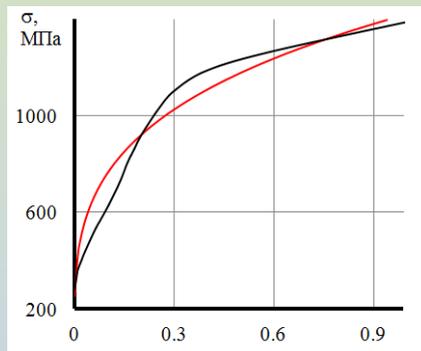
**Кривая упрочнения**

График зависимости напряжения (σ) от деформации (ε). Ось σ имеет значения от 300 до 650 МПа, ось ε - от 0 до 0.35. Красная кривая показывает нелинейное увеличение напряжения с деформацией.

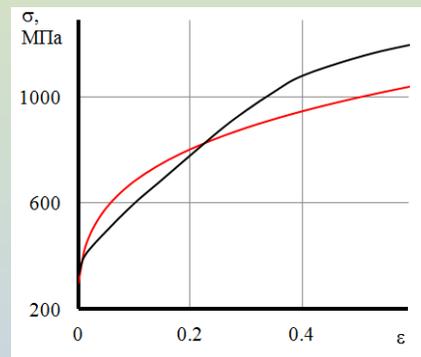
# Экспериментальные и восстановленные кривые упрочнения для тестовых материалов 8



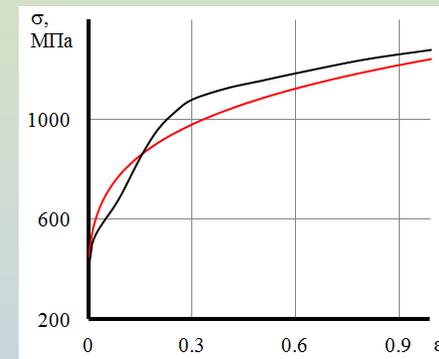
Сталь Ст3



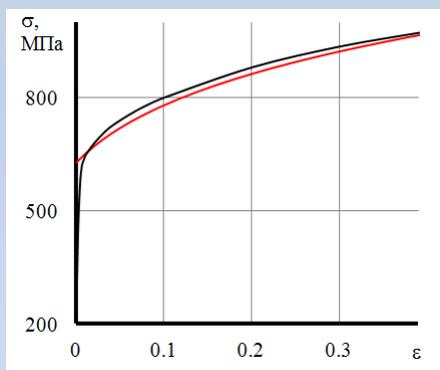
Сталь 08X18H10T



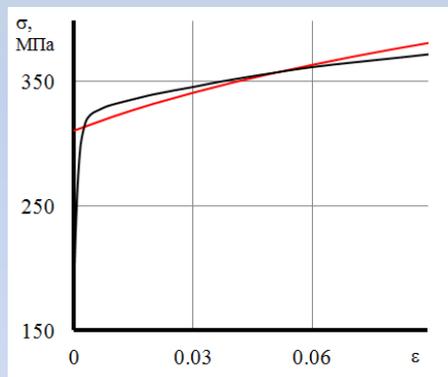
Сталь 10X17H13M3T



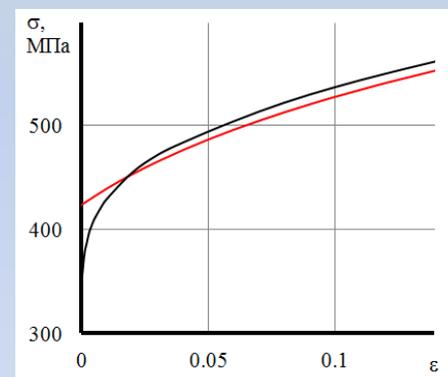
Сталь 12X18H10T



Сталь 45



Медь М0

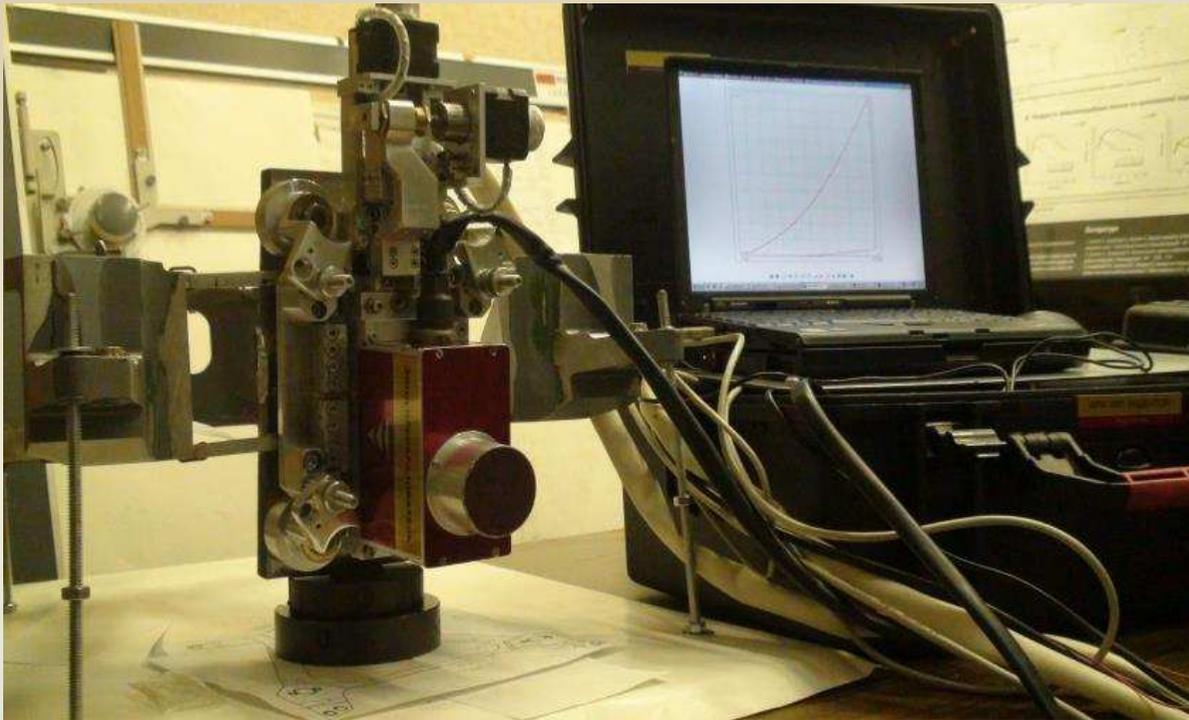


Латунь

— Эксперимент на машине Instron 8801

— По разработанной методике

## Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) кинетического индентирования



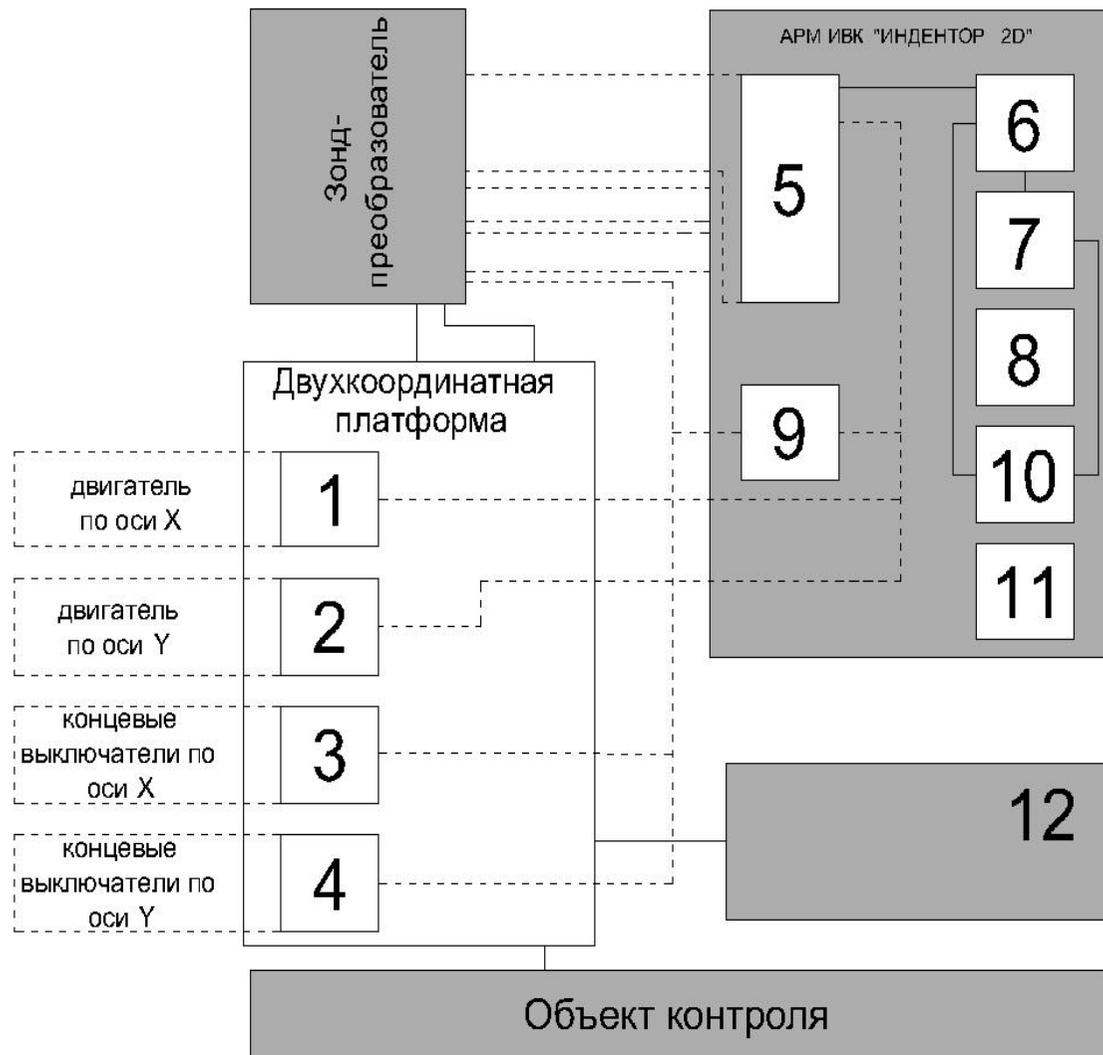
Комплекс ИВК, разработанный в Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМаш УрО РАН), предназначен для исследования состояний и диагностики материалов конструкций. ИВК реализует прямой метод испытания по твердости – метод нагружения (индентирования) непосредственно на элементах конструкций контролируемых объектов и построение кинетических диаграмм вдавливания в виде зависимости силы вдавливания  $P$  от глубины вдавливания  $h$ .

Прибор состоит из трех основных блоков:

- зонд-преобразователь;
- автоматизированное рабочее место (АРМ ИВК «Индентор 2.0»);
- устройство базирования двухкоординатное.

### Основные характеристики прибора

- ◆ Система измерения силы в диапазоне 0-250Н, с систематической составляющей погрешности  $\pm 0,1\%$ .
- ◆ Система измерения перемещения с пределами допускаемой погрешности на участках диапазона измерений 0-40 мкм  $\pm 0,06$  мкм, 0-400 мкм  $\pm 0,6$  мкм.



- 1 - двигатель по оси X;
- 2- двигатель по оси Y;
- 3 - концевые выключатели X;
- 4 - концевые выключатели Y;
- 5 - модуль управления двигателями;
- 6- сервер последовательных интерфейсов ;
- 7 - коммутатор;
- 8 - блок питания ;
- 9 - Модуль дискретного вывода;
- 10 - переносной ПК (ноутбук);
- 11 - ПО (программное обеспечение);
- 12 - устройство подготовки поверхности;

## Технические характеристики ИВК

Тип	Индентор 2.0
Диапазон испытательных нагрузок	1–240 Н
Разрешение нагрузки	0,1 Н
Разрешение перемещения по X	0,16 мкм
Разрешение перемещения по Y	0,16 мкм
Разрешение перемещения по Z	0,16 мкм
Разрешение датчика перемещения	1 мкм (с калибровочной кривой до 0,1 мкм)
Устройство базирования 2-х координатное, размеры площадки базирования оборудования	160; 60 мм. (X; Y)
Устройство базирования 2-х координатное, перемещение, мм	30x6 мм. (X; Y)
Программное обеспечение / Операционная система	Индентор 2.0®/WinXP®
Инденторы	четырёхгранная пирамида с квадратным основанием и углом между гранями: 90°, 120°, 136°.
Скорость перемещения по X	от 0,16 до 480 мкм/сек
Скорость перемещения по Y	от 0,16 до 480 мкм/сек
Скорость перемещения по Z (приближения индентера к поверхности)	от 0,16 до 480 мкм/сек
Максимальная глубина внедрения	400 мкм
Окружающий рабочий температурный диапазон	-15 °С до +40°С
Электропитание	220 V +/- 10 %, 47-63 Hz
Максимальные размеры образца (В x Г x Ш)	не ограничены
Размеры кейса (Д x Ш x В)	480 x 360 x 198 мм.
Дополнительные сведения	Класс защиты комплекса в транспортировочном состоянии –

Программное обеспечение (ПО) предлагает набор функций для управления всем циклом измерения.

Установки тестовых параметров, такие как максимальная нагрузка, количество интервалов индентирования, время выдержки при максимальной нагрузке, вертикальная скорость перемещения индентора (ось Z) и скорость перемещения вдоль поверхности объекта по осям X, Y могут быть сохранены в отдельном файле и загружены в любой момент без необходимости задавать все параметры заново.

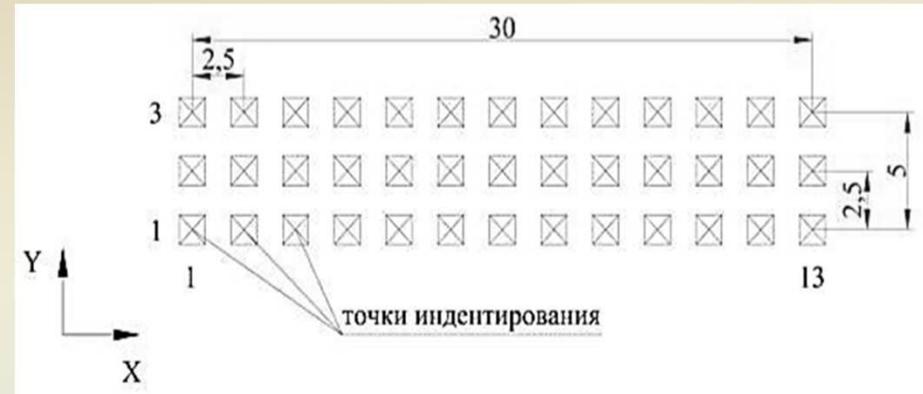
Рабочее окно ПО **Индентор 2.0®** представляет собой несколько одновременно открытых информационных окон, способствующих краткому обзору всей релевантной информации:

- интерактивное представление процесса измерения в координатах P-h;
- таблица, отображающая текущее значение силы и перемещения при индентировании;
- таблица, отображающая количество точек цикла автоматического индентирования, их координаты и текущая точка индентирования при автоматическом режиме работы.

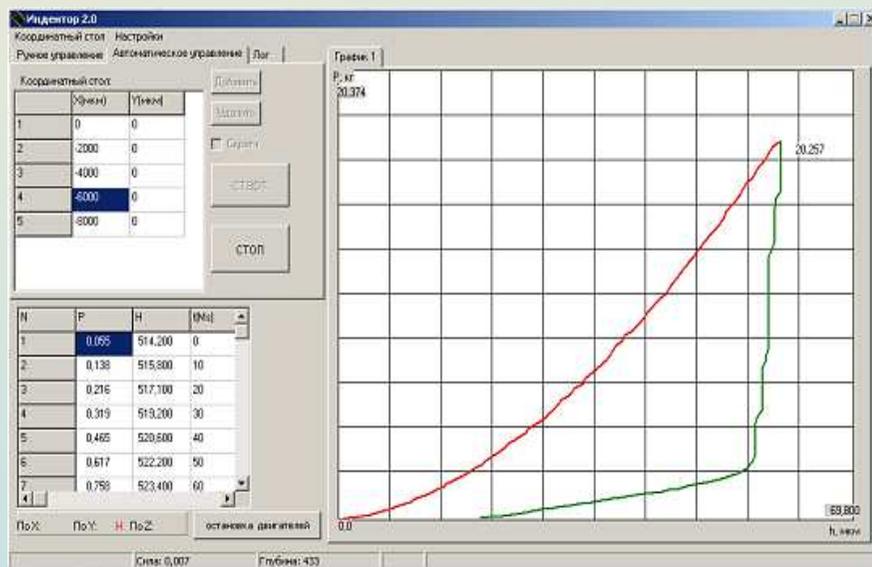
ПО предусматривает два режима работы – автоматический и ручной. Рабочие окна двух режимов отличаются лишь областью управления перемещением: автоматический режим предусматривает табличный набор координат x и y для индентирования, в то время как ручной режим содержит указатели направления движения в виде стрелок, позволяющих переместиться на заранее заданное расстояние.

Значения силы и перемещения полученных характеристик материала автоматически корректируются согласно тарифовочным таблицам.

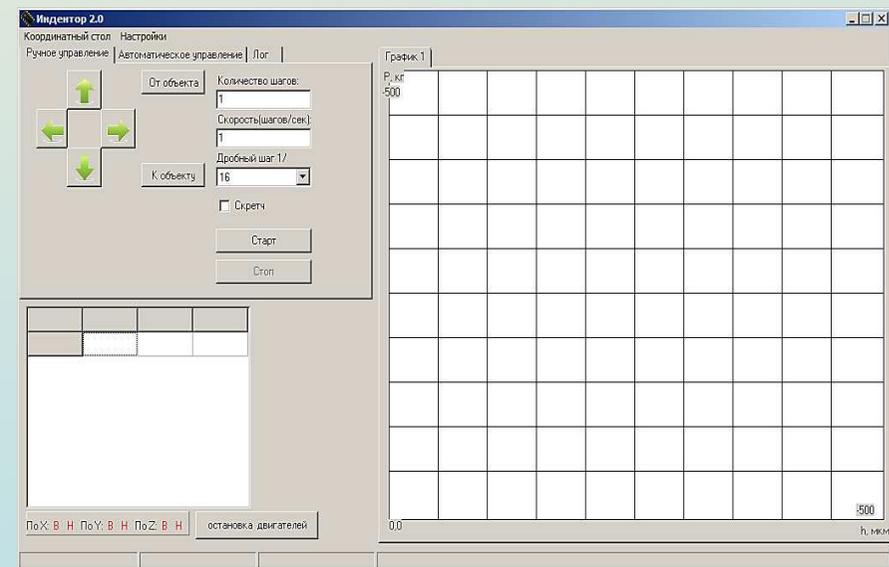
## Схема индентирования



## Окно для автоматического режима



## Окно для ручного режима





Весового терминал CAS CL-2001A



Датчик перемещения индуктивный с измерительным прибором БИН-2И



Контроллеры uirobot UIM24104 для управления шаговыми и планетарными двигателями



Шаговый двигатель FL42STH33 с угловым шагом 1,8 градуса



Планетарный двигатель FL42BY12 (Рисунок 8) с угловым шагом 7,5 градуса



Четырех портовый шлюз данных Ethernet в RS232/422/485 EKI-1524, к нему подключаются все устройства

## ИВК на объекте контроля



Спасибо за внимание !