ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ИНДЕНТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ НАГРУЗКИ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

USE OF INDENTER RESONANT OSCILLATION FREQUENCY TO IMPROVE INDENTATION LOAD RESOLUTION

УДК 681.2.083, ВАК 05.11.13

В.Мещеряков¹, И.Масленников², В.Решетов², А.Усеинов² / useinov@mail.ru
V.Mesheryakov¹, I.Maslenikov², V.Reshetov², A.Useinov²

Описывается метод измерения средней силы взаимодействия осциллирующего острия индентора с образцом, основываясь на данных о сдвиге резонансной частоты колебаний в контакте с поверхностью. Эффективность метода продемонстрирована с помощью модификации нанотвердомера "НаноСкан" при исследовании образцов с различными механическими свойствами. Новый метод измерения контактных сил позволяет расширить круг объектов для инструментального индентирования за счет существенного уменьшения контролируемого усилия и глубины внедрения индентора.

A method of measuring the average force of interaction of the oscillating indenter tip with the sample based on the data about the shift of the resonance frequency of the oscillations in contact with the surface is proposed. The efficiency of the method is demonstrated using NanoScan nanohardness tester modification during testing of samples with different mechanical properties. The application of the new method is extending the range of objects available for study by the instrumented indentation technique, due to a significant resolution improvement during force and indentation depth measurements.

Измерение локального значения твердости и модуля упругости гетерогенных и наноструктурированных материалов предполагает проведение инструментального индентирования с предельно низкими значениями глубины погружения индентора в материал и усилия прижима индентора к поверхности. Многие сканирующие нанотвердомеры, в частности, приборы семейства "НаноСкан" (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия), комплектуются гибридными зондовыми датчиками, работающими как в статическом, так и в динамическом режиме, когда зонд осциллирует на собственной резонансной частоте. Динамический режим обычно используется при

сканировании профиля рельефа поверхности и картографировании механических свойств материалов [1–3].

Метод инструментального индентирования предполагает анализ экспериментальной кривой "нагрузка-внедрение" (рис.1). Максимальное значение нагрузки $F_{\max}$, наклон разгрузочной кривой S и контактная глубина $h_c = h_{\max} - F_{\max}/S$ позволяют определить локальные значения твердости и модуля упругости исследуемого материала [4].

Такого рода измерения обычно проводятся в квазистатическом режиме без возбуждения колебаний индентирующего наконечника. Однако, используя режим динамического изме-

¹ НИЯУ МИФИ / National Research Nuclear University MEPhI.

² Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ФГБНУ ТИСНУМ) / Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials.

рения контактной жесткости и метод силовой спектроскопии, можно существенно сократить время измерений и упростить обработку полученной зависимости механических свойств материала от глубины погружения индентора.

Детальный анализ механизмов взаимодействия осциллирующего острия с поверхностью и экспериментальные исследования новой модели прибора "НаноСкан" с цифровым регулированием режима самовозбуждения позволили расширить метрологические возможности сканирующих нанотвердомеров в области малых нагрузок и глубин внедрения. Благодаря такому подходу, для типичного резонансного зондового датчика "НаноСкан" удастся в десятки раз уменьшить уровень эквивалентной шумовой компоненты силы на кривой индентирования.

В настоящей работе приводятся результаты, полученные с использованием резонансного зондового датчика балочной конструкции, возбуждение которого обеспечивается автогенераторной схемой, представленной на рис.2. С целью расширения метрологических возможностей прибора в схеме возбуждения используется дополнительная петля регулирования, поддерживающая амплитуду колебаний зондового датчика неизменной во время индентирования и силовой спектроскопии (элементы 7, 8 и 9 на рис.2).

Принципиальным отличием данной схемы от традиционной [5] является наличие механизма автоматического регулирования сигнала возбуждения зондового датчика с целью поддер-

Рис.1. Кривая нагрузки-разгрузки

Fig.1. Loading-unloading curve

жания неизменной амплитуды его колебаний. Это приводит к двум положительным результатам:

- автоколебания не срываются при гораздо больших уровнях прижима алмазного острия к поверхности, чем при обычной схеме возбуждения;
- величина сдвига частоты резонансных колебаний датчика, находящегося в контакте с поверхностью, оказывается прямо пропорциональной среднему значению силы взаимодействия в достаточно широком диапазоне глубин погружения индентора в поверхность.

Measurement of local values of hardness and elastic modulus of heterogeneous and nanostructured materials presupposes the instrumental indentation with extremely low values of the depth of penetration of the indenter into the material and the contact force of the indenter to the surface. Many scanning nanohardness testers, in particular, the devices of the NanoScan family (FSBI TISNCM, Russia), are equipped with a hybrid probe sensors, which operate both in static and in dynamic mode, when the probe oscillates at its own resonant frequency. Dynamic mode is usually used for scanning the surface

profile and for mapping of mechanical properties of materials [1-3].

The instrumental indentation involves the analysis of experimental loading-unloading curve (Fig.1). The maximum load value F_{max} , the slope of the unloading curve S and the contact depth $h_c = h_{max} - F_{max}/S$ allow to estimate local values of hardness and elastic modulus of the investigated material [4].

This kind of measurement is usually conducted in quasi-static mode without excitation of vibrations of indenter tip. However, using the dynamic measurement of contact stiffness and the method of force spectroscopy, it is possible to

significantly reduce the measurement time and to simplify processing of the dependences of the mechanical properties of the material on the indentation depth.

A detailed analysis of the interaction mechanisms of the oscillating tip with the surface and experimental study of a new model of NanoScan device with digitally controlled self-excitation mode allow to extend the metrological capabilities of scanning nanohardness tester in the area of small loads and indentation depths. Thanks to this approach, for a typical NanoScan resonant probe it is possible to reduce dozens of times the level of

Рис.2. Схема возбуждения колебаний с петлей автоматического регулирования по амплитуде: 1 – пьезокерамический актюатор; 2 – гибридный зонд с датчиком силы; 3 – усилитель; 4 – образец; 5 – полосовой фильтр; 6 – ограничитель; 7 – амплитудный детектор; 8 – ПИД регулятор; 9 – усилитель с управляемым коэффициентом усиления

Fig.2. Scheme of excitation of oscillations with feedback loop for amplitude automatic control: 1 – piezoceramic actuator; 2 – hybrid probe with a force sensor; 3 – amplifier; 4 – sample; 5 – band filter; 6 – stopper; 7 – amplitude detector; 8 – PID controller; 9 – amplifier with controlled gain

Сочетание двух этих факторов привело к существенному расширению метрологических характеристик приборов семейства "НаноСкан" при наноиндентировании, позволив перейти к режимам измерения с усилиями прижима всего несколько десятков мкН.

Рассмотрим физические процессы, происходящие при прерывистом контакте осциллирующего острия с поверхностью. Подчеркнем, что в данном случае рассматривается полуконтактный режим, существенно отличающийся от измерений механических свойств возбужденным индентором с амплитудой намного меньшей углубления в поверхность, как это принято в методе динамического анализа (DMA [6] и при непрерывном измерении контактной жесткости (CSM [7])). Другое отличие рассматриваемого метода от традиционных подходов заключается в том, что датчик колеблется на частоте своего резонанса, в то время как в случае CSM и DMA происходят вынужденные колебания на частоте, обычно не превышающей резонансную частоту зонда.

Для всех рабочих скоростей углубления зонда в поверхность образца можно принять, что $A_0\omega_0 \ll v$, где A_0 – амплитуда колебаний зонда, ω_0 – резонансная частота, v – скорость углубления зонда в поверхность. При этом условии в рамках одного цикла колебаний зонд совершает индентирование до одной и той же глубины. Тогда можно считать, что каждое повторное нагружение до заданной глубины являются чисто упругими [8]. Отсюда следует, что в рассматриваемой ситуации осциллирующий индентор движется вдоль кривых разгрузки, лишь немного углубляясь за каждый следующий период (рис.3).

equivalent noise power on the indention curve.

This paper presents the results obtained using a resonant probe of beam type, which excitation is provided by self-contained generator shown in Fig.2. To extend the metrological capabilities of the device, we have used in the scheme of excitation an additional loop of regulation that supports the oscillation amplitude of the probe constant during indentation and force spectroscopy (items 7, 8 and 9 in Fig.2).

The principal difference of this scheme from the traditional one [5] is a mechanism for automatic regulation of the excitation signal of the

probe sensor to maintain constant the amplitude of its oscillation. This leads to two positive results:

- self-oscillation does not break at much higher levels of pressure of the diamond tip on the surface than in conventional excitation system;
- the frequency shift of resonance oscillations of the sensor, which is in contact with the surface, is directly proportional to the average value of the interaction force in a fairly wide range of depths of penetration of the indenter into the surface.

The combination of these two factors has led to a significant extension

of the metrological characteristics of the devices of the NanoScan family during the nanoindentation, allowing the use of measurement modes with the load of only a few tens of microneutons.

Let's consider the physical processes occurring during intermittent contact of the oscillating tip with the surface. We consider semi-contact mode, which significantly differs from the measurements of the mechanical properties by excited indenter with an amplitude that is much smaller than the penetration in the surface, as it is typical for dynamic mechanical analysis (DMA [6]) and continuous stiffness

Как указано в [4], упругое взаимодействие индентора с пластически деформированной поверхностью можно описать в рамках чисто упругого взаимодействия параболоида вращения с радиусом кривизны кончика R с плоской поверхностью. Введение такой "эффективной формы индентора" [4] позволяет связать силу, действующую на зонд, с глубиной погружения в рамках модели Герца:

$$F = \frac{4}{3} E^* h^{3/2} \sqrt{R}. \quad (1)$$

Символом E^* обозначен приведенный модуль упругости поверхности $\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s^2} + \frac{1 - \nu_{ind}^2}{E_{ind}^2}$, где ν_s и ν_{ind} – коэффициенты Пуассона материала и индентора, E_s и E_{ind} – модули Юнга материала и индентора. Во всех измерениях использовался алмазный индентор ($E_{ind} = 1147$ ГПа, $\nu_{ind} = 0,07$). При таком описании под h следует понимать нормальную деформацию, обусловленную упругим взаимодействием с поверхностью. Рассматривая один цикл колебаний как кривую "нагрузка-разгрузка", в рамках обозначений рис.1 можно отметить, что при описании кривой разгрузки в рамках модели Герца величине h соответствует глубина $h_{max} - h_f$.

Хорошо известно [9, 10], что для резонансной системы с параметрами k и m наличие внешней силы $F(h) = F(h_0 + A \cos(\omega_0 t))$ приводит к сдвигу резонансной частоты собственных колебаний, задаваемому соотношением:

Рис.3. Зависимость силы от глубины погружения при осциллирующем движении индентора (сила и глубина приведены в условных единицах)

Fig.3. Force dependence on the depth of indentation at the oscillating motion of the indenter (the strength and depth are given in arbitrary units)

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{k A_0^2} \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(h(t)) (-\dot{h}(t)) dt. \quad (2)$$

Если касание острия зонда с поверхностью длится лишь небольшую часть периода колебаний ($A \gg h$), то данная зависимость приводит к соотношению следующего вида [11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{E^* \sqrt{R}}{k_0 A^{3/2}} h^2. \quad (3)$$

measurement (CSM [7]). Another difference of this method from traditional approaches is that the sensor oscillates at the resonance frequency, while in the case of CSM and DMA forced oscillations occur at a frequency, which normally does not exceed the resonance frequency of the probe.

For all operating speeds of deepening of the probe into the surface of a sample it can be taken that $A_0 \omega_0 \ll v$, where A_0 is the oscillation amplitude of the probe, ω_0 is the resonant frequency, v is the speed of the deepening of the probe into the surface. Under this condition within one cycle of oscillation the probe makes

an indentation to the same depth. Then we can assume that each reloading to a predetermined depth is purely elastic [8]. It follows that in this situation, oscillating indenter moves along the curves of unloading, going deep only a little for each following period (Fig.3).

As stated in [4], the elastic interaction between the indenter and plastically deformed surface can be described in terms of a purely elastic interaction between paraboloid of revolution with a radius of curvature of the tip R and a flat surface. The introduction of such "effective indenter shape" [4] allows to relate the force acting on the probe with

penetration depth in the model of Hertz:

$$F = \frac{4}{3} E^* h^{3/2} \sqrt{R}, \quad (1)$$

where E^* is reduced modulus of elasticity of the surface

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s^2} + \frac{1 - \nu_{ind}^2}{E_{ind}^2}, \quad \nu_s \text{ and } \nu_{ind} \text{ are}$$

the Poisson's ratios of the material and the indenter, E_s and E_{ind} are Young modules of the material and the indenter. In all measurements the diamond indenter is used ($E_{ind} = 1147$ ГПа, $\nu_{ind} = 0.07$). In this case under the h should understand the normal deformation due to elastic interaction

Рис.4. Примеры зависимостей между средней силой прижима и сдвигом резонансной частоты для различных материалов: черный – плавленый кварц ($E_s = 73$ ГПа, $H = 9,2$ ГПа); красный – ПММА ($E_s \sim 3,5$ ГПа, $H \sim 0,3$ ГПа); зеленый – титан ($E_s \sim 110$ ГПа, $H \sim 1$ ГПа); синий – бериллиевая бронза ($E_s \sim 130$ ГПа, $H \sim 0,3$ ГПа). Более тусклыми кривыми обозначены зависимости, соответствующие нагружению индентора в материал, более яркие и жирные – кривые, соответствующие участку разгрузки

Fig.4. Examples of the dependencies of average contact force on the shear of resonance frequency for different materials: black – fused quartz ($E_s = 73$ GPa, $H = 9.2$ GPa); red – PMMA ($E_s \sim 3.5$ GPa, $H \sim 0.3$ GPa); green – titan ($E_s \sim 110$ GPa, $H \sim 1$ GPa); blue – beryllium bronze ($E_s \sim 130$ GPa, $H \sim 0.3$ GPa). Dimmer curves are marked according to corresponding loading of the indenter into the material, more bright and bold curves, corresponding to the section of unloading

Все современные модификации приборов "НаноСкан" позволяют измерять среднюю за период величину силы, действующей на зонд со стороны поверхности:

$$F_a = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(h[t]) dt. \quad (4)$$

Для данной величины при условии кратковременности касания поверхности в сравнении с периодом колебаний ($A \gg h$) получаем:

$$F_a = \frac{E^*}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R}{A}} h^2. \quad (5)$$

Сопоставление выражений (2) и (4) приводит к следующему соотношению:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{F_a}{k_0 A}. \quad (6)$$

Несмотря на то, что выражение (6) было получено исходя из уравнений деформации полубесконечной упругой среды параболическим индентором, оно имеет более широкую область применения. Действительно, используя рассуждения и термины работы [4], можно отметить, что взаимодействие по модели Герца (1) описывает также процесс разгрузки индентора после пластического взаимодействия, если под символом R понимать "эффективную форму индентора". Далее, в свете приведенных выше рассуждений, при быстрых осцилляциях можно считать, что на протяжении всего периода колебаний в контакте с поверхностью индентор движется вдоль разгрузочной кривой, а значит, полученные соотно-

with the surface. Considering one cycle of oscillations as the "loading-unloading" curve (Fig.1) it can be noted that in case of description of the unloading curve in the framework of the Hertz model, the value h corresponds to the depth $h_{\max} - h_f$.

It is well known [9, 10] that for the resonant system with parameters k and m the presence of an external force $F(h) = F(h_0 + A \cos(\omega_0 t))$ leads to a shift of the resonance frequency of natural oscillations, which is set by a ratio

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{k A_0^2} \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(h(t)) (-h'(t)) dt. \quad (2)$$

If the touch of the tip of the probe with the surface lasts only a small part of the oscillation period ($A \gg h$), the dependency leads to the following correlation [11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{E^* \sqrt{R}}{k_0 A^{3/2}} h^2. \quad (3)$$

All modern modifications of the NanoScan devices allow to measure the average force that acts on the probe from the surface:

$$F_a = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(h[t]) dt. \quad (4)$$

Under condition of the short duration of a contact with the surface in comparison with the period of

oscillations ($A \gg h$), we obtain for the given quantity:

$$F_a = \frac{E^*}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R}{A}} h^2. \quad (5)$$

Comparison of expressions (2) and (4) leads to the following relationship:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{F_a}{k_0 A}. \quad (6)$$

Despite the fact that the expression (6) was derived on the basis of the equations of deformation of semi-infinite elastic medium by a parabolic indenter, it has a broader field of application. Indeed, using the arguments and terminology of

шения остаются верными и при медленном внедрении с пластической деформацией образца.

Вместе с тем можно отметить, что, несмотря на описанную общность приведенных соотношений, уравнения (3) и (5) содержат величину эффективного радиуса R , которая меняется по мере углубления в упруго-пластическую поверхность, что затрудняет применение этих выражений напрямую. Тем не менее, из этих уравнений следует соотношение (6), которое величины R не содержит, а значит может быть использовано на практике для описания процессов внедрения в упруго-пластичный материал.

В качестве экспериментального подтверждения соотношения (6) на рис.4 представлены примеры зависимостей средней силы от сдвига резонансной частоты колебаний, полученные с использованием резонансного датчика балочной конструкции. Экспериментальные кривые получены на образцах с различными механическими свойствами.

Определенное по экспериментальным данным значение калибровочного коэффициента $40,3 \text{ мкН/Гц}$ (95% доверительный интервал: $40,13\text{--}40,46 \text{ мкН/Гц}$) хорошо согласуется с расчетным значением при $f_0 = 2460 \text{ Гц}$, $k_0 = 330 \text{ кН/м}$ и амплитуде колебаний 300 нм .

Соотношение (5) позволяет определять силу по сдвигу частоты при любых значениях амплитуды колебаний, если они существенно больше глубины погружения. Вместе с тем, введение дополнительной петли регулирования в тракт самовозбуждения позволяет не только легко вычислить силу по сдвигу частоты, но и исключает необходимость учета влияния изменения ампли-

Рис.5. Кривая инструментального индентирования, полученная на ПММА с использованием новой методики измерения силы прижима острия к поверхности образца

Fig.5. The curve of instrumental indentation obtained for PMMA using a new technique of measuring the pressure of the tip to the sample surface

туды колебаний на глубину погружения индентора в поверхность исследуемого материала.

Пример кривой "нагрузка-разгрузка" для полиметакрилата (ПММА) с максимальным усилием около 300 мкН представлен на рис.5. Хорошо видно, что для испытываемой модели гибридного зонда измерение твердости и модуля упругости с использованием обычного датчика силы не представляется возможным из-за влияния шумов (синяя кривая). В то

paper [4], it can be noted that the interaction in the Hertz model (1) describes the process of unloading of the indenter after plastic interaction, if to understand "effective indenter shape" under R . Further, in light of the above arguments, in case of fast oscillations, we can assume that throughout the period of oscillation in contact with the surface the indenter moves along the unloading curve, and thus the obtained relations remain true and at slow penetration with plastic deformation of the sample.

It can be noted that, despite the described commonality of these relations, equations (3) and (5)

contain the value of the effective radius R that is changing with the deepening in the elastic-plastic surface. It complicates direct application of these expressions. However, from these equations follows the relation (6), which does not contain value of R , and thus can be used in practice to describe the penetration in elastic-plastic material.

As experimental confirmation of the relation (6), Fig.4 shows examples of the dependences of the average force on the shift of the resonant oscillation frequency obtained using the resonant sensor of the beam design. Experimental curves are

obtained for samples with different mechanical properties

Value of the calibration coefficient of 40.3 μN/Hz (confidence interval of 95% from 40.13 to 40.46 μN/Hz), which is determined by experimental data, is in good agreement with the calculated value $f_0/(k_0A)$ at $f_0 = 2460 \text{ Hz}$, $k_0 = 330 \text{ кН/м}$ and oscillation amplitude of 300 нм .

The relation (5) allows to determine the force by the frequency shift for all values of the oscillation amplitude if they are significantly more than penetration depth. At the same time, the introduction of an additional loop of regulation in the path of self-excitation allows not

же время данные, получаемые по сдвигу резонансной частоты зонда, дают возможность обработать кривую по методу инструментального индентирования.

Проведенный теоретический анализ и экспериментальное исследование показали перспективность автогенераторного метода возбуждения колебаний индентирующего зонда и возможность использования такого рода зондов в качестве датчика силы при минимальных изменениях в схеме возбуждения автоколебаний. Введение петли регулирования амплитуды колебаний зонда приводит к возможности прямого использования сигнала сдвига частоты в качестве сигнала силы при обработке кривых инструментального индентирования без учета изменения амплитуды.

Экспериментально подтвержденное значительное уменьшение уровня шума на кривой индентирования вполне типично и позволяет говорить о существенном расширении метрологических возможностей приборов семейства "НаноСкан" при использовании в их составе нового электронного обеспечения без изменения механической и зондовой части прибора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения №14.577.21.0088 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0088).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Maslenikov I.I., Reshetov V.N., Useinov A.S.** Mapping the Elastic Modulus of a Surface with a NanoScan 3D // Instruments Exp. Tech. 2015. Vol. 58. №5. P. 711-717.
2. **Maslenikov I.I. et al.** Mapping of mechanical properties of nanostructured materials using a piezoresonance probe // Instruments Exp. Tech. 2015. Vol. 58. №3. P. 438-443.
3. **Useinov A., Gogolinskiy K.V., Reshetov V.N.** Mutual consistency of hardness testing at micro-and nanometer scales // Int. J. Mater. Res. 2009. Vol. 56. №2. P. 233-239.
4. **Oliver W.C., Pharr G.M.** Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. Vol. 19. №1. P. 3-20.
5. **Gogolinskii K.V. et al.** A multipurpose probe sensor for scanning nanohardness testers // Instruments Exp. Tech. 2013. Vol. 56. №5. P. 576-583.
6. **Frontini P. et al.** High Temperature Nanoindentation Response of RTM6 Epoxy Resin at Different Strain Rates // Exp. Mech. 2015. P. 851-862.
7. **Li X., Bhushan B.** A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications // Mater. Charact. 2002. Vol. 48. №1. P. 11-36.
8. **Johnson K.** Contact mechanics. Cambridge University Press, 1987. 453 p.
9. **Giessibl F.** Forces and frequency shifts in atomic-resolution dynamic-force microscopy // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. № 24. P. 10-15.
10. **Durig U.** Relations between interaction force and frequency shift in large-amplitude dynamic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 433. May. P. 1-4.
11. **Bielefeldt H., Giessibl F.J.** A simplified but intuitive analytical model for intermittent-contact-mode force microscopy based on Hertzian mechanics // Surf. Sci. 1999. Vol. 440. №3. P. L863-L867.

only to easily calculate the force by the frequency shift, but also eliminates the necessity of considering the influence of oscillation amplitude on the depth of penetration of the indenter into the surface of the material.

An example of the loading-unloading curve for polymethylmethacrylate (PMMA) with a maximum force of about 300 μN is shown in Fig.5. It is obvious that for the test model of a hybrid probe the measurements of hardness and elastic modulus using a conventional force sensor are not possible due to the influence of noise (blue curve). At the same time, the data obtained

by shift of the resonant frequency of the probe, allow to process the curve by a method of instrumental indentation.

Theoretical analysis and experimental study were shown the prospects of the method of self-excitation of oscillations of indentureship probe and the possibility of using this kind of probe as a force sensor in case of minimal changes in the scheme of excitation of self-oscillations. The introduction of a loop of regulation of the amplitude of oscillation of the probe leads to the possibility of direct use of the signal of frequency shift as the signal of force at the processing of curve of instrumental indentation

with no account taken of change of amplitude.

Experimentally confirmed a significant reduction in the noise level on the indentation curve is fairly typical and allows to talk about a significant expansion of the metrological capacities of the devices of the NanoScan family with use of a new electronics without change of a mechanical and probe part of the device. ■

The project is executed at financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation under the agreement No. 14.577.21.0088 (unique project identifier RFMEFI57714X0088).