



# ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО НАНОТВЕРДОМЕРА

## PROFILE MEASUREMENTS OF COMPLEX-SHAPED PARTS USING SCANNING NANOHARDNESS TESTER

УДК 681.2.083, ВАК 05.11.13, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.75.4.38.44

А.Усеинов<sup>1</sup>, И.Масленников<sup>1</sup>, А.Русаков<sup>1</sup>, Е.Гладких<sup>1</sup>, Б.Логинов<sup>2</sup>, В.Логинов<sup>2</sup>, А.Елкин<sup>2</sup> / useinov@mail.ru  
A.Useinov<sup>1</sup>, I.Maslenikov<sup>1</sup>, A.Rusakov<sup>1</sup>, E.Gladkikh<sup>1</sup>, B.Loginov<sup>2</sup>, V.Loginov<sup>2</sup>, A.Yelkin<sup>2</sup>

Составные части механизмов, имеющие криволинейные поверхности, требуют строгого контроля формы. Для решения таких задач применяются приборы, основанные на контактных (зондовых) или бесконтактных (оптических) методах. В данной работе методом контактной профилометрии при помощи сканирующего нанотвердомера "НаноСкан-4D" были измерены профили пресс-форм, применяемых при синтезе монокристаллов алмаза в камере высокого давления в процессе НРНТ-роста.

The component parts of the mechanisms having curved surfaces require strict shape control. To implement this operation, devices based on contact (probe) or non-contact (optical) methods can be used. In this paper, profiles of molds used in HPHT diamond growth were measured using the contact profilometry method implemented in NanoScan-4D scanning nanohardness tester.

В различных областях техники важную роль играет высокая точность изготовления деталей машин и механизмов. В инженерии широко используются изделия, форма которых значительно отличается от простых прямоугольных тел и тел вращения (например, лопатки турбин). При этом для поддержания оптимальных режимов работы механизмов требуется изготовление деталей с высокой степенью точности. В связи с этим появляется такая инженерная задача, как контроль формы. Эту задачу можно решать различными способами. В частности, в статьях [1, 2] предложены аналитические методы проверки отклонения профиля сопряженного диска кулачкового механизма. Экспериментальная проверка моделей проводилась путем сравнения результатов, даваемых аналитическими выражениями, с данными, полученными при помощи контурографа. В статье [3] на основе контуров, полученных при помощи прецизионного сканирующего профилометра, посредством программного обеспечения оценивалась точность изготовления деталей

авиационных двигателей. Все эти работы были бы невозможны без приборов, способных с высокой точностью измерить контуры деталей.

Профили поверхности изделий могут измеряться различными способами, как контактными, так и бесконтактными. К контактному методу можно отнести те, в которых используются щупы или зонды, находящиеся в контакте с измеряемой поверхностью и движущиеся вдоль нее при помощи моторизованных трансляторов. К этому классу приборов относятся контурографы, профилометры. Бесконтактные методы контроля рельефа и шероховатости поверхности осуществляются при помощи оптических профилометров [4]. Профилометры – устройства, предоставляющие данные о рельефе поверхности с точностью менее микрометра, что позволяет вычислять параметры шероховатости. Исторически первыми оптическими профилометрами были гетеродинные интерферометры, в дальнейшем появились интерферометры, измеряющие сдвиг фаз, затем – приборы, измеряющие дифференциальный интерференционный

<sup>1</sup> Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ) / Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials.  
<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет "МИЭТ" / National Research University of Electronic Technology (MIET).

контраст. Работа таких приборов основана на теоретических моделях отражения излучения от поверхностей различных типов (металлов, диэлектриков) [5].

Контактное профилирование может быть применено как в макро-, так и в микромасштабах. Для разных задач измерения рельефа поверхности могут быть использованы различные по своим размерам зонды. Если необходима точность измерений латеральных размеров, превышающая 10 нм, то поверхность изучают при помощи кремниевых кантилеверов с малым радиусом закругления кончика. Однако, при их использовании диапазон измерений по оси X(Y) ограничен сотней микрон, а по оси Z – несколькими десятками микрон. Как было указано выше, в промышленности ставится задача совершенно другого рода – требуется измерить форму

детали, имеющей продольные размеры порядка нескольких сантиметров и перепад высот того же масштаба. В таком случае целесообразно использовать прибор с другим масштабом метрологических характеристик.

Для измерений параметров шероховатости и профилей различных деталей, как плоских, так и тел вращения, предназначены контурграфы. С их помощью возможно также определение в измеренных профилях геометрических параметров: радиусов дуг, координат точек, расстояний, углов и т.д. [6].

С точки зрения повышения технологичности производства приборы, имеющие в своем арсенале разноплановые методики, являются хорошей альтернативой традиционным установкам. Так, нанотвердомер "НаноСкан-4D" (ФГБНУ "ТИСНУМ", Россия), сконструированный

**H**igh precision of manufacturing of machine parts and mechanisms plays an important role in various fields of technology. Products the shape of which differs significantly from simple rectangular solids and solids of revolution (e.g., turbine blades) are widely used in engineering. At the same time, the optimal modes of operation of the mechanisms require the manufacture of parts with high degree of accuracy. In this regard, an engineering challenge of the shape control appears. This problem can be solved in different ways. In particular, papers [1, 2] propose analytical methods to test profile errors of the conjugate disk cams. Experimental verification of the models was performed by comparing the results of the analytical expressions with those obtained using contourgraph. In the paper [3], on the basis of the contours obtained using a high-precision scanning profilometer, software was used to assess the accuracy of manufacture of parts of aircraft engines. All this studies would not

have been possible without instruments for high-precision measurements of the shapes of the parts.

The surface profiles of the products can be measured in various ways, both contact and contactless. Contact methods include those that use probes that are in contact with the measured surface and are moved along it with the aid of motorized translators. Contourgraphs and profilometers belong to this class of devices. Non-contact methods of control of relief and surface roughness are implemented using optical profilometers [4]. Profilometers are the devices that provides data about the surface topography with accuracy of less than a micrometer that allows to calculate the roughness parameters. Historically, the first optical profilers were heterodyne interferometers followed by interferometers for measuring the phase shift and then by the devices that measure differential interference contrast. The operation of such devices is based on theoretical models of reflection of radiation

from surfaces of various types (metals, dielectrics) [5].

Contact profiling can be applied both in macro- and microscales. Different sized probes can be used for measuring the surface topography. If the required measurement accuracy of lateral dimensions exceeding 10 nm, then the surface is studied with the help of a silicon cantilever with a small radius of curvature of the tip. However, in this case the measuring range in X(Y) axis is limited to hundreds of microns, and in the Z axis – to a few tens of microns. As it has been stated above, the task of quite another kind is actual in the industry, it is required to measure the shape of the part having the lateral dimensions of the order of several centimeters and a height difference of the same scale. In this case, it is advisable to use the device with a different scale metrological characteristics.

The contourgraphs are intended for measurement of roughness and profiles of different parts, both flat and solids of revolution. With their help it is



Рис.1. Общий вид "Контурографа модели 220"

Fig.1. General view of Model 220 contour measuring machine

для измерения твердости и модуля упругости, за счет наличия моторизованного транслятора и системы возбуждения резонансных колебаний системы подвеса индентора может осуществлять профилирование поверхности образца. Кроме непосредственно данных о геометрии и линейных размерах детали, совмещение в одном приборе функции профилирования поверхности и измерения механических свойств помогает решить задачу выбора участка для измерения, а также выполнить высокоточное позиционирование индентора.

В данной работе проведены измерения контура детали сложной формы, и экспериментальные данные сопоставлены с результатами,

получаемыми с помощью входящего в Государственный реестр средств измерений РФ "Контурографа модели 220" (АО "Завод ПРОТОН", Россия).

### ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Принцип работы "Контурографа модели 220" (рис.1) стандартен и основан на сканировании неровностей измеряемой поверхности специальным щупом, установленным на консоли. В зависимости от конфигурации измеряемого места на образце, применяются щупы длиной от 1 до 100 мм с радиусом закругления острия в 10 или 20 мкм, углом заострения от 30° до 60°. Щуп давит на образец своим весом, а на противоположном конце консоли установлен подвижный груз, позволяющий регулировать измерительное усилие в диапазоне от 1 до 200 мН. Перемещение консоли с щупом в горизонтальной плоскости осуществляется линейным электромеханическим приводом на длину трассирования до 220 мм с точностью до 0,1 мкм и скоростью до 2 мм/с. Возникающие при движении по измеряемой поверхности вертикальные механические колебания щупа преобразуются в цифровой сигнал индуктивным датчиком с точностью до 0,001 мкм во всем диапазоне от -60 до 60 мм поднятия-опускания щупа. Привод с датчиком, консолью и щупом перемещается по вертикали на 400 мм на моторизованной стойке для работы с разными по габаритам образцами. Сами образцы закрепляются либо

possible to determine geometric parameters in the measured profiles: radiuses of arcs, coordinates of points, distances, angles, etc [6].

From the viewpoint of improving manufacturability, the devices providing diverse methods are a good alternative to traditional tools. For example, the NanoScan-4D scanning nano-hardness tester (FSBI TISNCM, Russia) designed to measure the hardness and elastic modulus, thanks to the use of motorized translator and system for excitation of resonance oscillations of the indenter suspension system can perform profiling of the

sample surface. In addition to data on the geometry and the linear dimensions of the part, combining of the functions of surface profiling and measurement of mechanical properties in one device helps to solve the problem of selection of measurement area, and to perform high-precision positioning of the indenter.

In this paper, we have measured the contour of a part of complex shape and have compared the experimental data with the results obtained using Model 220 contour measuring machine (Zavod PROTON, Russia) that is included in the State register of

approved measuring instruments of the Russian Federation.

### DESCRIPTION OF METHODOLOGY

The principle of operation of Model 220 contour measuring machine (Fig.1) is standard and based on the scanning of the irregularities of the measured surface by a special probe mounted on the console. Depending on the configuration of the measured area on the sample, the probes of length from 1 mm to 100 mm with radius of curvature of the tip 10 or 20 microns and tip angle from 30 to 60 degrees are used. The probe presses on the sample and a moveable load on the

на координатном столе, либо на шпинделе. Координатный стол позволяет выбрать место на образце для измерения профиля, а также получать трехмерное изображение путем измерения многих профилей. Шпиндель за счет наличия горизонтальной оси вращения позволяет работать в режиме кругломера, измеряя отклонение формы тел вращения. Гранитное основание моторизованной стойки и виброгасящие амортизаторы снижают уровень шумов при измерениях. Возможна работа с образцами весом до 60 кг. Метрологически обеспечиваются точности измерения длин до 0,1 мкм, радиусов до 0,2 мкм, углов до 0,1° и одновременно шероховатости Ra в диапазоне от 0,005 до 50 мкм с точностью до 0,001 мкм.

Типичным режимом работы наноинденторов при профилировании является сканирование в режиме постоянной силы прижима. Это своеобразный аналог контактного режима в атомно-силовых микроскопах (АСМ). Благодаря высокому разрешению по силе и эффективной системе виброизоляции, типичный наноиндентор может сканировать поверхность при уровне прижима в несколько микро-ньютон (типичная величина для приборов типа "НаноСкан-4D" и Agilent G200 – от 5 до 10 мкН). Использование датчика боковой силы в дополнение к такому режиму позволяет получать не только профиль рельефа поверхности, но и коэффициент сухого трения острия индентора о поверхность материала.



Рис.2. Сканирующий наноиндентор "НаноСкан-4D"

Fig.2. NanoScan-4D scanning nanohardness tester

Имеющая высокую собственную частоту измерительная система наноиндентора "НаноСкан-4D" (рис.2) благодаря оптимальному разрешению по силе и смещению может осуществлять профилирование при работе в режиме резонансного возбуждения, что аналогично полуконтактному режиму АСМ. В процессе колебаний необходимо, чтобы отклонение иглы находилось в пределах диапазона

opposite end of the console allows to adjust the measuring force in the range from 1 to 200 mN. The console with the probe is moved in the horizontal plane by a linear electromechanical actuator to the length of up to 220 mm with an accuracy of 0.1 microns and a speed of 2 mm/s. Vertical mechanical oscillations of the probe during its movement on the measured surface are converted into a digital signal by the inductive sensor with an accuracy of up to 0.001  $\mu\text{m}$  in the whole range from -60 mm to +60 mm of rising or lowering of the probe. Drive with a sensor console and probe moves

vertically at 400 mm on a motorized stand for operation with samples of different size. The samples are fixed either on the coordinate table or in the spindle. The coordinate table allows to select the location on the sample to measure the profile and to obtain a three-dimensional image by measuring many profiles. The spindle thanks to the horizontal rotation axis allows to operate in the mode of roundness gage measuring the shape deviation of solid of revolution. The granite base of a motorized rack and the vibration-absorbing dampers reduce noise during the measurements. It is possible

to work with samples weighing up to 60 kg. An accuracy of length measurement up to 0.1  $\mu\text{m}$ , radius measurement up to 0.2  $\mu\text{m}$ , angles measurement up to 0.1 degree and, at the same time, of the roughness Ra measurement in the range from 0.005 to 50  $\mu\text{m}$  with an accuracy of up to 0.001  $\mu\text{m}$  is metrologically provided.

A typical mode of operation of nanoindentors at profiling is scanning with constant force of pressure. This is an analogue of the contact mode in atomic force microscopes (AFM). Thanks to the high force resolution in force and to the effective vibration isolation



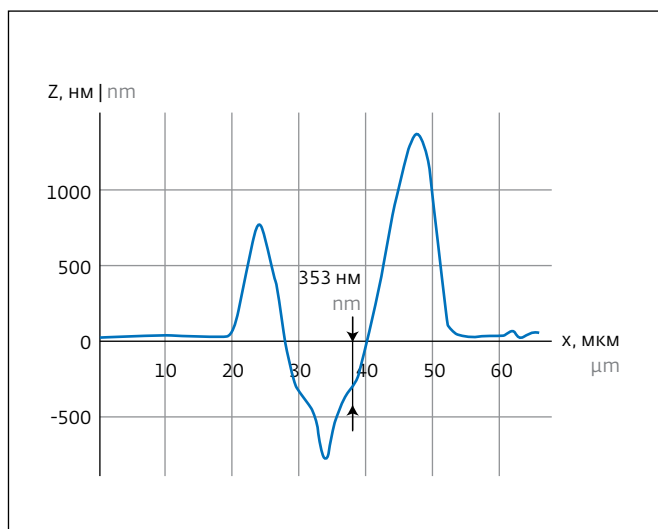


Рис.3. Профиль поперечного сечения царапины  
Fig.3. Cross-sectional profile of scratch

измерений датчика. При работе в контактном режиме неизбежно происходит деформация поверхности, а полуконтактный режим снижает влияние на измеряемый образец.

Для уменьшения времени измерений разработан ряд программных алгоритмов управления перемещением в зависимости от степени кривизны поверхности изделия (при движении вдоль плоских поверхностей скорость увеличивается). Изменение скорости перемещения датчика вдоль контуров детали влияет на скорость считывания данных, то есть в местах, где рельеф

поверхности меняется быстрее всего, производится большее количество измерений.

Для получения наилучших результатов требуется комплексная обработка и фильтрация данных, чтобы преобразовать результаты измерений в используемую на практике информацию о "слежке" поверхности [7]. Эту задачу решает разработанное для приборов "НаноСкан" программное обеспечение, корректирующее шаг изображения поверхности (вычитающее наклон) с одновременной фильтрацией случайных единичных выбросов в данных.

### ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве тестового объекта для испытаний возможностей наноиндентора для измерения профилей были выбраны пресс-формы, используемые для выращивания синтетических монокристаллов алмаза в камере высокого давления в процессе НРНТ-роста. Они имеют достаточно сложную форму с углублениями, радиус кривизны которых должен иметь заданное значение. Точное соблюдение геометрии необходимо для того, чтобы прикладываемое прессом усилие распределялось равномерно. Проверка точности изготовления деталей со сложным рельефом поверхности была осуществлена путем профилирования в полуконтактном режиме. Получены данные о контуре детали и ее отклонении от формы, заданной чертежами.

Сканирующий нанотвердомер "НаноСкан-4D", при помощи которого в представленном

system, a typical nanoindenter can scan the surface with the level of pressure in a few  $\mu\text{N}$  (typical value for devices like NanoScan-4D and Agilent G200 is from 5 to 10  $\mu\text{N}$ ). The use of the sensor of lateral forces in addition to such mode allows to obtain not only the profile of the surface topography, but also the coefficient of dry friction of the tip of the indenter on the surface of the material.

The measuring system of NanoScan-4D nanohardness tester (Fig.2) has a high natural frequency and due to the optimal resolution in force and displacement allows the profiling in the mode

of resonant excitation, which is similar to tapping mode in AFM. During oscillations, it is necessary that the deviation of a needle was within the limits of the measuring range of the sensor. In contact mode, the deformation of the surface is inevitable, and tapping mode reduces the influence on the measured sample.

To reduce measurement time, a number of software algorithms for motion control depending on the degree of curvature of the surface (the speed increases when moving along flat surfaces) was developed. Change the speed of the sensor movement along the

contours of the part affects the speed of reading data, that is, in places where the surface topography is changing most rapidly, a larger number of measurements is carried out.

The best results require the integrated processing and filtering data to convert the measurement results into information about the shape of the surface that is used in practice [7]. This problem is solved by software developed for NanoScan devices that adjusts the step of image of the surface (subtracting the slope) with the simultaneous filtering of a random individual data outliers.

исследовании измерялись профили, имел резонансную частоту системы подвеса индентора 80 Гц, массу подвижной части 30 г и жесткость системы подвеса 7 кН/м. При этом добротность системы подвеса индентора  $Q$  равнялась 30, минимально регистрируемое смещение – 0,1 нм, а порог обнаружения по силе – 1 мкН в полосе частот 0,1 Гц – 1 кГц.

Контроль прижима колеблющегося зонда к поверхности может быть осуществлен двумя способами: по изменению амплитуды и по изменению сдвига фазы. Существенно повысить качество сканирования поверхности прибором "НаноСкан-4D" удалось путем реализации режима фазового контроля сдвига резонансной частоты, так как он обеспечивает не только высокое быстродействие, но и менее подвержен влиянию разного рода возмущающих факторов. Уровень средней силы взаимодействия острия с поверхностью был снижен на порядок благодаря динамическому контролю контакта за счет использования резонансного режима возбуждения сенсорной системы подвеса [8]. Был подобран оптимальный алгоритм измерения сдвига фазы при контакте с поверхностью, а также режим работы с наиболее предпочтительной амплитудой колебаний зондирующего острия.

На рис.3 приведен поперечный профиль царапины, полученный при помощи прибора "НаноСкан-4D" в режиме полуконтактного сканирования с поддержанием постоянного сдвига фазы колебаний [9].

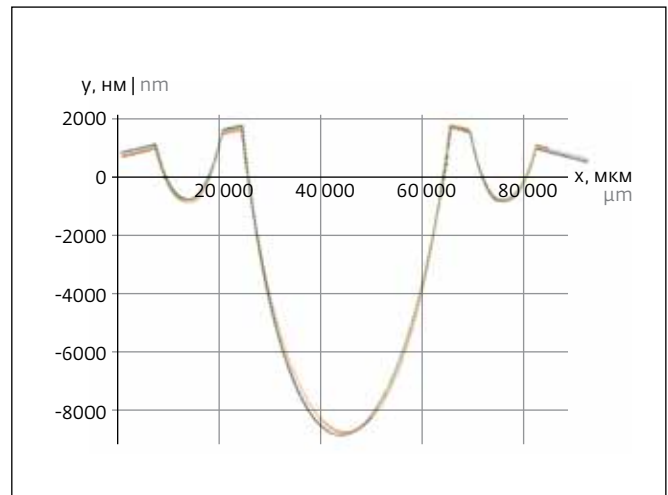


Рис.4. Изображение профилей поверхности пресс-формы. Сплошной линией красного цвета показан профиль, полученный на приборе "НаноСкан-4D", пунктирными линиями черного и зеленого цвета показаны профили, полученные на "Контурографе модели 220"

Fig.4. Image of mold surface profiles. Solid red line shows profile obtained on NanoScan-4D, black and green dashed lines show profiles obtained on Model 220 contour measuring machine

На рис.4 представлены профили поверхности пресс-формы, полученные при помощи прибора "НаноСкан-4D" (амплитуда колебаний зондирующего острия составляла 100 нм, уровень силы взаимодействия – менее 1 мкН) и "Контурографа модели 220".

## CONDUCTED STUDY

A mold used for HPHT growth of synthetic diamonds in the high pressure chamber was selected as a test object for testing the capabilities of nanoindenter in measuring profiles. It has a fairly complex shape with hollows, the curvature radius of which must have a specified value. Exact compliance of the geometry is necessary for uniform distribution of pressure. Precision of parts with complex surface topography was measured by profiling in tapping mode. Data on the contour of the part and its deviation from a shape specified by the drawings was obtained.

NanoScan-4D scanning nano-hardness tester, which was used in the present study for measuring the profiles, had a resonant frequency of the indenter suspension system of 80 Hz, a mass of the movable part of 30 g and a stiffness of the suspension system of 7 kN/m. The  $Q$ -factor of the indenter suspension system was equal to 30 at the minimum detectable displacement of 0.1 nm and the force detection threshold of 1  $\mu$ N in the frequency range from 0.1 Hz to 1 Hz.

Control of pressure of the oscillated probe to the surface can be accomplished in two ways: by the change of amplitude and

by the change of phase shift. Implementation of the mode of phase control of the shift of resonant frequency has been significantly improved the quality of the surface scan by NanoScan-4D, as it provides not only high speed but also is less susceptible to influence of various disturbing factors. The level of the average interaction force of the tip with the surface has been reduced by the order thanks to the dynamic control through the use of a resonant excitation mode of the sensor suspension system [8]. An optimal algorithm for measuring the phase



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неоспоримым преимуществом контактных профилометров и контурографов с точки зрения решения задачи контроля формы, радиусов кривизны поверхностей и параметров шероховатости различных деталей является высокая скорость работы и точность получаемых данных. В то же время, реализация режима профилирования в нанотвердомерах серии "НаноСкан-4D" позволяет сочетать в едином измерительном комплексе такие разноплановые методики, как исследование механических характеристик (твердости и модуля упругости) и регистрация с микрометровой точностью рельефа деталей. При этом, как показывают результаты проведенных экспериментальных исследований, профили, измеренные с помощью двух различных приборов, совпадают в пределах разброса линейных размеров измеряемого объекта. Также показано, что при работе в режиме полуконтактного профилирования наиболее эффективным и быстродействующим методом контроля контакта зонда и поверхности образца для заданных характеристик колебательной системы является способ детектирования фазового сдвига между возбуждающей силой и возникшими колебаниями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Chang W.** et al. Inspecting profile errors of conjugate disk cams with coordinate measurement // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2008. Vol. 130.
2. **Tsay D., Tseng K., Chen H.** A Procedure for Measuring Planar Cam Profiles and Their Follower Motions // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2006. Vol. 128. P. 697-704.
3. **Бусурин В.** и др. Применение прецизионного сканирующего профилометра для оценки точности изготовления деталей авиационных двигателей // *Вестник МАИ.* 2011. № 3. С. 200-209.
4. **Chumbley L.S., Eisenmann D.J.** Use of a scanning optical profilometer for toolmark characterization // *Scanning Microsc.* 2009. Vol. 7378.
5. **Bennett J.M., Mattsson L.** Introduction to Surface Roughness and Scattering. 2nd ed. Washington, D.C.: Optical Society of America, 1999.
6. **Loginov V.B.** et al. Development and creation of a linear displacement guide rail with nanometric deviation from linearity at submetric scales of the measurement base // *Meas. Tech.* 2015. Vol. 58. № 5. P. 501-505.
7. <http://www.renishaw.ru/ru/scanning-probes-6656> [Electronic resource].
8. **Усеинов А.** и др. Исследование свойств тонких покрытий в режиме динамического механического анализа с помощью сканирующего нанотвердомера "НаноСкан-4D" // *НАНОИНДУСТРИЯ.* 2016. № 1. С. 80-87.
9. **Маслеников И.** и др. Построение объемных карт механических свойств в режиме динамического механического анализа // *НАНОИНДУСТРИЯ.* 2016. № 2. С. 36.

shift upon contact with the surface, as well as the mode with most preferred amplitude of oscillation of the probe tip were determined.

Fig.3 shows a cross-sectional profile of scratch obtained with the help of the NanoScan-4D in a tapping mode with a constant phase shift of the oscillations [9].

Fig.4 presents the mold surface profiles obtained with the help of the NanoScan-4D (the oscillation amplitude of the probe tip of 100 nm, the force level of the interaction is less than 1  $\mu\text{N}$ ) and of Model 220 contour measuring machine.

## CONCLUSION

The indisputable advantage of contact profilometers and contourographs from the point of view of controlling the shape, radiuses of curvature of the surfaces and the roughness parameters of various parts is high operation speed and the accuracy of the obtained data. At the same time, implementation of the profiling mode in NanoScan-4D nano-hardness testers allows to combine in a single measuring complex such diverse techniques as the study of the mechanical characteristics (hardness and modulus of elasticity) and the

recording with micrometer precision of the topography of the part. At the same time, in accordance with the results of experimental studies, profiles measured with use of two different devices match within the scatter of the linear dimensions of the measured object. It is also shown that in tapping mode of profiling, the most effective and responsive method of controlling contact of the probe and the sample surface for the specified characteristics of the oscillating system is a method of detecting a phase shift between exciting force and resulting oscillations. ■