



СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

COMPARATIVE STUDY OF VOLUMETRIC AND SURFACE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIALS FOR DENTAL CONSTRUCTIONS OBTAINED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

М.А.Гаджиев¹, аспирант, (ORCID: 0000-0003-1878-503X), К.С.Кравчук², науч. сотр., к.ф.-м.н., (ORCID: 0000-0002-9956-9939), Е.В.Гладких², мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-8273-3934), Г.Х.Султанова², стажер-исследователь, (ORCID: 0000-0002-4770-5724), А.А.Русаков², мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0001-5702-1353), А.С.Усеинов², зам. директора по научной работе ФГБНУ ТИСНУМ, к.ф.-м.н., (ORCID: 0000-0002-9937-0954), С.В.Апресян¹, к.м.н., проф., (ORCID: 0000-0002-3281-707X) / useinov@mail.ru

M.A.Gadzhiev¹, Postgraduate, K.S.Kravchuk², Researcher, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), E.V.Gladkikh², Junior Researcher, G.Kh.Sultanova², Researcher Trainee, A.A.Rusakov², Junior Researcher, A.S.Useinov², Deputy Director of TISNCM, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), S.V.Apresyan¹, Cand. of Sci. (Medicine), Professor

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.3-4.196.204

Получено: 21.06.2021 г.

В данной работе приведены результаты испытания инструментальной твердости и модуля упругости, коэффициентов линейного износа и трения исходных и полированных образцов для стоматологических конструкций, полученных при помощи аддитивных технологий. Помимо исследования локальных механических свойств, проводилось измерение объемных характеристик – модуль упругости, прочность и деформация – при помощи метода трехточечного изгиба. Поверхность образцов, подвергнутых испытанию на изгиб не проходила пробоподготовку.

This paper presents the results of testing the instrumental hardness and elastic modulus, linear wear and friction coefficients of the original and polished samples for dental structures obtained using additive technologies. In addition to the study of local mechanical properties, volumetric characteristics – elastic modulus, strength and deformation – were measured using the three-point bending method. The surface of the samples subjected to the bending test did not undergo sample preparation.

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов", Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6 / Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peoples' Friendship University of Russia", Russia, 117198, Moscow, ul. Miklukho-Maclay, 6.

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а / Federal State Budgetary Scientific Institution Technological Institute for Superhard and New Carbon Materials, Russia, 108840, Moscow, Troitsk, ul. Centralnaya, 7a.



ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение является областью знания, находящей широкое применение не только в технических приложениях, но и в медицине. В частности, современная стоматология базируется на усовершенствовании биоматериалов, методов их получения и обработки [1]. Материалы для изготовления стоматологических конструкций должны обладать рядом характеристик в зависимости от местоположения и выполняемых функций [2].

В случае патологий височно-нижнечелюстного сустава одним из распространенных методов лечения является шинотерапия [3, 4]. Изготовление окклюзионных шин производится различными методами: термопресованием, холодной и горячей полимеризацией. Особое внимание привлекает возможность изготовления данных элементов при помощи аддитивных технологий [5]. 3D-печать в сочетании с современным программным обеспечением и компьютерной томографией видится весьма перспективным направлением для того, чтобы с легкостью получать элементы с уникальной, подходящей конкретному пациенту геометрией [6]. Однако, во внимание должен быть принят не только способ изготовления, но и сам материал, поскольку при эксплуатации стоматологические конструкции испытывают большую нагрузку, рациональный выбор материала и способ изготовления напрямую влияют на качество лечения [7].

Принятие решения об использовании конкретного материала и способа его изготовления возможно осуществить, применяя количественные критерии оценки прочностных характеристик образцов, исследование которых может быть произведено как в объеме, так и на поверхности. К методам измерения механических свойств поверхности относятся испытания твердости по методу вдавливания твердого наконечника (инструментальное индентирование) [8], а также истирание путем повторяющихся проходов контртела (испытание на износ) [9]. Результатом инструментального индентирования являются значения твердости и модуля упругости, испытаний на износ – линейный коэффициент изнашивания и коэффициент трения. Сравнение полученных по описанным методикам данных способно пролить свет на понимание применимости материалов в качестве заявленных конструктивных элементов для стоматологии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образы напечатаны на 3D-принтере Phrozen Sonic из низко-раздражающего фотополимера. Шероховатость образцов измерена на оптическом профилометре S Neox. Режим измерения рельефа поверхности – оптическая конфокальная микроскопия. Источник монохромного излучения – зеленый светодиод. Поле сканирования 340×280 мкм. Измерения шероховатости при помощи конфокального оптического профилометра проведены

INTRODUCTION

Materials science is the area of knowledge that is widely used not only for technical applications, but also in medicine. In particular, modern dentistry is based on improving biomaterials, methods of their obtaining and processing [1]. The materials for manufacture of dental structures must have a number of characteristics depending on the location and the functions performed [2].

In the case of the temporomandibular joint pathologies, a splint therapy is one of the common treatment methods [3, 4].

Occlusal splints are manufactured by various methods: thermal and press, cold and hot polymerization. Special attention is drawn to the possibility of manufacturing such elements with additive technologies [5]. 3D printing in combination with modern software and computed tomography seems to be a very promising direction in order to easily get elements possessing unique and specific geometry suitable for a patient [6]. However, not only the method of manufacturing should be taken into account, but the material itself, because

during an operation, the dental structures are experiencing a large load and a rational choice of material and the method of manufacture directly affect the quality of treatment [7].

It is possible to decide on the use of a particular material and method of its manufacture by applying the quantitative criteria for estimating the strength characteristics of samples which volume and surface can be studied. The methods of measuring the mechanical properties of the surface include the hardness tests based on indenting a hard tip (instrumental indenting) [8],

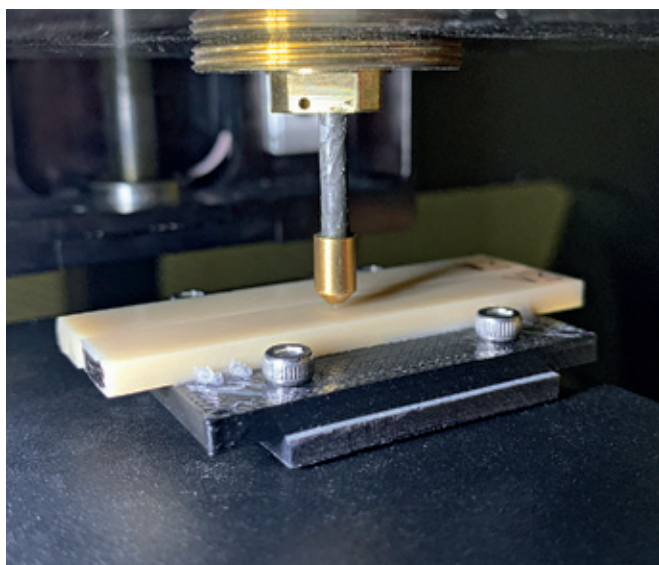


Рис.1. Образцы в держателе датчика боковой нагрузки под зондовым измерительным модулем

Fig.1. Samples in the holder of the lateral load cell under the measuring probe module

на трех образцах из каждой группы в трех областях (два с краю и один по центру).

Измерение твердости и модуля упругости образцов проведено на нанотвердомере "НаноСкан-4D" [10]. Для двух исследованных групп образцов: исходных напечатанных на 3D-принтере и дополнительно полированных – измерено по три образца. На каждом образце измерено три области: в центре образца и в 1 см от края. В каждой

области проведено по две серии испытаний индентированием с разной нагрузкой в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ Р 8.748-2011 [8]. Максимальная сила нагружения 1 и 10 мН (количество индентов в каждой серии не менее 20). Индентор – пирамидальный трехгранный алмазный наконечник типа Беркович. Время нагружения и разгружения 10 с, время выдержки – 2 с. Калибровка формы наконечника и жесткости прибора проводилась на плавленном кварце. Глубины индентирования при малых нагрузках сопоставимы со средней шероховатостью поверхности. При малых нагрузках измеряется тонкий приповерхностный слой образца и его механические свойства связаны со способом получения материала и механической обработкой поверхности. Высокая шероховатость поверхности приводит к большому разбросу измеренных методом индентирования данных. При больших нагрузках влияние шероховатости уменьшается, но увеличивается влияние свойств материала в объеме.

Измерения коэффициента трения и коэффициента линейного износа также проведены на трех образцах из каждой группы в трех областях (два с краю и один по центру). Количество циклов износа в каждом испытании – 100, нормальная нагрузка 250 мН. Испытания проводились при помощи "НаноСкан-4D", но наконечник был заменен на алмазную полусферу диаметром 130 мкм (рис.1). Нагрузка и диаметр наконечника подобраны таким образом, чтобы глубина внедрения во время испытания была небольшой, но имело место пластическое

as well as abrasion by repeating passage passes (wear test) [9]. The instrumental indenting allows of getting the values of the values of hardness and elastic moduli, wear tests – the linear wear coefficient and the friction coefficient. A comparison of the data obtained according to the described methods can be useful to understand the applicability of materials as declared structural elements for dentistry.

RESEARCH METHODS

Images were printed on the Phrozen Sonic 3D printer from

low-irritating photopolymer. Roughness of the samples is measured on the S Neox optical profilometer. The surface relief measurement mode with the aid of the optical confocal microscopy was used. The monochrome radiation was provided by a green LED. The scan field is 340×280 microns. Roughness measurements using a confocal optical profilometer were carried out on three samples from each group in three regions (two near the edge and one in the center).

Measurement of hardness and elastic module of samples were carried out using a NanoScan-4D

nano-hardness tester [10]. There were two groups of samples to be studied: three initial ones printed on a 3D printer and three additionally polished samples. On each sample three areas were measured: in the centre of the sample and at a distance of 1 cm from the sample edge. In each area two series of tests were conducted with various loads according to the recommendations of GOST R 8.748-2011 standard [8]. The maximum loading force equaled 1 and 10 mN (the number of indenters in each series was at least 20). The indenter was a

или хрупкое разрушение образца, то есть имел место абразивный механизм износа материала.

Испытание проводится следующим образом: наконечник сферической формы из твердого материала прижимается к поверхности образца с постоянной нормальной силой и совершает повторяющиеся возвратно-поступательные движения вдоль прямой линии. Во время испытания измеряется боковая сила нагружения (вдоль поверхности образца) и глубина внедрения наконечника в поверхность образца. После проведения испытания измеряется геометрия канавки истирания. Трехмерное изображение рельефа поверхности получается на оптическом профилометре S neox.

В результате испытания на истирание рассчитываются следующие параметры: линейный износ, ширина и глубина канавки после испытаний на износ, коэффициент трения. Линейный износ – среднее изменение глубины канавки за один цикл испытания показывает скорость износа материала, коэффициент трения – отношение боковой и нормальной силы во время скольжения по материалу. Линейный износ и коэффициент трения измеряется на участке между 50 и 100 циклами износа. В начале испытания имеет место притирание образца связанной с неровностью поверхности. Параметры износа измеряются на участке после выхода испытания на постоянный режим истирания.

Испытания образцов на трехточечный изгиб проведены на универсальной испытательной машине Instron 5982 в соответствии со стандартом

ГОСТ 31572-2012 [11]. Из исследуемого материала были приготовлены пять полосок, проверенных на отсутствие пористости. Размеры полосок: длина 64 мм, ширина $(10 \pm 0,2)$ мм и высота $(3,3 \pm 0,2)$ мм. Высота и ширина готовых полосок измеряются трижды вдоль продольной оси с помощью штангенциркуля.

Устройство для испытания на трехточечный изгиб состоит из центрального нагружающего плунжера и двух опор в виде цилиндров с отполированными поверхностями диаметром 3,2 мм и минимальной длиной 10,5 мм. Опоры расположены параллельно с отклонением не более 0,1 мм и перпендикулярны к продольной центральной линии. Расстояние между центрами опор – $(50 \pm 0,1)$ мм; нагрузочный плунжер находится в центре между опорами с допуском отклонения от центра 0,1 мм.

Перед испытанием на изгиб образцы выдерживают в воде при температуре $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение (50 ± 1) ч. Перед испытанием полоску извлекают из воды и сразу же помещают ее на опоры устройства для испытания (рис.2). Равномерно увеличивают нагрузку плунжера с постоянной скоростью (5 ± 1) мм/мин до разрушения образца.

Прочность при изгибе σ вычисляют по формуле:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2}, \quad (1)$$

где F – нагрузка при разрушении образца, l – расстояние между опорами, b – ширина образца, h – высота образца.

pyramidal triangular diamond tip of Berkovich type. Loading and unloading times were equal to 10 seconds and exposure time – 2 sec. Calibration of the tip shape and rigidity of the device was carried out on the melted quartz. Indentation depths at light loads are comparable to the average surface roughness. With light loads, a thin near-surface layer of the sample and its mechanical properties were measured, their mechanical properties were dependent on the method of obtaining material and mechanical surface treatment. The data

obtained by the indentation method in case of a high surface roughness leads to a large scatter of the values. For high loads, the effect of roughness decreases, but the effect of material properties in a volume increases.

Measurements of the friction coefficient and the linear wear coefficient are also carried out on three samples from each group in three areas (two near the edge and one in the center). The number of wear cycles in each test is 100, the normal load is 250 mN. The tests were carried out using a NanoScan-4D, but the tip was replaced with a

diamond hemisphere of 130 μm diameter (Fig.1). The load and the diameter of the tip are selected in such a way that the penetration depth during the test was small, but there was a plastic or fragile destruction of the sample, that is, there was an abrasive mechanism of material deterioration.

The test is carried out as follows: The spherical shape tip of a hard material is pressed against the surface of the sample with a constant normal force and performs a reciprocal movements along a straight line. During the test the lateral loading force

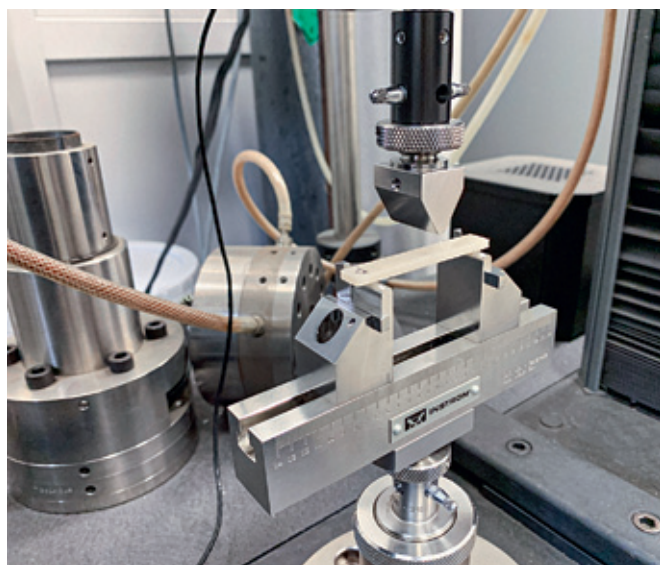


Рис. 2. Образец на опорах устройства перед испытанием
Fig. 2. The sample installed on the device supports before testing

Таблица 1. Шероховатость рельефа поверхности образцов
Table 1. Relief roughness of the sample surface

	Ra, мкм/μm	Rz, мкм/μm
Образцы без обработки Samples w/o treatment	0,47 ± 0,10	3,3 ± 0,8
Образцы после полировки Samples after polishing	0,19 ± 0,09	1,7 ± 0,7

is measured (along the surface of the sample) simultaneously with the depth of the tip penetration into the sample surface. After testing, the geometry of the abrasion groove is measured. Three-dimensional image of the surface relief is obtained at S Neox optical profilometer.

As a result of the abrasion test, the following parameters are calculated: linear wear, width and depth of groove after wear testing, and friction coefficient. The linear wear reflects the average change in the groove depth for one test cycle and indicates the material wear rate, and

the friction coefficient shows the ratio of the lateral and normal force during the slip on the material. The linear wear and the friction coefficient are measured on the area between 50 and 100 wear cycles. At the beginning of the test, the sample is rubbed in as the surface is irregular. Wear parameters are measured in situ after the abrasion mode testing become stable.

Test samples on a three-point bend were conducted on the Instron 5982 universal testing machine according to GOST 31572-2012 [11]. There were

Модуль упругости при изгибе E , МПа, вычисляют по формуле:

$$E = \frac{F_1 l^3}{4bh^3d}, \quad (2)$$

где F_1 – нагрузка в области упругой деформации образца, выбранная на прямолинейном участке диаграммы "нагрузка – деформация", d – деформация при нагрузке F_1 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.3 приведены трехмерные топографические изображения рельефа поверхности для измеренных образцов. Исходные образцы имеют сильно развитый рельеф поверхности. Видна периодическая структура, связанная с режимом печати материала.

В табл.1 приведены два параметра шероховатости: R_a – среднеарифметическая шероховатость, R_z – шероховатость по 10 точкам (среднее расстояние между 5 самыми высокими и 5 самыми низкими областями на изображении рельефа поверхности). R_a показывает среднее отклонение поверхности от среднего уровня, R_z показывает максимальный перепад поверхности на измеренной области. Приведенные данные – результат усреднения девяти измерений.

На рис.4 показаны диаграммы зависимости твердости и модулей упругости образцов

prepared 5 strips made of the studied material and the absence of porosity was checked. The strip dimensions were: length 64 mm, width (10 ± 0.2) mm and height (3.3 ± 0.2) mm. The height and width of the finished strips are measured three times along the longitudinal axis using the caliper.

A device for a three-point bending test consists of a central loading plunger and two cylindrical supports with polished surfaces dia. 3.2 mm and a minimum length of 10.5 mm. The supports are located in parallel with a deviation not exceeding

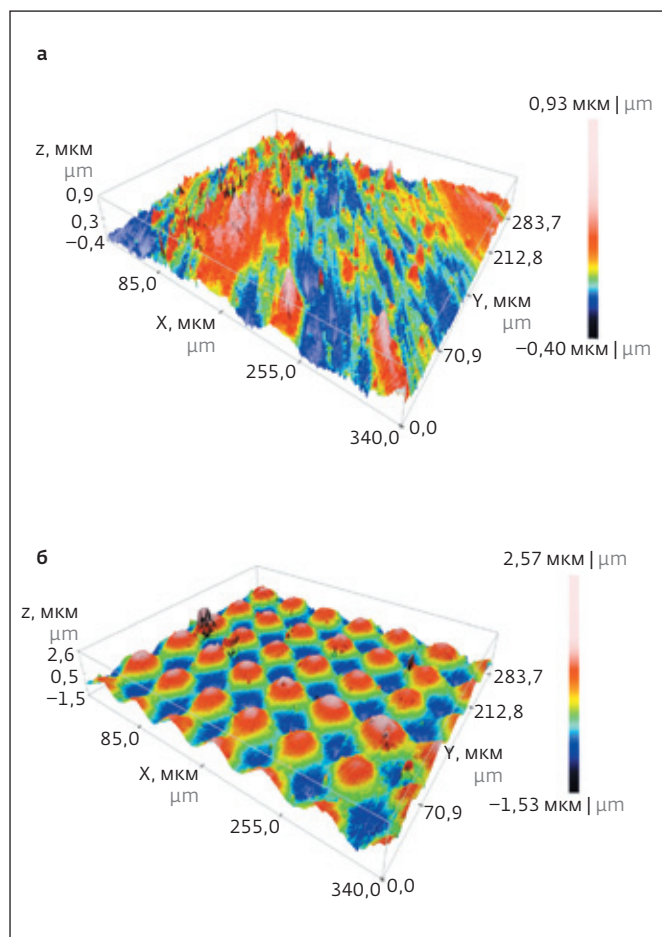


Рис.3. Изображение рельефа поверхности: а – исходного, б – полированного

Fig.3. Image of the surface relief: a – original and b – polished samples

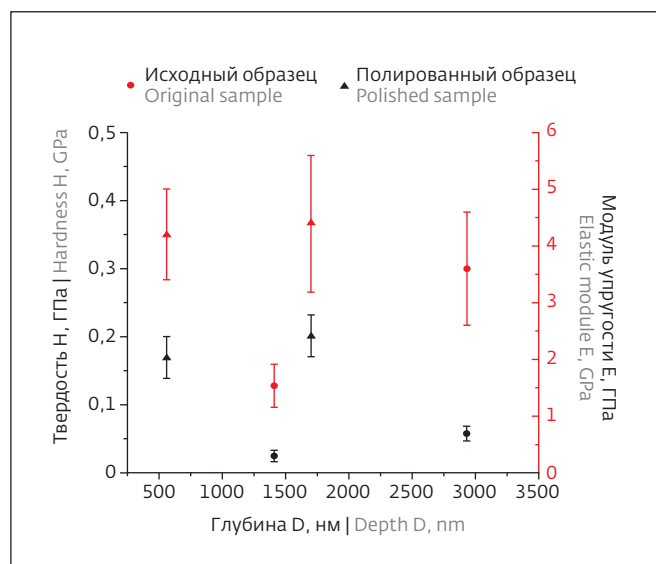


Рис.4. Значения твердости и модуля упругости, измеренные при нагрузках 1 и 10 мН на исходном (original) и полированном (polished) образцах

Fig.4. Hardness and elastic modulus values measured at loads of 1 and 10 mN on original and polished samples

от глубины с указанием погрешности измерений (разброс показан между измерениями на разных областях).

Твердость и модуль упругости материала на поверхности исходных образцов сильно ниже материала с обработанной поверхностью. Разница между свойствами образцов уменьшается с увеличением глубины. Можно сделать

0.1 mm and perpendicular to the longitudinal center line. The distance between the centres of supports – (50 ± 0.1) mm; the loader plunger is located in the center between the supports, and permissible deviation from the center is 0.1 mm.

Before proceeding to bending, the samples are kept in water of temperature $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ for (50 ± 1) hour. Before testing, the strip is removed from the water and immediately put on the supports of the testing device (Fig.2). The load applied to the plunger is evenly increased at a constant speed

(5 ± 1) mm/min until the sample is destructed.

The bending strength σ is calculated by the formula:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2}, \quad (1)$$

where F – load at sample destructed, l – distance between the supports, b – sample width, h – sample height.

The elastic modulus at bending E, MPa, is calculated by the formula:

$$E = \frac{F_1 l^3}{4bh^3 d}, \quad (2)$$

where F_1 – the load in the field of elastic deformation of the sample, selected on the diagram "Load – deformation" straight line, d – deformation at load F_1 .

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the three-dimensional topographic images of the surface relief of the measured samples. The initial samples have a strongly developed surface relief. A periodic structure associated with the print mode of the material is visible.

Table 1 shows two parameters of roughness: Ra is an arithmetic-mean roughness,



Таблица 2. Результаты испытания на износ

Table 2. Wear test results

	Ширина, мкм Width, μm	Глубина, мкм Depth, μm	Лин. износ, нм Linear wear, nm	Коэффициент трения Friction coefficient
Исходный образец Initial sample	96.9 ± 3.4	18.1 ± 0.9	87 ± 28	0.598 ± 0.009
Полированный образец Polished sample	89 ± 9	16 ± 4	93 ± 8	0.585 ± 0.033

предположение, что на поверхности напечатанных образцов имеется область, в которой не прошла полная полимеризация материала и полировка позволяет удалить данный слой с поверхности.

Испытание на истирание, проведенное на сканирующем твердомере "НаноСкан-4D", показало результаты, приведенные в табл.2, также усредненные по девяти измерениям.

Результаты испытаний материалов на абразивный износ показывают корреляцию между износостойкостью и твердостью материалов. Чем выше твердость, тем выше износостойкость и меньше область разрушения при износе. Твердость материала исходных образцов меньше на поверхности и увеличивается с глубиной, приближаясь к твердости образца после полировки. Величины линейного износа и коэффициента трения образцов имеют близкие значения, так как они измерены на временном

участке, когда наконечник разрушил поверхностный слой и глубоко внедрился в материал. Измерение размеров канавки износа показывает меньшую износостойкость исходного материала, что связано с мягким слоем материала на поверхности.

Результаты испытаний на трехточечный изгиб показали, что деформация образцов до разрушения составляет $(2,7 \pm 0,6)\%$, предел прочности – (45 ± 10) МПа, модуль упругости – $(1,59 \pm 0,14)$ ГПа. Материалы имеют меньшую жесткость и прочность при испытании на изгиб, чем при испытании методом индентирования, что ближе всего соответствует испытаниям на одноосное сжатие.

ВЫВОДЫ

В данной работе проведены испытания твердости, модуля упругости, абразивного износа, а также прочности материала, полученного

Rz – roughness in 10 points (average distance between 5 the highest and 5 the lowest areas on the surface relief image). Ra shows the average surface deviation from the middle level, Rz shows the maximum surface differential drop on the measured area. The data provided reflects the result of nine averaged measurements.

Figure 4 shows the dependences of the hardness and elastic modules of the samples on depth and indicates the measurement error (the scatter is shown between measurements on different areas).

The hardness and elastic modulus of the material on the surface of the initial samples is very lower than the material with the treated surface. The difference between the properties of the samples is reducing with the depth increase. It can be assumed that there is an area on the printed samples surface, where the full polymerization of the material and polishing has not taken place, polishing allows of removing this layer from the surface.

The abrasion test conducted on the NanoScan-4D, indicated the results given in

Table 2, also averaged for nine dimensions.

The results of the abrasive wear test show a correlation between the wear resistance and the hardness of the materials. The higher the hardness, the higher the wear resistance and less the area of destruction during wear tests. The hardness of the material of the original samples is smaller on the surface and increases with depth, approaching the hardness of the sample after polishing. The values of the linear wear and the friction coefficient of the samples have close values, as they

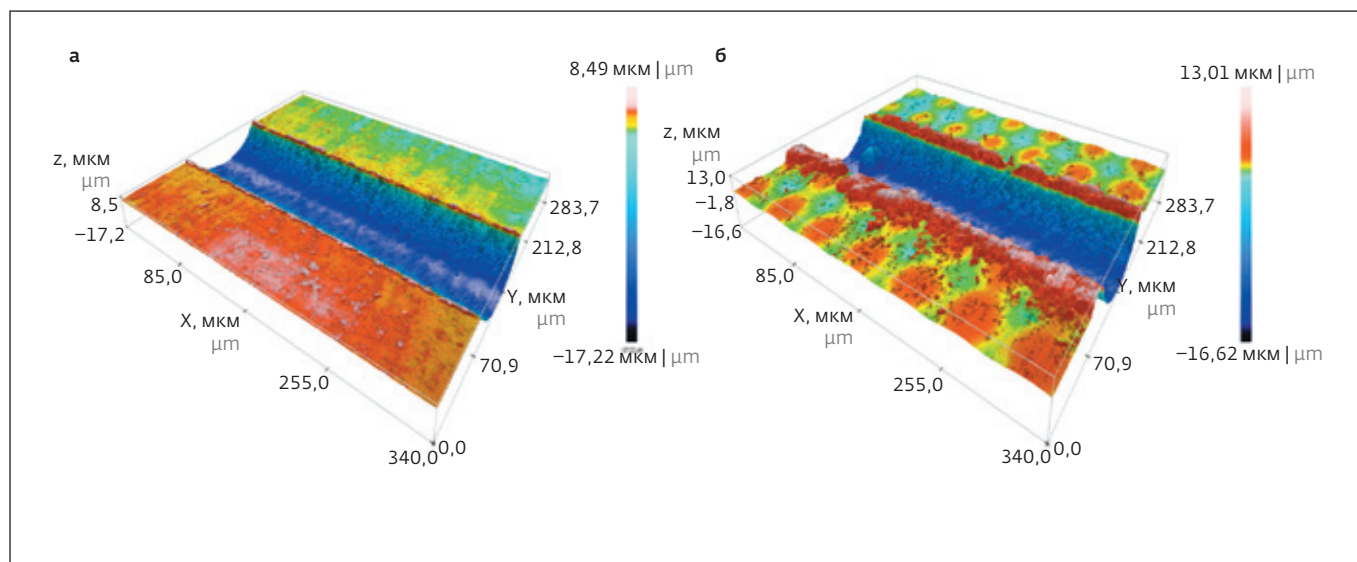


Рис.5. Изображение поверхности образца после проведения испытания на износ: а – исходного; б – полированного
 Fig.5. Image of the sample surface after the wear test: a – initial; b – polished

при помощи аддитивных технологий с целью анализа применимости их для изготовления окклюзионных шин.

Исходный образец по сравнению с полированным показал развитый рельеф с периодической структурой. Слой материала на поверхности исходного образца имеет меньшую твердость и износостойкость, чем материал в объеме. Полировка образца позволяет удалить мягкий слой на поверхности и уменьшить шероховатость поверхности.

Работа выполнена с помощью оборудования, входящего в ЦКП ТИСНУМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Oezcan M. et al.** Materials and Manufacturing Techniques for Polymeric and Ceramic Scaffolds Used in Implant Dentistry. J. Compos. Sci. ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND: MDPI. 2021. V. 5. No. 3.
2. **Degtyarev N.E. et al.** Stages of the surgical templates manufacturing and their application in

are measured in the temporary area, when the tip destroyed the surface layer and deeply penetrated into the material. The measurements of the wear groove size show a smaller wear resistance of the initial material, which is associated with a soft layer of material on the surface.

Three-point test results showed that the deformation of the samples until destruction is $(2.7 \pm 0.6) \%$, the strength is (45 ± 10) MPa, the elastic modulus - (1.59 ± 0.14) of the GPa. Materials have less rigidity and bending strength than

when testing by the indentation method, which is the closest to the tests for monoaxial compression.

CONCLUSIONS

In this paper, tests of hardness, elastic modulus, abrasive wear as well as the strength of the material obtained by additive technologies in order to analyze their applicability for the manufacture of occlusal splints were conducted.

The initial sample compared to the polished one showed a developed relief of a periodic structure. The surface layer

of the material in the initial sample has smaller hardness and wear resistance than the material in the volume. Polishing of the sample allows to remove the soft layer on the surface and reduce surface roughness. ■

The work was performed using the CUC TISNCM equipment.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

- complex clinical cases // Head Neck Russ. J. 2020. V. 8. No. 3. PP. 61–67.
3. Oliveira I S.S. *et al.* Effect of occlusal splint and therapeutic exercises on postural balance of patients with signs and symptoms of temporomandibular disorder // Clin. Exp. Dent. Res. 111 RIVER ST, HOBOKEN 07030-5774, NJ USA: WILEY. 2019. V. 5. No. 2. PP. 109–115.
 4. Re J. *et al.* Occlusal splint: State on the art. Rev. Stomatol. Chir. MAXILLO-FACIALE Chir. ORALE. 685 ROUTE 202-206, BRIDGEWATER, NJ 08807 USA: ELSEVIER. 2009. V. 110. No. 3. PP. 145–149.
 5. Wesemann C. *et al.* Accuracy and its impact on fit of injection molded, milled and additively manufactured occlusal splints. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. RADARWEG 29, 1043 NX AMSTERDAM, NETHERLANDS: ELSEVIER. 2021. V. 114.
 6. Salmi M. *et al.* A digital process for additive manufacturing of occlusal splints: a clinical pilot study. J. R. Soc. INTERFACE. 6–9 CARLTON HOUSE TERRACE, LONDON SW1Y 5AG, ENGLAND: ROYAL SOC. 2013. V. 10. № 84.
 7. Goryainova K.E. *et al.* Comparative clinical evaluation of the prosthetic treatment quality of molars restored by chairside manufactured CAD/CAM crowns. Srovnitel'naia klinicheskaia otsenka kachestva ortopedicheskogo lecheniia moliarov CAD/CAM koronkami metodikoĭ chairside. Stomatologĭia (Mosk). 2019. V. 98. No. 5. PP. 72–77.
 8. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) ГСИ. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч.1. Метод испытаний.
 9. ASTM G133 – 05 (Reapproved 2016) Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear.
 10. Электронный ресурс: <http://nanoscan.info/> [Electronic resource].
 11. ГОСТ 31572-2012 (ISO 1567:1999) Материалы полимерные для базисов зубных протезов. Технические требования. Методы испытаний.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2600 руб.

Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА **Трехмерная печать, быстрое прототипирование** **и прямое цифровое производство**

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Авторы книги – признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Первое издание задумывалось как базовый учебник, объединивший все литературные источники, посвященные целям и задачам аддитивного производства (АП). Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные

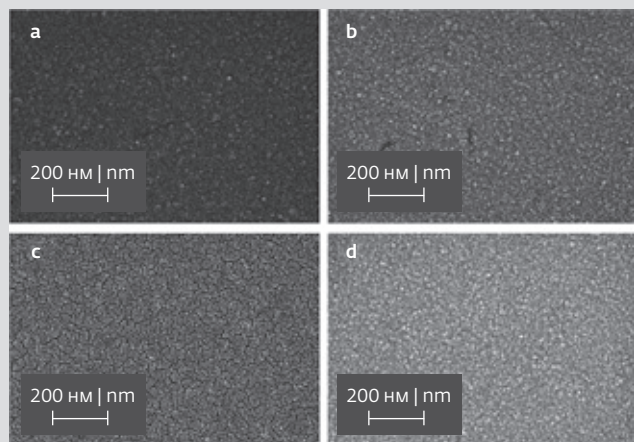
разделы и главы. Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и перспективы дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru



РАЗРАБОТАНА ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТРИОКСИДА ВОЛЬФРАМА, ПАЛЛАДИЯ И ПЛАТИНЫ ДЛЯ СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ



СЭМ-снимки пленок палладия (a, b) и платины (c, d), нанесенных непосредственно на кварцевую подложку (a, c) и на пленку WO_3 толщиной 81 нм (b, d)

Группа ученых НОЦ ФМН на базе МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова", МГУ им. М.В.Ломоносова, ИРЭ РАН и ИТПЭ РАН разработала технологию электронно-лучевого испарения тонкопленочных покрытий и элементов газовых сенсоров с контролируемыми при помощи эллипсометрических спектров и спектров пропускания оптическими параметрами пленок палладия, платины и триоксида вольфрама.

Интегральная волноводная оптика – одно из стремительно развивающихся направлений современной физики, открывающее новые возможности передачи и управления сигналами на микросхемах, изготовления сверхчувствительных химических и биологических сенсоров, оптических гироскопов и спектрометров. Наиболее перспективным типом оптических волноводов являются плазмонные волноводы из благородных металлов, конструкция которых позволяет минимизировать потери на рассеяние и, соответственно, увеличить длину распространения поверхностного плазмона, что критично для существенного повышения эффективности плазмонных устройств.

В последние годы активно развиваются технологии изготовления оптических газовых сенсоров. В качестве материалов для сенсоров водорода наиболее часто применяются тонкие пленки палладия и платины, а также пленки триоксида вольфрама с палладиевыми или платиновыми катализаторами. Получение тонких пленок с контролируемыми оптическими параметрами является важной задачей для создания сверхчувствительных газовых сенсоров.

Разработка технологии электронно-лучевого испарения тонкопленочных покрытий и элементов оптических параметров газовых сенсоров с контролируемыми при помощи эллипсометрических спектров и спектров пропускания параметрами пленок палладия, платины и триоксида вольфрама могут найти широкое применение в современной нанотехнологии и микроэлектронике.

Исследуемые пленки триоксида вольфрама имели толщину 81, 162 и 515 нм, толщина металлических пленок составила 5–7 нм. Показано, что ультратонкие пленки палладия и платины успешно описываются локальной и изотропной средой с диэлектрической проницаемостью, которая сильно отличается от известных объемных материалов. Однако диэлектрическая проницаемость сильно зависит от смежных материалов, что свидетельствует о том, что ультратонкие металлические пленки можно рассматривать как композиты, характеризующиеся эффективной диэлектрической проницаемостью.

Полученные показатели преломления и диэлектрической проницаемости оптических спектров изготовленных наноструктур WO_3 / Pd и WO_3 / Pt , включающих одномерную решетку из Al_2O_3 , предельно точно согласуются с расчетными данными без дополнительной "подгонки" или включения в математическую модель численных значений шероховатости поверхности тонких пленок.

Продемонстрированные данные могут быть использованы для прогнозирования оптических свойств наноструктурированных чувствительных элементов сенсоров различных конструкций на основе газохромных пленок палладия или триоксида вольфрама / катализатора.

Результаты исследований представлены в материалах Optical properties of tungsten trioxide, palladium, and platinum thin films for functional nanostructures engineering (Optics Express 28 (21), 32049-32060, 2020).

НОЦ ФМН – совместный технологический центр МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" ГК "Росатом", обеспечивающий реализацию передовых практических исследований в области элементной базы на новых физических принципах, квантовых технологий, нанотехнологии и оптики, биоаналитических платформ типа "лаборатория на чипе", МЭМС/МОЭМС и тонкопленочных технологий. Исследования в центре выполняются с использованием комплексов оборудования ведущих мировых производителей, объединенных в единый технологический кластер.

МГТУ им. Н.Э.Баумана – один из крупнейших государственных технических университетов и научных центров России и Европы. Обучение в МГТУ им. Н.Э.Баумана ведется на 19 факультетах дневного отделения. Открыты два филиала МГТУ в Калуге и Мытищах, а также техникум. Основными структурными подразделениями университета являются научно-учебные комплексы, имеющие в своем составе факультет и научно-исследовательский институт.

ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" – созданное в 1954 году, одна из ведущих научно-исследовательских организаций Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом".