



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОКРЫТИЯ МЯЧА ДЛЯ ГОЛЬФА

MECHANICAL PROPERTIES STUDY OF SURFACE LAYERS OF THE GOLF BALL STRUCTURE

А.Усеинов*, К.Кравчук*, И.Масленников*, В.Пешетов* / useinov@mail.ru
A.Useinov*, K.Kravchuk*, I.Maslenikov*, V.Reshetov*

Методом инструментального индентирования исследованы механические свойства структурных элементов, формирующих приповерхностный объем мяча для гольфа. Определены зависимости механических свойств от глубины, а также морфология и параметры шероховатости поверхности.

The mechanical properties of the structural elements forming the near-surface volume of a golf ball were studied by instrumental indentation. The dependences of mechanical properties on the depth, and also morphology and roughness of the surface are defined.

Одним из активных потребителей высоких технологий и новых материалов является спортивная индустрия. Оригинальные технические решения и уникальные свойства используемых изделий существенно влияют на уровень спортивных достижений и помогают добиваться все более высоких результатов как профессиональным атлетам, так и любителям.

В частности, современные мячи для гольфа представляют собой сложные многокомпонентные изделия и являются хорошим примером наукоемкой продукции [1]. Свойства мяча должны обеспечить максимальную дальность и устойчивость траектории полета, а также контролируемое поведение при коротких ударах. В центре мяча обычно находится плотное тяжелое ядро из резиноподобного полимера [2], которое обеспечивает накопление потенциальной энергии при ударе мяча клюшкой и превращение ее в кинетическую, необходимую для полета мяча на дальние расстояния. Полимерное ядро заключено в жесткую пластиковую оболочку, уменьшающую прыгучесть мяча и делающую его более жестким. Для контроля удара и устойчивости в полете поверхность мяча имеет специальную форму и состоит из нескольких слоев пластика (обычно полиуретана), покрытых специальной устойчивой к царапинам краской [3].

Таким образом, приповерхностный объем мяча, непосредственно контактирующий с клюшкой, представляет собой многослойную структуру со сложными вязкоупругими свойствами.

При проектировании геометрии новых мячей с целью оптимизации их упругих и аэродинамических свойств огромный интерес представляет измерение характеристик отдельных слоев используемых материалов. При этом, поскольку все компоненты должны находиться в отличном адгезионном контакте, исключающем расслаивание мяча, механические свойства составных частей мяча в объемном виде могут отличаться от свойств исходных материалов.

Для исследования механических свойств структурных элементов, формирующих приповерхностный объем мяча для гольфа, целесообразно использовать метод инструментального индентирования.

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

При проведении измерений использовались два образца:

- образец А – отполированный поперечный срез мяча для гольфа (рис.1а);
- образец Б – целый мяч без какой-либо подготовки.

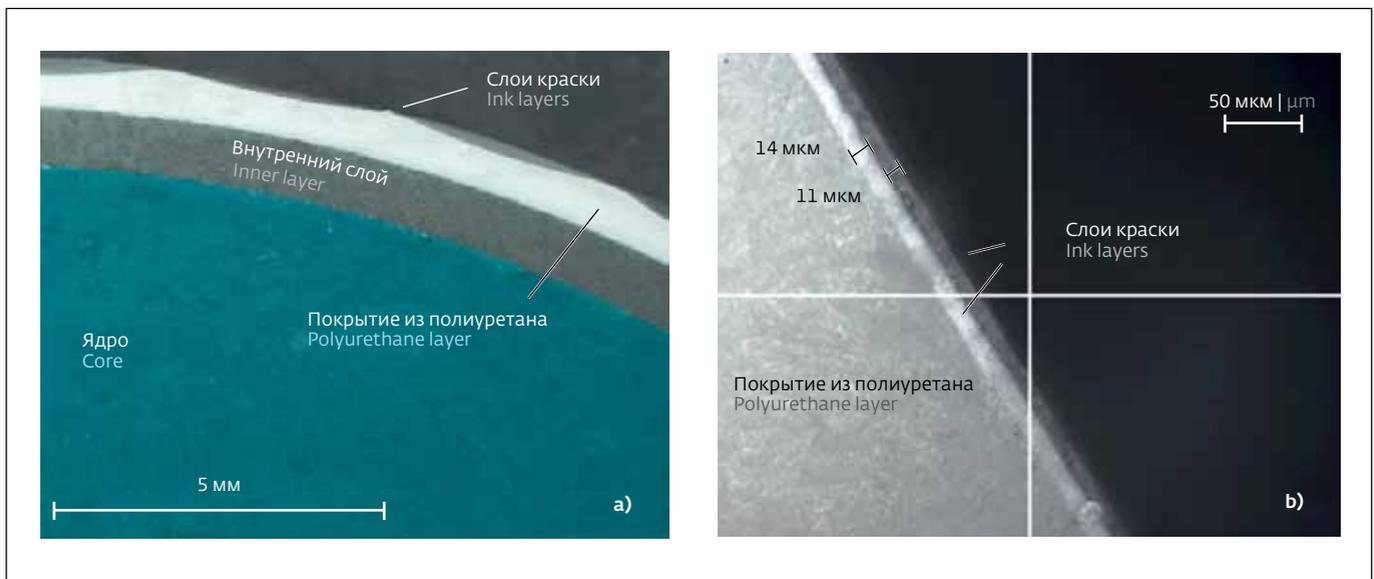


Рис.1. Оптические микрофотографии полированного поперечного среза мяча для гольфа (образец А)
 Fig.1. Optical micrographs of polished cross-section of a golf ball (sample A)

Как показано на рис.1б, внешняя оболочка мяча состоит из пластиковой скорлупы, толстого полиуретанового покрытия и двух тонких слоев краски. Основной целью данной работы являлось изучение свойств внешних покрытий: слоя полиуретана и двух тонких слоев краски, попутно были изучены и механические свойства скорлупы и ядра.

Разработчикам мячей наиболее интересны данные о твердости по Мартенсу и форма зависимости глубины внедрения индентора от нагрузки, получаемой при испытании методом инструментального индентирования. Эти параметры влияют на эффективность передачи энергии при ударе мяча клюшкой и на его долговечность.

One of the active users of high technology and advanced materials is the sports industry. Original technical solutions and the unique products significantly affect the level of sporting achievements and help both professional athletes and amateurs to achieve better results.

In particular, modern golf balls are complex multi-component products of high technology [1]. The properties of the ball should ensure a maximum flight range and trajectory stability, and also good control of short kicks. In the center of the ball is usually dense and hard core from a rubber-like polymer

[2], which ensures the accumulation of potential energy upon impact of the ball and turning it into kinetic energy required for the flight over long distances. Polymer core is encased in hard plastic shell, which reduces the jumping of the ball and making it harder. For control and stability in flight the surface of the ball has the special form, and consists of several layers of plastic (usually polyurethane), coated with a special scratch-resistant ink [3]. Thus, the near-surface volume of the ball, which is in direct contact with the club is a multi-layer structure with complex viscoelastic properties.

When designing the geometry of new balls, to optimize their elastic and aerodynamic properties, the measurement of the characteristics of the individual layers of the materials is of great interest. Thus, since all components must be in adhesive contact, which eliminates the delamination of the ball, the mechanical properties of the components in bulk may differ from the properties of the original materials.

To study the mechanical properties of the structural elements forming the near-surface volume of a golf ball, it is reasonable to use the instrumental indentation.

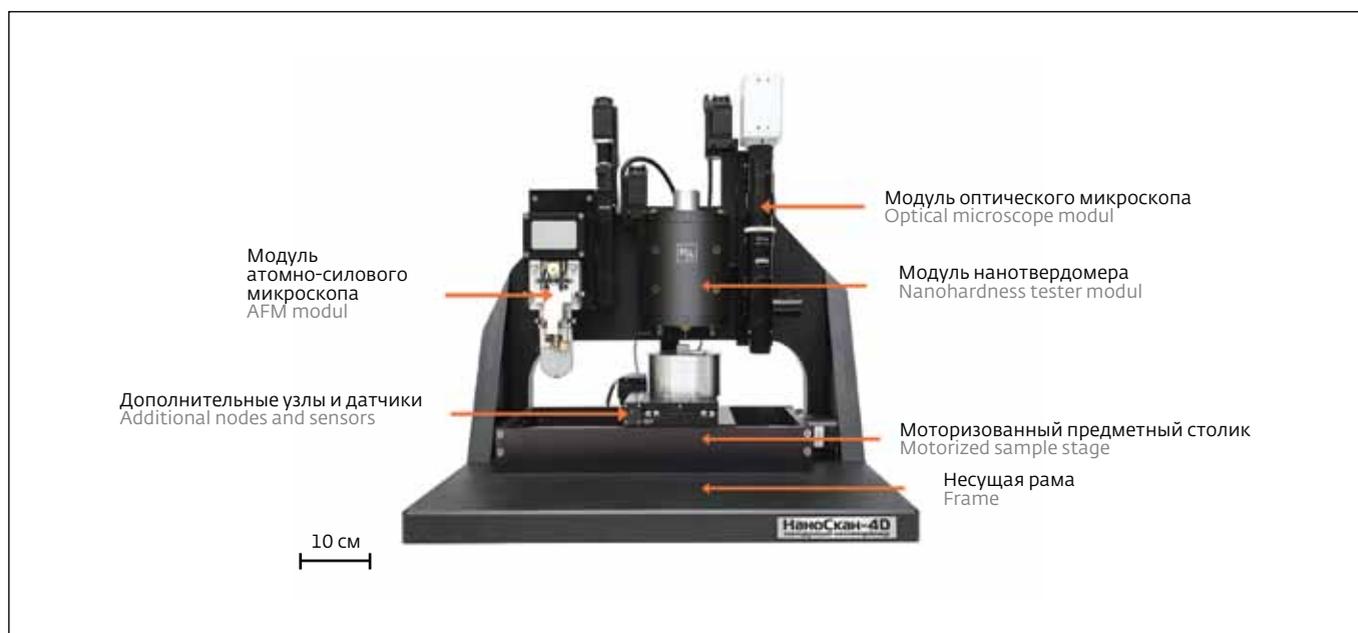


Рис.2. Нанотвердомер "НаноСкан-4D"

Fig.2. NanoScan-4D scanning nanohardness tester

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Механические свойства многослойного мяча для гольфа исследовались с использованием нанотвердомера "НаноСкан-4D" (ФГБНУ ТИСНУМ) [4-8]. Общий вид прибора представлен на рис.2. В число методов измерения,

реализованных в данном приборе, входят испытания методом склерометрии, измерение твердости и модуля упругости методом инструментального индентирования, а также ряд методов атомно-силовой микроскопии (АСМ). Индентирующая головка прибора

DESCRIPTION OF THE SAMPLES

Two samples were used for research:

- sample A - polished cross-section of a golf ball (fig.1a);
- sample B - a ball without any preparation.

As shown in fig.1b, the outer shell of the ball consists of a plastic shell, thick polyurethane coating and two thin layers of ink. The main goal of this work was the study of the properties of external coatings (polyurethane layer and two thin layers of ink), but the mechanical properties of the shell and the core were also studied.

The Martens hardness test and the dependence of the indentation

depth on the load are most interesting for golf balls developing. These data affect the efficiency of energy transfer when hitting the ball and its durability.

DEVICES AND METHODS

Mechanical properties of multi-layer Golf ball was investigated using NanoScan-4D scanning nanohardness tester (FSBI TISNCM) [4-8]. General view of the device is presented in fig.2.

Among the measurement methods implemented in this device are sclerometry tests, measurements of hardness and elastic modulus by instrumental indentation, and a number of methods of atomic force

microscopy (AFM). The indenting head allows to apply loads in the range from micronewtons to a few newtons, as well as to measure displacement in the range from fractions of nanometer to the millimeter.

Measurement of mechanical properties and surface topography were performed using the same device by moving the sample from one working position to another with the help of motorized tables.

The hardness and elastic modulus were determined by the method of instrumental indentation in accordance with ISO 14577-1:2002 using Berkovich indenter (diamond triangular pyramid).

позволяет прикладывать нагрузки в диапазоне от единиц микроныютонов до нескольких ньютон, а также измерять смещения в диапазоне от долей нанометров до миллиметра.

Измерения механических свойств и топографии рельефа поверхности были проведены на этом же приборе путем перемещения образца из одного рабочего положения в другое с помощью моторизованных столиков.

Твердость и модуль упругости определялись методом инструментального индентирования в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 (отечественный аналог международного стандарта ISO 14577-1:2002). Наконечник представлял собой индентор Берковича – алмазную трехгранную пирамиду.

Методами АСМ измерялись топография рельефа поверхности и параметры шероховатости.

ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ТВЕРДОСТИ

Рельеф поверхности (рис.3) в области испытания был исследован, прежде всего, для определения ее средней шероховатости. Режим испытания индентированием подбирался исходя из неровности исследуемой поверхности. Установлено, что толщина каждого слоя краски варьируется в пределах 14–18 мкм.

Профиль твердости и модуля упругости среза мяча был построен на базе 3 мм (рис.4).

Surface topography and roughness were measured by AFM Methods.

HARDNESS MAPPING

The surface topography (fig.3) was investigated, primarily to determine the average roughness of the test area. The indentation conditions were chosen based on roughness of the investigated surface. It is established that the thickness of each layer of the ink varies from 14 to 18 μm .

Base for the hardness and elastic modulus profile amounted to 3 mm (fig.4). Profile measurement begins at the core (coordinate 0) and ends within the layer

of polyurethane (dotted line in fig.1a). Part of the profile between 1300 and 2400 μm corresponds to the inner layer.

The following indentation parameters were selected:

- loading time of 10 sec.;
- maximum load of 5 mN;
- hold-time at maximum load of 5 sec.

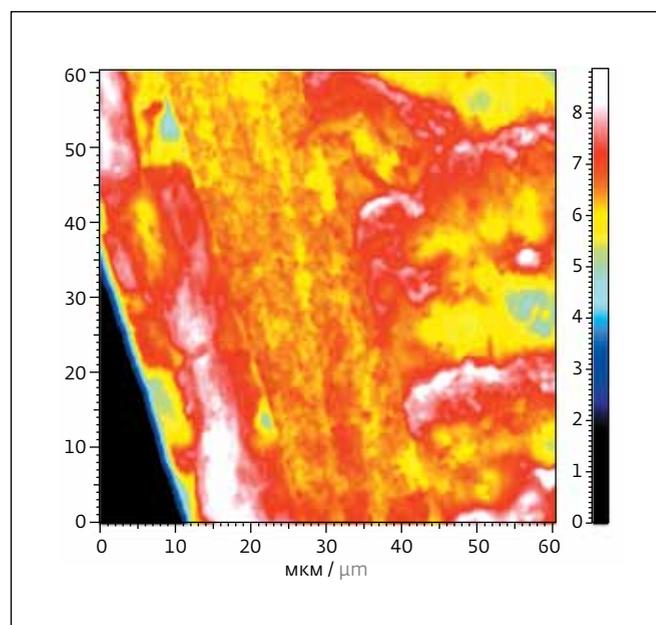
In these conditions, the depth of indentation has ranged from 2 to 8 μm depending on the test area.

The hardness profiles show that the shell has the largest hardness and elastic modulus. The core has the same hardness as the polyurethane layer, but lesser modulus of elasticity. Fig.5 shows typical

curves of loading-unloading, obtained by instrumental indentation. The experimental curve for the core (green curve) shows that deformation is mostly elastic in nature, unlike the external layers, which are characterized by a significant share of plastic deformation.

In a separate experiment, the profiles were brought to ink layers, but acquired data showed no significant changes of the properties in the ink area, what corresponds to the results of multicyclic indentation of the surface of the ball in the radial direction.

Instrumental multicyclic indentation with partial unloading of



Измерение профиля начинается в области Рис.3. Образец А: рельеф слоев краски, полученный методом АСМ

Fig.3. Sample A: relief map of ink layers, obtained by AFM

ядра (координата 0) и завершается внутри слоя полиуретана (пунктирная линия на рис.1а). Часть профиля между 1300 и 2400 мкм соответствует внутреннему слою.

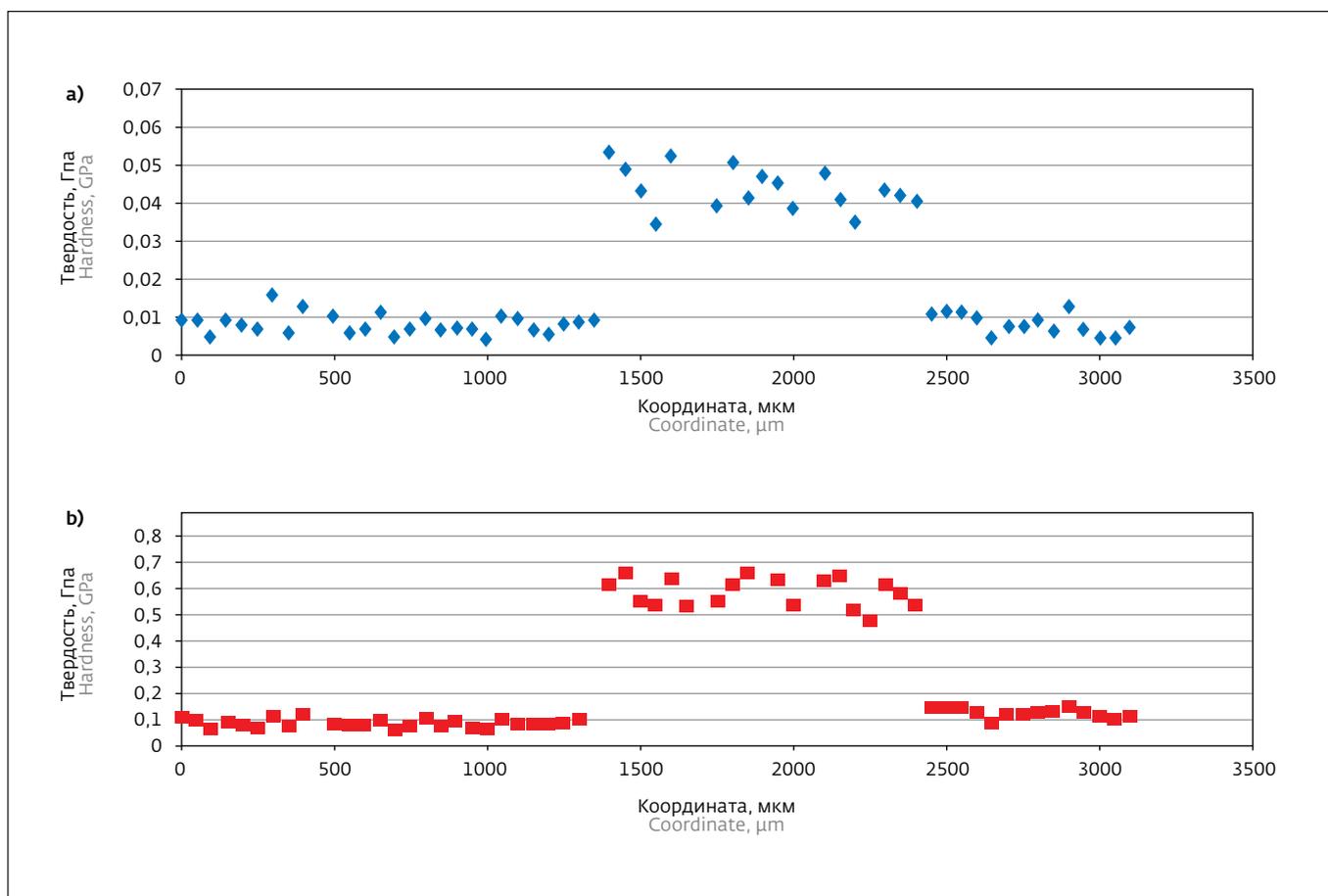


Рис.4. Профили твердости H (а) и модуля упругости E (б), снятые через ядро (0–1300 мкм), внутренний слой (1300–2400 мкм) и слой полиуретана (2400–3200 мкм)

Fig.4. Profiles of hardness H (a) and elastic modulus E (b), obtained through the core (0–1300 μm), inner layer (1300–2400 μm) and polyurethane layer (2400–3200 μm)

the surface of the sample B (fig.6) was conducted under the following parameters:

- time of each part of loading and unloading of 2 sec.;
- maximum load of 750 mN;
- hold-time at maximum load of 5 sec.;
- number of cycles in one measurement of 25;
- maximum penetration depth of the indenter of 75 μm .

It turned out that the material of the surface of the ball has considerable fluidity, as during loading and unloading the depth of penetration varies with delay. The hardness increases linearly up to a depth

equal to the thickness of two layers of ink, and when it exceeds the hardness value is reduced, but not significantly, as the influence of the upper layers (fig.7).

CONCLUSION

The mechanical properties of different areas of the near-surface volume of a golf ball were studied by instrumental indentation NanoScan-4D scanning nanohardness tester. The combination of this method with the precision positioning enabled to determine the dependence of mechanical properties on the depth and along the profile. Morphology and surface roughness were studied

by AFM. The results of the study are given in the table.

The dependence of hardness on the depth was investigated on the surface of the sample B (a ball) by the instrumental multicyclic indentation, and the results are consistent with the data obtained on sample A (cross-section of a ball).

The experimental results in general correspond to the information of the developer of the balls about the properties of the materials. The most significant are data about the viscoelastic properties of the coatings, whose wear and tear shows that the ball loses its performance. ■

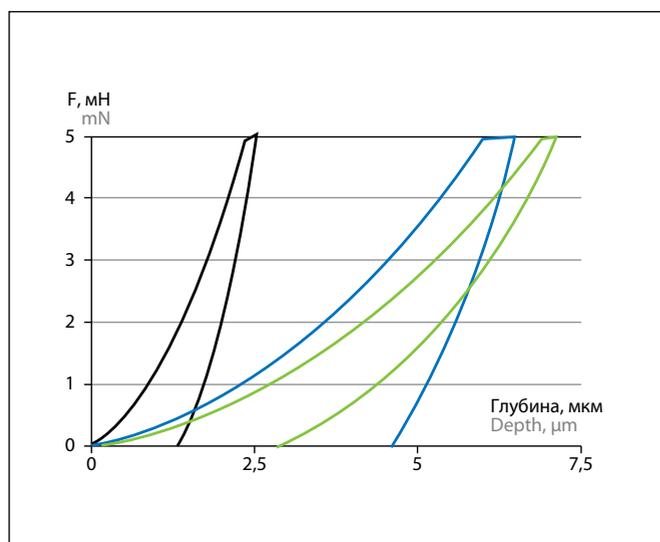


Рис.5. Типичные кривые нагружения/разгрузки: зеленая кривая – в области ядра; черная кривая – внутреннего слоя; синяя кривая – полиуретанового слоя

Fig.5. Typical curves of loading and unloading: the green curve – in the core area; the black curve – in the inner layer; the blue curve – in a polyurethane layer

Были выбраны следующие параметры индентирования:

- время нагружения – 10 с;
- максимальная нагрузка – 5 мН;
- выдержка при максимальной нагрузке – 5 с.

В данных условиях глубина индентирования составляла от 2 до 8 мкм в зависимости от области испытания.

Из профилей твердости видно, что слой скорлупы имеет самые большие твердость и модуль упругости. Ядро имеет такую же твердость, что и слой полиуретана, но меньший модуль упругости. На рис.5 показаны типичные кривые нагружения/разгрузки, полученные при испытании методом инструмен-

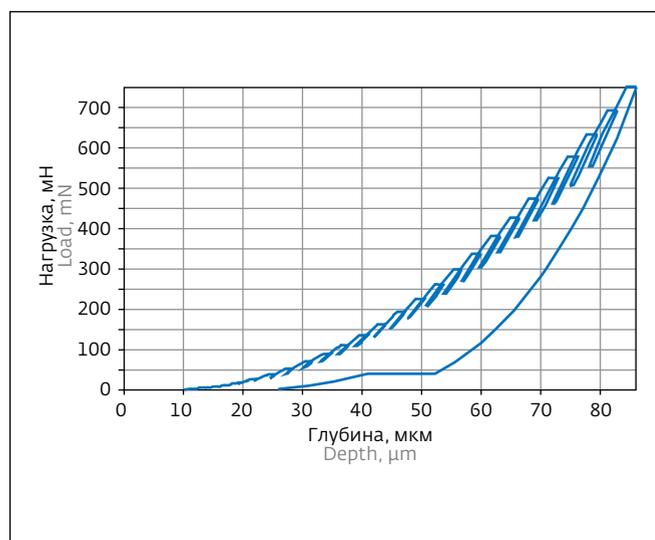


Рис.6. Диаграмма многоциклового индентирования образца Б Fig.6. Multicyclic indentation chart for the sample B

тального индентирования. По экспериментальной кривой для области ядра (зеленая кривая) видно, что деформация имеет преимущественно упругий характер в отличие от внешних слоев, характеризующихся значительной долей пластической деформации.

В отдельном эксперименте профили были доведены до слоев краски, однако полученные данные не показали существенного изменения свойств в области покраски, что согласуется с представленными ниже результатами многоциклового индентирования поверхности мяча в радиальном направлении.

Многоцикловое инструментальное индентирование с частичной разгрузкой на поверхности образца Б (рис.6) было проведено при следующих параметрах:

Физико-механические свойства поверхности образца А Physico-mechanical properties of the sample A surface

Структурный элемент Structural element	Ядро Core	Внутренний слой Inner layer	Полиуретановый слой Polyurethane layer	Внутренний слой краски Inner ink layer	Внешний слой краски Outer ink layer
Шероховатость, Ra Roughness	0,94	1,18	0,6	0,16	0,52
Твердость, Мпа Hardness, MPa	8,2	42	8	25	20
Модуль упругости, Мпа Elastic modulus, MPa	88	590	125	250	200

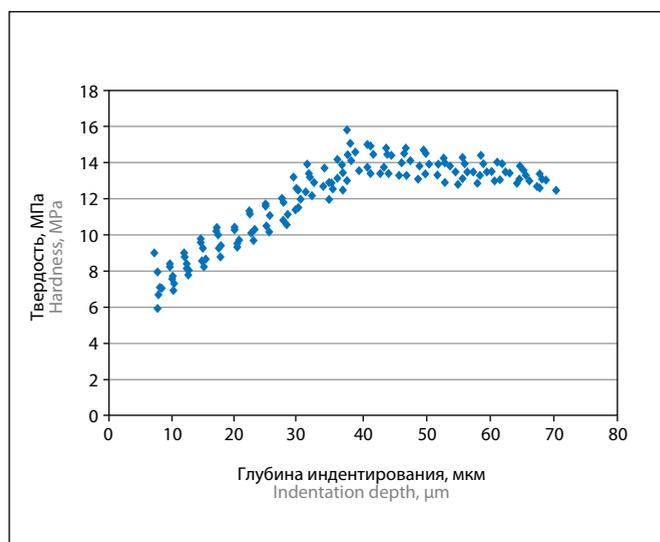


Рис.7. Зависимость твердости H от глубины внедрения индентора в образец Б (поверхность исходного мяча), полученная методом многоциклового индентирования
 Fig.7. Hardness H and the depth of penetration of the indenter dependence for the sample B (the surface of the initial ball), obtained by multicyclic indentation

- время каждого участка нагружения и разгрузки – 2 с;
- максимальная нагрузка – 750 мН;
- выдержка при максимальной нагрузке – 5 с;
- количество циклов в рамках одного измерения – 25;
- максимальная глубина проникновения индентора – 75 мкм.

Оказалось, что материал на поверхности мяча обладает значительной текучестью, так как при нагружении и разгрузке глубина внедрения изменяется с запаздыванием. Твердость линейно увеличивается до глубины, равной толщине двух слоев краски, а при ее превышении значение твердости снижается, но не значительно, так как сказывается влияние верхних слоев (рис.7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механические свойства разных областей приповерхностного объема мяча для гольфа были исследованы методами инструментального индентирования с помощью нанотвердомера "НаноСкан-4D". Комбинация данного метода с функцией прецизионного позиционирования позволила определить зависимости механических свойств от глубины и по длине профиля. Морфология и параметры

шероховатости поверхности были исследованы методами АСМ. Результаты исследования приведены в таблице.

Зависимость твердости от глубины была исследована на поверхности образца Б (целого мяча) методом многоциклового инструментального индентирования, и полученные результаты согласуются с данными, зафиксированными на образце А (разрезанный мяч).

Результаты экспериментов в целом соответствуют информации разработчика мячей о свойствах используемых материалов. Наиболее значимыми оказались данные о вязкоупругих свойствах лакокрасочного покрытия, используемого для придания мячам товарного вида и лимитирующего число ударов, которые мяч выдерживает без потери рабочих характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. William E., Kevin M., Michael J. Multi-layer golf ball // US 6692379 B2. 2004.
2. Mikio Yamada, Yoshikazu Yabuki S.E. Rubber composition for golf balls // US 5585440 A. 1996.
3. Kieran F. Andre C.W.V. Scratch resistant coating compositions for golf equipment // US 7115050 B2. 2006.
4. Усеинов А., Кравчук К., Маслеников И., Решетов В., Фомкина М. Исследование прочности микрообъектов с помощью сканирующего нанотвердомера "НаноСкан" // Наноиндустрия. 2015. № 4. С. 54-60.
5. Маслеников И., Решетов В., Усеинов А. Построение карт модуля упругости поверхности сканирующим зондовым микроскопом "НаноСкан 3D" // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 5. С. 136-142.
6. Усеинов А., Кравчук К., Маслеников И., Получение томограммы механических свойств методами наноиндентирования // Наноиндустрия. 2014. № 1. С. 34-38.
7. Кравчук К., Торская Е., Усеинов А., Фролов Н. Экспериментально-теоретическое исследование причин скалывания покрытий на основе многокомпонентных оксидов при фрикционном нагружении // Известия РАН. Механика твердого тела. 2015. № 1. С. 64-74.
8. Useinov A., Useinov S. Scratch hardness evaluation with in-situ pile-up effect estimation // Philosophical Magazine. Vol. 92. issue 25-27. 2012. P. 3188-3198.