

УДК 53.081; 620.17  
PACS 62.20.-x

## Определение модуля упругости нанопокрyтия с помощью испытания на трехточечный изгиб

Я. Н. Иванов<sup>1†</sup>, В. С. Чудинов<sup>2</sup>, И. Н. Шардаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

† jaroslawrussia@gmail.com

<sup>2</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Технологии создания на полимерных материалах нанопокрyтий с уникальными свойствами активно развиваются и используются в деятельности человека. Возможности применения таких композитных материалов будут зависеть от физико-механических свойств покрyтий. Для определения механических характеристик нанопокрyтий на полимерных материалах используется метод наноиндентирования. На результаты наноиндентирования жесткого покрyтия существенно влияет мягкая полимерная подложка. С другой стороны, существуют различные экспериментальные методы и аналитические модели для определения механических свойств материалов на макроуровне. Использование данных подходов позволило бы получать значения механических свойств нанопокрyтий, которые можно будет использовать для расчета и анализа напряженно-деформированного состояния изделий с нанопокрyтиями. В данном исследовании мы демонстрируем применение трехточечного изгиба для определения модуля упругости карбонизированного нанослоя, сформированного путем обработки ионами азота высокой энергии поверхности полиуретана. Подбирая оптимальную толщину испытываемых образцов, можно создать условия для определения модуля упругости нанослоя на полимерной подложке с помощью эксперимента на трехточечный изгиб. Нами были получены статистически значимые различия между значениями модулей упругости необработанных и обработанных плазмой образцов. С помощью модели составной балки был определен модуль упругости карбонизированного нанослоя.

**Ключевые слова:** нанослой; модуль упругости; трехточечный изгиб

*Поступила в редакцию 06.06.2022; после рецензии 11.07.2022; принята к опубликованию 13.07.2022*

## Determination of the elastic modulus of a nanocoating using a three-point bending test

Y. N. Ivanov<sup>1†</sup>, V. S. Chudinov<sup>2</sup>, I. N. Shardakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Perm State University, Perm, Russia

† jaroslawrussia@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

Technologies for creating nanocoatings with unique properties on polymeric materials are being actively developed and used in human activities. The possibilities of using such composite materials will depend on the physical and mechanical properties of the coatings. To determine the mechanical characteristics of nanocoatings on polymeric materials, there are used nanoindentation methods. The results of nanoindentation of a hard coating are significantly affected by a soft polymer substrate. On the other hand, there are various experimental methods and analytical models for determining the

mechanical properties of materials at the macroscopic level. The use of these approaches would make it possible to obtain the values of the mechanical properties of nanocoatings, which could be used to calculate and analyze the stress-strain state of products with nanocoatings. In this study, we demonstrate the application of a three-point bending test to determine the elastic modulus of a carbonized nanolayer formed by high-energy nitrogen ion treatment of a polyurethane surface. By selecting the optimal thickness of the test samples, it is possible to create conditions for determining the modulus of elasticity of a nanolayer on a polymer substrate using a three-point bending test. We have obtained statistically significant differences between the values of the elastic modulus of untreated and plasma-treated samples. Using a composite beam model, the modulus of elasticity of the carbonized nanolayer was determined.

**Keywords:** nanolayer; elastic modulus; three-point bending

*Received 06 June 2022; revised 11 July 2022; accepted 13 July 2022*

doi: 10.17072/1994-3598-2022-3-05-11

## 1. Введение

В настоящее время активно применяются и развиваются технологии создания нанопокровов с уникальными свойствами на полимерных материалах [1, 2].

Возможности применения таких композитных материалов будут зависеть от физико-механических свойств покрытий. В частности, одним из таких свойств является модуль упругости нанопокровов, поскольку он широко применяется в формулах прочностных расчетов элементов конструкций и изделий в целом. Малые значения толщины нанопокровов обуславливают выбор методов для определения модуля упругости. Традиционно для оценки упругого модуля нанопокровов применяются такие методы, как наноиндентирование, атомно-силовая микроскопия и SIEBIMM [3–7]. Наноиндентирование и атомно-силовая микроскопия с применением аналитических моделей Герца и Дерягина-Мюллера-Топорова дают заниженные значения модуля упругости покрытия, поскольку велико влияние мягкой подложки на результаты измерений. Метод SIEBIMM прост в применении, поскольку необходимо измерять только длину волны коробления покрытия. Данный метод основан на линейно-упругой деформации подложки и покрытия при относительно высоких напряжениях, что не всегда возможно. Следовательно, данные методы больше подходят для ранжирования и сравнения жесткостных свойств покрытий на одной подложке, чем для количественного определения модуля упругости нанопокровов.

Макромеханические экспериментальные методы определения модуля упругости вызывают большой интерес. Но такие методы мало применимы для нахождения модуля упругости нанопокровов, поскольку его наличие обычно не влияет на механическое поведение макрообразцов [8]. Однако при соблюдении некоторых условий существует возможность выполнить макромеханиче-

ский эксперимент так, что наличие нанопокровов ощутимо влияет на результаты измерений. В подтверждение этого нами был определен упругий модуль карбонизированного нанослоя, сформированного ионно-плазменной обработкой поверхности полиэтилена, с помощью испытаний на одноосное растяжение. Влияние нанопокровов на макромеханическое поведение образца композитного материала можно регулировать с помощью изменения его толщины. А точность измерений можно повысить, выполняя эксперимент на одном и том же образце до и после формирования нанопокровов [9].

Эксперимент на трехточечный изгиб представляет больший интерес, поскольку поверхностный слой при изгибе получает наибольшую деформацию. А при одноосном растяжении деформация в сечении распределена равномерно. Это означает, что при одинаковых геометрических характеристиках образца поверхностный слой окажет большее влияние на жесткость сечения при изгибе нежели при растяжении. Таким образом, когда поверхностный слой недостаточно жесткий для определения его модуля упругости с помощью одноосного растяжения, альтернативным экспериментальным методом может быть испытание на трехточечный изгиб.

В этом исследовании мы опробуем методику определения упругого модуля нанослоя на полимерной подложке по результатам трехточечного изгиба. Исследуемым материалом будет являться карбонизированный нанослой, сформированный на поверхности полиуретана методом ионно-плазменной обработки.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Подготовка образцов

В качестве подложки использовались образцы полиуретанов СКУ-ПФЛ (Эластопласт, Пермь, Россия). Полиуретаны синтезировались из уретанового форполимера ЭП СКУ ПТ-74 на основе

простого полиэфира и 2,4-толуилендиизоцианата. Для отверждения форполимера использовались комбинации смесей отвердителей 3,3'-дихлор-4,4'-диаминодифенилметана (массовая доля 13.2%), полифурита (массовая доля 84.7%) и Воранола RA640 (массовая доля 2.1%). Форполимер и отвердитель разогревались в термощкафу при температуре 70°C в условиях низкого вакуума. В течение 2 мин производилось смешивание форполимера и отвердителя в соотношении массовых долей 100:47.5 соответственно. Из смеси удалялись пузыри воздуха при температуре 70°C в условиях низкого вакуума в течение 3–4 мин. Затем смесь отверждалась в 3 этапа. На первом этапе выполняется отверждение в течение 24 ч в силиконовой форме при температуре 25°C в условиях низкого вакуума. На втором этапе процесс отверждения происходил в течение 24 ч в силиконовой форме при температуре 50°C в условиях низкого вакуума. На третьем этапе после извлечения из формы происходил отжиг без вакуума при температуре 70°C в течение 3 ч. Испытуемые образцы вырезались из полиуретановых пластин вырубным ножом. Ширина и длина образцов составляли 6 мм и 40 мм соответственно. Были подготовлены 2 партии образцов толщиной 2 и 5 мм.

## 2.2. Формирование нанослоя

Образцы обрабатывались ионами азота с энергией 20 кэВ флюенсом  $3 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Для этого полиуретановые образцы помещались на плоский металлический электрод в вакуумном реакторе. Электрод был изолирован от стенок камеры и подключался к высоковольтному генератору. Образцы на электроде закрывались металлической сеткой. Из камеры откачивался воздух с помощью спирального форвакуумного и турбомолекулярного насосов до давления  $10^{-5}$  Торр. В реактор подавался азот особой чистоты до установления давления в реакторе  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр. На электрод подавались прямоугольные импульсы высокого напряжения с амплитудой 20 кэВ, фронтом нарастания 100 нс, шириной 20 мкс и частотой 100 Гц. Из-за разницы потенциалов между электродом и вакуумным реактором создавался плазменный разряд, и происходила бомбардировка ионами высокой энергии поверхности полимерных образцов. Параметры режима обработки были подобраны таким образом, чтобы не допускать перегрева образца. Набор дозы ионов  $3 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> происходил за 600 с. Обрабатывались обе стороны образца, чтобы увеличить вклад сформированного нанослоя в сопротивление образца изгибу. Для этого после разгерметизации реактора образцы переворачивались относительно горизонтальной оси на 180°, и весь процесс ионно-плазменной обработки повторялся. Глубина проникновения иона в материал была рас-

считана с помощью программного пакета TRIM [10]. На рис. 1 приведено распределение глубины проникновения ионов с энергией 20 кэВ в полиуретан. Среднее значение глубины проникновения ионов составило 78 нм. Данное значение было принято за толщину карбонизированного слоя.

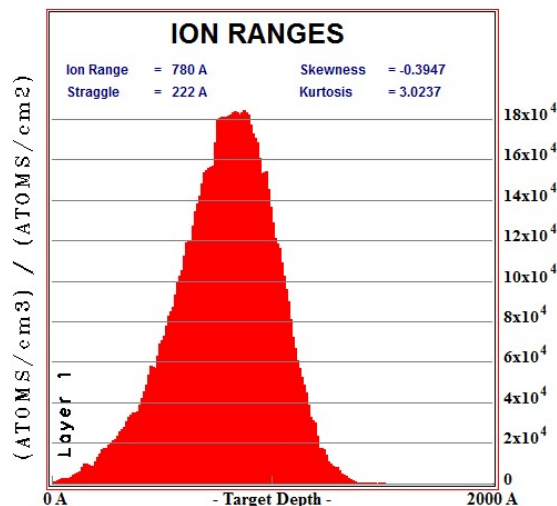


Рис. 1. Распределение глубины проникновения ионов азота энергией 20 кэВ в полиуретан

## 2.3. Изгиб составной балки

Нагружение образца силой  $P$ , имеющего поверхностный нанослой с двух сторон, схематично проиллюстрировано на рис. 2.

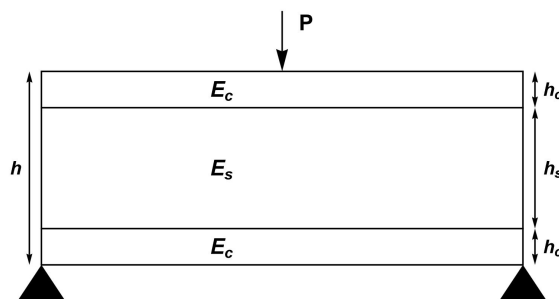


Рис. 2. Схема нагружения трехслойной балки

Материалы подложки и слоя, в рамках данного эксперимента, будем считать однородными линейно-упругими материалами с модулями упругости  $E_s$  и  $E_c$  соответственно. Для полимерной подложки данное предположение справедливо при малых деформациях и низкой скорости нагружения. Между тем карбонизированный слой, полученный на поверхности полиуретана с помощью ионно-плазменной обработки, имеет неоднородное распределение механических свойств по толщине [11]. Поскольку толщина нанослоя мала по сравнению толщиной образца, деформацию в произвольном сечении нанослоя можно считать постоянной. Следовательно, нанослой будет находиться в состоянии осевого растяжения (сжатия) под дей-

ствием нормальных растягивающих (сжимающих) напряжений, переменных по длине образца. Тогда под модулем упругости слоя  $E_c$ , полученного в рамках данной экспериментальной работы, следует понимать эффективный модуль упругости карбонизированного нанослоя.

Для модифицированного с помощью плазменной обработки поверхностного слоя характерно наличие остаточных сжимающих напряжений [11, 12]. Известно, что остаточные напряжения могут значительно повлиять на напряженно-деформированное состояние образца при проведении эксперимента. Величина остаточных напряжений в данном случае неизвестна. При изгибе в произвольном сечении карбонизированный слой с одной и другой сторон образца получает разную по знаку и одинаковую по величине деформацию. Поскольку материалы нанослоя и подложки работают в пределах линейно-упругой области, влияние остаточных напряжений в верхней части образца компенсируется влиянием в нижней части.

Образец имеет ширину  $b$ . Толщина всего образца равна  $h$ , причем подложка имеет толщину  $h_s$ , а поверхностный слой – толщину  $h_c$ .

Относительно нейтральной оси, которая расположена в центре сечения, момент инерции сечения подложки будет иметь вид

$$J_s = \frac{bh_s^3}{12},$$

момент инерции сечения поверхностного слоя –

$$J_c = 2 \left( \frac{bh_c^3}{12} + bh_c \frac{(h-h_c)^2}{4} \right),$$

а момент инерции сечения всего образца –

$$J_0 = \frac{bh^3}{12}.$$

При описанной геометрии изготовленные образцы будут работать на изгиб как балка Эйлера–Бернулли. Изгибающий момент в сечении, учитывая сопротивление изгибу подложки и слоя раздельно, будет выглядеть следующим образом:

$$M = \frac{1}{\rho} (E_s J_s + E_c J_c), \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиус кривизны. Также изгибающий момент можно записать через эффективный модуль

$$M = \frac{E_{eff} J_0}{\rho}. \quad (2)$$

Запишем выражение для нахождения модуля упругости слоя, сравнивая правые части (1) и (2)

$$E_c = \frac{-E_s h_s^3 + E_{eff} h^3}{2h_c (3h^2 - 6h h_c + 4h_c^2)}. \quad (3)$$

#### 2.4. Анализ влияния нанослоя на результаты макроэксперимента

Оценить влияние нанослоя на результаты изгиба можно, если известны его примерные значения модуля упругости. Поскольку действующая сила при изгибе пропорциональна жесткости сечения, достаточно сравнить эту характеристику при отсутствии и при наличии поверхностного слоя. Жесткость сечения необработанного образца равна  $E_s J_0$ , а для обработанного с двух сторон образца составляет  $E_s J_s + E_c J_c$ . Сравнивая эти величины, можно записать относительное увеличение силы  $\delta$ , регистрируемой в эксперименте, при наличии слоя

$$\delta = \left( \frac{E_s J_s + E_c J_c}{E_s J_0} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Ранее нами был найден модуль упругости карбонизированного слоя, сформированного ионно-плазменной обработкой на полиэтилене. В зависимости от флюенса обработки модуль карбонизированного слоя менялся от 1 до 20 ГПа. Будем использовать этот диапазон значений модуля упругости слоя для оценки  $\delta$  на полиуретановых образцах. Среднее значение модуля упругости синтезированных образцов полиуретана составляет 10 МПа. Для образцов толщиной 5 мм  $\delta$  лежит в диапазоне от 1 до 20%. Если же значение толщины принять равной 2 мм, то  $\delta$  будет находится в диапазоне от 3 до 46%.

#### 2.5. Испытания на трехточечный изгиб

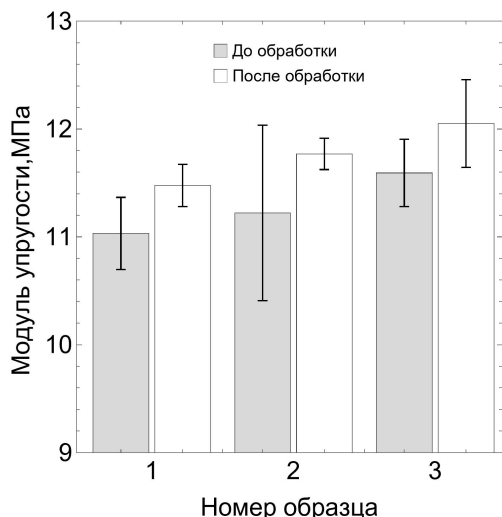
Испытания на трехточечный изгиб проводились на испытательной машине Testometric FS100. В эксперименте измерялась сила сопротивления изгибу при заданном прогибе образца. Для того чтобы увеличить влияние карбонизированного слоя на результаты трехточечного изгиба, было предложено сравнивать результаты до и после обработки на каждом образце индивидуально. Для статистической достоверности влияния карбонизированного нанослоя на результаты трехточечного изгиба каждый образец испытывался по 8 раз. Образцы каждый раз устанавливались на опоры заново. Интервал между нагружениями одного образца составлял 5 мин. Рабочая длина образца составляла 30 мм. Образцы из второй партии были изготовлены с меньшей толщиной, что уменьшило жесткость образца на изгиб в 2.5 раза. Для того чтобы усилия, регистрируемые в эксперименте, были в рабочем диапазоне датчика силы, образцы из второй партии были разбиты на три группы, образцы в которых испытывались вместе. Испытание широких образцов было бы некорректно, поскольку эксперимент выходил бы за пределы теории балки Эйлера–Бернулли.

Схема эксперимента была следующей:

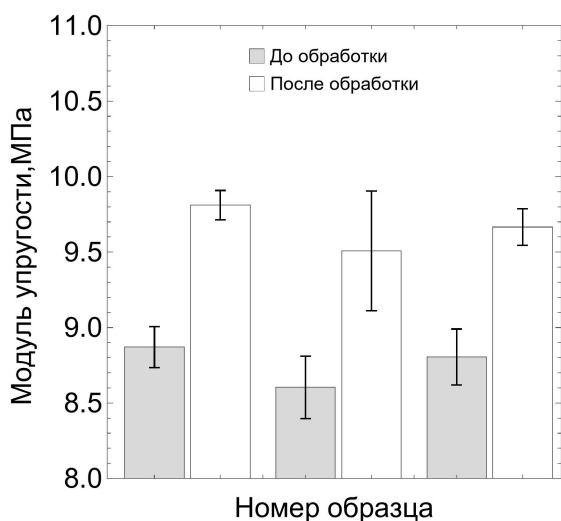
1. Проводился трехточечный изгиб образца. Прогиб составлял 0.5 мм. Скорость нагружения составляла 0.5 мм/мин. Для каждого образца проводилось 8 испытаний.

2. Производилась ионно-плазменная обработка двух противоположных поверхностей образца с заданными флюенсом и энергией ионов азота.

3. Проводился трехточечный изгиб обработанного плазмой образца, описанный в первом пункте.



**Рис. 3.** Значения модуля (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) упругости образцов из первой партии до (серый) и после (белый) ионно-плазменной обработки

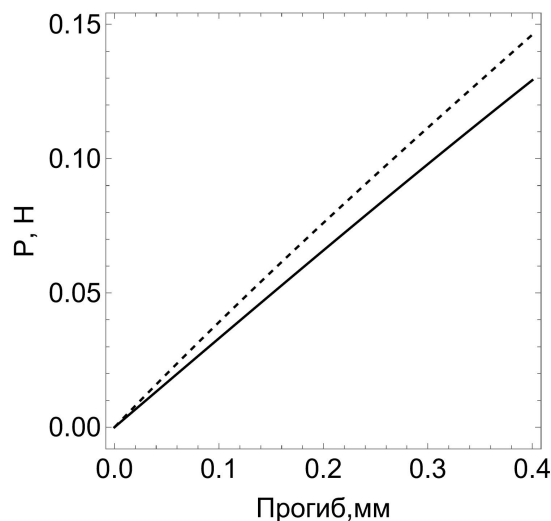


**Рис. 4.** Значения модуля (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) упругости образцов из второй партии до (серый) и после (белый) ионно-плазменной обработки

### 3. Результаты

На рис. 3 и 4 представлены значения эффективного модуля упругости до и после ионно-

плазменной обработки образцов первой и второй партий соответственно.



**Рис. 5.** Диаграммы нагружения одного из образцов до (сплошная линия) и после (штриховая линия) ионно-плазменной обработки

На рис. 5 представлены типичные диаграммы нагружения образцов из второй партии. Сплошной линией обозначена диаграмма нагружения образца до обработки, а пунктирной – после ионно-плазменной обработки. Диаграммы представлены в осях «сила сопротивления изгибу  $P$  – прогиб образца». Относительные значения увеличения эффективного модуля упругости и рассчитанный по формуле (3) модуль карбонизированного слоя представлены в таблице.

*Значения относительного увеличения среднего значения эффективного модуля упругости образцов после плазменной обработки и значения модуля упругости (среднее значение и стандартная ошибка среднего) карбонизированного слоя*

Образец \ Величина	1	2	3
Относительное увеличение модуля упругости композитной балки	10.6%	10.5%	9.7%
Модуль упругости карбонизированного слоя, ГПа	4.32±0.43	4.15±0.23	3.95±0.28

### 4. Обсуждение

Результаты эксперимента с первой партией образцов дали неудовлетворительный результат (рис. 3). Уменьшение толщины позволило увеличить вклад карбонизированного нанослоя в силу сопротивления изгибу (рис. 4). Распределения эф-

фактивного модуля более тонких образцов до и после обработки имеют статистически значимые различия. Результат данной работы (см. таблицу) согласуется с итогом нашего предыдущего исследования, где целочисленное значение модуля упругости карбонизированного слоя, сформированного на поверхности полиэтилена при том же режиме ионно-плазменной обработки, составило 7 ГПа [9].

Относительное увеличение силы  $\delta$  для образцов с толщиной 5 мм, рассчитанное по формуле (4) с использованием найденного значения модуля упругости нанослоя, составляет 3.7%. Это объясняет, почему в эксперименте для первой партии образцов не удалось зарегистрировать значительное увеличение жесткости образцов после плазменной обработки.

## 5. Выводы

Был опробован метод нахождения модуля упругости жесткого нанослоя на мягкой подложке с помощью эксперимента на трехточечный изгиб. Влияние нанослоя на макромеханическое поведение образцов можно повысить, уменьшая их толщину. Но при этом необходимо, чтобы сила, регистрируемая в эксперименте, находилась в рабочем диапазоне датчика. Подобрать толщину образцов можно, используя выражение (4), если известно примерное значения модуля упругости слоя.

## 6. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №20-48-596014 р\_НОЦ\_Пермский край и государственного задания ИМСС УрО РАН.

## Список литературы

1. Mills K. L., Zhu X., Takayama S., Thouless M. D. The mechanical properties of a surface-modified layer on poly(dimethylsiloxane) // *J. Mater. Res.* 2008. Vol. 23. N. 1. P. 37-48. DOI: 10.1557/JMR.2008.0029
2. Henry B., Erlat A., McGuigan A., Grovenor C., Briggs G., Tsukahara Y., Miyamoto T., Noguchi N., Nijima T. Characterization of transparent aluminium oxide and indium tin oxide layers on polymer substrates // *Thin Solid Films.* 2001. Vol. 382. N. 1–2. P. 194–201. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01769-7
3. Stafford C., Harrison C., Beers K. et al. A buckling-based metrology for measuring the elastic moduli of polymeric thin films // *Nature Materials.* 2004. Vol. 3. P. 545–550. DOI:10.1038/nmat1175
4. Niinivaara E., Desmaisons J., Dufresne A., Bras J., Cranston E. Film thickness limits of a buckling-based method to determine mechanical properties of polymer coatings // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2021. Vol. 582. N. 1. P. 227–235. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.08.025

5. Issele H., Mercier D., Parry G., Estevez R., Vignoud L., Olagnon C. Determination of the Young's modulus of a TiN thin film by nanoindentation: analytical models and FEM simulation // *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology.* 2012. Vol. 10. N. 1. P. 624–629. DOI: 10.1380/ejsnt.2012.624
6. Jeong H., Park H., Jung Y.H., Lee J.H., Oh B.Y., Seo D. Tailoring the orientation and periodicity of wrinkles using ion-beam bombardment // *Langmuir.* 2016. Vol. 32. N. 28. P. 7138-7143. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b01473
7. Chudoba T., Griepentrog M., Dück A., Schneider D., Richter F. Young's modulus measurements on ultra-thin coatings // *Journal of Materials Research.* 2004. Vol. 19, 30. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.301
8. Tavares da Costa M. V., Neagu C., Fayet P. et al. Comparison of test methods estimating the stiffness of ultrathin coatings // *Journal of Coatings Technology and Research.* 2018. Vol. 15. N. 1. P. 743–752. DOI: 10.1007/s11998-018-0085-0
9. Shardakov I., Ivanov Y., Chudinov V., Glot I., Timkina T. Mechanical characteristics of the carbonized layer on the surface of polyethylene treated by the ion-plasma method // *Procedia Structural Integrity.* 2022. Vol. 37. N. 1. P. 1065-1072. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.02.046
10. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B.* 2010. Vol. 268. N. 11–12. P. 1818–1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091
11. Kondyurin A.V., Bilek M. Ion beam of polymers application from medicine to space. Amsterdam: Elsevier, 2015. 268 p.
12. Ahmed S. F., Rho G. H., Lee K. R., Vaziri A., Moon M. W. High aspect ratio wrinkles on a soft polymer // *Soft Matter.* 2010. Vol. 6. N. 1. P. 5709–5714. DOI: 10.1039/C0SM00386G

## References

1. Mills K. L., Zhu X., Takayama S., Thouless M. D. The mechanical properties of a surface-modified layer on poly(dimethylsiloxane). *J. Mater. Res.*, 2008, vol. 23, no. 1, pp. 37–48. DOI: 10.1557/JMR.2008.0029
2. Henry B., Erlat A., McGuigan A., Grovenor C., Briggs G., Tsukahara Y., Miyamoto T., Noguchi N., Nijima T. Characterization of transparent aluminium oxide and indium tin oxide layers on polymer substrates. *Thin Solid Films*, 2001, vol. 382, no. 1–2, pp. 194–201. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01769-7
3. Stafford C., Harrison C., Beers K. L. et al. A buckling-based metrology for measuring the elastic moduli of polymeric thin films. *Nature Mater.*, 2004, vol. 3, pp. 545–550. DOI:10.1038/nmat1175

4. Niinivaara E., Desmaisons J., Dufresne A., Bras J., Cranston E. Film thickness limits of a buckling-based method to determine mechanical properties of polymer coatings. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 582, no. 1, pp. 227–235. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.08.025
5. Issele H., Mercier D., Parry G., Estevez R., Vignoud L., Olagnon C. Determination of the Young's modulus of a TiN thin film by nanoindentation: analytical models and FEM simulation. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 624–629. DOI: 10.1380/ejsnt.2012.624
6. Jeong, H., Park H., Jung Y.H., Lee J.H., Oh B.Y., Seo. D. Tailoring the orientation and periodicity of wrinkles using ion-beam bombardment. *Langmuir*, 2016, vol. 32, no. 28, pp. 7138–7143. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b01473
7. Chudoba T., Griepentrog M., Dück A., Schneider D., Richter F. Young's modulus measurements on ultra-thin coatings. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, 30. DOI: 10.1557/jmr.2004.19.1.301
8. Tavares da Costa M.V., Neagu C., Fayet P. et al. Comparison of test methods estimating the stiffness of ultrathin coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 743–752. DOI: 10.1007/s11998-018-0085-0
9. Shardakov I., Ivanov Y., Chudinov V., Glot I., Timkina T. Mechanical characteristics of the carbonized layer on the surface of polyethylene treated by the ion-plasma method. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 37, no. 1, pp. 1065–1072. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.02.046
10. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B*, 2010, vol. 268, no. 11–12, pp. 1818–1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091
11. Kondyurin A. V., Bilek M. *Ion Beam of Polymers Application from Medicine to Space*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 268 p.
12. Ahmed S. F., Rho G. H., Lee K. R., Vaziri A., Moon M. W. High aspect ratio wrinkles on a soft polymer. *Soft Matter*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 5709–5714. DOI: 10.1039/C0SM00386G

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Иванов Я. Н., Чудинов В. С., Шардаков И. Н. Определение модуля упругости нанопокрyтия с помощью испытания на трехточечный изгиб // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 3. С. 5–11. doi: 10.17072/1994-3598-2022-3-05-11

**Please cite this article in English as:**

Ivanov Y. N., Chudinov V. S., Shardakov I. N. Determination of the elastic modulus of a nanocoating using a three-point bending test. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 3, pp. 5–11. doi: 10.17072/1994-3598-2022-3-05-11

**Сведения об авторах**

1. Ярослав Николаевич Иванов, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.
2. Вячеслав Сергеевич Чудинов, м.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.
3. Игорь Николаевич Шардаков, д. физ.-мат. н., г.н.с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королева, 1, Пермь, 614013.

**Author information**

1. Yaroslav N. Ivanov, Student, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
2. Vyacheslav S. Chudinov, Junior Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia
3. Igor N. Shardakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS; 1, Akademika Koroleva st., Perm, 614013, Russia