

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФОТООТВЕРЖДАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ, НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ*

Протасеня Т.А.¹, Крень А.П.¹, Дьякова Г.Н.²

¹Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Рассмотрено влияние термической обработки изделий, полученных путем лазерной стереолитографии, на их физико-механические характеристики. Установлено, что отжиг образцов из отвержденной фотополимерной смолы Formlabs Standard White V04 при 60°C в течение часа приводит к существенному увеличению модуля упругости и предела прочности, что подтверждено результатами стандартных испытаний. В качестве альтернативы разрушающим испытаниям для контроля упругих и прочностных свойств изделий из отвержденных фотополимерных смол предложено использовать метод динамического индентирования. Приведены аналитические выражения для расчета твердости и модуля упругости исследуемых материалов по основным параметрам регистрируемой диаграммы ударного нагружения. На основании экспериментальных данных получены градуировочные зависимости между значениями предела прочности и модуля упругости, установленными в ходе стандартных испытаний, и твердостью и модулем упругости, измеренными методом локального ударного деформирования с использованием сферического индентора. Показано, что данные зависимости имеют линейный характер и позволяют в рассматриваемом диапазоне изменения свойств измерить методом динамического индентирования предел прочности с погрешностью не более 4%, а модуль упругости – с погрешностью не более 3%. Установлено, что метод ударного локального деформирования обладает достаточной чувствительностью к изменению физико-механических характеристик отвержденных полимерных материалов, вызванному термическим воздействием, и может быть использован как для отладки технологических режимов термообработки изделий, полученных по SLA-технологии, так и для оперативного контроля их качества.

Ключевые слова: полимеры; твердость; модуль упругости; прочность; SLA-технология; индентирование

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE REGIMES OF HEAT TREATMENT OF PRODUCTS FROM PHOTOCURED POLYMERS, MANUFACTURED BY LASER STEREOLITHOGRAPHY

* Работа выполнена в рамках Национальной программы стипендий для молодых ученых при финансовой поддержке Всемирной федерации ученых (World Federation of Scientists National Scholarship Programme).

TECHNOLOGY, ON THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

Pratasenia T.A.¹, Kren A.P.¹, Dyakova H.N.²

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

ABSTRACT

The influence of heat treatment of products obtained by laser stereolithography on their physical and mechanical characteristics is considered. It has been established that annealing of specimens from the cured Formlabs Standard White V04 photopolymer resin at 60°C for an hour leads to a significant increase in the modulus of elasticity and ultimate strength, which is confirmed by the results of standard tests. As an alternative to destructive tests to control the elastic and strength properties of articles made of hardened photopolymer resins, it is proposed to use the dynamic indentation method. Analytical expressions are given for calculating the hardness and elastic modulus of the materials under study by the main parameters of the recorded shock loading diagram. Based on the experimental data, the calibration dependences were obtained between the values of the ultimate strength and elastic modulus established during standard tests and the hardness and elastic modulus measured by the method of local impact deformation using a spherical indenter. It is shown that these dependences have a linear character and make it possible to measure the ultimate strength by the method of dynamic indentation with an error of no more than 4%, and the modulus of elasticity with an error of no more than 3% in the considered range of changes in properties. It has been established that the method of local impact deformation is sufficiently sensitive to changes in the physical and mechanical characteristics of cured polymeric materials caused by thermal action, and can be used both for debugging the technological modes of heat treatment of products obtained using SLA-technology and for operational control of their quality.

Keywords: polymers; hardness; elastic modulus; strength; SLA-technology; indentation

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время одним из наиболее прогрессивных и широко распространенных способов производства изделий из полимерных материалов является аддитивный синтез. При этом, по соотношению стоимости изготовления и качества напечатанных изделий лидирующие позиции занимает SLA-технология (стереолитография). В SLA-технологии отверждение жидкой фотополимерной смолы происходит посредством избирательного воздействия лазера, что позволяет производить 3D-модели с высоким разрешением и гладкой поверхностью по окончании печати [1-3]. Благодаря разнообразию фотополимерных смол, доступных для SLA-печати, данная технология применяется как в промышленном производстве, так и в медицине, ювелирном деле и т.д.

Фотополимерные смолы являются термоотверждаемыми пластиками, в исходном состоянии это жидкости с низкой вязкостью. При прохождении процесса фотоотверждения в них образуется пространственная структура, которая не может в последующем изменяться без разрушения образованных ковалентных связей [4,5]. Вместе с тем при получении изделий методом SLA-технологии время воздействия луча лазера на фотополимер минимально и продолжительность

нахождения выращиваемого изделия в области печати недостаточно для полного прохождения процесса отверждения. Поэтому такое изделие обладает недостаточной степенью отверждения и высоким уровнем внутренних напряжений.

Для улучшения характеристик готовое изделие подвергают термообработке – отжигу, который заключается в нагреве материала до температуры ниже критической точки для данного полимера с последующим медленным охлаждением (охлаждение и нагрев проводят в одной и той же среде). Критической точкой для термореактивных полимеров принято считать предельно допустимый температурный режим при эксплуатации (до + 80°C) [6].

Отжиг позволяет получить высокую степень отверждения реактопластов и тем самым увеличить прочность и твердость полимерного материала. Поскольку процесс модификации структуры протекает не мгновенно, то большое значение имеет время выдержки при термообработке. Поэтому для определения ее оптимального режима необходим оперативный контроль физико-механических характеристик материала.

В настоящее время контроль свойств материалов изделий, полученных путем аддитивного синтеза, ведется, как правило, стандартными разрушающими методами согласно ГОСТ 11262, ГОСТ 4648 и ГОСТ 4647. В этой связи выбор оптимального режима термообработки – процесс длительный, поскольку включает в себя:

- изготовление образцов для разрушающих испытаний в соответствии с режимами печати для материала и предполагаемого готового изделия;
- термообработку образцов при различных температурах и с различным временем выдержки;
- проведение испытаний;
- корректировку режимов печати и условий отжига (при необходимости) и повторные испытания.

При этом свойства материала образцов могут иметь отклонения от свойств материала готового изделия ввиду различий технологических параметров при изготовлении, масштабного фактора и т.д.

Очевидно, что в данном случае применение метода неразрушающего контроля позволяет избежать излишних временных и материальных затрат. Кроме того, появляется возможность дать численную оценку физико-механических характеристик материала и отследить их изменение в зависимости и от температуры, и от времени выдержки при термообработке изделия. Наиболее перспективным методом, удовлетворяющим всем этим требованиям, является метод динамического индентирования [7-11]. Благодаря непрерывной регистрации полной диаграммы ударного нагружения в одном измерительном цикле проводится оценка основных упругих и прочностных свойств материала – твердости и модуля упругости. При этом нет необходимости в использовании дорогостоящего стационарного лабораторного оборудования и в изготовлении стандартных образцов. Весь комплекс необходимых данных может быть получен посредством одного испытательного удара, нанесенного непосредственно по готовому изделию без его разрушения и создания какого-либо дефекта. По этой причине метод динамического индентирования может рассматриваться как один из оптимальных и при проведении входного контроля напечатанных 3D-изделий.

Однако возможности метода динамического индентирования для контроля свойств изделий, полученных по SLA-технологии, до настоящего времени не изучены, как и не выяснен вопрос эффективности его использования для регистрации изменения свойств полимерных материалов, подвергшихся термообработке по различным режимам.

В этой связи настоящие исследования направлены на адаптацию метода динамического индентирования для контроля твердости и модуля упругости полимерных композиционных материалов, изготовленных методами 3D-печати по SLA-технологии, а также оценке влияния режима термообработки (времени выдержки) на их физико-механические характеристики.

2. МЕТОД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В основе метода динамического индентирования лежит непрерывная регистрация мгновенной скорости индентора [7]. Технически это реализовано посредством постоянного магнита, закрепленного на инденторе, и измерительной катушки индуктивности, выступающей в качестве первичного измерительного преобразователя (рис.1а). Скорость свободного падения индентора в таком случае прямо пропорциональна наводимой магнитом ЭДС-индукции в катушке.

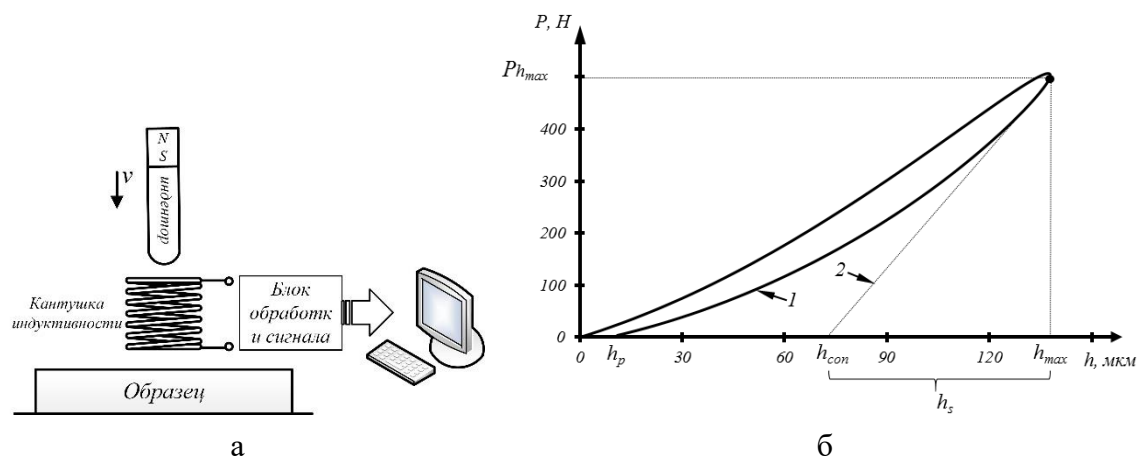


Рис.1. Структурная схема экспериментальной установки (а) и общий вид диаграммы ударного нагружения для отвержденной фотополимерной смолы (б). 1 – кривая разгрузки; 2 – касательная к кривой разгрузки.

Следующим звеном в измерительной цепи является блок обработки информативного сигнала, выполняющий функции фильтрации, усиления и преобразования. Далее работа с данными происходит в персональном компьютере. Интегрирование временной зависимости скорости движения индентора $v(t)$ позволяет получить массив значений мгновенных перемещений индентора $h(t)$, а дифференцирование зависимости $v(t)$ и умножение на массу индентора – значения контактного усилия $P(t)$. Соотнеся временной параметр зависимостей $P(t)$ и $h(t)$ переходим к основной диаграмме ударного нагружения $P(h)$ (рис.1б). Основными параметрами, извлекаемыми из диаграммы $P(h)$, по которым непосредственно ведется расчет физико-механических характеристик материала, являются: максимальная глубина

внедрения индентора h_{\max} , величина контактного усилия при максимальном внедрении $P_{h_{\max}}$, упругий прогиб контура отпечатка h_s , глубина пластического отпечатка h_p и контактная глубина внедрения h_{con} . Графически контактная глубина внедрения h_{con} интерпретируется как точка пересечения касательной, проведенной в точке $(h_{\max}; P_{h_{\max}})$ к кривой разгрузки на диаграмме $P(h)$, с осью абсцисс (рис.1).

Для расчета основных физико-механических характеристик (твердости H_D и модуля упругости E_D) при использовании сферического индентора радиусом R_i можно воспользоваться выражениями (1) и (2), которые были получены ранее [12] и успешно апробированы в том числе на угленаполненных полимерных материалах [13]

$$H_D = \frac{P_{h_{\max}}}{\pi R_i (h_{\max} + h_p)}, \quad (1)$$

$$E_D = \frac{3P_{h_{\max}}}{4\sqrt{R_i} (h_{\max} - h_p)^{3/2}}. \quad (2)$$

В рамках исследования ввиду отсутствия данных о коэффициенте Пуассона исследуемого материала под E_D будем понимать приведенный модуль упругости системы индентор-материал, который отличается от динамического модуля упругости исследуемого материала только на величину постоянного масштабного коэффициента [14,15].

3. ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовление и доотверждение образцов для проведения исследования проводилось в Белорусском государственном технологическом университете (г. Минск). Печать образцов осуществлялась на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США) с использованием фотополимерной смолы Formlabs Standard White V04. В таблице 1 приведены основные физико-механические характеристики используемого полимерного материала, заявленные производителем.

Таблица 1.

Физико-механические характеристики стандартных смол Formlabs, заявленные производителем.

Наименование характеристики	До термообработки (без УФ-излучения)	После термообработки (с УФ-излучением)
Предел прочности на растяжение, МПа	38	65
Модуль упругости при растяжении, ГПа	1,6	2,8
Удлинение на разрыв, %	12	6,2
Модуль упругости при изгибе, ГПа	1,25	2,2
Ударная вязкость по Изоду, Дж/см ²	16	25

Геометрические параметры образцов соответствовали указанным в ГОСТ 11262 для образца 1-го типа. Размещение образцов на столе принтера и расположение материала поддержки приведено на рис.2. При печати были заданы следующие технологические параметры: толщина слоя – 0,1 мм; температура смолы – 31°C; мощность лазера – 250 кВт; размер пятна лазера – 140 мкм. Доотверждение материала образцов проводилось в сушильной камере Form Cure (Formlabs Inc., США) под действием УФ-излучения мощностью 39 Вт и температуры 60°C (рис.3). Данный температурный режим постотверждения рекомендован производителем используемой фотополимерной смолы как оптимальный. Время выдержки образцов при термообработке составляло 30, 45 и 60 минут.

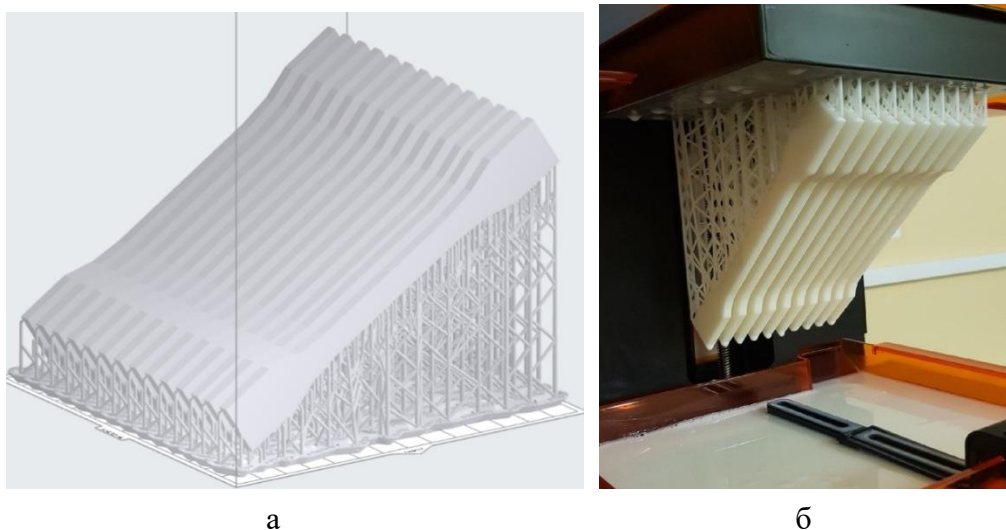


Рис.2. Компьютерная 3D-модель образцов (а) и напечатанные готовые изделия (б).



Рис.3. Образцы, прошедшие процедуру доотверждения материала в сушильной камере.

Для исследования методом динамического индентирования было подготовлено 20 образцов: по 5 образцов для каждого времени выдержки и 5 образцов, не подвергавшихся термообработке и доотверждению УФ-излучением. Все образцы предварительно были испытаны на растяжение на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной

скоростью нагружения 10 мм/мин при температуре воздуха $20\pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $70\pm 5\%$. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Результаты стандартных испытаний образцов на растяжение.

№ образца	Без термо- обработки		Время термообработки					
			30 мин.		45 мин.		60 мин.	
	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа	E_S , ГПа	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа	E_S , ГПа	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа	E_S , ГПа	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа	E_S , ГПа
1	37,15	1,19	45,79	1,90	50,84	1,77	46,23	1,94
2	38,19	1,22	48,76	1,86	50,41	1,86	51,39	1,99
3	35,62	1,19	48,93	1,90	49,26	1,78	48,17	2,02
4	36,44	1,18	47,85	1,91	47,76	1,58	50,68	1,89
5	36,82	1,19	47,80	1,87	45,84	1,77	54,81	1,95
Среднее	36,84	1,19	47,83	1,89	48,82	1,75	50,26	1,96
Коэфф. вариации,%	2,30	1,06	3,02	0,99	3,76	5,27	5,82	2,15

Из представленных данных видно, что изменение прочностных и упругих свойств исследуемых образцов прямо пропорционально времени выдержки. Наибольшее увеличение предела прочности при растяжении $\sigma_{\text{рм}}$ и модуля упругости E_S зарегистрировано на образцах, выдержанных при 60°C в течение 60 минут: предел прочности увеличился в среднем до 50,26 МПа, а модуль упругости до 1,96, что в процентном соотношении составляет 36,42% и 64,71% соответственно.

Дальнейшие исследования были направлены на установление возможности контроля физико-механических характеристик исследуемых материалов методом динамического индентирования и оценке чувствительности метода к изменению свойств отвержденной фотополимерной смолы, вызванных различным временем выдержки при термообработке.

Индентирование образцов осуществлялось индентором сферической формы диаметром 5 мм, массой 6,8 г с предударной скоростью 3,0 м/с. Данные параметры нагружения способны создать необходимый уровень деформации материала и обеспечить достаточную площадь контакта индентора и поверхности контролируемого образца для получения устойчивого информативного сигнала, несущего в себе объективные данные о твердости и модуле упругости контролируемого полимера.

Результаты индентирования представлены в виде градуировочных зависимостей $\sigma(H_D)$ и $E_S(E_D)$ на рис.4. Максимальная величина размаха результатов индентирования не превышала 4% от среднего значения как для динамического модуля упругости, так и для динамической твердости.

Как видно из представленных графиков значения модуля упругости E_D , измеренные методом динамического индентирования, в несколько раз превышают значения, полученные в ходе стандартных разрушающих испытаний (E_S), что объясняется вязкоупругой деформацией материала, возникающей вследствие ударного приложения нагрузки. Отметим, что приведенная формула (2)

не учитывает вязкоупругий характер деформации, однако с достаточной для практики точностью может использоваться в инженерных расчетах.

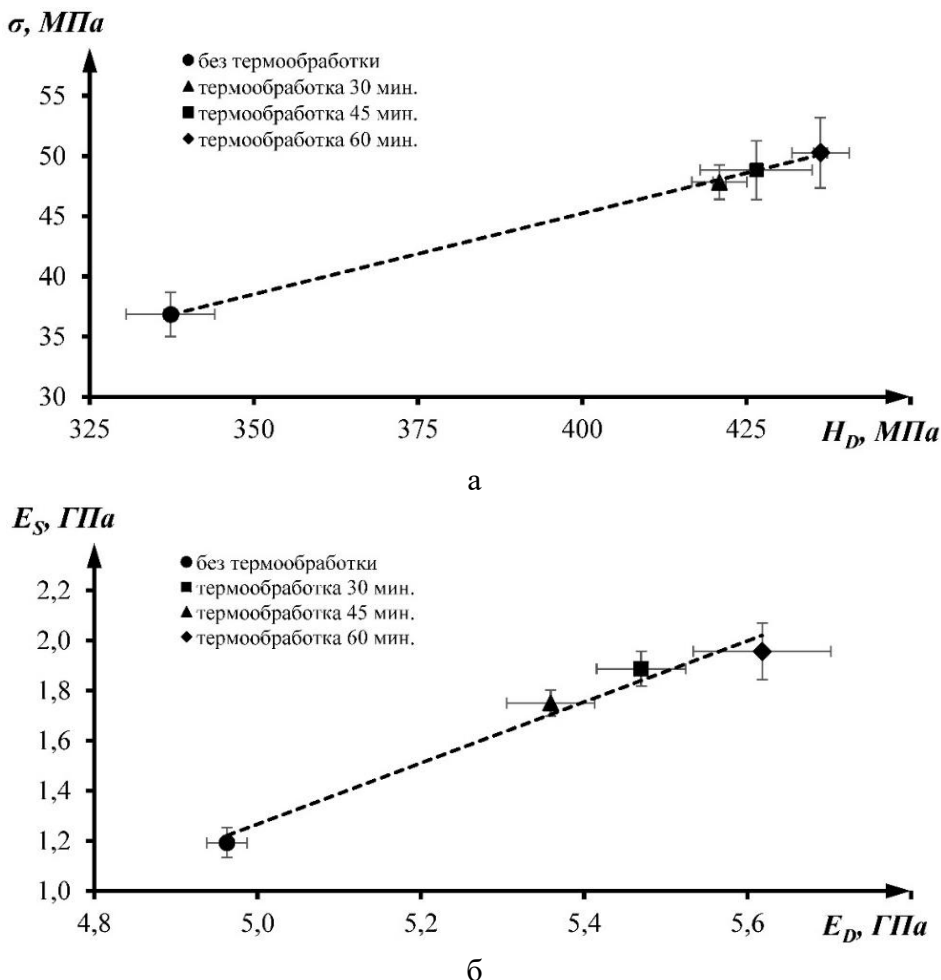


Рис.4. Корреляционные зависимости между результатами стандартных испытаний образцов, прошедших термообработку с различным временем выдержки при температуре 60°С, и значениями их физико-механических характеристик, полученными методом динамического индентирования. а – зависимость для σ , б – зависимость для E_S .

Представленная зависимость предела прочности при разрушении от измеряемой динамической твердости может быть описана следующим линейным уравнением с коэффициентом корреляции 0,99

$$\sigma = 0,13H_D - 8,49. \tag{3}$$

При этом погрешность измерения предела прочности методом динамического индентирования в диапазоне 36,8-50,3 МПа не превышает 4%.

Градуировочная зависимость для модуля упругости также имеет линейный характер и описывается уравнением (4) с коэффициентом корреляции 0,97

$$E_S = 1,22E_D - 4,83. \tag{4}$$

Погрешность измерения модуля упругости в диапазоне 1,193-1,957 ГПа с использованием приведенной зависимости (уравнение (4)) составляет порядка 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что отжиг (под воздействием ультрафиолетового излучения) изделий из отвержденных фотополимерных смол, полученных по SLA-технологии, при температуре 60°C приводит к увеличению упругих и прочностных характеристик материала. Причем наибольшее изменение характеристик зарегистрировано при времени выдержки 60 минут: предел прочности σ увеличился на 36% и модуль упругости E_s – на 64%.

В результате индентирования образцов, подвергшихся термообработке с различным временем выдержки, было установлено, что между пределом прочности и модулем упругости, измеренными в ходе стандартных испытаний на растяжение, существует корреляционная связь с динамической твердостью и модулем упругости, рассчитанными по основным параметрам диаграмм ударного нагружения образцов сферическим индентором (диаметром 5 мм, массой 6,8 г и предударной скоростью 3 м/с). Показано, что полученные градуировочные зависимости в диапазоне изменения предела прочности σ 36,8-50,3 МПа и модуля упругости E_s 1,193-1,957 ГПа имеют линейный характер и позволяют измерить σ методом динамического индентирования с погрешностью не более 4%, а модуль упругости – 3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валетов В.А. *Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие.* – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. *Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров.* – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
3. Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др. *Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин».* – 2012. – №2(20). – С.48-50.
4. Машков Ю.К., Байбарацкая М.Ю., Григорьевский Б.В. *Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: учеб. пособие.* – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 51 с.
5. Привалко В.П. *Молекулярное строение и свойства полимеров.* – Л.: Химия, 1979. – 312 с.
6. Чуваев И.А., Габельченко Н.И. *Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс // Международный научно-исследовательский журнал.* – 2019. – №6(84) – С.70-75.
7. Рудницкий В.А., Крень А.П. *Испытание эластомерных материалов методами индентирования.* – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.
8. Кашапова И.А., Федоров А.В., Егоров Р.А. *Обоснование применимости метода динамического индентирования для контроля твердости материалов покрытий элементов жидкостных ракетных двигателей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2020. – №5. – С.144-152.
9. Егоров Р.А., Ильинский А.В., Кузьмичев М.В., Федоров А.В. *Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования // Дефектоскопия.* – 2020. – №6. – С.61-69.

10. Xiaosheng L., Feng J., Ningchang W. et al. *The mechanical response characteristics of sapphire under dynamic and quasi-static indentation loading* // *Ceramics International*. – 2018. – Vol.44. – Iss.13. – Pp.15208-15218.
11. Tolmacheva Lyapunova E., Zaytsev D., Panfilov P. et al. *Regularities of fracture pattern formation in alumina ceramics subjected to dynamic indentation* // *Frattura ed integrita strutturale*. – 2017. – Vol.11. – No.41. – Pp.552-561.
12. Kren A.P., Pratasenia T.A. *Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolitic graphite by dynamic indentation method* // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2014. – Vol.50. – Iss.7. – Pp.419-425.
13. Kren A.P., Pratasenia T.A., Arnautov A.K., Rudnitskii V.A. *Complex of devices for determining the physical and mechanical properties of the carbon materials used in the rocket and space technology by the impact indentation method* // *Mechanics of Composite Materials*. – 2015. – Vol.51. – No.2. – Pp.323-328.
14. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. *Surface energy and the contact of elastic solids* // *Proc. R. Soc. Lond. A*. – 1971. – Vol.324. – Iss.1558. – Pp.301-313.
15. Johnson K.L. *The correlation of indentation experiments* // *J. Mech. Phys. Solids*. – 1970. – No.18. – Pp.147-159.

REFERENCES

1. Valetov V.A. *Additivnye tekhnologii (sostoyanie i perspektivy): uchebnoe posobie [Additive technologies (state and prospects)]*. Sankt-Peterburg, Universitet ITMO, 2015, 63 p.
2. Zlenko M.A., Nagaicev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov [Additive technology in mechanical engineering]*. Moskva, GNC RF FGUP “NAMI”, 2015, 220 p.
3. Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadrotysev I.A. et al. *Ehksperimental’noe additivnoe pryamoe proizvodstvo s pomoshh’yu lazera [Experimental additive direct production using a laser]*. Vestnik MGTU “Stankin”, 2012, No.2(20), Pp.48-50.
4. Mashkov Yu.K., Baybaratskaya M.Yu., Grigorevskiy B.V. *Konstruksionnye plastmassy i polimernye kompozitsionnye materialy: uchebnoe posobie [Structural plastics and polymer composite materials: textbook. allowance]*. Omsk, Izdatel’stvo OmGTU, 2002, 51 p.
5. Privalko V.P. *Molekulyarnoe stroenie i svoystva polimerov [Molecular structure and properties of polymers]*. Leningrad, Khimiya, 1979, 312 p.
6. Chuvayev I.A., Gabel’chenko N.I. *Termicheskaya obrabotka 3D pechatnykh izdelij iz plastmass [Heat treatment of 3D printed plastic products]*. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel’skiy zhurnal, 2019, No.6(84), Pp.70-75.
7. Rudnitskii V.A., Kren A.P. *Ispytanie ehlastomernykh materialov metodami indentirovaniya [Testing elastomeric materials by indentation methods]*. Minsk, Belorusskaya nauka, 2007, 227 p.
8. Kashapova I.A., Fedorov A.V., Yegorov R.A. *Obosnovanie primenimosti metoda dinamicheskogo indentirovaniya dlya kontrolya tverdosti materialov pokrytij ehlementov zhidkostnykh raketnykh dvigatelej [Justification of the applicability of the dynamic indentation method to control the hardness of coating materials for elements of liquid-propellant rocket engines]*. Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2020, No.5, Pp.144-152.
9. Yegorov R.A., Il’inskiy A.V., Kuz’michev M.V., Fedorov A.V. *Apparatno-algoritmicheskoe obespechenie protsessa dinamicheskogo indentirovaniya*

[Hardware and algorithmic support of the dynamic indentation process]. Defektoskopiya, 2020, No.6, Pp.61-69.

10. Xiaosheng L., Feng J., Ningchang W. et al. *The mechanical response characteristics of sapphire under dynamic and quasi-static indentation loading.* Ceramics International, 2018, Vol.44, Iss.13, Pp.15208-15218.
11. Tolmacheva Lyapunova E., Zaytsev D., Panfilov P. et al. *Regularities of fracture pattern formation in alumina ceramics subjected to dynamic indentation.* Frattura ed integrita strutturale, 2017, Vol.11, No.41, Pp.552-561.
12. Kren A.P., Pratasenia T.A. *Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method.* Russian J. of Nondestructive Testing, 2014, Vol.50, Iss.7, Pp.419-425.
13. Kren A.P., Pratasenia T.A., Arnautov A.K., Rudnitskii V.A. *Complex of devices for determining the physical and mechanical properties of the carbon materials used in the rocket and space technology by the impact indentation method.* Mechanics of Composite Materials, 2015, Vol.51, No.2, Pp.323-328.
14. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. *Surface energy and the contact of elastic solids.* Proc. R. Soc. Lond. A, 1971, Vol.324, Iss.1558, Pp.301-313.
15. Johnson K.L. *The correlation of indentation experiments.* J. Mech. Phys. Solids, 1970, No.18, Pp.147-159.

Поступила в редакцию 23 августа 2021 года.

Сведения об авторах:

Протасеня Татьяна Анатольевна – к.т.н., с.н.с., Лаборатория контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь; e-mail: 5657397@gmail.com

Крень Александр Петрович – д.т.н., зав.лаб., Лаборатория контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси г. Минск, Республика Беларусь; e-mail: 7623300@gmail.com

Дьякова Галина Николаевна – асс., Кафедра механики и конструирования, Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь; e-mail: kravhchn@gmail.com