

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 620.179.18

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-17-26>

Поступила в редакцию 05.11.2021

Received 05.11.2021

**Т. А. Протасеня, А. П. Крень, О. В. Мацулевич***Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ОТВЕРЖДАЕМОГО СЛОЯ ФОТОПОЛИМЕРНОЙ СМОЛЫ ПРИ SLA-ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ НА УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Аннотация.** Рассмотрена возможность контроля методом динамического индентирования упругих и прочностных свойств полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза по SLA-технологии. Выполнена оценка чувствительности метода к изменению твердости, предела прочности и модуля упругости изделий, выращенных по различным режимам печати с толщиной отверждаемого слоя фотополлимерной смолы в 100, 50 и 25 мкм. Проведено сравнение двух основных методик расчета физико-механических характеристик материала по данным диаграммы его ударного нагружения: адаптированной классической методики механики контактного взаимодействия, рассматривающей геометрические параметры деформированной области материала, и методики на основе энергетических характеристик ударного взаимодействия. Установлено, что наибольшая чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств аддитивного полимера в зависимости от толщины его отверждаемого слоя обеспечивается при использовании энергетической расчетной модели оценки свойств материала. Полученные результаты – основа методик неразрушающего контроля полимерных изделий аддитивного производства методом динамического индентирования. Реализация данных методик в портативной измерительной технике является альтернативой стандартным разрушающим испытаниям и позволит получить достоверные данные о свойствах контролируемого материала без необходимости изготовления специальных образцов-свидетелей.

**Ключевые слова:** твердость, модуль упругости, прочность, SLA-технология, индентирование

**Для цитирования:** Протасеня, Т. А. Влияние толщины отверждаемого слоя фотополлимерной смолы при SLA-технологии печати на упругие и прочностные характеристики полимерных изделий аддитивного производства / Т. А. Протасеня, А. П. Крень, О. В. Мацулевич // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 17–26. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-17-26>

**Tatsiana A. Pratasenia, Alexander P. Kren, Oleg V. Matsulevich***Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE CURED LAYER OF PHOTOPOLYMER RESIN DURING SLA-PRINTING TECHNOLOGY ON THE ELASTIC AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMERIC PRODUCTS OF ADDITIVE PRODUCTION**

**Abstract.** The possibility of using dynamic indentation method for measurement the elastic and strength properties of polymer products obtained by additive synthesis using the SLA-technology is considered. The sensitivity of the method to changes in hardness, tensile strength, and elastic modulus of products obtained by different printing modes with a thickness of the cured layer of photopolymer resin of 100, 50, and 25 microns has been estimated. A comparison is made of two main methods for calculating the physical and mechanical characteristics of a material according to the data of its impact loading diagram: an adapted classical method of mechanics of contact interaction, considering the geometric parameters of the deformed region of the material, and a method based on the energy characteristics of shock interaction. It was found that the highest sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the properties of the additive polymer, depending on the thickness of its hardened layer, is provided when using an energy computational model for evaluating the properties of the material. The results obtained are the basis for the methods of non-destructive testing of polymer products of additive manufacturing by the method of dynamic indentation. The implementation of these techniques in portable measuring equipment is an alternative to standard destructive tests and will allow obtaining reliable data on the properties of the controlled material without the need to manufacture special witness samples.

**Keywords:** hardness, elastic modulus, strength, SLA-technology, indentation

**For citation:** Pratasenia T. A., Kren A. P., Matsulevich O. V. Influence of the thickness of the cured layer of photopolymer resin during SLA-printing technology on the elastic and strength characteristics of polymeric products of additive production. *Vesti Natsyuanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 17–26 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-17-26>

**Введение и постановка задачи исследования.** Развитие современных технологий привело к появлению полимерных материалов, которые обладают исключительными эксплуатационными качествами: высокой пластичностью и прочностью при относительно малой объемной массе, способностью к упругому восстановлению деформации, химической стойкостью к воде, органическим растворителям, растворам солей и легкостью в обработке. Кроме того, для повышения эксплуатационных свойств, как правило, в состав полимеров вводят дополнительные компоненты (процесс армирования), тем самым адаптируя материал под конкретные задачи производства. В настоящее время получение готовых изделий из полимерных материалов общепринятыми методами: штамповки, прессования, литья, формования, – отходит на второй план, а лидирующие позиции занимают аддитивные технологии, в частности лазерная стереолитография (SLA-технология). В процессе SLA-печати фотополимерная смола послойно отверждается под действием лазера, однако такого воздействия недостаточно для полной полимеризации материала, и следующий цикл воздействия лазерного луча направлен не только на отверждение очередного слоя полимера, но и способствует межслоевому сплавлению и доотверждению предыдущего. Фактически модификация структуры материала продолжается и после завершения процесса печати. Благодаря этому в отличие от деталей, изготовленных экструзионными методами печати, полимерные изделия, полученные лазерной стереолитографией, имеют изотропные свойства [1, 2].

Вследствие аддитивной природы SLA-технологии толщина отверждаемого слоя определяет разрешение печати (то есть способность создавать изделия с высокой точностью). Как правило, чем меньше толщина слоя, тем выше разрешение печати и качество готового изделия. Однако с уменьшением толщины слоя растут время печати и количество необходимых слоев для выращивания изделия, что увеличивает вероятность возникновения искажений и ошибок [3]. В некоторых случаях печать изделий с более низким разрешением (с большей толщиной слоя) может способствовать улучшению их качества. В идеальном случае выбор толщины слоя печати должен осуществляться исходя из анализа формы и геометрии модели, а также оценки возможности повышения качества изделия за счет селективного увеличения или уменьшения слоя печати в каждом конкретном случае. Современный уровень развития аддитивных технологий позволяет в некоторых 3D-принтерах использовать функцию адаптивной толщины слоя, но пока она находится на стадии тестирования и не может полноценно использоваться при серийном производстве изделий.

Следует также отметить, что наиболее распространенной проблемой, связанной с точностью изготовления продукции аддитивного синтеза по SLA-технологии, является так называемое скручивание. По сути скручивание – это деформация, вызванная усадкой фотополимерной смолы в процессе отверждения под действием УФ-излучения лазера. В случае, если усадка слоя значительна, между текущим слоем и предыдущим возникают внутренние напряжения. Это приводит к деформации изделия и изменению физико-механических характеристик материала, что и определяет необходимость их контроля на протяжении всех жизненных циклов изделия: производства, эксплуатации, технического обслуживания и хранения (вплоть до утилизации).

Единственными методами, применяемыми сейчас для численной оценки физико-механических характеристик изделий аддитивного производства, являются стандартные разрушающие испытания [4]. Наряду с тем, как нет стандартизованных требований к производству продукции методами аддитивного синтеза, не разработаны и стандарты на проведение контроля таких изделий. В отечественной практике, как правило, используются стандарты, регламентирующие испытания пластмасс (ГОСТ 11 262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»; ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010) «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб»; ГОСТ 4647-2015 (ISO 179-1: 2010) «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи» и т. д.). Но поскольку свойства образцов-свидетелей могут отличаться от свойств готового изделия (ввиду своей геометрии, масштабного фактора и т.д.), то объективность полученной с их помощью оценки свойств аддитивного материала ставится под сомнение, даже если опустить временные и материальные затраты на испытания. В то же время надежных методов неразрушающего контроля, которые могли бы с достаточной степенью достоверности дать

численную оценку физико-механическим характеристикам, пока не существует. В различных публикациях отмечается, что частично задача контроля может быть решена с помощью ультразвукового метода [5]. Однако ультразвуковой контроль может дать лишь оценку скорости прохождения различных волн в объекте, по которой можно определить модуль упругости, наличие пористости и других дефектов. При этом, используя данный вид контроля, невозможно оценить такие характеристики, как твердость и предел прочности.

По этой причине актуальной задачей контроля качества изделий, изготовленных по SLA-технологии, является развитие методов неразрушающего контроля, способных оперативно дать численную оценку их физико-механических характеристик и определить оптимальную величину отверждаемого слоя печати, обеспечивающего требуемые упругие и прочностные характеристики при минимальных временных затратах на изготовление.

Наиболее часто применяемым методом неразрушающего измерения физико-механических характеристик материалов является метод индентирования. Описание использования индентирования для контроля изделий, полученных методами аддитивного синтеза, можно найти в ряде публикаций ученых ведущих мировых центров, при этом лишь малая часть посвящена контролю именно полимерных материалов [6–8]. Однако в своем классическом представлении – статического нагружения – метод индентирования не предназначен для проведения оперативного контроля, поскольку требует создания замкнутой силовой системы нагружения. В условиях производства для этих целей более пригоден метод динамического индентирования, позволяющий проводить контроль реальных изделий (а не подготовленных образцов) и своевременно выявлять отклонения их характеристик от номинальных значений уже на стадии изготовления.

Ранее нами были проведены исследования, направленные на адаптацию метода динамического индентирования для контроля ряда конструкционных материалов (углезаполненных полимеров, углерод-углеродных композитов и т.д.). Научные работы по данной теме посвящены в том числе вопросам моделирования процесса упругопластического деформирования и содержат аналитические уравнения связи параметров диаграммы ударного нагружения с основными физико-механическими характеристиками материалов (твердостью, пределом прочности, модулем упругости и т.д.) [9, 10]. Описанные в [9, 10] расчетные модели (уравнения (1) и (2)) получены нами на основе классических моделей механики контактного деформирования, разработанных С. И. Булычевым и В. П. Алехиным, при рассмотрении геометрических параметров деформированной области материала (упругого прогиба контура отпечатка  $h_s$ , контактной глубины внедрения  $h_c$ , глубины пластического отпечатка  $h_p$  и т.д.) [11, 12]. Так, согласно данным моделям, динамическая твердость  $H_{IT}$  и приведенный динамический модуль упругости контролируемого материала  $E_{IT}^*$  могут быть рассчитаны по формулам:

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

$$E_{IT}^* = \frac{3P_{h_{\max}}}{4\sqrt{R_i} (h_{\max} - h_p)^{3/2}}, \quad (2)$$

где  $R_i$  – радиус индентора, м;  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения индентора, м;  $P_{h_{\max}}$  – контактное усилие при максимальной глубине внедрения, Н;  $h_p$  – глубина пластического отпечатка, м.

В настоящей же работе предлагается использовать связь физико-механических характеристик контролируемого материала с энергетическими характеристиками ударного взаимодействия: энергией пластической и упругой деформации. Сравнение этих двух подходов расчета основных физико-механических характеристик исследуемых материалов позволит выявить наиболее точную и информативную методику определения твердости и модуля упругости материалов полимерных изделий и оценить чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств аддитивного материала в зависимости от толщины его отверждаемого слоя.

**Методика расчета физико-механических характеристик на основе энергетических параметров ударного нагружения.** Согласно закону сохранения энергии, величина кинетической энергии при ударе  $W_0$  равна работе деформирования за время активного этапа удара:

$$W_0 = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \int_0^{h_{\max}} P(h) dh, \quad (3)$$

где  $v_{\max}$  – предупредная скорость индентора, м/с;  $m$  – масса индентора, кг (рис. 1).

Энергия упругого деформирования  $W_e$  равна кинетической энергии отскока индентора (см. рис. 1):

$$W_e = \frac{mv_{\min}^2}{2} = \frac{m}{2} (v_{\max}^2 e^2), \quad (4)$$

где  $v_{\min}$  – скорость отскока индентора, м/с;  $e$  – коэффициент восстановления скорости, равный отношению  $v_{\min}/v_{\max}$ .

Работа восстановления упругих деформаций в процессе разгрузки равна работе упругого вдавливания индентора с радиусом сферического наконечника  $R_i$  в вогнутую сферическую лунку в испытуемом материале, имеющую радиус  $R_m = d_c^2 / 8h_p$  (см. рис. 1) до момента достижения максимальной упругой глубины вдавливания  $h_e$ .

Работа восстановления упругих деформаций в процессе разгрузки для сферического индентора описывается уравнением

$$W_e = \int_{h_p}^{h_{\max}} P dh = \int_0^{h_e} \frac{4}{3} \sqrt{R_0} E_{ITW}^* h^{3/2} dh = \frac{8}{15} \sqrt{R_0} E_{ITW}^* h_e^{5/2}, \quad (5)$$

где  $h_e$  – упругая глубина вдавливания, равная разности максимальной глубины внедрения индентора  $h_{\max}$  и глубины невозстановленного отпечатка  $h_p$ , м;  $R_0$  – приведенный радиус контактирующих поверхностей, м.

Приведенный радиус контактирующих поверхностей рассчитывается согласно уравнению

$$R_0 = \frac{R_i R_m}{R_i + R_m}. \quad (6)$$

Приняв во внимание уравнение Герца [13] в виде  $P_{h_{\max}} = \frac{4}{3} \sqrt{R_0} E_{ITW}^* h^{3/2}$ , энергию упругого деформирования можно представить следующим образом:

$$W_e = \frac{3}{10} \frac{P_{h_{\max}}^2}{\sqrt{R_0} E_{ITW}^* \sqrt{h_e}}. \quad (7)$$

Контактный диаметр  $d_c$  (см. рис. 1) при упругом вдавливании рассчитывается, согласно [14], по формуле

$$d_c = 2\sqrt{h_e R_0}. \quad (8)$$

Значение  $E_{ITW}^*$  получим на основании совместного решения (7) и (8):

$$E_{ITW}^* = \frac{6}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{mv_{\max}^2 e^2 d_c}, \quad (9)$$

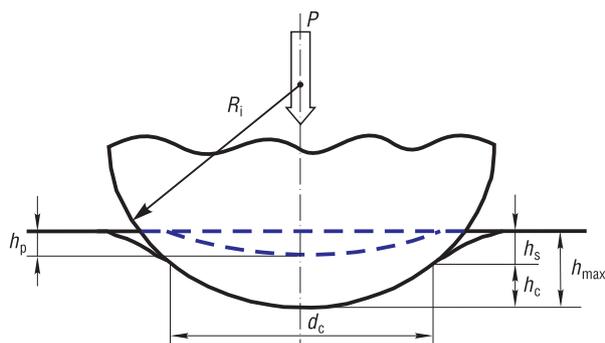


Рис. 1. Схематичное представление поперечного сечения отпечатка при деформировании материала сферическим индентором

Fig. 1. Schematic representation of the cross-section of the indentation when the material is deformed by a spherical indenter

либо иначе через параметр глубины при упругопластическом вдавлении:

$$E_{ITW}^* = \frac{3\sqrt{2}}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{mv_{\min}^2 \sqrt{2R_1(h_{\max} + h_p)}}. \quad (10)$$

Твердость  $H_{ITW}$  является мерой сопротивления материала вдавлению индентора и в частном случае может быть определена соотношением

$$H_{ITW} = \frac{W_p}{V_p}, \quad (11)$$

где  $W_p$  – энергия пластической деформации материала, Дж;  $V_p$  – объем пластического отпечатка, м<sup>3</sup>.

Энергия пластической деформации вычисляется как разность между полной кинетической энергией удара  $W_0$  и энергией упругого деформирования  $W_e$ :

$$W_p = W_0 - W_e = \frac{m(v_{\max}^2 - v_{\min}^2)}{2}. \quad (12)$$

В свою очередь объем пластического отпечатка с достаточной для практических целей точностью рассчитывается по формуле

$$V_p = \pi h_p h_c R_1. \quad (13)$$

Принимая во внимание, что контактная глубина внедрения индентора  $h_c = \frac{1}{2}(h_{\max} + h_p)$ , уравнение для расчета твердости примет вид

$$H_{ITW} = \frac{m(v_{\max}^2 - v_{\min}^2)}{\pi R_1 h_p (h_{\max} + h_p)}. \quad (14)$$

**Макет измерительного оборудования и экспериментальные исследования.** Для проведения экспериментальных исследований нами был разработан макет установки для регистрации процесса ударного нагружения полимерных изделий аддитивного производства и обработки первичной измерительной информации (рис. 2).

В качестве первичного измерительного преобразователя установки выступает катушка индуктивности, закрепленная на стеклянной трубке, которая служит вертикальной направляющей при движении в ней индентора с запрессованным постоянным магнитом. Испытательный удар осуществляется за счет свободного падения индентора под действием силы тяжести. Во время движения магнит наводит в катушке индуктивности электродвижущую силу индукции, пропорциональную скорости перемещения индентора. Зависимость изменения скорости индентора от времени выступает основным информативным сигналом любой установки ударного индентирования. Преимуществом метода динамического индентирования является возможность непрерывной регистрации процесса внедрения индентора в материал, что позволяет регистрировать

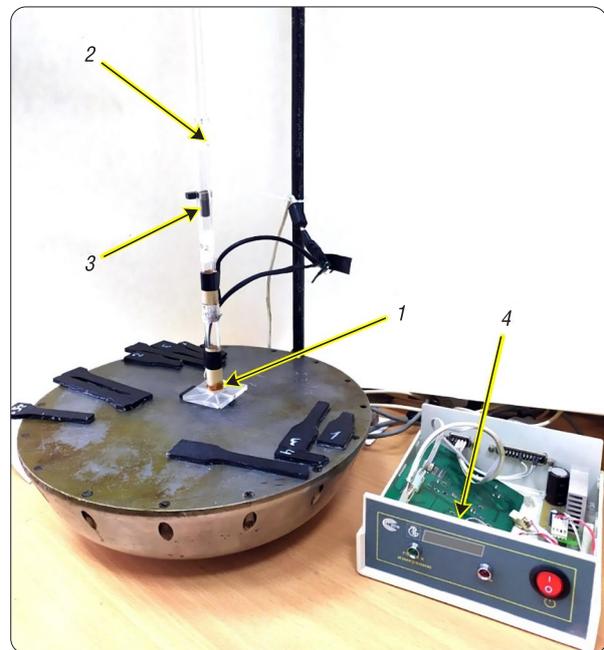


Рис. 2. Внешний вид макета установки для регистрации процесса ударного нагружения: 1 – катушка индуктивности, 2 – стеклянная направляющая, 3 – индентор с запрессованным магнитом, 4 – электронный блок обработки

Fig. 2. Appearance of the layout of the installation for registering the process of impact loading: 1 – inductor coil, 2 – glass rail, 3 – indenter with a pressed-in magnet, 4 – electronic processing unit

максимальное количество информативных параметров, характеризующих упругие и прочностные свойства контролируемых материалов и изделий. Дальнейшая обработка информативного сигнала (фильтрация, аналого-цифровое преобразование и т.д.) осуществляется в электронном блоке и персональном компьютере со специализированным программным обеспечением.

Для проведения исследования влияния толщины отверждаемого слоя при SLA-технологии аддитивного производства на физико-механические характеристики полимерных изделий были изготовлены образцы – лопатки типа A1 (согласно ГОСТ 11 262-2017) из фотополимерной смолы Formlabs Black V4 (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид образцов из фотополимерной смолы Formlabs Black V4, изготовленных по SLA-технологии для проведения исследований

Fig. 3. Appearance of samples from Formlabs Black V4 photopolymer resin made using SLA-technology for research

Печать образцов осуществлялась в Белорусском государственном технологическом университете (Минск, Беларусь) на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США) при температуре смолы 31 °С, мощности лазера 250 мВт с пятном 140 мкм. Доотверждение материала образцов проводилось в сушильной камере Form Cure (Formlabs Inc., США) при температуре 60 °С под действием УФ-излучения мощностью 39 Вт. Для исследования было изготовлено три вида образцов с различной толщиной отверждаемого слоя при печати: 100, 50 и 25 мкм (по пять образцов каждого вида). Все образцы были предварительно испытаны на растяжение (ГОСТ 11 262-2017). Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Результаты стандартных испытаний образцов на растяжение

T a b l e 1. Results of standard tensile tests

Номер образца	Модуль упругости $E_p$ , ГПа			Предел прочности $\sigma_p$ , МПа		
	100 мкм	50 мкм	25 мкм	100 мкм	50 мкм	25 мкм
1	2,03	2,26	1,84	54,66	57,66	62,85
2	1,83	2,35	2,11	57,46	63,95	61,48
3	2,10	2,85	2,15	49,17	64,93	55,94
4	2,23	2,30	2,19	59,34	60,67	56,21
5	2,04	2,02	2,18	56,21	57,49	63,23
Среднее значение	2,05	2,37	2,09	55,37	60,94	59,94
Коэффициент вариации	6,31 %	5,16 %	6,17 %	6,24 %	5,06 %	5,35 %

Из представленных данных видно, что оптимальная толщина отверждаемого слоя при указанных геометрических параметрах выращиваемого изделия составляет 50 мкм. При заданных параметрах SLA-печати модуль упругости увеличивается в среднем на 10 %, а предел прочности – примерно на 9 %.

Инденитрование образцов осуществлялось с предупредной скоростью 3,0 м/с твердосплавным индентором (из карбида вольфрама) массой 6,8 г с радиусом сферического наконечника 2,5 мм. Выбор параметров инденитрования обусловлен необходимостью получения стабильного информативного сигнала и обеспечения достаточного объема пластического отпечатка ( $h_{max}$  при заданных параметрах нагружения составляла порядка 140 мкм) для интегральной оценки свойств аддитивного полимерного материала. Результаты инденитрования представлены в табл. 2 и 3.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения динамической твердости

T a b l e 2. Dynamic hardness measurement results

Номер образца	Динамическая твердость $H_{IT}$ , МПа			Динамическая твердость $H_{ITW}$ , МПа		
	100 мкм	50 мкм	25 мкм	100 мкм	50 мкм	25 мкм
1	372,20	395,69	386,96	383,22	422,10	411,23
2	369,37	395,02	383,93	374,44	419,23	402,10
3	383,20	410,00	401,83	390,55	424,00	415,20
4	398,82	417,82	408,93	394,49	425,02	417,82
5	379,12	402,10	392,10	384,98	422,82	413,06
Среднее значение	380,54	404,13	394,75	385,54	422,63	411,88
Коэффициент вариации	3 %	2 %	3 %	2 %	1 %	1 %

Т а б л и ц а 3. Результаты измерения динамического модуля упругости

T a b l e 3. The results of measuring the dynamic modulus of elasticity

Номер образца	Динамический модуль упругости $E_{IT}^*$ , ГПа			Динамический модуль упругости $E_{ITW}^*$ , ГПа		
	100 мкм	50 мкм	25 мкм	100 мкм	50 мкм	25 мкм
1	6,82	7,20	6,87	7,04	7,68	7,18
2	6,78	7,00	6,68	7,01	7,59	7,13
3	6,89	7,26	7,01	7,12	7,95	7,21
4	6,89	7,31	7,03	7,14	7,97	7,23
5	6,85	7,23	6,90	7,06	7,92	7,18
Среднее значение	6,85	7,20	6,90	7,07	7,82	7,19
Коэффициент вариации	1 %	2 %	2 %	1 %	2 %	1 %

Анализ данных (см. табл. 2, 3) показал, что метод динамического индентирования на качественном уровне подтверждает результаты стандартных испытаний на растяжение (см. табл. 1). По данным ударного нагружения наибольшими значениями твердости и модуля упругости обладают образцы, изготовленные при заданной толщине отверждаемого слоя в 50 мкм. При этом наибольшее изменение динамической твердости и динамического модуля упругости наблюдается между образцами с толщиной отверждаемого слоя в 100 и 50 мкм. При уменьшении толщины отверждаемого слоя фотополимерной смолы твердость  $H_{IT}$  увеличивается в среднем на 6 %, а модуль упругости  $E_{IT}^*$  – на 5 %. Однако наибольшую чувствительность к изменению свойств исследуемых полимерных изделий метод динамического индентирования показал при использовании энергетического подхода анализа регистрируемых данных нагружения материала. В данном случае изменение динамической твердости  $H_{ITW}$  составило порядка 10 %, а модуля упругости  $E_{ITW}^*$  – 11 %.

Результаты исследования приведены на рис. 4, 5.

Как видно из приведенных графиков, полученные экспериментальные данные оценки модуля упругости, могут быть представлены в виде линейных градуировочных характеристик  $E_p = f(E_{IT}^*)$ , либо  $E_p = f(E_{ITW}^*)$ . При этом в диапазоне изменения модуля упругости 1,83–2,85 ГПа функция  $E_p = f(E_{ITW}^*)$ , отражающая наибольшую чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств исследуемых материалов, может быть представлена следующим уравнением с коэффициентом корреляции 0,99:

$$E_p = 0,43E_{ITW}^* - 1,01, \tag{15}$$

погрешность аппроксимации при этом составляет не более 1 %.

Аналогичным образом функция  $\sigma_p = f(H_{ITW})$  может быть описана полиномиальной зависимостью (16) с коэффициентом корреляции 0,98:

$$\sigma_p = -2,2 \cdot 10^{-3} H_{ITW}^2 + 1,9037 H_{ITW} - 356,07. \tag{16}$$

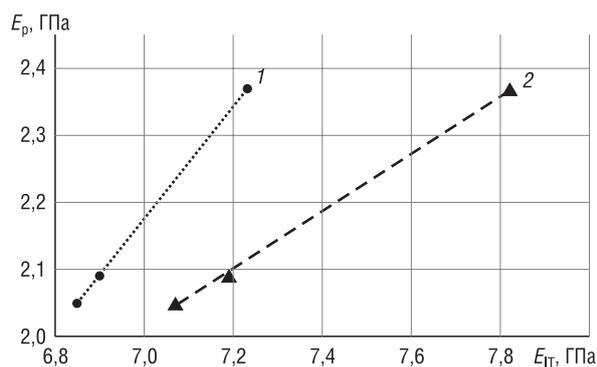


Рис. 4. Градуировочная характеристика, определяющая функциональную связь динамического модуля упругости  $E_{IT}^*$  (график 1) и  $E_{ITW}^*$  (график 2) с модулем упругости  $E_p$ , измеренным в ходе стандартных испытаний

Fig. 4. Calibration characteristic that determines the functional relationship of the dynamic elastic modulus  $E_{IT}^*$  (graph 1) and  $E_{ITW}^*$  (graph 2) with the elastic modulus  $E_p$ , measured during standard tests

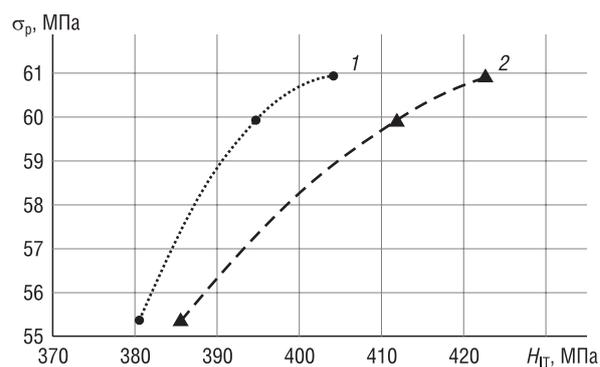


Рис. 5. Градуировочная характеристика, определяющая функциональную связь динамической твердости  $H_{IT}$  (график 1) и  $H_{ITW}$  (график 2) с пределом прочности  $\sigma_p$ , измеренным в ходе стандартных испытаний

Fig. 5. Calibration characteristic that determines the functional relationship of the dynamic hardness  $H_{IT}$  (graph 1) and  $H_{ITW}$  (graph 2) with the ultimate strength  $\sigma_p$ , measured during standard tests

Данная градуировочная кривая (уравнение (16)) позволяет оценить предел прочности полимерных изделий, изготовленных по различным режимам печати SLA-технологии, в диапазоне изменения предела прочности 49,17–64,93 МПа с погрешностью, не превышающей 9 %.

**Заключение.** Проведенные исследования позволили установить, что уменьшение толщины отверждаемого слоя фотополимерной смолы Formlabs Black V4 при 3D-печати стандартных образцов на растяжение (ГОСТ 11262-2017) по SLA-технологии ведет к улучшению физико-механических характеристик выращиваемых полимерных изделий. На основе экспериментальных данных показана достаточная чувствительность метода динамического индентирования к изменению твердости (прочности) и модуля упругости образцов, изготовленных по различным режимам печати, с толщиной слоя 100, 50 и 25 мкм. В результате использования основных методик обработки регистрируемых параметров ударного нагружения (на основе энергетических параметров ударного нагружения и на базе геометрических параметров деформированной области материала) установлено, что оптимальной является энергетическая расчетная модель, позволяющая получить максимально достоверные данные о свойствах исследуемых материалов и обеспечивающая наибольшую чувствительность метода динамического индентирования к изменению характеристик полимерных изделий. Экспериментальные данные ударного нагружения качественно соответствуют результатам стандартных испытаний на растяжение и подтверждают эффективность применения метода динамического индентирования для оперативного контроля твердости и модуля упругости изделий аддитивного синтеза из фотополимерных смол.

Показано, что полученные градуировочные зависимости в диапазоне изменения предела прочности  $\sigma_p = 49,17\text{--}64,93$  МПа и модуля упругости  $E_p = 1,83\text{--}2,85$  ГПа имеют полиномиальный и линейный характер соответственно. Использование данных зависимостей позволяет измерить  $\sigma_p$  методом динамического индентирования с погрешностью не более 9 %, а  $E_p$  – 1 %.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках Национальной программы стипендий для молодых ученых при финансовой поддержке Всемирной федерации ученых по теме «Оценка физико-механических характеристик композиционных (полимерных и углерод-углеродных) материалов методами инструментального индентирования».

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the National Scholarship Program for Young Scientists with the financial support of the World Federation of Scientists on the topic “Evaluation of the physical and mechanical characteristics of composite (polymer and carbon-carbon) materials using instrumental indentation methods”.

## Список использованных источников

1. Ляпков, А. А. Полимерные аддитивные технологии: учеб. пособие / А. А. Ляпков. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2016. – 114 с.
2. Layani, M. Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization / M. Layani, X. Wang, S. Magdassi // *Additive Materials*. – 2018. – Vol. 30, iss. 41. – P. 1706344. <https://doi.org/10.1002/adma.201706344>
3. Vat Photopolymerization of Polymer and Polymer Composites: Processes and Applications / Ans Al Rashid [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2021. – P. 102279. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>
4. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J.R. C. Dizon [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 20. – P. 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
5. Ibrahim, M. E. Ultrasonic inspection of hybrid polymer matrix composites / M. E. Ibrahim // *Compos. Sci. Technol.* – 2021. – Vol. 208, № 3. – P. 108755. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108755>
6. Indentation experiments and simulations of nonuniformly photocrosslinked polymers in 3D printed structures / Z. Zhao [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2020. – Vol. 35. – P. 101420. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101420>
7. Progress in Additive Manufacturing on New Materials / Neng Li [et al.] // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2018. – Vol. 35, iss. 2. – P. 242–269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
8. Li, C.-W. On the microstructure and properties of an advanced cemented carbide system processed by selective laser melting / Chen-Wei Li, Kai-Chun Chang, An-Chou Yeh // *J. Alloys Compd.* – 2019. – Vol. 782. – P. 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.187>
9. 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 / A. P. Kren [et al.] // *Mech. Compos. Mater.* – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 323–328. <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9493-8>
10. Kren, A. P. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method/ A. P. Kren, T. A. Pratasenia // *Russ. J. Nondestr. Test.* – 2014. – Vol. 50, iss. 7. – P. 419–425. <https://doi.org/10.1134/S1061830914070079>
11. Булычев, С. И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С. И. Булычев, В. П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
12. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // *J. Mater. Res.* – 1992. – Vol. 7, № 6. – P. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
13. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
14. Варнелло, В. В. Измерение твердости металлов / В. В. Варнелло. – М.: Изд-во стандартов, 1965. – 210 с.

## References

1. Lyapkov A. A. *Polymer Additive Technologies*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2016. 114 p. (in Russian).
2. Layani M., Wang X., Magdassi S. Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization. *Additive Materials*, 2018, vol. 30, iss. 41, p. 1706344. <https://doi.org/10.1002/adma.201706344>
3. Ans Al Rashid, Waqas Ahmed, Muhammad Yasir Khalid, Muammer Koc. Vat Photopolymerization of Polymer and Polymer Composites: Processes and Applications. *Additive Manufacturing*, 2021, p. 102279. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102279>
4. Dizon J.R. C., Espera A. H., Jr., Chen Q., Advincola R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 20, pp. 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
5. Ibrahim M. E. Ultrasonic inspection of hybrid polymer matrix composites. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 208, no. 3, pp. 108755. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108755>
6. Zhao Z., Wu D., Chen H.-S., Qi H. J., Fang D. Indentation experiments and simulations of nonuniformly photocrosslinked polymers in 3D printed structures. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, pp. 101420. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101420>
7. Li N., Huang S., Zhang G., Qin R., Liu W., Xiong H., Shi G., Blackburn J. Progress in Additive Manufacturing on New Materials. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, vol. 35, iss. 2, pp. 242–269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
8. Li C.-W., Chang K.-C., Yeh A.-C. On the microstructure and properties of an advanced cemented carbide system processed by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 782, pp. 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.187>
9. 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. <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9493-8>
10. Kren A. P., Pratasenia T. A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, iss. 7, pp. 419–425. <https://doi.org/10.1134/S1061830914070079>
11. Bulychev S. I., Alekhin V. P. *Testing of Materials by Continuous Indentation of the Indenter*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 224 p. (in Russian).
12. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
13. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1985. 452 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
14. Varnello V. V. *Measuring the Hardness of Metals*. Moscow, Standards Publ., 1965. 210 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Протасеня Татьяна Анатольевна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-0557-7207>. E-mail: 5657397@gmail.com

*Крень Александр Петрович* – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

*Мацулевич Олег Владимирович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com

### Information about the authors

*Tatsiana A. Pratasenia* – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-0557-7207>. E-mail: 5657397@gmail.com

*Alexander P. Kren* – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

*Oleg V. Matsulevich* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com