

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

## Оптимальные режимы печати и постобработки полимерных изделий, полученных по SLA-технологии аддитивного производства

Т.А. Протасеня, А.П. Крень

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 27.10.2023

Принята к печати 05.12.2023

Появление инновационных производственных технологий, таких как аддитивный синтез, требует одновременного развития методов оценки качества выпускаемой продукции. На начальном этапе внедрения новых способов производства в различные отрасли промышленности, как правило, применяют наиболее изученные и широко используемые на практике методы контроля. В большинстве случаев это стандартные разрушающие испытания. В качестве альтернативы стандартным испытаниям на растяжение, применяемым для оценки упругих и прочностных свойств полимерных изделий, полученных по SLA-технологии, в работе предложен метод динамического индентирования. На примере высокотемпературной фотополимерной смолы *High Temp RS-F2-НТАМ-01* показана возможность оптимизации способов 3D-печати и режимов постобработки на основании данных динамического индентирования. Показано, что наибольшему охрупчиванию подвержены непигментированные фотополимеры из-за своей возможности пропускать УФ-излучение в объём синтезированного материала. Выявлено, что охрупчивание полимерного материала в меньшей мере сказывается на результате измерения его динамической твёрдости, чем предела прочности при растяжении. Установлено, что доотверждение полимерных изделий при высоких температурах (вплоть до 160 °С) и УФ-излучении мощностью 39 Вт позволяет повысить их прочность и модуль упругости на 170 % и 85 % соответственно, по сравнению с состоянием до обработки. Доказано, что чувствительность метода динамического индентирования к изменению физико-механических характеристик изделий, полученных по SLA-технологии при различных видах и режимах их постобработки, сопоставима с чувствительностью стандартных испытаний на растяжение.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, аддитивные технологии, полимерные материалы, физико-механические характеристики, метод динамического индентирования

---

**Адрес для переписки:**

Протасеня Т.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: 5657397@gmail.com

---

**Address for correspondence:**

Pratasenia T.A.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: 5657397@gmail.com

---

**Для цитирования:**

Т.А. Протасеня, А.П. Крень.

Оптимальные режимы печати и постобработки полимерных изделий, полученных по SLA-технологии аддитивного производства.

Приборы и методы измерений.  
2023. Т. 14. № 4. С. 296–307.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

---

**For citation:**

Pratasenia TA, Kren AP.

Optimal Printing and Post-Processing Modes of Polymer Products Manufactured Using SLA-Technology of Additive Manufacturing. *Devices and Methods of Measurements*.

2023;14(4):296–307. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

# Optimal Printing and Post-Processing Modes of Polymer Products Manufactured Using SLA-Technology of Additive Manufacturing

T.A. Pratasenia, A.P. Kren

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 27.10.2023

Accepted for publication 05.12.2023

## Abstract

Innovative production technologies, such as additive synthesis, is inextricably linked with the development of methods for assessing the quality of manufactured products. At the initial stage of introducing of new production methods into various industries, the most studied and widely used control methods are usually used. In most cases these are standard destructive tests. As an alternative to standard tensile tests used to evaluate the elastic and strength properties of polymer products produced using SLA-technology, the dynamic indentation method is studied in this work. Using the samples of the high-temperature photopolymer resin *High Temp RS-F2-HTAM-01*, the possibility of optimizing 3D printing methods and post-processing modes based on dynamic indentation data is shown. It has been shown that non-pigmented photopolymers are most susceptible to embrittlement due to their ability to transmit UV radiation into the volume of the synthesized material. It was found that the embrittlement of a polymer material has a lesser effect on the result of measuring its dynamic hardness than on its tensile strength. It has been established that post-curing of polymer products at high temperatures (up to 160 °C) and UV radiation with a power of 39 W can increase their strength and elastic modulus by 170 % and 85 %, respectively, compared to the state before treatment. It has been proven that the sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the physical and mechanical characteristics of products obtained using SLA-technology under various types and modes of their post-processing is comparable to the sensitivity of standard tensile tests.

**Keywords:** non-destructive testing, additive technologies, polymer materials, physical and mechanical characteristics, dynamic indentation method

---

### Адрес для переписки:

Протасеня Т.А.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: 5657397@gmail.com

### Address for correspondence:

Pratasenia T.A.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: 5657397@gmail.com

---

### Для цитирования:

Т.А. Протасеня, А.П. Крень.  
Оптимальные режимы печати и постобработки полимерных изделий, полученных по SLA-технологии аддитивного производства.  
Приборы и методы измерений.  
2023. Т. 14. № 4. С. 296–307.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

### For citation:

Pratasenia TA, Kren AP.  
Optimal Printing and Post-Processing Modes of Polymer Products Manufactured Using SLA-Technology of Additive Manufacturing.  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2023;14(4):296–307. (In Russ.).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-296-307

## Введение

Стереолитография (SLA-технология) – это процесс аддитивного производства, при котором изделие формируется путём послойного отверждения фотополимерной смолы под действием ультрафиолетового (УФ) излучения. Среди преимуществ данной технологии выделяют возможность построения моделей сложной формы (в том числе тонкостенных) с сохранением при этом достаточно высокой точности [1, 2]. Однако изделия, полученные по SLA-технологии, требуют целого ряда этапов постобработки.

Во время SLA-печати под действием УФ-излучения фотополимерные смолы образуют ковалентные связи, за счёт чего происходит отверждение материала. Воздействие лазера не приводит к завершению процесса полимеризации, хотя и изменяет агрегатное состояние полимера. В состоянии незавершённой полимеризации на поверхности элементарного слоя остаются полимеризуемые группы, впоследствии образующие ковалентные связи со следующим слоем. Таким образом, на молекулярном уровне полученный материал абсолютно изотропен. В то же время множество участков с недостаточно прочными связями, оставшимися по окончании печати, в первую очередь негативно сказываются на физико-механических характеристиках изделий. Как правило, для повышения их упругих и прочностных свойств используется УФ-излучение, под действием которого происходит завершение формирования молекулярных связей. Дополнительное тепловое воздействие в процессе доотверждения приводит к увеличению энергии в полимерной сетке и провоцирует ускоренное движение молекул, что значительно облегчает процесс молекулярной сшивки [3]. Тем не менее УФ-излучение является неотъемлемой составляющей процесса постобработки изделий, а термическое воздействие является лишь дополнительным фактором, ускоряющим процесс окончательной полимеризации.

Полимеры, используемые в стереолитографии (реактопласты), после циклов доотверждения являются более хрупкими, чем термопласты, применяемые в FDM- или SLS-печати [4]. Поэтому их, как правило, не используют для деталей, которые будут подвергаться

значительной нагрузке. Повышенная хрупкость готового изделия может быть связана не только с техническими характеристиками принтера, временем экспозиции при печати и неправильным режимом постобработки (чрезмерным воздействием УФ-излучения и температуры), но и расположением детали в процессе печати.

Как правило, 3D-модель ориентируют таким образом, чтобы максимально заполнить рабочую область принтера, а вспомогательные поддержки предотвращали прогиб и деформацию изделия в процессе печати. При этом в меньшей степени обращают внимание на возможные паразитные УФ-засветки.

Паразитная засветка по осям  $X$ - $Y$  ведёт к увеличению размера детали и негативно сказывается на точности изготовления [5]. В большей степени ей подвержены материалы светлых оттенков из-за наличия пигмента рассеивающего УФ-излучение. Тёмные полимеры, наоборот, поглощают часть светового потока и тем самым ограничивают паразитную засветку. Отсутствие пигмента в прозрачных материалах способствует проникновению излучения на глубину, большую чем элементарный печатный слой, поэтому изделия из таких полимеров больше подвержены охрупчиванию из-за паразитной засветки по оси  $Z$ , т. е. засветки предыдущих слоёв. Зачастую негативное влияние паразитной засветки по осям  $X$ - $Y$  можно увидеть даже невооружённым глазом. Однако в случае охрупчивания материала оценить степень его деградации можно только посредством дополнительных испытаний.

Ещё одним фактором, влияющим на физико-механические свойства готового изделия, является его расположение относительно перемешивателя 3D-принтера. Отверждённая фотополимерная смола в процессе печати в некоторой степени остаётся пластичной и движение перемешивателя в каждом цикле УФ-засветки создаёт дополнительную вибрацию, которая может приводить к микросмещению слоёв и изменению свойств полимерного материала.

Целью настоящего исследования являлась оценка изменения свойств полимерных материалов в зависимости от различных вариантов размещения модели на рабочем столе 3D-принтера и анализ эффективности

режимов доотверждения изделий аддитивного производства, полученных по SLA-технологии.

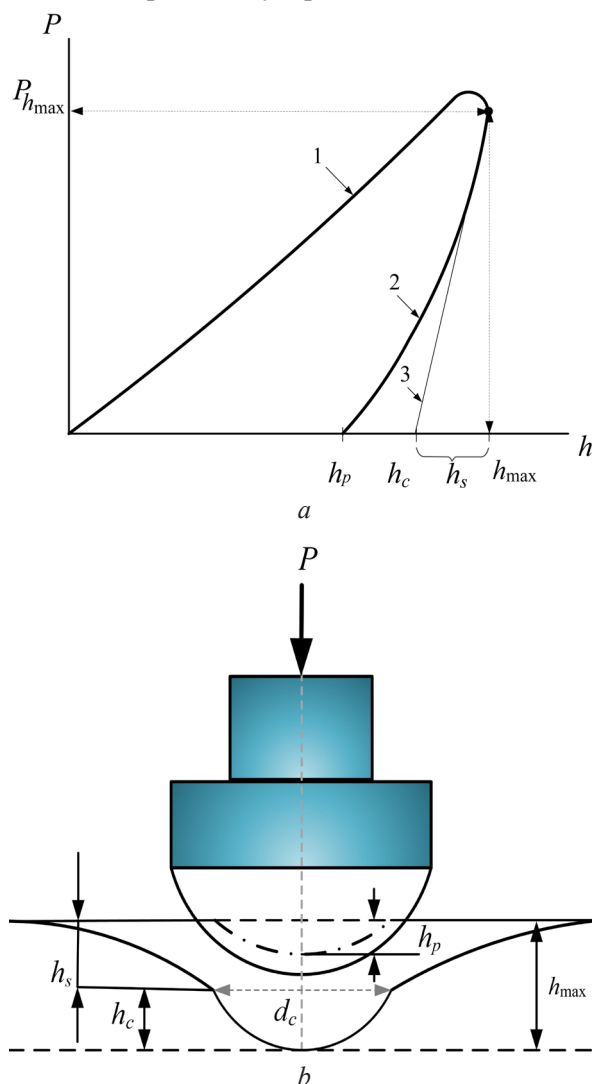
## Метод исследований

В настоящее время измерение физико-механических характеристик и оценка качества изделий аддитивного производства осуществляется в основном посредством разрушающих испытаний, хотя современные тенденции развития технологий контроля направлены на разработку неразрушающих методов. В этой связи в качестве альтернативы стандартным испытаниям на растяжение предложено использовать метод динамического индентирования [6].

Суть метода заключается в нанесении удара жёстким индентором по испытуемому объекту с непрерывной регистрацией процесса контактного взаимодействия бойка с материалом. Получаемая при этом диаграмма нагружения (зависимость контактного усилия от глубины внедрения  $P(h)$ ) несёт информацию о физико-механических характеристиках материала. Существует ряд аналитических моделей, позволяющих решать задачи, связанные с упругопластической контактной деформацией. Наиболее хорошо изученной и часто используемой на практике является модель Оливера–Фарра, которая легла в основу одноименного метода оценки твёрдости  $H$  и модуля упругости  $E$  конструкционных материалов [7, 8]. Метод Оливера–Фарра заключается в подборе параметров степенной функции, описывающей экспериментальную зависимость глубины внедрения индентора и площади контакта от приложенной нагрузки  $P$ , и расчёте твёрдости и модуля упругости по этим данным. Этот метод был адаптирован для случая динамического нагружения и успешно применяется для контроля широкого класса материалов, начиная от сталей и заканчивая пространственно-армированными углеродными композитами [9, 10].

Широкое распространение получила реализация метода динамического индентирования посредством внедрения сферического индентора (рисунок 1). Такая форма бойка позволяет создавать в области контакта динамически изменяющиеся деформации (пластическую и упругую), тем

самым получать максимально информативный отклик материала на ударное воздействие.



**Рисунок 1** – Типичный вид регистрируемой диаграммы ударного нагружения (а) и схематичное представление деформируемой области материала при внедрении индентора со сферическим наконечником (б): 1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки; 3 – касательная к кривой разгрузки

**Figure 1** – Typical view of the recorded impact loading diagram (a) and schematic representation of the deformed area of the material when introducing an indenter with a spherical tip (b): 1 – loading curve; 2 – unloading curve; 3 – tangent to the unloading curve

В основе используемой модели лежат два основных уравнения расчёта динамической твёрдости  $H_{IT}$  и модуля упругости  $E_{IT}$  [6, 10]:

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

$$E_{IT} = \frac{3P_{h_{\max}}(1-\mu^2)}{4\sqrt{R_i}(h_{\max}-h_p)^{3/2}}, \quad (2)$$

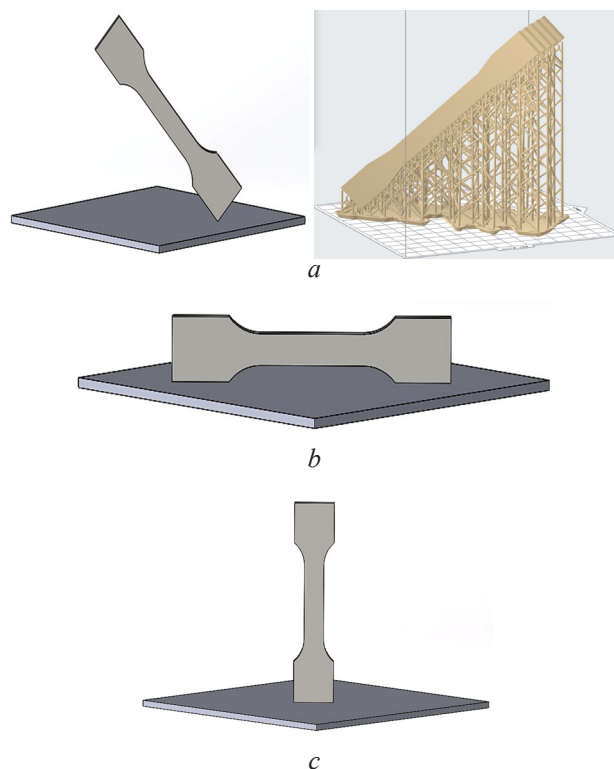
где  $P_{h_{\max}}$  – величина контактного усилия при максимальном внедрении;  $R_i$  – радиус индентора;  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения индентора;  $h_p$  – глубина пластического отпечатка;  $\mu$  – коэффициент Пуассона исследуемого материала равный 0,43<sup>1</sup>.

Главным отличием динамического процесса нагружения полимеров от статического является отсутствие острого пика на диаграмме  $P(h)$ . Высокая скорость деформации (порядка  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ) приводит к запаздыванию достижения максимальной глубины внедрения  $h_{\max}$  относительно прикладываемого усилия  $P_{\max}$ , что связано с появлением вязкой составляющей силы сопротивления материала и инерционностью процесса.

## Экспериментальные исследования

Для проведения исследований на 3D-принтере *Formlabs Form 2* было изготовлено 25 стандартных образцов для испытаний на растяжение<sup>1</sup> из прозрачной высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01* (*Formlabs Inc.*, США), как материала, наиболее подверженного охрупчиванию из-за паразитной засветки. Толщина элементарного печатного слоя составляла 100 мкм. Первая партия из 5 образцов была напечатана при размещении 3D-модели по диагонали рабочей области и под углом 45° к плоскости стола принтера (согласно рекомендациям встроенного программного обеспечения), как показано на рисунке 2а.

Следующие две партии образцов (по 5 шт. в каждой) были получены при продольном (т. е. угол печати 0°) и поперечном (угол печати 90°) послойном отверждении при том же диагональном расположении относительно рабочего стола принтера (рисунке 2b и 2c соответственно).



**Рисунок 2** – Схематичное изображение направления печати стандартных образцов: под углом 45° (a), продольного (b) и поперечного (c)

**Figure 2** – Schematic representation of the printing direction of standard samples: at an angle of 45° (a), longitudinal (b) and transverse (c)

Ещё по 5 образцов были напечатаны при параллельном (угол 0°) и перпендикулярном (угол 90°) расположении относительно перемещивателя принтера.

Все образцы по окончании печати были подвержены стандартному (рекомендуемому производителем материала) режиму постобработки: доотверждение под действием УФ-излучения мощностью 39 Вт при температуре 60 °С в течение 60 мин.

Результаты стандартных испытаний на растяжение<sup>1</sup> посредством универсальной машины *MTS Criterion 43* (*MTS Systems*, США) при непрерывной скорости нагружения 2 мм/мин приведены в таблице. Модуль упругости материала<sup>2</sup> определён по диаграмме растяжения при величине относительного удлинения 0,1 и 0,3 %.

<sup>1</sup>ISO 527-1:2021 Plastics. Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites. Edition 12.2021. – 27 p.

<sup>2</sup>GOST 9550-81 Plastics. Methods for determination of elasticity modulus at strength, compression and bending. Edition 07.1982. – 12 p.



Таблица / Table

**Результаты стандартных испытаний на растяжение образцов, изготовленных при различной ориентации модели в рабочей зоне принтера**

**Results of standard tensile tests of samples made with different orientations of the model in the working area of the printer**

№ образца Sample No	Направление отверждения слоя Layer curing direction						Расположение по отношению к перемешивателю Location in relation to the mixer			
	вдоль, 0° along, 0°		под углом 45° at an angle of 45° (также относительно перемешивателя) (also regarding the stirrer)		поперёк, 90° across, 90°		параллельно, 0° parallel, 0°		перпендикулярно, 90° perpendicular, 90°	
	$E_S$ , ГПа $E_S$ , GPa	$\sigma_m$ , МПа $\sigma_m$ , MPa	$E_S$ , ГПа $E_S$ , GPa	$\sigma_m$ , МПа $\sigma_m$ , MPa	$E_S$ , ГПа $E_S$ , GPa	$\sigma_m$ , МПа $\sigma_m$ , MPa	$E_S$ , ГПа $E_S$ , GPa	$\sigma_m$ , МПа $\sigma_m$ , MPa	$E_S$ , ГПа $E_S$ , GPa	$\sigma_m$ , МПа $\sigma_m$ , MPa
1	2.95	30.18	3.06	39.46	3.33	48.87	2.99	47.35	3.02	30.88
2	3.05	28.50	3.05	40.67	2.71	44.09	3.10	58.41	2.98	46.65
3	2.91	29.32	2.91	40.81	3.21	48.96	3.12	29.88	2.85	39.43
4	3.23	31.21	3.09	39.60	3.01	46.39	3.01	37.58	2.87	32.89
5	3.18	28.44	3.02	40.93	3.10	45.29	3.01	25.16	2.90	35.19
Ср. знач. Average value	3.06	29.53	3.03	40.29	3.07	46.72	3.05	39.68	2.92	37.01
Коэф. вар., % The coef. of variation, %	4.08	3.56	2.07	1.57	6.85	4.33	1.74	30.26	2.23	15.12

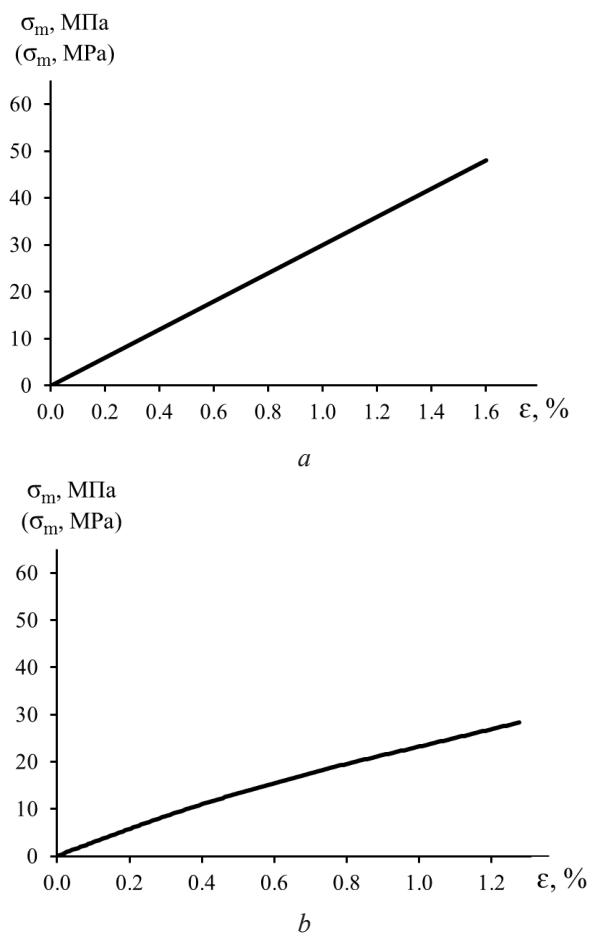
Как показал анализ приведённых данных, модуль упругости исследуемых образцов практически не зависит от способов отверждения изделий (их пространственной ориентации) и положения относительно перемешивателя принтера, но существенным образом изменяется предел прочности.

Наиболее прочными оказались изделия, отверждение которых проводилось в перпендикулярном направлении (рисунок 2с), а наименее – при продольной засветке слоёв (рисунок 2б). Образцы с перпендикулярной засветкой слоёв наряду с большей прочностью обладают и высокой хрупкостью, что отчётливо видно по характеру их разруше-

ния (рисунки 3, 4) и достаточно высокому коэффициенту вариации в пределах данной выборки. Со средними по абсолютному значению, но более стабильными свойствами оказались образцы, полученные при доотверждении материала под углом 45° (рисунок 2а).

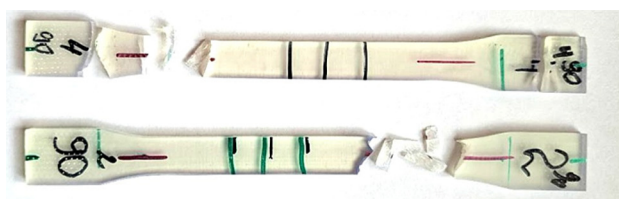
В ходе исследований установлено, что продольная и перпендикулярная ориентация относительно перемешивателя является источником девиации упругих и прочностных характеристик материала, о чём свидетельствует коэффициент вариации, достигший в отдельных случаях 30 %. Наиболее стабильные характеристики могут быть получены

при размещении модели под углом  $45^\circ$  к перемешивателю принтера.



**Рисунок 3** – Пример диаграмм растяжения для образца № 3 с перпендикулярным (a) и с продольным (b) отверждением

**Figure 3** – Example of tensile diagrams for sample No. 3 with perpendicular (a) and with longitudinal (b) curing



**Рисунок 4** – Внешний вид образцов с перпендикулярным отверждением после стандартных испытаний на растяжение

**Figure 4** – Appearance of samples with perpendicular curing after standard tensile tests

Однако данные выводы получены при приложении растягивающей нагрузки к исследуемым образцам. Дальнейшие ис-

следования были посвящены оценке отклика материала на динамически изменяющуюся ударную нагрузку. Индентирование образцов проведено с использованием индентора сферической формы диаметром 2,3 мм, массой 4,3 г и предупредительной скоростью 0,88 м/с.

Результаты индентирования отражены на рисунке 5 в виде зависимостей результатов стандартных испытаний (модуля упругости при растяжении  $E_S$  и предела прочности при разрушении  $\sigma_m$ ) от динамического модуля упругости  $E_{IT}$  и динамической твёрдости  $H_{IT}$ .

По результатам индентирования установлено качественное соответствие данных динамического нагружения и стандартных разрушающих испытаний. При этом максимальное изменение предела прочности (рассчитываемое как  $(\sigma_{m\text{прод.}} - \sigma_{m\text{перпенд.}}) / \sigma_{m\text{прод.}}$ ) составило 51 %, а динамической твёрдости ( $(H_{IT\text{прод.}} - H_{IT\text{перпенд.}}) / H_{IT\text{прод.}}$ ) – 25 %.

В данном случае хрупкость в большей степени оказывает влияние на результат измерения предела прочности, чем динамической твёрдости изделия. В случае индентирования отклик хрупкого материала на внедрение бойка имеет практически чисто упругий характер (с минимальной долей пластической деформации), за счёт чего в результате измерения регистрируется достаточно высокая твёрдость, хотя само по себе изделие может и не быть прочным.

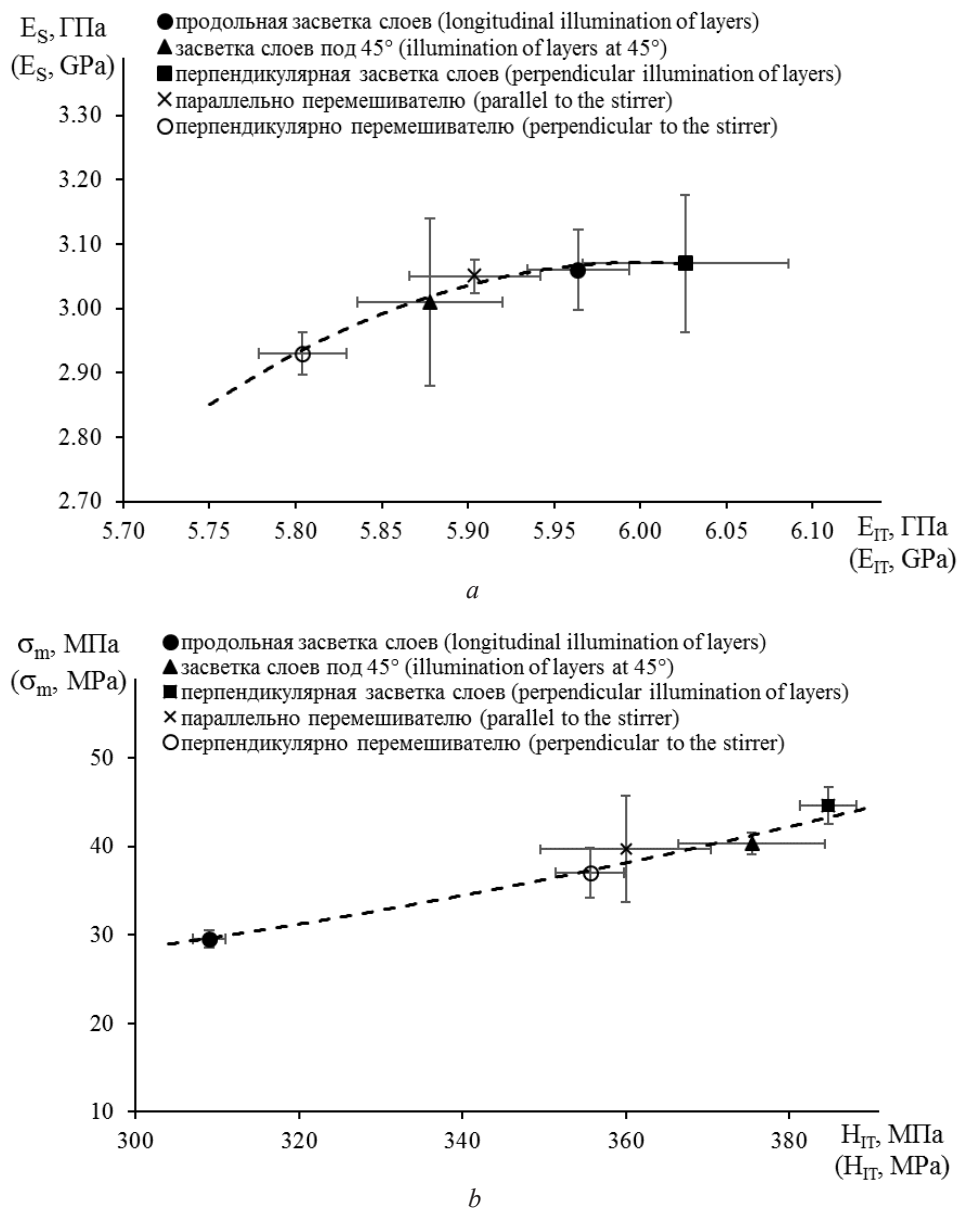
Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что изделия, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и твёрдости конструкции, в идеальном случае должны контролироваться как разрушающими, так и неразрушающими методами. Если таких требований нет, а наиболее критичными являются упругие характеристики материала, то необходимым и достаточным будет проведение оценки модуля упругости методом динамического индентирования.

Процесс SLA-печати не является заключительной операцией в технологическом цикле изготовления, а окончательное формирование свойств полимерных изделий происходит только после их доотверждения. Каждый полимер реагирует на постобработку по-разному и требует разного времени и температурных условий для достижения оптимальных свойств. В этой связи дальнейшие исследования были направлены

на изучение комплексного влияния УФ-излучения и температуры на формирование физико-механических характеристик исследуемого материала.

Для получения объективной информации о влиянии различных режимов доотверждения экспериментальные образцы изготавливались из того же материала (*High Temp RS-F2-*

*HTAM-01*) с толщиной элементарного слоя 100 мкм и диагональном расположении модели в рабочей области 3D-принтера. Угол засветки фотополимера при печати составлял 45° (рисунок 2а), так как такое расположение модели обеспечивает максимально стабильные прочностные характеристики готового изделия (таблица).



**Рисунок 5** – Зависимости результатов стандартных испытаний модуля упругости  $E_S$  (a) и предела прочности  $\sigma_m$  (b) от динамических характеристик материала

**Figure 5** – Dependence of the results of standard tests elastic modulus  $E_S$  (a) and tensile strength  $\sigma_m$  (b) on the dynamic characteristics of the material

Первый этап доотверждения материала образцов проводился в сушильной камере *Form*

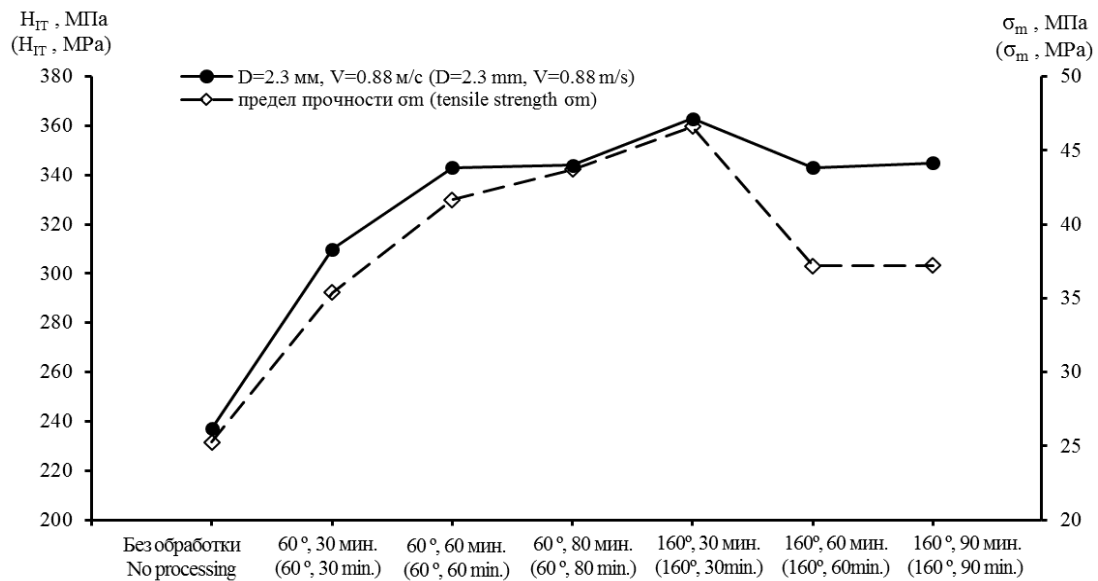
*Cure (Formlabs Inc., США)* под действием температуры 60 °C и УФ-излучения мощностью



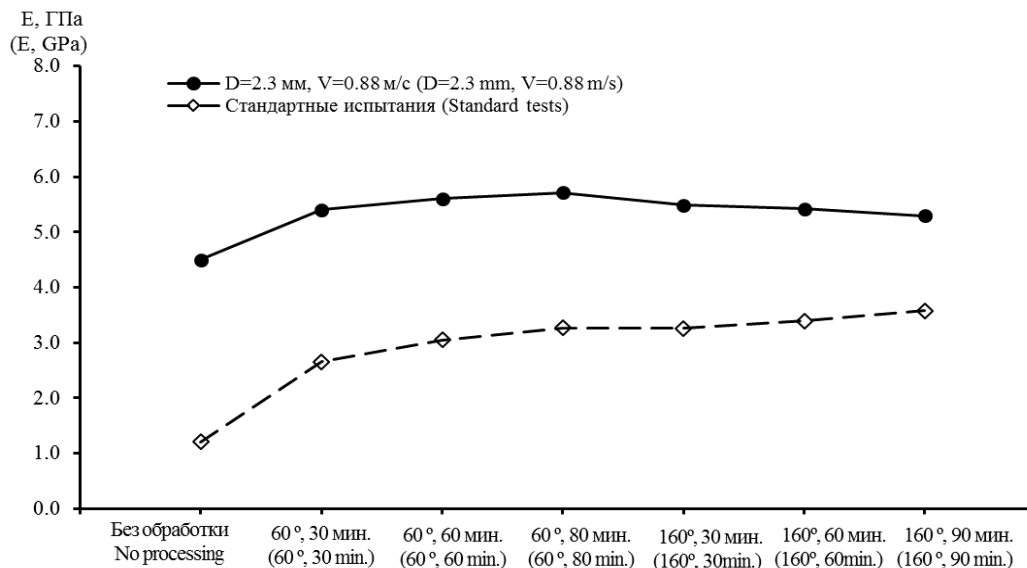
39 Вт на протяжении 30–80 мин. Для оценки влияния термообработки на физико-механические характеристики изделий завершающим этапом их доотверждения являлся нагрев до температуры 160 °С и выдержка на протяжении 30, 60 и 90 мин.

Оценка свойств материала образцов, прошедших различные режимы доотверждения, проводилась посредством испытаний

на растяжение<sup>1</sup>. Оценка эффективности применения метода динамического индентирования для измерения физико-механических характеристик полимерного материала с разным временем и температурными условиями постобработки проводилась на используемой ранее установке с теми же параметрами нагружения. Результаты испытаний исследуемых образцов приведены на рисунке 6.



a



b

**Рисунок 6** – Зависимости изменения прочностных (a) и упругих (b) характеристик образцов от режимов доотверждения полимерного материала

**Figure 6** – Dependences of changes in strength (a) and elastic (b) characteristics of samples on post-curing modes of the polymer material

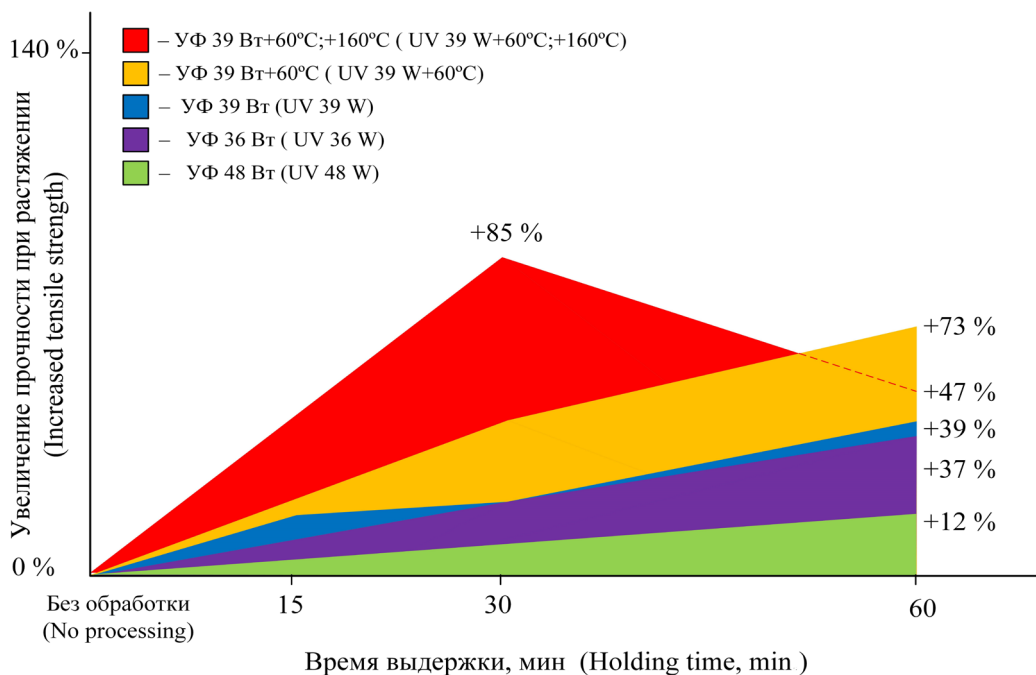
Из представленных данных видно, что дополнительное воздействие УФ-излучения и температуры приводит к повышению прочности  $\sigma_m$  и модуля упругости  $E_S$  полимерного материала, полученного по SLA-технологии. В среднем изделия, прошедшие доотверждение под действием температуры 60 °С и ультрафиолета мощностью 39 Вт на протяжении 80 мин, по прочностным и упругим характеристикам превосходят необработанные образцы на 73 % и 170 % соответственно. Дальнейшая термообработка при 160 °С в течение 30 мин способствует дополнительному повышению  $\sigma_m$  почти на 7 %. Однако увеличение времени выдержки (60–90 мин) вызывает хрупкость исследуемого полимера. Разрушение таких образцов при испытании часто происходило вне рабочей зоны в следствие того, что при охрупчивании возникновение любого дефекта приводит к разрушению в той зоне, где он находится. Данные, полученные по таким образцам, не принимались в расчёт.

Результаты динамического индентирования качественно соответствуют результатам стандартных испытаний. Установлено, что максимальными значениями динамической твёрдости  $H_{IT}$  363 МПа обладают образцы, подвергшиеся дополнительному температурному воздействию (160 °С) на протяжении 30 мин. Увеличение времени выдержки до 60 мин привело к снижению предела прочности

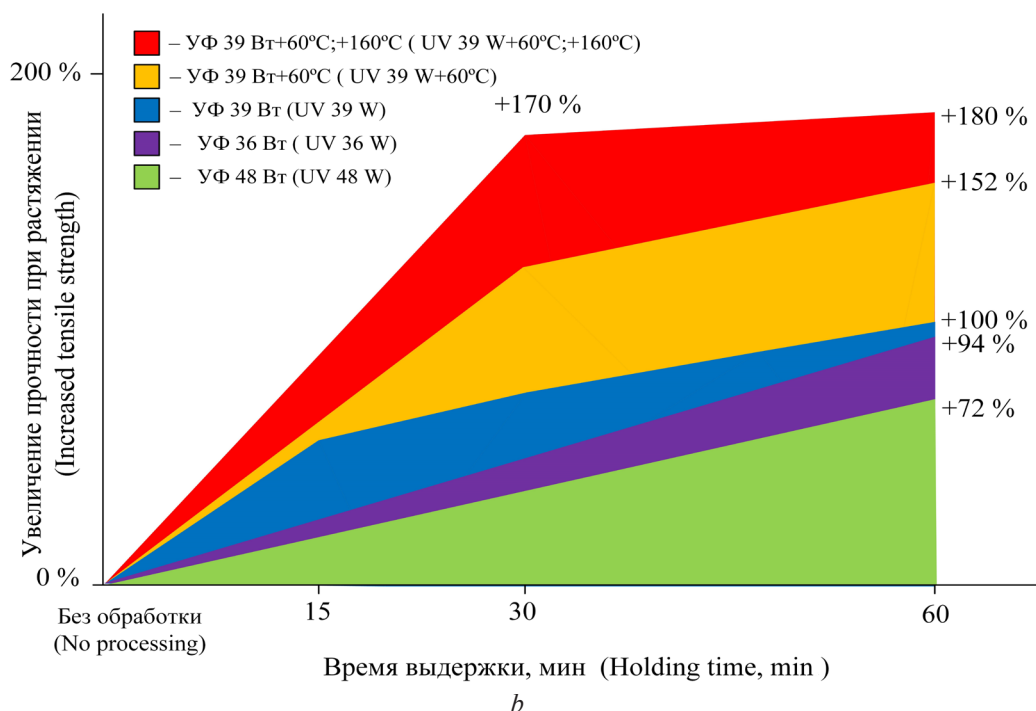
и динамической твёрдости на 20 % и 6 % соответственно при незначительной вариации модуля упругости. Выдержка образцов при температуре 160 °С на протяжении 90 мин не привела к существенным изменениям прочностных и упругих свойств как по данным стандартных испытаний, так и по результатам динамического индентирования.

Дополнительные исследования по доотверждению образцов под действием УФ-излучения мощностью 36, 39 и 48 Вт (без дополнительной температурной обработки) позволили обобщить результаты исследований режимов постобработки и представить их в виде зависимости процентного увеличения предела прочности  $\sigma_m$  и модуля упругости  $E_S$  при растяжении (рисунок 7).

Как видно из представленных графиков, воздействие на исследуемый материал УФ-излучения (36–48 Вт) вызывает достаточно равномерное увеличение предела прочности и модуля упругости, которое продолжается на протяжении рассматриваемых 60 мин. Однако повышение мощности излучения до 48 Вт снижает эффективность доотверждения, что выражается в наименьшем процентном приращении  $\sigma_m$  и  $E_S$  и, возможно, является результатом начала деградации полимера. Для исследуемой смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01* оптимальным оказалось доотверждение при УФ-излучении мощностью 39 Вт.



a



**Рисунок 7** – Зависимости изменения предела прочности (а) и модуля упругости (b) от времени выдержки полимера при различных видах постобработки

**Figure 7** – Dependences of changes in tensile strength (a) and elastic modulus (b) on the exposure time of the polymer for various types of post-processing

Дополнительное воздействие температуры (режим 39 Вт+60 °С) оказывает наибольшее влияние на модуль упругости исследуемого полимера. В первые 60 мин финальной полимеризации зарегистрировано максимальное увеличение  $E_S$  на 152 %,  $\sigma_m$  – на 73 %.

Улучшить результат удалось при последующей термообработке изделий при 160 °С. В течение первых 30 мин выдержки предел прочности и модуль упругости резко возрастают и достигают максимального увеличения на 85 % и 170 % соответственно. Однако если в течение следующих 30 мин модуль упругости постепенно нарастает (до 180 %), то предел прочности резко падает до 47 %, что может быть следствием повышения хрупкости материала.

### Заключение

Установлено, что пространственная ориентация и расположение 3D-модели на рабочем столе принтера оказывают существенное влияние на прочностные свойства полимерных изделий. На примере высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01* показано,

что наибольшему охрупчиванию подвержены непигментированные фотополимеры из-за своей оптической прозрачности и возможности пропускать УФ-излучение в объём синтезированного материала на глубину большую, чем толщина элементарного слоя печати. Установлено, что наибольшей прочностью обладают изделия, отверждение которых проводилось с большим количеством циклов засветки, т. е. в поперечном направлении стандартного образца для испытаний на растяжение. Однако данные изделия в процессе испытаний имели хрупкий характер разрушения. Показано, что охрупчивание полимерного материала в меньшей мере сказывается на результате измерения его динамической твёрдости, чем предела прочности при растяжении. По этой причине чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств исследуемых материалов при различном расположении и ориентации модели в процессе печати несколько ниже, чем при стандартных испытаниях.

Установлено, что доотверждение полимерных изделий при высоких температурах

(вплоть до 160 °С) и УФ-излучении мощностью 39 Вт позволяет повысить их прочность и модуль упругости на 170 % и 85 % соответственно по сравнению с состоянием до обработки. Данный режим доотверждения является оптимальным в отношении исследуемой фотополимерной смолы.

Из результатов исследований следует, что метод динамического индентирования является альтернативой стандартным испытаниям на растяжение и позволяет достоверно оценить упругие и прочностные свойства полимерных материалов, а также оптимизировать способ SLA-печати и режим постобработки для получения изделий аддитивного производства с требуемым набором стабильных физико-механических характеристик.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № T22M-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путём аддитивного синтеза».

## Acknowledgments

The work was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research: project No. T22M-004 "Development of a local contact deformation method for non-destructive testing of polymer products obtained by additive synthesis".

## References

1. Godec Damir, Gonzalez-Gutierrez Joamin, Nordin, Axel, Pei Eujin, Ureña Alcázar Julia. A Guide to Additive Manufacturing. Springer; 2022.324 p.  
**DOI:** 10.1007/978-3-031-05863-9

2. Rangappa SM, Gupta MK, Siengchin S, Song Q. Additive and Subtractive Manufacturing of Composites. Singapore; 2021.247 p.

**DOI:** 10.1007/978-981-16-3184-9

3. Katheng A, Kanazawa M, Iwaki M, Minakuchi S. Evaluation of dimensional accuracy and degree of polymerization of stereolithography photopolymer resin under different postpolymerization conditions: An in vitro study. The Journal of Prosthetic Dentistry. 2021;125(4):695-702.

**DOI:** 10.1016/j.prosdent.2020.02.023

4. Ans Al Rashid, Waqas Ahmed, Muhammad Yasar Khalid, Muammer Koc. Vat Photopolymerization of Polymer and Polymer Composites: Processes and Applications. Additive Manufacturing; 2021.102279 p.

**DOI:** 10.1016/j.addma.2021.102279

5. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering. 2018;143:172-196.

**DOI:** 10.1016/j.compositesb.2018.02.012

6. Kren AP, Pratasenia TA. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014;50(7):419-425.

**DOI:** 10.1134/S1061830914070079

7. Oliver WC, Pharr GM. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. J. Mater. Res. 2004;19(1):3-20.

**DOI:** 10.1557/jmr.2004.19.1.3

8. Oliver WC, Pharr GM. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. 1992;7(6):1564-1583. **DOI:** 10.1557/jmr.1992.1564

9. Lee A, Komvopoulos K. Dynamic spherical indentation of elastic-plastic solids. International Journal of Solids and Structures. 2018;146:180-191.

**DOI:** 10.1016/j.ijsolstr.2018.03.028

10. Pratasenia TA, Kren AP, Dyakova HN. Application of the dynamic indenting method for evaluation of the hardness and elasticity module of the material of products obtained by the extrusive method of additive production from a carbon-filled composite materials. Mechanics of Composite Materials. 2022;58(3):383-394.

**DOI:** 10.1007/s11029-022-10036-z