

Список использованных источников

1. Попок, Н. Н. Автоматизация подготовки производства на основе 3D макетирования технологической оснастки / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 марта 2020 г. / редкол.: Ф. И. Пантелеенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2020. – С. 95.
2. Попок, Н. Н. Подготовка машиностроительного производства на основе 3D-прототипирования технологической оснастки / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Электрон. сб. ст. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию науч.-технол. парка Полоцк. гос. ун-та (Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г.) / редкол.: Н. Н. Попок (гл. ред.) [и др.]. – Новополоцк, ПГУ, 2020. – С. 40–41.
3. Попок, Н. Н. Подготовка производства блочно-модульных фрез с использованием 3D прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2021. – № 1 (40). – С. 94–106.
4. Попок, Н. Н. Конструирование сборных режущих инструментов на основе 3D-прототипирования / Н. Н. Попок, С. А. Портянко, Е. М. Тихон // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 22–23 апр. 2021 г.) / редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 71–72.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТВЕРЖДЕННЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО SLA-ТЕХНОЛОГИИ, НА ИХ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Т. А. Протасеня¹, А. П. Крень¹, Г. Н. Дьякова²

¹*Институт прикладной физики, г. Минск, Беларусь*

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

Введение. 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 печатать 3D-модели с высоким разрешением, хорошей детализацией и гладкой поверхностью сразу на выходе из принтера [1]. 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, а термообработка изделия из пластика включает в себя нагрев до температуры выше точки стеклования, но ниже температуры плавления. В этом температурном диапазоне изменяется соотношение аморфной и кристаллической составляющей структуры материала. Когда полимер приближается к температуре стеклования или достигает ее, у молекулярных цепочек появляется достаточно энергии, чтобы перейти в аморфное состояние [2, 3]. В таком состоянии они могут вращаться, смещаться, растягиваться и т. д., что снимает внутренние напряжения, которые могут возникнуть в процессе изготовления изделия. Все это делает изделие более прочным и устойчивым к механическим нагрузкам. Поскольку процесс модификации структуры протекает не мгновенно, то большое значение имеет время выдержки. Поэтому для определения оптимального режима термообработки необходим оперативный контроль физико-механических характеристик материала.

В настоящее время контроль свойств материалов изделий, полученных путем аддитивного синтеза, ведется, как правило, стандартными разрушающими методами [4–6]. В связи с этим выбор оптимального режима термообработки – процесс длительный, поскольку включает в себя:

изготовление образцов для разрушающих испытаний по тем же режимам печати и из того же материала, что и предполагаемое готовое изделие;

термообработку образцов при различных температурах и различным временем выдержки;

проведение испытаний;

корректировку режима печати и условий термообработки (при необходимости) и повторные испытания.

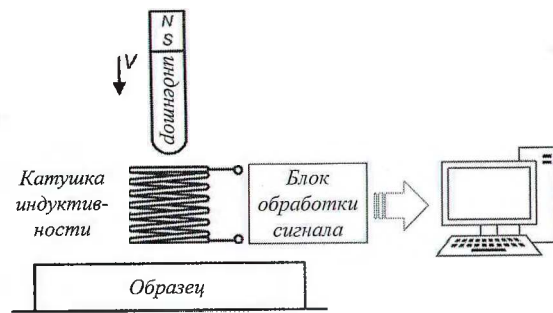
Очевидно, что в данном случае применение метода неразрушающего контроля позволяет избежать излишних временных и материальных затрат. Кроме того, появляется возможность дать численную оценку физико-механическим характеристикам материала и отследить их изменение в зависимости от температуры и времени выдержки при термообработке изделия.

Наиболее перспективным методом, удовлетворяющим всем этим требованиям, является метод динамического индентирования [7–9]. Благодаря непрерывной регистрации полной диаграммы ударного нагружения в одном измерительном цикле производится 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.

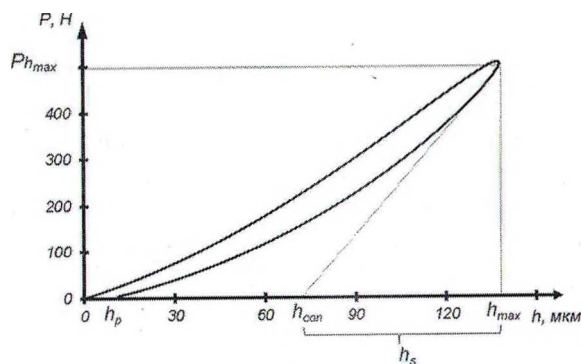
Однако возможности метода динамического индентирования для контроля свойств изделий, полученных по SLA-технологии, до настоящего времени не изучены, как и не выяснен вопрос эффективности его использования для регистрации изменения свойств полимерных материалов, подвергшихся термообработке по различным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

По этой причине настоящее исследование направлено на адаптацию метода динамического индентирования для контроля твердости и модуля упругости полимерных композиционных материалов, изготовленных методами 3D-печати по SLA-технологии, а также оценки влияния режима термообработки (времени выдержки) на их физико-механические характеристики.

Метод и экспериментальное оборудование. В основе метода динамического индентирования лежит непрерывная регистрация мгновенной скорости индентора [7]. Технически это



а



б

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки (а) и общий вид экспериментальной диаграммы ударного нагружения для отвержденной фотополимерной смолы (б)

реализовано посредством использования постоянного магнита, закрепленного на инденторе, и измерительной катушки индуктивности, выступающей в качестве первичного измерительного преобразователя (рис. 1, а). Скорость свободного падения индентора в таком случае прямо пропорциональна наводимой магнитом ЭДС-индукции в катушке.

Следующим звеном в измерительной цепи является блок обработки информативного сигнала, выполняющий функции фильтрации, усиления и преобразования. Далее работа с данными происходит в персональном компьютере. Интегрирова-

ние 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. 1, б). Основными параметрами, извлекаемыми из диаграммы $P(h)$, по которым непосредственно ведется расчет физико-механических характеристик материала, являются: максимальная глубина внедрения индентора h_{max} , упругий прогиб контура отпечатка h_p , контактная глубина внедрения h_{con} , глубина пластического отпечатка h_p и величина контактного усилия при максимальном внедрении $P_{h_{max}}$.

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 [10] и успешно апробированы в том числе на угленаполненных полимерных материалах [11]:

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

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

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.

Подготовка образцов и экспериментальные исследования. Изготовление и термообработка образцов для проведения исследования проводилась в Белорусском государственном технологическом университете (г. Минск). Печать образцов осу-

ществлялась с использованием фотополимерной смолы Formlabs standard white. Геометрические параметры образцов соответствовали указанным в ГОСТ 11262 [4] для образца 1-го типа. Температура термообработки составляла 60 °С, время выдержки – 30, 45 и 60 мин. Для исследования было подготовлено 20 образцов: по 5 образцов для каждого времени выдержки и 5 образцов, не подвергавшихся термообработке. Все образцы предварительно были испытаны на растяжение [4] на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной скоростью нагружения 10 мм/мин при температуре воздуха 20±2 °С и относительной влажностью воздуха 70±5 %. Результаты испытаний приведены в таблице. Из представленных данных видно, что изменение прочностных и упругих свойств исследуемых образцов прямо пропорционально времени выдержки. Наибольшее увеличение предела прочности при растяжении σ_{pm} и модуля упругости E_s зарегистрировано на образцах, выдержанных при 60 °С в течении 60 мин: 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.

Результаты стандартных испытаний образцов на растяжение

№ образца	Без термо- обработки		Время термообработки					
			30 мин		45 мин		60 мин	
	σ_{pm} , МПа	E_s , ГПа	σ_{pm} , МПа	E_s , ГПа	σ_{pm} , МПа	E_s , ГПа	σ_{pm} , 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
Коэффициент вариации,%	2,30	1,06	3,02	0,99	3,76	5,27	5,82	2,15

Дальнейшие исследования были направлены на установление возможности контроля физико-механических характеристик исследуемых материалов методом динамического индентирования и оценке чувствительности метода к изменению свойств

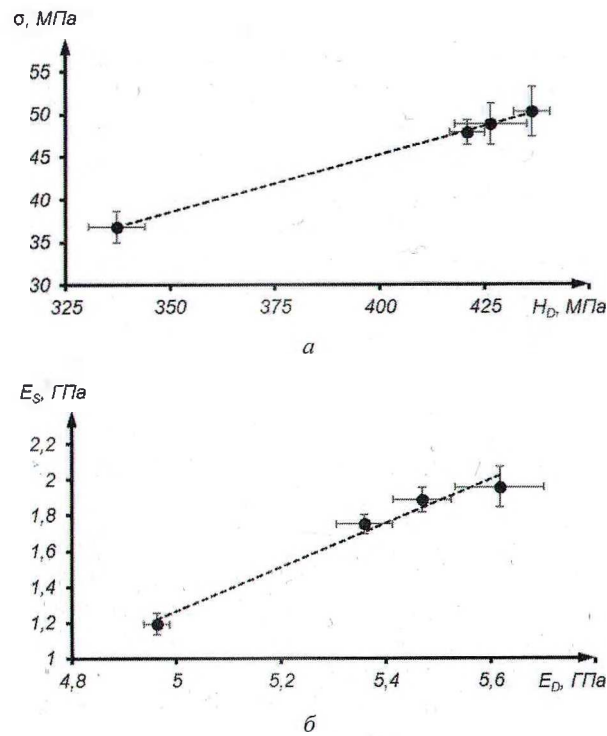


Рис. 2. Корреляционные зависимости между результатами стандартных испытаний и значениями, полученными методом динамического индентирования: а – зависимость для σ ; б – зависимость для E_S

отвержденной фотополимерной смолы, вызванных различным временем выдержки при термообработке. Индентирование образцов осуществлялось индентором сферической формы диаметром 5 мм, массой 6,8 г с предупредительной 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 σ (H_D) и E_S (E_D) (рис. 2).

Максимальная величина размаха результатов индентирования не превышала 4 % от среднего значения как для динамического модуля упругости, так и для динамической твердости.

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

$$\sigma = 0,13H_D - 8,49. \quad (3)$$

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.

$$E_S = 1,22E_D - 4,83. \quad (4)$$

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 термообработка изделий из отвержденных фотополимерных смол, полученных по SLA-технологии, при температуре 60 °С приводит к увеличению упругих и прочностных характеристик материала. Причем наибольшее изменение характеристик зарегистрировано при времени выдержки 60 мин: 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 %.

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

Список использованных источников

1. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учеб. пособие / В. А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Машков, Ю. К. Конструкционные пластмассы и полимерные композиционные материалы: учеб. пособие / Ю. К. Машков, М. Ю. Байбарацкая, Б. В. Григорьевский. – Омск: ОмГТУ, 2002. – 51 с.
3. Привалко, В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В. П. Привалко. – Л.: Химия, 1979. – 312 с.
4. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262-80. – Взамен ГОСТ 11262-76; введ. 01.12.80. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.
5. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-2014. – Взамен 4648-71; введ. 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
6. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи: ГОСТ 4647-2015. – Введ. 01.05.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.
7. Рудницкий, В. А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень; под. ред. П. П. Прохоренко. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.
8. Кашапова, И. А. Обоснование применимости метода динамического индентирования для контроля твердости материалов покрытий элементов жидкостных ракетных двигателей / И. А. Кашапова, А. В. Федоров, Р. А. Егоров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2020. – № 5. – С. 144–152.
9. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение процесса динамического индентирования / Р. А. Егоров [и др.] // *Дефектоскопия.* – 2020. – № 6. – С. 61–69.
10. Деформационные модели контактного взаимодействия жесткого индентора с упругопластическим полупространством при динамическом нагружении / Т. А. Протасеня [и др.] // *Актуальные проблемы прочности: Междунар. науч. конф. (Минск, 25–29 мая 2020 г.)* / под ред. В. В. Рубаника. – Молодечно: Тип. «Победа», 2020. – С. 12–14.
11. 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.] // *Mechanics of Composite Materials.* – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 323–328.