

Оценка возможности применения изделий из пластмасс, созданных посредством послойной наплавки материала, в силовой оснастке лабораторных установок

12, декабрь 2016

Бошняк В. А.¹, Языков А. В.^{1,*}

УДК 620.172.2

¹МГТУ им. Баумана, Москва, Россия

*andr-yaz@yandex.ru

В практике работы кафедры "Стартовые ракетные комплексы" МГТУ им. Н.Э. Баумана периодически возникает необходимость усовершенствования лабораторных стендов, использующихся в учебной и научной деятельности. При решении этой задачи, как правило, остро встаёт вопрос об уменьшении сроков изготовления и снижении стоимости новой оснастки.

В настоящее время, технологии создания моделей посредством послойной наплавки материала (аддитивные технологии, трёхмерная печать) стали доступны широкому кругу заинтересованных лиц и организаций. Наиболее известной сферой применения данных технологий в проектных и исследовательских целях является создание пластмассовых моделей разрабатываемых изделий. Чаще всего, целями такого моделирования является оценка визуально-эстетических качеств изделия [1] и увязка расположения изделия в более крупной сборке [2]. Следует отдельно отметить промышленное применение аддитивных технологий для производства готовых изделий из металлов [3, 4]. Такое производство в настоящее время требует применения дорогостоящего оригинального оборудования, как правило, недоступного для лабораторий учебных и исследовательских центров.

Весьма интересным представляется использование доступного по цене оборудования трёхмерной печати для изготовления пластиковых элементов, способных выдерживать значимую силовую нагрузку, прикладываемую к модели во время эксплуатации. Такие изделия могли бы быть использованы при моделировании гидropневматического оборудования, перегрузочных машин, несущих конструкций сооружений и т. п.

Сами по себе прочные изделия из пластмасс не новы, например в промышленности для их изготовления крайне широко применяется акрилонитрилбутадиенстирол (АБС, англ. ABS) [5]. Этот пластик обладает хорошими прочностными свойствами, сопостави-

мыми со свойствами металлов, стабилен и нетоксичен в нормальных условиях эксплуатации [6]. Изделия из пластика АБС, в основном, изготавливаются прессованием или литьём под давлением с последующей механической обработкой [7]. Но, ввиду необходимости изготовления литейной оснастки, такой способ наиболее применим для серийного изготовления изделий и слабо подходит для задач моделирования.

В то же время, пластик АБС также является одним из наиболее используемых материалов при изготовлении изделий методом трёхмерной печати [8]. Современные аппараты для послойного наплавления материала с числовым программным управлением позволяют создавать на основе АБС-пластика изделия сложных конфигураций в соответствии с предварительно созданными виртуальными геометрическими моделями.

Однако, прочность пластиковых изделий, изготовленных аддитивным методом, очевидно, будет ниже, чем изделий, изготовленных литейным способом. Это связано с внутренними напряжениями, возникающими из-за последовательного остывания слоёв материала, а также с неполным скреплением слоёв между собой. Отрицательное влияние на прочность изделия также оказывают погрешности в дозировании и позиционировании порций материала. Кроме того, состав и механические свойства материала для печати, как правило, строго не нормируются, следовательно различные партии материала могут иметь различные характеристики.

Таким образом, прочность получаемых при трёхмерной печати изделий находится в зависимости от характеристик оборудования, выбранного режима работы, а также состава используемого материала. Следовательно, предсказать прочностные характеристики изделий можно проводя испытания образцов, изготовленных на оборудовании и с использованием партии материала, которые будут использоваться при изготовлении основного изделия.

Испытания целесообразно производить в условиях нагружения, близких к условиям работы основного изделия. В данной статье рассмотрены испытания образцов на растяжение.

Для испытаний образцов на прочность при растяжении используются разрывные машины. Разрывные машины промышленного изготовления, как правило, спроектированы для испытаний достаточно габаритных металлических образцов, т. е. для работы с большим усилием на разрыв [9], что делает затруднительным их применение для испытаний малогабаритных пластиковых образцов.

В данной статье предложено использовать для испытаний простой в изготовлении малогабаритный стенд. Стенд представляет собой четырёхстоечную конструкцию с подкреплёнными нижней и верхней платформами (рис. 1), способную выдерживать нагрузки, заведомо большие нагрузок, вызывающих разрыв образцов. Нижней платформе установлен механизм нагружения с рым-болтом для крепления нижней части испытательной сборки. На верхней платформе размещён рым-болт для крепления верхней части испытательной сборки.



Рис. 1. Испытательный стенд.

Испытательная сборка (рис. 2) состоит из образца для испытаний и прутка-динамометра с наклеенными на него тензорезисторами. Элементы сборки шарнирно скреплены между собой и с элементами испытательного стенда с помощью такелажных скоб.

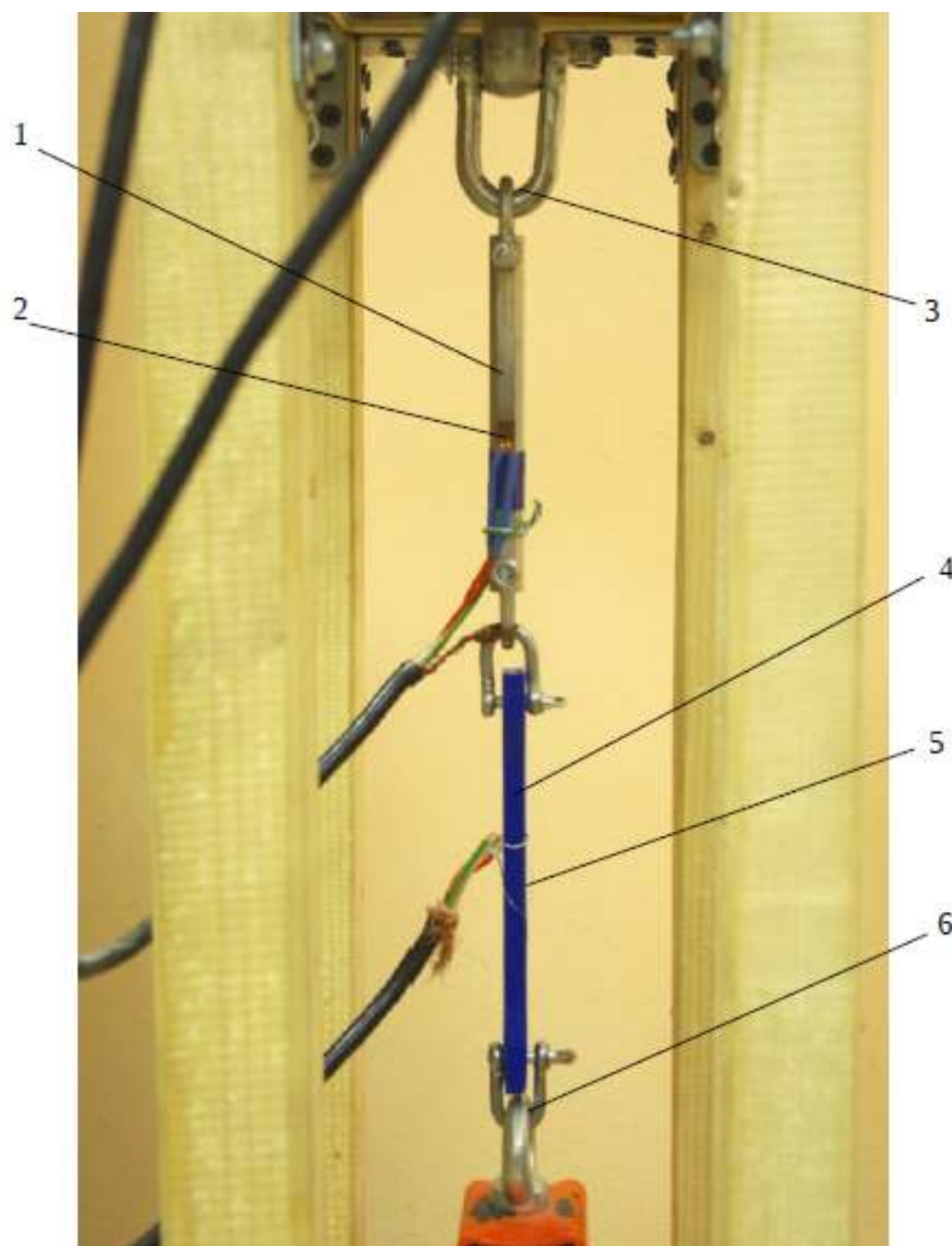


Рис. 2. Испытательная сборка. 1 – пруток-динамометр; 2 — тензорезистор прутка-динамометра; 3 — верхнее крепление измерительной сборки; 4 — образец для испытаний; 5 — тензорезистор на образце для испытаний; 6 — нижнее крепление измерительной сборки.

Образец для испытаний (рис.3) представляет собой пруток прямоугольного сечения с местами крепления по краям. Прутки изготавливались на устройстве, реализующем технологию послойного наплавления нити (англ. Fused Filament Fabrication, FFF). При этом для одних образцов слои наплавлились параллельно направлению воздействия силы (вариант 1, рис.4.а), а для других — перпендикулярно (вариант 2, рис.4.б).

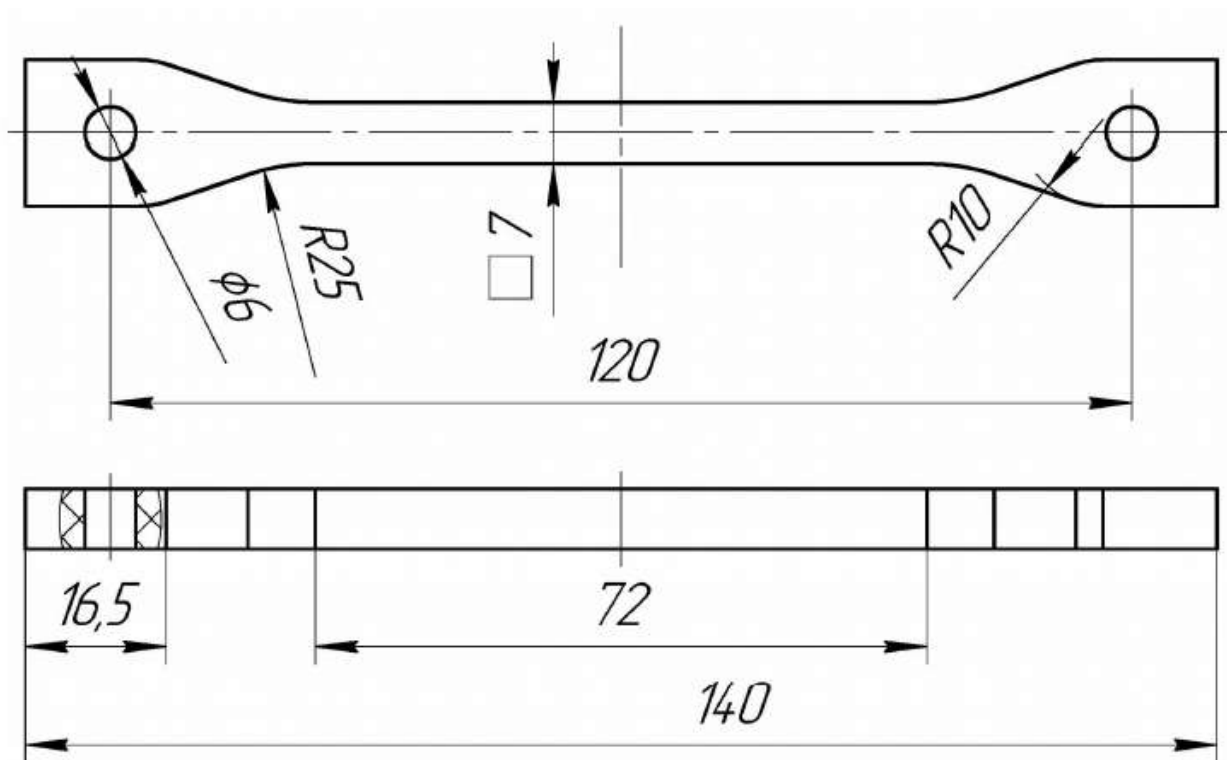


Рис. 3. Испытательный образец.

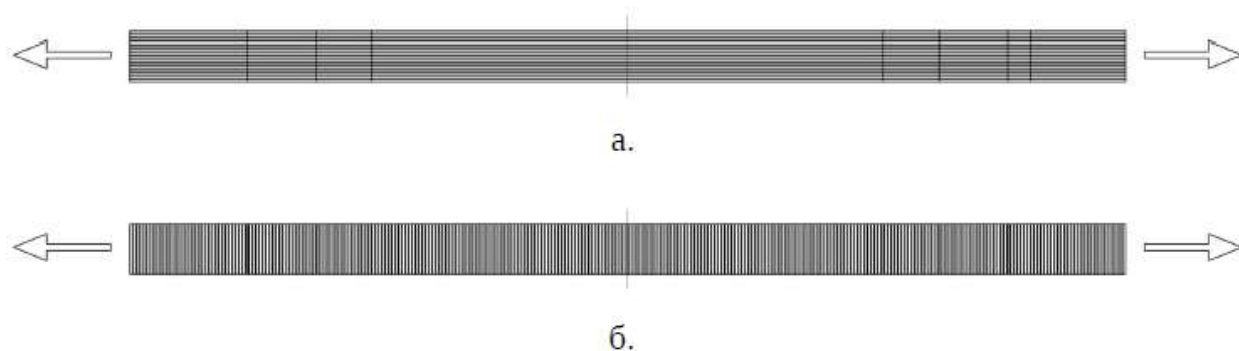


Рис. 4. Направления наплавки слоёв в образцах

Целью проведения испытаний является определение механического напряжения, при котором происходит разрушение материала образца, а также получение кривой деформации для этого материала. При проведении испытаний, с помощью механизма нагружения, осуществляется растягивание испытательной сборки. Растягивающие силы измеряются с помощью отградуированной измерительной системы с чувствительными элементами в виде тензорезисторов, установленных на прутке-динамометре. Поскольку образец во время эксперимента испытывает только растяжение, - определение механических напряжений в нём осуществляется тривиальным делением измеренной силы на площадь поперечного сечения. Деформации образца для испытаний измеряются с помощью тензорезисторов, установленных на самом образце и подключенной к отградуированному на деформации входу измерительной системы.

Результаты измерения растягивающей силы для образца варианта 1 показаны на рис.5.

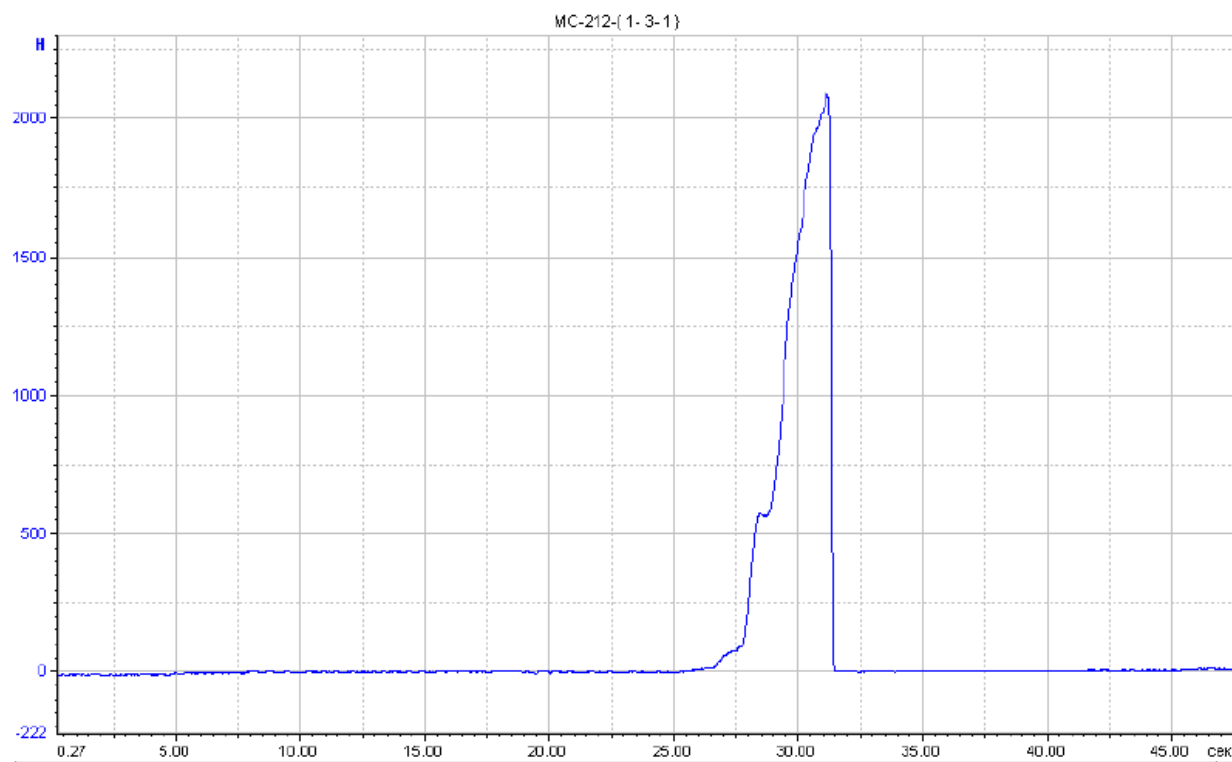


Рис. 5. Растягивающая сила при испытании образца варианта 1. По оси абсцисс — время (сек); по оси ординат — растягивающая сила (Н).

Поскольку в используемом стенде механизм нагружения имеет ручной привод, возрастание нагрузки несколько неравномерно по времени. Разрушение образца произошло при растягивающем усилии 2087 Н. Напряжение в образце при этом составило:

$$\sigma = \frac{2087\text{Н}}{49 \cdot 10^{-6}\text{м}^2} \approx 42,6 \cdot 10^6\text{Па}$$

Такое напряжение разрушения, приблизительно соответствует пределу прочности материала, заявляемому производителями марочного пластика АБС, с известными механическими характеристиками [10].

Результаты измерения растягивающей силы для образца варианта 2 показаны на рис.6. Разрушение образца произошло при растягивающем усилии 350 Н. Напряжение в образце при этом составило:

$$\sigma = \frac{350\text{Н}}{49 \cdot 10^{-6}\text{м}^2} \approx 7,1 \cdot 10^6\text{Па}$$

Таким образом видно, что напряжение разрушения образца при работе на разрыв между слоями значительно ниже, чем при работе на растяжение слоя.

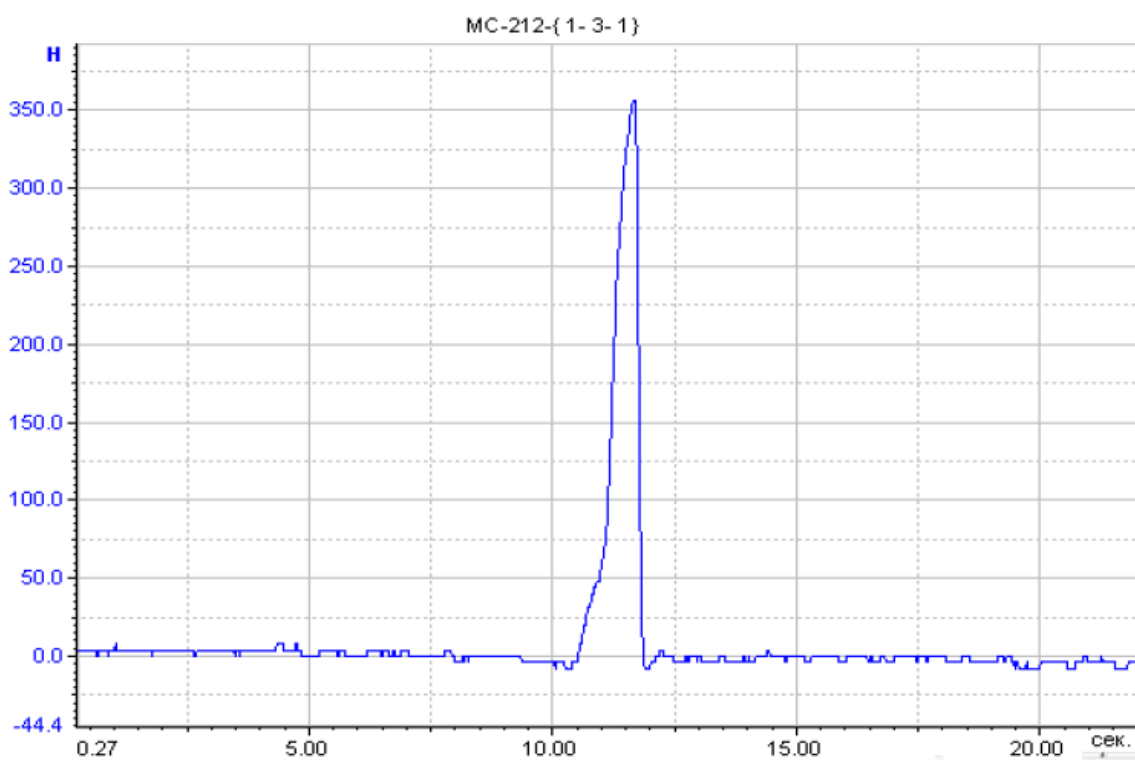


Рис. 6. Растягивающая сила при испытании образца варианта 2. По оси абсцисс — время (сек); по оси ординат — растягивающая сила (Н).

Для испытаний на определение упругих свойств использовались только образцы варианта 1. График деформаций образца, полученный с использованием установленного на нём тензорезистора показан на рис.7.

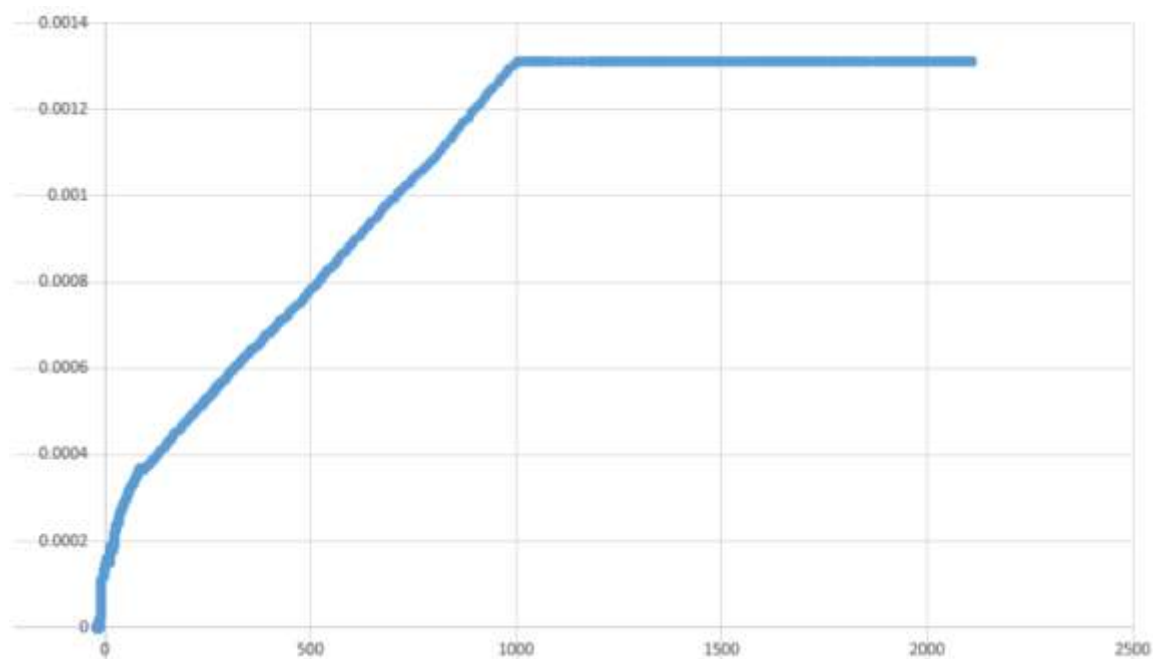


Рис. 7. График деформации при растяжении образца варианта 1. По оси абсцисс — растягивающая сила (Н) ; по оси ординат — относительная деформация (ед). Зона 1 — местное обжатие материала в местах крепления; зона 2 — упругое растяжение материала; зона 3 — повреждение тензорезистора

На графике можно выделить три зоны. В зоне 1, проявляющейся при испытаниях новых образцов, наблюдается резкий рост деформаций при относительно небольшой растягивающей силе. По всей видимости, этот эффект связан с местным обжатием материала в зонах закрепления образца. В зоне 2 наблюдается упругое растяжение материала образца. В зоне 3, в связи с повреждением тензорезистора, показания измерительной системы никак не отражают состояния образца. По отсутствию на графике резкого увеличения деформации после зоны 2, можно сделать вывод, что разрушение тензорезистора наступало до возникновения текучести материала. Из анализа графика деформации, был сделан вывод о том, что при использовании имеющихся в лаборатории средств, достоверную информацию о жесткостных свойствах материала можно получить только анализируя данные в зоне 2.

Для оценки жесткостных свойств материала в упругой зоне 2 построен график напряжений, возникающих в образце при его деформировании (рис. 8) и проведена прямая с высокой степенью достоверности аппроксимирующая этот график. Построенная прямая в координатах "относительная деформация"- "напряжение" (на графике "х" и "у" соответственно) описывается зависимостью

$$y = 2 \cdot 10^{10} \cdot x - 644176.$$

В соответствии с законом Гука, угловой коэффициент является модулем упругости материала образца. Присутствие в выражении свободного члена связано с наличием во время эксперимента зоны обжатия материала (зона 1).

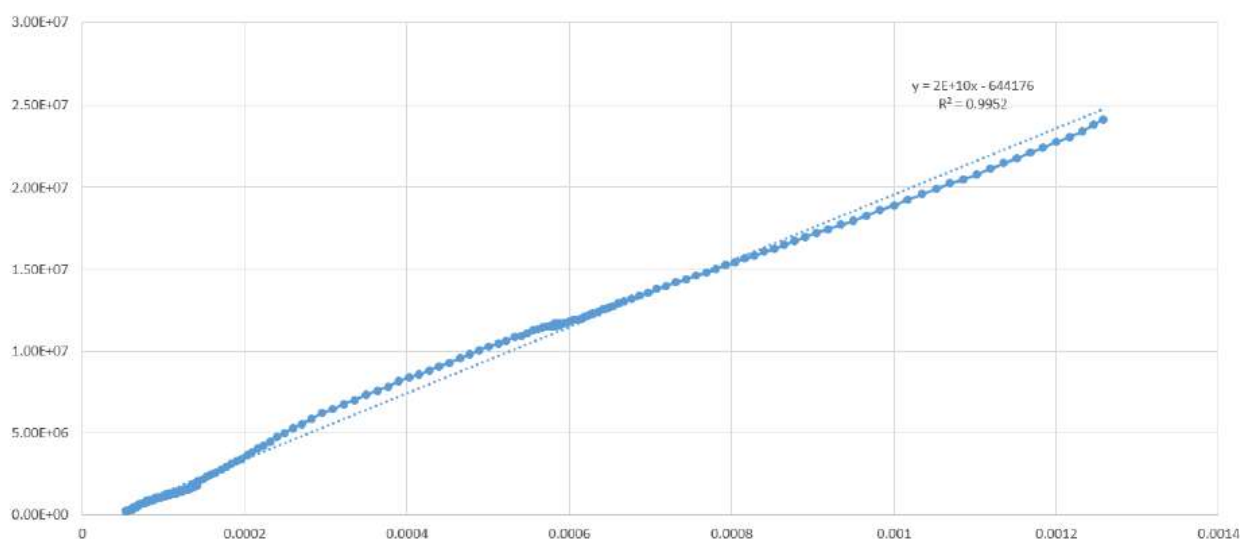


Рис. 8. Напряжения в образце варианта 1 при его деформировании. По оси абсцисс — относительная деформация (ед); по оси ординат — напряжение (Па).

Модули упругости АБС-пластиков, заявляемые производителями, в зависимости от марки, варьируются в широких пределах (1...10 ГПа [10]). При испытании образцов был получен модуль упругости в зоне 2 $E = 2 \cdot 10^{10}$ Па.

Значительное отличие экспериментального значения модуля упругости от справочного может быть объяснено различием составов материалов.

Проведённые опыты по испытанию образцов показали, что изделия из акрилонитробутадиенстирола, изготовленные послойной наплавкой материала, в целом, имеют механические свойства, сходные с изделиями, изготовленными традиционными промышленными способами и могут использоваться для изготовления элементов лабораторных установок, воспринимающих механические нагрузки. Однако, при этом следует учитывать значительное механическое ухудшение свойств изделия при работе на разрыв слоёв и трудности с определением механических свойств для партии материала для трёхмерной печати.

Для решения указанных проблем предлагается при проектировании изделия проводить испытания образцов материала, с использованием простых стендов и при разработке технологии печати изделия учитывать направление наплавки слоёв.

Относительная простота изготовления деталей произвольной формы с прогнозируемыми прочностными и жесткостными свойствами позволяет рассматривать трёхмерную печать пластиком с использованием доступного по цене оборудования как весьма перспективный способ изготовления элементов лабораторных стендов.

На кафедре "Стартовые ракетные комплексы" МГТУ им. Н.Э. Баумана планируется использование изделий, изготовленных путём послойной наплавки пластика, как в качестве прочных частей стендов (оснастки для закрепления моделей, подвесов, кронштейнов для измерительного оборудования и т. п.), так и в качестве разрушающихся при определённой нагрузке одноразовых элементов (напр. для имитации ударных нагрузок). Планируется продолжение работ по исследованию возможностей применения трехмерной печати в образовательной деятельности кафедры.

Список литературы

1. 3d-печать в архитектуре. САПР и графика, 2009, № 8 (154). с. 12-16.
2. Применение аддитивных технологий при проектировании и прототипировании узлов и блоков для ракетно-космических систем. <http://3dtoday.ru/blogs/rec/the-use-of-additive-technologies-in-the-design-and-prototyping-of-asse/> Дата обращения к ресурсу: 12.10.2016г.
3. PSA Group Signs a Strategic Partnership Letter of Intent With Divergent 3D, Charting a New Future of Dramatically More Efficient Automobile Manufacturing <http://www.businesswire.com/news/home/20160915005409/en/PSA-Group-Signs-Strategic-Partnership-Letter-Intent> Дата обращения к ресурсу: 15.10.2016г.
4. Аддитивные технологии представлены на международной выставке «АКТО-2016» <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/additive-technologies-presented-at-the-international-exhibition-akto20/> Дата обращения к ресурсу: 15.10.2016 г.

5. Сапунов С.В. Материаловедение: Учебн. пособие, изд. 2-е Испр. и доп., СПб: изд-во "Лань", 2015г.
6. Кривошеин Д.А., Дмитренко В.П., Федотова Н.В., Основы экологической безопасности производств: Учебн. пособие, СПб: изд-во "Лань", 2015г.
7. Богодухов С.И., Бондаренко Е.В., Схиртладзе А.Г., Сулейманов Р.М., Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов — М: "Машиностроение", 2009г.
8. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Воронцов Р.В., Материалы, доступные в рамках различных технологий 3d печати, Журнал "Современные наукоемкие технологии", №5 2015г.
9. Гидравлические разрывные машины http://npk-tm.ru/article/view/gidravlicheskie_razryvnye_mashiny.html Дата обращения к ресурсу: 05.11.2016г.
10. Описание и марки полимеров — АБС-пластик <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/8/451.html#v451> Дата обращения к ресурсу: 06.11.2016г.