

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ABS-ПЛАСТИКА,
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ**

Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек

**IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE ABS-PLASTIC
MODEL OBTAINED BY THE METHOD OF FLARE SURFACE**

E. D. Kartashova, A. Yu. Muizemnek

Аннотация. *Актуальность и цели.* Устойчивыми тенденциями развития аддитивных технологий являются ежегодный рост объема производимых с их использованием изделий и увеличение доли функциональных изделий в общем объеме производимой продукции при уменьшении доли прототипов. Появляются новые и совершенствуются существующие аддитивные технологии. Появляются более производительные, дешевые и доступные устройства 3D-печати, обеспечивающие быстрое и стабильное изготовление качественной и дешевой продукции. Постоянно появляются новые материалы для 3D-печати. Одними из причин, сдерживающих более широкое применение аддитивных технологий для изготовления функциональных изделий, часто являются относительно низкие характеристики механических свойств материалов, формируемые при 3D-печати. Прежде всего это характеристики сопротивления деформированию и разрушению. Целью работы является исследование сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, и идентификация параметров его модели. В качестве модели материала использована модель Леонова-EPG. *Материалы и методы.* В качестве исследуемого материала выбран ABS-пластик, выпускаемый ООО «РЭК». При изучении сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика выбран метод лабораторных испытаний материалов на растяжение, при идентификации параметров модели материала – численные методы решения оптимизационных задач, реализованные в САЕ-системе. *Результаты.* Построены диаграммы деформирования ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, идентифицированы параметры модели Леонова-EPG. *Выводы.* Особенностью сопротивления растяжению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, является то, что после первого пика напряжений происходит его разупрочнение с последующим упрочнением вплоть до разрушения. Это поведение может быть описано с помощью модели Леонова-EPG.

Ключевые слова: ABS-пластик, 3D-печать, сопротивление деформированию и разрушению, модель Леонова-EPG, идентификация, параметры.

Abstract. *Background.* Stable trends in the development of additive technologies are the annual growth in the volume of products produced with their use and the increase in the share of final products in the total volume of products due to a decrease in the share of prototypes. New additive technologies are emerging and improving. There are more productive, cheap and affordable 3D-printing devices, providing fast stable production of high-quality and cheap products. Constantly there are new materials for 3D-printing. One of the reasons restraining the wider use of additive technologies is often the relatively low characteristics of the mechanical properties of materials formed with 3D printing. First of all, they

are characteristics of resistance to deformation and destruction. The aim of the work is to study the resistance to deformation and destruction of ABS plastic obtained by the method of layer-by-layer fusing and identification of the parameters of its model. The model of the material is the Leonov-EPG model. *Materials and methods.* As the test material selected ABS-plastic, produced by the company REC. When studying the resistance to deformation and destruction of ABS plastic, the method of laboratory testing of materials for stretching was chosen, when identifying the parameters of the material model – methods numerical methods for solving optimization problems implemented in the CAE-system. *Results.* The diagrams of deformation of ABS plastic obtained by the method of layer-by-layer fusion are constructed, the parameters of the Leonov-EPG model are identified. *Conclusions.* A feature of the resistance to stretching of ABS plastic, obtained by the method of layer-by-layer fusion, is that after the first peak of stresses, it softens and then strengthens until it breaks down. This behavior can be described using the Leonov-EPG model.

Key words: ABS plastic, 3D-printing, resistance to deformation and destruction, Leonov-EPG model, identification, parameters.

Введение

Устойчивыми тенденциями развития аддитивных технологий являются ежегодный рост объема производимых с их использованием изделий и увеличение доли функциональных изделий в общем объеме производимой продукции при уменьшении доли прототипов. Так, объем мирового рынка 3D-печати в 2018 г. составил более 12 млрд долл. Прогнозируемые значения мирового рынка 3D-печати в 2019, 2020 и 2021 гг. составляют более 15, 20 и 26 млрд долл. соответственно [1].

Появляются новые и совершенствуются существующие аддитивные технологии. Появляются более производительные, дешевые и доступные устройства 3D-печати, обеспечивающие быстрое стабильное изготовление качественной и дешевой продукции. Одной из наиболее распространенных технологий 3D-печати является технология послойного наплавления (Fused deposition modeling – FDM).

Постоянно появляются новые материалы для 3D-печати. Одним из отечественных предприятий, выпускающих широкую номенклатуру конкурентных пластиков, является ООО «РЭК». Выпускаемый этим предприятием ABS-пластик предназначен для 3D-печати изделий, несущих нагрузку, таких как шестерни механизмов, корпуса, крючки, рукоятки, держатели, так как он обеспечивает высокую прочность и долговечность изделий. Он поддается механической обработке и покраске.

Одними из причин, сдерживающих более широкое применение аддитивных технологий для изготовления функциональных изделий, часто являются относительно низкие характеристики механических свойств материалов, формируемые при 3D-печати. Прежде всего это характеристики сопротивления деформированию и разрушению.

Целью работы является исследование сопротивления деформированию и разрушению ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, и идентификация параметров его модели. В качестве модели материала использована модель Леонова-EPG.

Упруго-вязкопластическая модель материала Леонова-EGP

Рассмотрим модель материала Леонова, которая является частным случаем модели Эйндховена (Eindhoven Glassy Polymer – EGP) [2–4]. Модель Леонова-EGP представляет собой упруго-вязкопластическую модель материала, которая описывает сопротивление деформированию при конечных деформациях с учетом скорости деформации и давления. Она способна описывать механическое поведение некоторых полимерных материалов, таких как поликарбонат, полиэтилентерефталат, полипропилен. Эти полимеры при растяжении, как правило, после первого пика напряжений проявляют разупрочнение с последующим упрочнением, как показано на рис. 1.

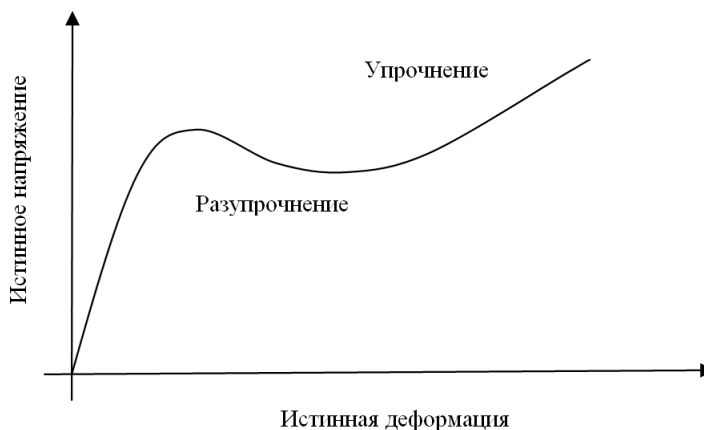


Рис. 1. Схематическое изображение кривой «напряжение–деформация»

Модель материала Леонова-EGP основана на мультипликативном разложении градиента деформации $\mathbf{F}$ на упругую $\mathbf{F}_e$ и пластичную часть $\mathbf{F}_p$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_p. \quad (1)$$

Как обычно, при конечных деформациях левый упругий тензор деформации Коши–Грина определяется выражением

$$\mathbf{b}_e = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_e^T, \quad (2)$$

где T – оператор транспонирования.

Правый пластический тензор деформации Коши–Грина определяется выражением

$$\mathbf{C}_e = \mathbf{F}_p^T \cdot \mathbf{F}_p. \quad (3)$$

С общей точки зрения пластическое течение для изотропного упруго-вязкопластического материала при конечных деформациях определяется следующим образом:

$$-\frac{1}{2} \mathbf{b}_e^L \cdot \mathbf{b}_e^{-1} = \dot{p} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{t}} = \dot{\varepsilon}^p, \quad (4)$$

где $\mathbf{b}_e^L = \mathbf{F} \cdot \frac{d}{dt}(\mathbf{C}_p^{-1}) \cdot \mathbf{F}^T$; точкой сверху обозначена производная по времени; верхним индексом L – объектная производная Ли; $\dot{\epsilon}^p$ – накопленная пластическая деформация; f – поверхность текучести; $\boldsymbol{\tau}$ – тензор напряжений Кирхгофа.

Тензор напряжений Кирхгофа связан с тензором напряжений Коши выражением $\boldsymbol{\tau} = J \boldsymbol{\sigma}$, где J – детерминант градиента деформации $\mathbf{F}$.

Разложение тензора напряжений Коши

В модели Леонова-EGP тензор напряжений Коши разбивается на напряжение упрочнения и напряжение движения, т. е.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_r + \boldsymbol{\sigma}_s. \quad (5)$$

Напряжение упрочнения можно получить на основе модели Эйндровена (6) или модели Нео-Гука (7):

$$\boldsymbol{\sigma}_r = J^{-2/3} G_r \mathbf{b}^d, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_r = J^{-5/3} G_r \mathbf{b}^d. \quad (7)$$

В обоих выражениях G_r обозначает модуль упрочнения; $\mathbf{b}^d$ – девиаторная часть левого тензора деформаций Коши–Грина $\mathbf{b} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$.

Напряжение движения разделяется на девиаторную $\boldsymbol{\sigma}_s^d$ и гидростатическую $\boldsymbol{\sigma}_s^h$ части

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \boldsymbol{\sigma}_s^d + \boldsymbol{\sigma}_s^h. \quad (8)$$

Гидростатическая часть напряжения движения является функцией модуля объемного сжатия K

$$\boldsymbol{\sigma}_s^h = K(J-1)\mathbf{I}, \quad (9)$$

где $\mathbf{I}$ – единичный тензор второго ранга.

Девиаторная часть напряжения движения определяется как

$$\boldsymbol{\sigma}_s^d = G J^{-2/3} \mathbf{b}_e^d, \quad (10)$$

где G – модуль сдвига; $\mathbf{b}_e^d$ – девиаторная часть левого упругого тензора деформации Коши–Грина $\mathbf{b}_e$; J – детерминант градиента деформации.

Функция вязкости

Для модели Леонова-EGP закон пластического течения связан с напряжением Мизеса для девиаторной части тензора напряжений движения Коши следующим образом:

$$(\boldsymbol{\sigma}_s^d)_{eq} = 3 \eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S) \dot{p}, \quad (11)$$

где напряжение Мизеса определяется как:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_s^d : \sigma_s^d} . \quad (12)$$

Функция вязкости $\eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S)$ зависит от температуры T , гидростатического давления σ_m , скорости накопленной пластической деформации $\dot{p}$ и параметра состояния S . Она задается выражением

$$\eta(T, \sigma_m, \sigma_{eq}, S) = \eta_{0,r}(T) \exp\left[\frac{\mu \sigma_m}{\tau_0}\right] \frac{\sigma_{eq}/\tau_0}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_0)} \exp(S), \quad (13)$$

где $S(t, T, \gamma_p) = S_a(t, T) R_p(\gamma_p)$; $S_a(t, T) = c_0 + c_1 \log\left(\frac{t_{eff} + t_a}{t_0}\right)$;

$$R_p(\gamma_p) = \left[\frac{1 + (\tau_0 \exp(\gamma_p))^{r_1}}{1 + (r_0)^{r_1}} \right]^{\frac{r_2-1}{r_1}},$$

где $\eta_{0,r}(T)$ – коэффициент начальной вязкости, который зависит от температуры; τ_0 – характерное напряжение; μ – коэффициент зависимости от давления.

В этом определении функции вязкости накопленная пластическая деформация определяется как функция скорости пластической деформации следующим образом:

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\gamma}^p . \quad (14)$$

Параметр состояния $S(t, T, \gamma_p)$ имеет два сомножителя, которые действуют независимо и учитывают кинетику разупрочнения и старения соответственно:

$R_p(\gamma_p)$ описывает кинетику разупрочнения, которая является функцией накопленной пластической деформации p и трех материальных коэффициентов r_0 , r_1 и r_2 ;

$S_a(t, T)$ описывает кинетику старения, которая зависит от четырех параметров материала: временных коэффициентов c_0 и c_1 , начального времени t_a , отсчетного времени t_0 и эффективного времени t_{eff} . Последнее определяется следующим образом:

$$t_{eff} = \int_0^t \frac{d\xi}{\alpha_T(T(\xi)) \alpha_\sigma(\xi)}, \quad (15)$$

где $\alpha_T(T) = \exp\left[\frac{\Delta U_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$, $\alpha_\sigma(\sigma_{eq}) = \frac{\sigma_{eq}/\tau_a}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_a)}$, $\tau_a = \frac{RT}{v_a}$,

где $R = 8,314472 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная; ΔU_a – энергия активации; T_{ref} – отсчетная температура; T – температура испытания; v_a – активационный объем, ΔU_a и v_a являются двумя дополнительными параметрами модели материала.

В модели Леонова-EGP напряжение текучести зависит от скорости и температуры. Оно определяется следующим образом:

$$\tau_y = \tau_0 \sinh(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0^*), \quad \dot{\epsilon}_0^* = \dot{\epsilon}_0 \exp(-\Delta U_a/RT), \quad (16)$$

где индекс 0 обозначает эталонное значение. Скорость деформации определяется из градиента деформации и производной правого тензора деформаций Коши–Грина по времени следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \mathbf{F}^{-T} \cdot \dot{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{F}^{-1}. \quad (17)$$

Пластические деформации возникают только в том случае, если $(\sigma_s^d)_{eq} = \frac{\sigma_{eq}/\tau_a}{\sinh(\sigma_{eq}/\tau_a)}$ становится больше τ_y .

Результаты лабораторных испытаний ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления

Испытаниям предшествовал процесс изготовления лабораторных образцов, которые были вырезаны из пластин, имеющих размеры в плане $180 \times 180 \text{ мм}$ и толщину от 1 до 1,25 мм в зависимости от направления нитей. Использовались стандартные плоские образцы, имеющие ширину рабочей части 10 мм и длину 150 мм. Толщина образцов соответствовала толщине пластины. Пластины были напечатаны на 3D-принтере Wanhao 6 [5] из ABS-пластика ООО «РЭК» [6]. 3D-печать была осуществлена при следующих технологических параметрах: высота слоя 0,1 мм; плотность заполнения 100 %; скорость печати 50 мм/с; температура печати 230 °C; температура стола 100 °C; диаметр пластика 1,75 мм; поток пластика 100 %; диаметр сопла 0,4 мм.

При печати нити расплавленного пластика располагались параллельно диагоналям основания пластины, меняя направление на 90° от слоя к слою. Всего было изготовлено шесть лабораторных образцов. У двух образцов направление нитей нечетных слоев совпадало с продольной осью лабораторного образца, у двух лабораторных образцов отклонение составляло 22,5°, у двух – 45°. Результаты предварительных измерений размеров и масс лабораторных образцов представлены в табл. 1.

Испытания лабораторных образцов на растяжение были проведены на универсальной испытательной машине МИ-40КУ с числовым программным управлением. В процессе испытаний образцы доводились до разрушения.

Таблица 1

Характеристики лабораторных образцов

Номер образца	Направление нитей, град	Толщина рабочей части, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Масса, г
1	0	1,00	10,00	150,60	2,017
2	0	1,25	10,00	150,20	2,174
3	22,5	1,05	10,25	150,10	1,961
4	22,5	1,25	10,05	150,00	2,180
5	45	1,10	10,25	149,60	1,890
6	45	1,10	10,25	149,70	2,060

В процессе испытаний снималась диаграмма деформирования в координатах «нагрузка на образец – удлинение образца», по которой строилась диаграмма деформирования в координатах «напряжение – деформация». На рис. 2 приведены диаграммы деформирования шести лабораторных образцов.

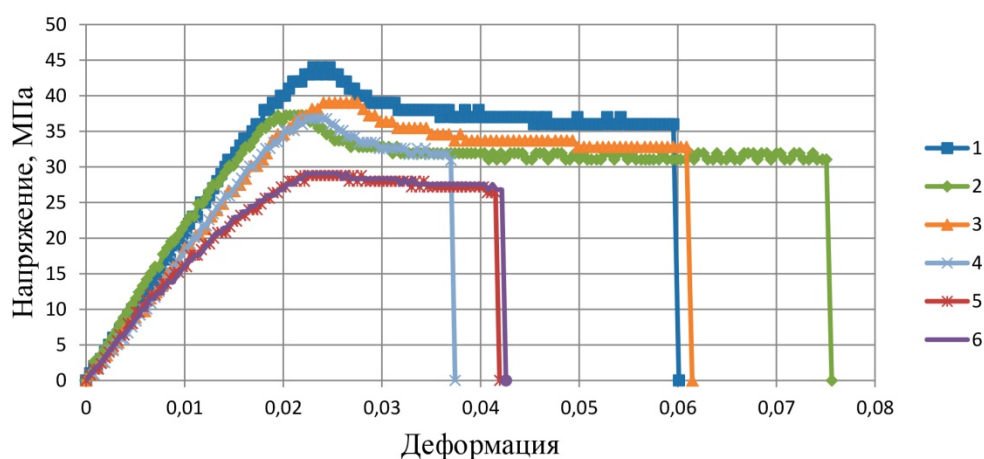


Рис. 2. Диаграммы деформирования: 1, 2 – направление нитей 0°; 3, 4 – направление нитей 22,5°; 5, 6 – направление нитей 45°

Анализ диаграмм деформирования позволил сделать следующие выводы:

- максимальные значения пика напряжений и тангенса угла наклона касательной к диаграмме деформирования на начальном участке имеют место при значении угла, характеризующего отклонение направления «нитей» от продольной оси лабораторного образца (угол α), равном нулю;
- при увеличении угла α значения пика напряжений и тангенса угла наклона касательной к диаграмме деформирования на начальном участке уменьшаются;
- при значениях угла α , равных 0 и 22,5°, имеет место значительный разброс деформации разрушения;
- при всех значениях угла α после первого пика напряжений на диаграмме деформирования проявляется разупрочнение с последующим упрочнением.

**Параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP
для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления**

Упруго-вязкопластическая модель Леонова-EGP имеет 20 параметров. Эти параметры идентифицированы для случая растяжения образцов, при котором отклонение направления «нитей» от продольной оси лабораторного образца (угол α) было равно нулю, т.е. для случая наибольшего сопротивления образца деформированию.

Идентификация параметров модели Леонова-EGP осуществлялась в следующем порядке.

Плотность материала определялась как отношение массы лабораторного образца, которая определялась взвешиванием на аналитических весах, к объему лабораторного образца. Объем образца определялся как произведение площади лабораторного образца к его толщине, которая измерялась микрометром.

Модуль Юнга определялся как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат таким образом, чтобы минимизировать среднее квадратическое отклонение этой прямой от диаграмм деформирования. В рассматриваемом случае минимизировалось отклонение от двух диаграмм деформирования, для которых $\alpha = 0$.

Коэффициент Пуассона определялся экспериментально.

Идентификация других параметров упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP осуществлялась по критерию среднее квадратического отклонения диаграммы деформирования, построенной по результатам испытаний на растяжение, и диаграммы, построенной по результатам моделирования соответствующего процесса испытаний.

Идентификация параметров осуществлялась пошагово. На каждом шаге определялись значения двух параметров. После определения значений всех параметров процесс поиска повторялся до тех пор, пока результаты моделирования и эксперимента не показывали достаточную согласованность. Результаты идентификации представлены в табл. 2. Сопоставление диаграмм деформирования, представленных на рис. 3, позволяет оценить степень согласованности результатов моделирования и эксперимента при идентификации параметров модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении в направлении максимального сопротивления деформированию (при $\alpha = 0$).

Таблица 2

Результаты идентификации параметров модели

Наименование характеристики	Значение
1	2
Плотность ρ , кг/м ³	890
Модуль Юнга E , МПа	2038
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Характерное напряжение τ_0 , МПа	0,67
Отсчетная скорость деформации $\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	$1,5 \cdot 10^{28}$

Модуль упрочнения G_r , МПа	48
Коэффициент начальной вязкости $\eta_{0,r}$, МПа·с	$1,5 \cdot 10^{17}$
Коэффициент зависимости от давления μ_0	0,1
Первый коэффициент разупрочнения r_0	0,995
Второй коэффициент разупрочнения r_1	2000
Третий коэффициент разупрочнения r_2	-25
Первый временной коэффициент c_0	-5
Второй временной коэффициент c_1	4
Начальное время t_a , с	100
Отсчетное время t_0 , с	1
Энергия активации ΔU , 10^{-3} Дж·моль $^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Активационный объем v_a , 10^9 м 3 ·моль $^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Универсальная газовая постоянная R , Дж·К $^{-1}$ ·моль $^{-1}$	8,31447
Отчетная температура T_{ref} , К	353
Температура испытаний T , К	300

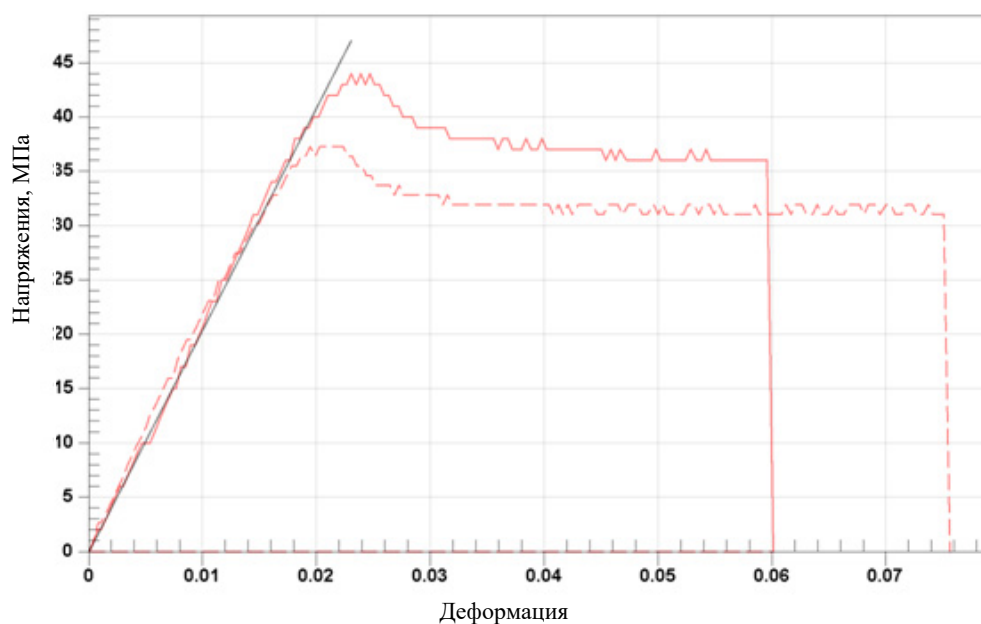


Рис. 3. Диаграммы деформирования: сплошная линия – результаты моделирования; точки – результаты эксперимента

Аналогично были идентифицированы параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении в других направлениях приложения нагрузки (при $\alpha \neq 0$).

Сопоставление диаграмм деформирования (рис. 4), полученных экспериментально, с диаграммами деформирования, полученными в результате

компьютерного моделирования, позволило сделать вывод о возможности использования упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для описания сопротивления деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при всех углах α . В том числе это касается и описания характерной особенности сопротивления растяжению ABS-пластика, заключающейся в происходящем после первого пика напряжений разупрочнении с последующим упрочнением вплоть до разрушения.

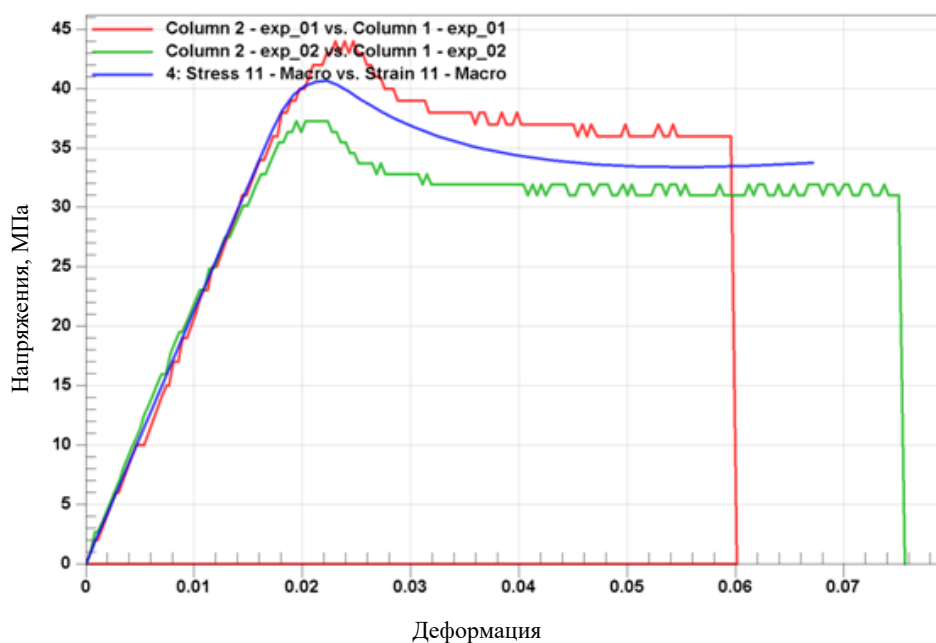


Рис. 4. Диаграммы деформирования: сплошная линия – результаты моделирования; точки – результаты эксперимента

Заключение

В работе исследовано сопротивление деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при различных углах ориентации «нитей» наплавленного пластика в слое. В результате исследования:

- выявлена характерная особенность сопротивления растяжению ABS-пластика, заключающейся в происходящем после первого пика напряжений разупрочнении с последующим упрочнением вплоть до разрушения. Эта особенность проявляется при углах $\alpha = 0$ и $\alpha = 22,5$;
- выявлена зависимость сопротивления деформированию ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, от угла α (угла ориентации «нитей» наплавленного пластика в слое);
- идентифицированы параметры упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления, при растяжении. Используемая в работе последовательность иденти-

фикации может быть использована при определении параметров упруго-вязкопластической модели Леонова-EGP для других материалов.

Дальнейшими направлениями совершенствования описания сопротивления деформированию ABS-пластиков, полученных методом послойного наплавления, являются:

- использование ортотропных упругих, упругопластических или упруго-вязкопластических моделей;
- использование теории слоистых композитов, что позволит учесть значения углов укладки «нитей» расплавленного пластика в каждом слое;
- использование многоуровневых моделей, что позволит в более полной степени учесть действительную структуру детали из ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления.

Библиографический список

1. URL: <https://drive.google.com/file/d/0Bw-WWMWmJ3F0WXN2MElwSDZnVWc/view>
2. Leonov, A. I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer melts / A. I. Leonov // Rheol. Acta. – 1976. – Vol. 15. – P. 85–98.
3. Leonov, A. I. Nonlinear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids / A. I. Leonov, A. N. Prokunin. – New York : Chapman and Hall, 1994. – 297 p.
4. Leonov, A. I. Constitutive Equations for Viscoelastic Liquids: Formulation, Analysis and Comparison with Data / A. I. Leonov // Advances in the flow and rheology of nonnewtonian fluids. – New York, 1999. – P. 519–576.
5. URL: <https://wanhaorus.ru/p329104877-printer-wanhao-duplicator.html>
6. URL: <https://rec3d.ru/shop/plastik-dlya-3d-printerov/abs/abs-plastik-rec-1-75-naturalnyj>

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант,
Пензенский государственный университет
E-mail: katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitryevna
postgraduate student,
Penza State University

Муйземнек Александр Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Muyzemnek Alexander Yuryevich
doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University

УДК 621

Карташова, Е. Д.

Идентификация параметров модели ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 130–140.