

**Ключевые слова:**

аддитивные технологии, CAE-программы, испытания на растяжение, ПЛА-пластик, коэффициент запаса, виртуальный эксперимент, натурные испытания, статическая прочность

ПРИМЕНЕНИЕ T-FLEX АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА ОБРАЗЦА ПЛА-ПЛАСТИКА НА РАСТЯЖЕНИЕ

**Анастасия МАРЕНКОВА, Валерия ДИКАРЕВА, Павел ПЕТРОВ,
Борис САПРЫКИН**

Рассмотрена возможность применения современных CAE-программ для прогнозирования способности образца из полимерного материала выдерживать нагрузки, превышающие расчетные. Сделана оценка возможности расчета с применением CAE-системы коэффициента запаса образца ПЛА-пластика на этапе выбора формы образца для испытания на растяжение.

Актуальными направлениями развития аддитивных технологий являются:

- разработка новых материалов и совершенствование методов испытаний свойств изделий, полученных с применением аддитивных технологий;
- разработка новых и совершенствование известных аддитивных технологий;
- разработка и совершенствование программного обеспечения класса CAD, CAM, CAE для обеспечения потребностей аддитивного производства на всех этапах подготовки производства;
- разработка стандартов для аддитивного производства;
- подготовка кадров для аддитивного производства.

В данной работе основное внимание уделено возможности применения современных CAE-программ для прогнозирования способности образца исследуемого материала выдерживать прилагаемые к нему нагрузки, превышающие расчетные. Прогнозирование выполняется на этапе подбора формы образца. Образец материала изготавливается из полимерного материала (пластика), обработанного по технологии FDM/FFF (экструзия материала в соответствии с ГОСТ 57558-2017 [1]). Тематика данной статьи соответствует

первому из перечисленных выше актуальному направлению развития аддитивных технологий.

Рассматриваемые в статье образцы изготавливаются из материала полилактид (ПЛА). Данный материал является биоразлагаемым, биосовместимым, термопластичным алифатическим полиэфиром, мономером которого является молочная кислота. Изделия, получаемые из ПЛА по технологии FDM/FFF, имеют короткий срок службы: например, пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара, а также находят применение в медицине для производства хирургических нитей и штифтов [2]. Учитывая особенности данного материала, типовой режим 3D-печати по технологии FFF на персональном принтере следующий:

- температура нагрева экструдера – 210–220 °С,
- скорость подачи – 45–65 мм/с,
- температура нагрева рабочего стола – 0–70 °С.

Несмотря на короткий срок службы изделий для конечного потребителя, ПЛА на этапе производства нити для 3D-печати проходит лабораторные испытания, направленные на оценку его механических и технологических свойств. При этом испытания образцов проводят в соответствии с ГОСТ 11262-2017 [3] и связанном с ним ГОСТ 33693-2015 [4].

Данные стандарты (ГОСТы) предполагают, что образцы материала изготавливаются методом литья под давлением, прессованием либо путем механической обработки; имеют сплошную структуру. Образец материала, полученный методом 3D-печати по технологии FDM/FFF имеет иную структуру – набор слоев одного и того же материала, каждый из которых плотно связан друг с другом. Сцепление слоев друг с другом обеспечивается за счет когезии материала образца. В зависимости от ориентации изготавливаемого образца во время 3D-печати, при испытании на растяжение будут оцениваться механические свойства либо материала образца, либо границы соединения двух слоев. В связи с этим, для постановки испытания по методу растяжения важным вопросом является выбор формы образца пластика, полученного методом 3D-печати по технологии FDM/FFF, а также расположение образца в захватах испытательной машины.

ГОСТ 11262-2017 предусматривает общее требование к способу установки образца в захватах испытательной машины [3]: «Образец для испытания растягивают вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью, в процессе растяжения измеряют нагрузку, выдерживаемую образцом, и удлинение образца и определяют заданные показатели». Таким образом, расположение слоев должно, по возможности, соответствовать расположению продольной оси образца.

Для выбора формы образца возможно прибегнуть к помощи специализированных CAE-программ, реализующих алгоритмы имитационного моделирования, в частности, позволяющих поставить виртуальный эксперимент. К числу таких программ относится программа «T-FLEX Анализ», разработанная российской компанией «Топ Системы» [5], интегрированная в программный комплекс T-FLEX.

Цель данной статьи являлась оценка возможности расчета с применением CAE-системы коэффициента запаса образца ПЛА-пластика на этапе выбора формы образца для испытания растяжением.

Под термином «коэффициент запаса» будем понимать способность образца исследуемого материала выдерживать прикладываемые к нему нагрузки выше расчетных. В практике инженерных расчетов различают несколько вариантов данного показателя, в том числе [6]:

- коэффициент запаса прочности по напряжениям;
- коэффициент запаса прочности по предельным нагрузкам;
- коэффициент запаса прочности по предельной деформации.

В нашем случае выбираем коэффициент запаса по напряжениям. Известно, что в зависимости от теории (критерия) прочности различают [7, 8]:

- коэффициент запаса по нормальным напряжениям (первая теория прочности);
- коэффициент запаса по касательным напряжениям (третья теория прочности);
- коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям.

В общем виде расчетная формула для определения коэффициента запаса по напряжениям записывается в виде [7]:

$$n \leq \frac{[\sigma_{\text{пред}}]}{\sigma_{\text{расчет}}}, \quad (1)$$

где n – коэффициент запаса по напряжениям; $[\sigma_{\text{пред}}]$ – допустимое напряжение для материала образца; $\sigma_{\text{расчет}}$ – расчетное значение напряжения в образце материала в произвольной точке его объема.

В качестве допустимого напряжения $[\sigma_{\text{пред}}]$ для пластичных материалов принято рассматривать величину предела текучести материала при статических (постоянных или медленно изменяющихся) нагрузках [7, 8]. В случае испытания растяжением в соответствии с ГОСТ принимается, что схема напряженного состояния должна быть линейной. Тогда коэффициент запаса n может быть определен по любому из трех вышеперечисленных критериев оценки коэффициента запаса по напряжениям. В случае наличия сложного напряженного состояния, предпочтение отдается применению коэффициента запаса по эквивалентному напряжению. Эквивалентные напряжения вычисляются исходя из компонент тензора напряжений.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить характеристики ПЛА-пластика для постановки виртуального эксперимента по растяжению в программе «T-FLEX Анализ»;
- выбрать форму образца и его размеры для виртуального эксперимента;
- выполнить натурные испытания;
- для нескольких форм образца выполнить сравнительный анализ результатов виртуального эксперимента с натурными испытаниями.

Комплекс механических и физических свойств ПЛА представлен в табл. 1 [9]. Для расчетов в CAE-программе «T-FLEX Анализ» вводим допущение о изотропности в пределах одного слоя материала образца, изготовленного по технологии FDM/FFF. Для проведения натурального эксперимента были изготовлены образцы (образец 1, см. рис. 1а, табл. 2) из ПЛА, напечатанные по технологии FFF на персональном принтере PICASO 3D Designer с размером области 3D-печати – 200 × 200 × 210 мм; плотность заполнения внутреннего сечения образца – 100%; диаметр выходного отверстия сопла – 0,3 мм; расположение образца при 3D-печати – в плоскости рабочего стола 3D-принтера.

Таблица 1. Свойства ПЛА

Величина	Значение
Температура плавления, °С	173–178
Температура размягчения, °С	50
Температура стеклования, °С	60–65
Относительное удлинение при разрыве, %	3,8
Предел текучести, МПа	62,0
Прочность на разрыв/сжатие, МПа	57,8
Модуль упругости при растяжении, МПа	3300,0
Коэффициент Пуассона	0,39
Плотность, кг/м ³	1290,0
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	540,0
Теплопроводность, Вт/(мм·К)	2,0
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	0,000075
Влагопоглощение, %	0,5–50

На рис. 1а представлен образец (Образец 1) для проведения натурального испытания и виртуального эксперимента. Образец имеет непропорционально уменьшенные размеры в сравнении с рекомендациями ГОСТ 33693-2015 для многоцелевого образца типа А. Размеры непропорционально уменьшенного образца выбирались с учетом хорошо формализованных рекомендаций к размерам образца, представленным в ГОСТ 1497-87.

На рис. 1б представлены образцы типа А (А1, А2, А12, А18), форма и размеры которых выбраны также по ГОСТ 33693-2015, только для постановки виртуального эксперимента для выполнения сравнительной оценки расчета коэффициента запаса и определения влияния непропорциональности выбора размеров на величину коэффициента запаса прочности.

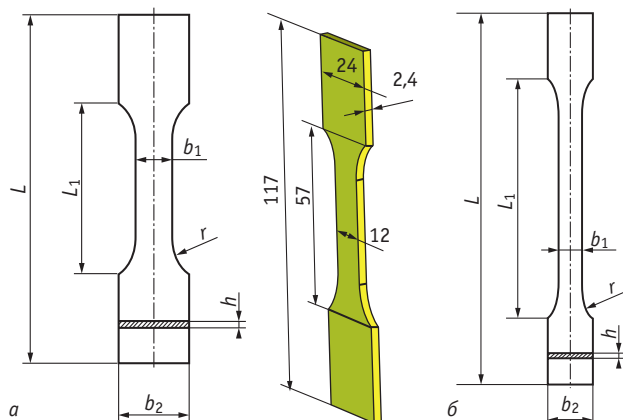


Рис. 1. Форма образца для проведения эксперимента: а – образец (Образец 1) для натурального и виртуального эксперимента; б – образец типа А для виртуального эксперимента

Таблица 2. Размеры образцов

Размер, мм	Образец 1	Образец 2 (тип А1)	Образец 3 (тип А2)	Образец 4 (тип 12)	Образец 5 (тип 18)
Общая длина, L , мм	117,0	170,0	150,0	75,0	23,8
Расстояние между широкими частями с параллельными сторонами, L_1 , мм	57,0	109,3	108,0	58,0	13,8
Ширина головки, b_2 , мм	24,0	20,0	20,0	10,0	2,5
Ширина узкой (рабочей) части, b_1 , мм	12,0	10,0	10,0	5,0	1,25
Толщина, h , мм	2,4	4,0	4,0	2,4	0,5
Радиус закругления, r , мм	15,0	24,0	60,0	30,0	3,2

Размеры всех применяемых в данной работе образцов представлены в табл. 2. Выбор размеров основан на анализе всего номенклатурного ряда образцов по ГОСТ 33693-2015. Образцы 2 и 3 являются многоцелевыми; образцы 4 и 5 – пропорциональными. Образец 1 является непропорциональным и промежуточным между образцом А12 и А1.

Испытания растяжением образцов ПЛА-пластика проведены с применением испытательной машины LFM-L 10, которая имеет следующие технические данные:

- номинальную силу, кН – 10;
- максимальную скорость перемещения зажима, мм/мин – 1000;
- максимальный ход траверсы, мм – до 1000.

Испытанию подвергались только образцы, форма и размеры которых представлены на рис. 1а. На рис. 2 показаны образец после проведения испытания и соответствующая ему диаграмма нагружения.

Виртуальный эксперимент проводился с применением САЕ-программы «Т-FLEX Анализ». При проведении виртуального эксперимента были последовательно подвергнуты растяжению образцы, пред-

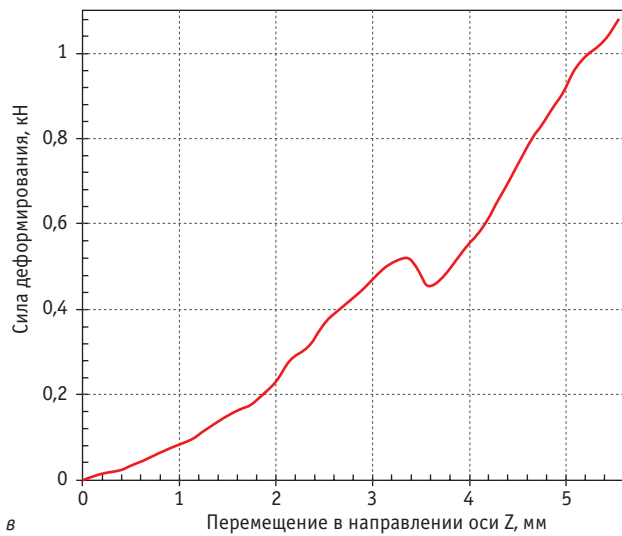
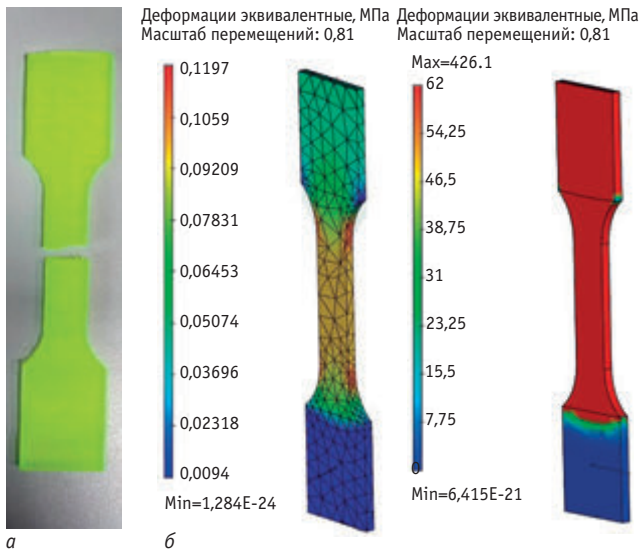


Рис. 2. Результаты натурального и виртуального эксперимента для образца 1: *а* – образец 1 после проведения натурального эксперимента; *б* – образец 1 после проведения виртуального эксперимента: распределение эквивалентной деформации и напряжения; *в* – диаграмма нагружения по результатам натурального эксперимента

ставленные в табл. 2. Растяжение проводилось под действием силы 10 кН (соответствует номинальной силе испытательной машины LFM-L 10). Расчетная схема, принятая при постановке виртуального эксперимента, представлена на рис. 3а.

На рис. 4 и 5 представлены результаты виртуального эксперимента для образцов типа А1, А2, А12 и А18 – распределение коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям и эквивалентной деформации. Сопоставление двух параметров позволяет качественно оценивать область, в пределах которой возможно разрушение образца.

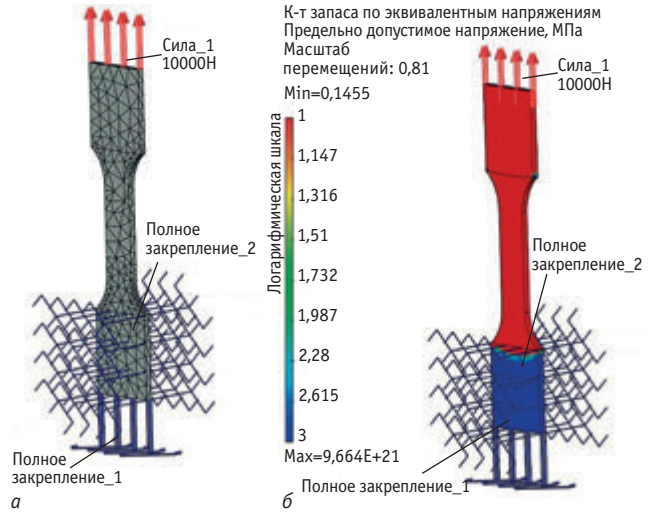


Рис. 3. Расчетная схема виртуального эксперимента для образца 1: *а* – расчетная схема; *б* – коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям

Образец А1 (рис. 4а) и образец А2 (рис. 4б) имеют максимальную по длине рабочую часть; вся деформация сосредоточена на длине L_1 и практически не заходит на головку шириной b_2 . Образец А12 (рис. 4в) и образец А18 (рис. 4з), напротив, при малом размере характеризуются наличием достаточно протяженной области, в пределах которой наблюдается неравномерность распределения эквивалентной деформации $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ (рис. 5в и г). Под термином «эквивалентная деформация» понимается деформация, вычисляемая из компонентов тензора деформаций по формуле [10]:

$$\epsilon_{\text{ЭКВ}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)}{2} + \frac{3(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2)}{4}}, \quad (2)$$

где $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ – линейная деформация в направлении оси OX, OY, OZ , соответственно, глобальной системы координат; $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – угловая деформация в плоскости OXY, OYZ, OXZ , соответственно, глобальной системы координат.

Как показывает виртуальный эксперимент, образец А18 является наиболее нагруженным (см рис. 5з); эквивалентная деформация распространяется на широкую часть b_2 образца, что для простейшего испытания, направленного на определение механических свойств материала, является недопустимым. Можно предположить, что минимизация размеров образца до восьмикратного (тип А18, коэффициент масштабирования 1:8 по отношению к образцу типа А1) не является удачным решением и применение образца данного типа (А18) будет приводить к неточным результатам в терминах, определяемых ГОСТ 11262-2017 применительно как для традиционных образцов пластика, так и образцов пластика,

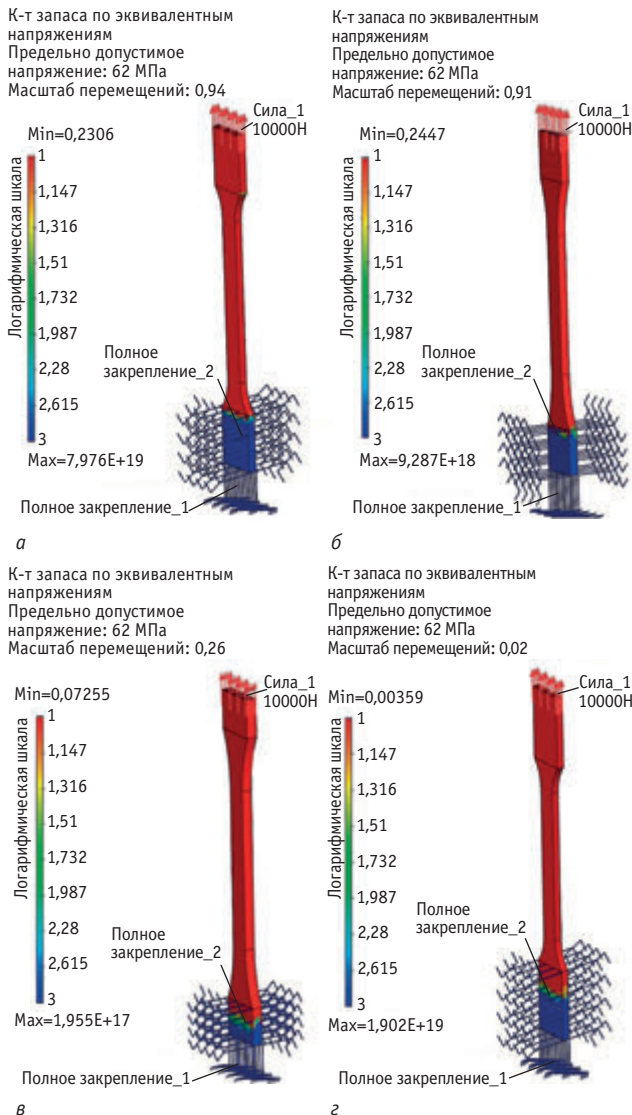


Рис. 4. Результаты виртуального эксперимента: коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям: а – образец 2 (тип A1); б – образец 3 (тип A2); в – образец 4 (тип A12); г – образец 5 (тип A18)

изготовленных по аддитивной технологии (например, FDM/FFF).

Постановка испытания на растяжение выполняется в предположении, что напряженное состояние на рабочей длине L_1 образца сохраняется линейным при нагружении осевой силой. В этом случае, образец A12 (см. рис. 4в и 5в) работает лучше по сравнению с образцом A18, но риск распространения деформации на нижнюю широкую часть образца остается. Преимуществом образца A12 перед образцом A18 являются его габаритные размеры (см. табл. 2); образец A12 может быть изготовлен по технологии FDM/FFF с применением 3D-принтеров при размере области 3D-печати до $120 \times 135 \times 100$ мм.

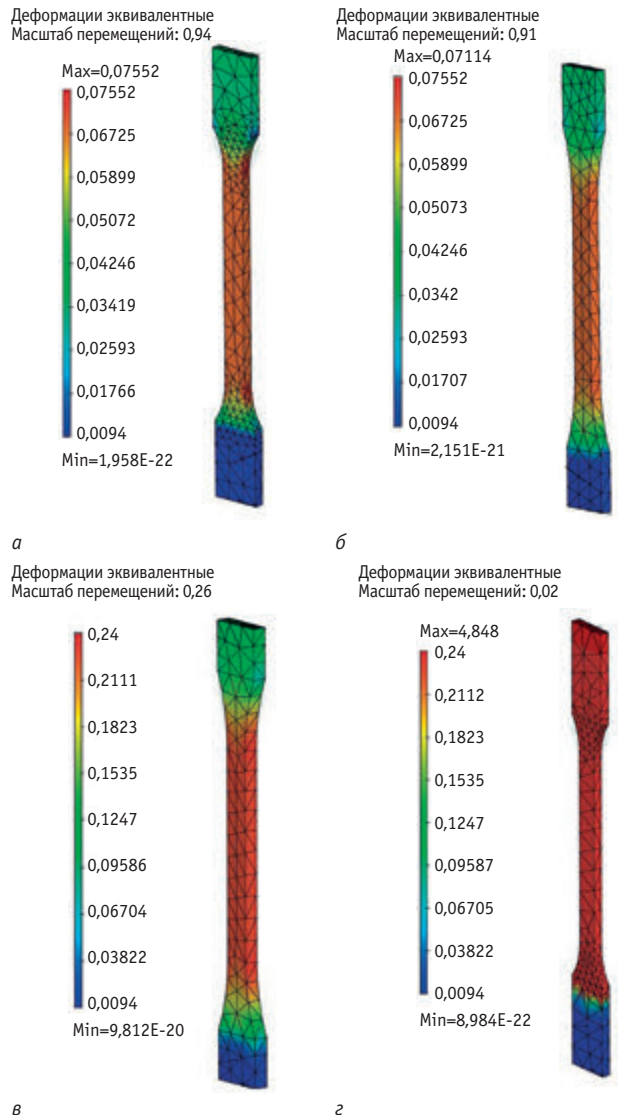


Рис. 5. Распределение эквивалентной деформации: а – образец 2 (тип A1); б – образец 3 (тип A2); в – образец 4 (тип A12); г – образец 5 (тип A18)

На рис. 6 представлены результаты сравнения значения коэффициента запаса по еще двум из вышеописанных критериев прочности – коэффициента запаса по нормальным напряжениям и коэффициента запаса по касательным напряжениям. Сравнительная оценка представлена для образца 1, образца 2 (тип A1) и образца 4 (тип A12), как наиболее интересных, для последующего изучения свойств образца, изготовленного по аддитивной технологии FDM/FFF (изучение свойств образца, полученного методом 3D-печати выходит за рамки цели и задач данной работы).

Тип образца, а соответственно и форма, влияет на его устойчивость при растяжении (см. рис. 6). Так, в виртуальном эксперименте диапазон значений перемещения в направлении Z

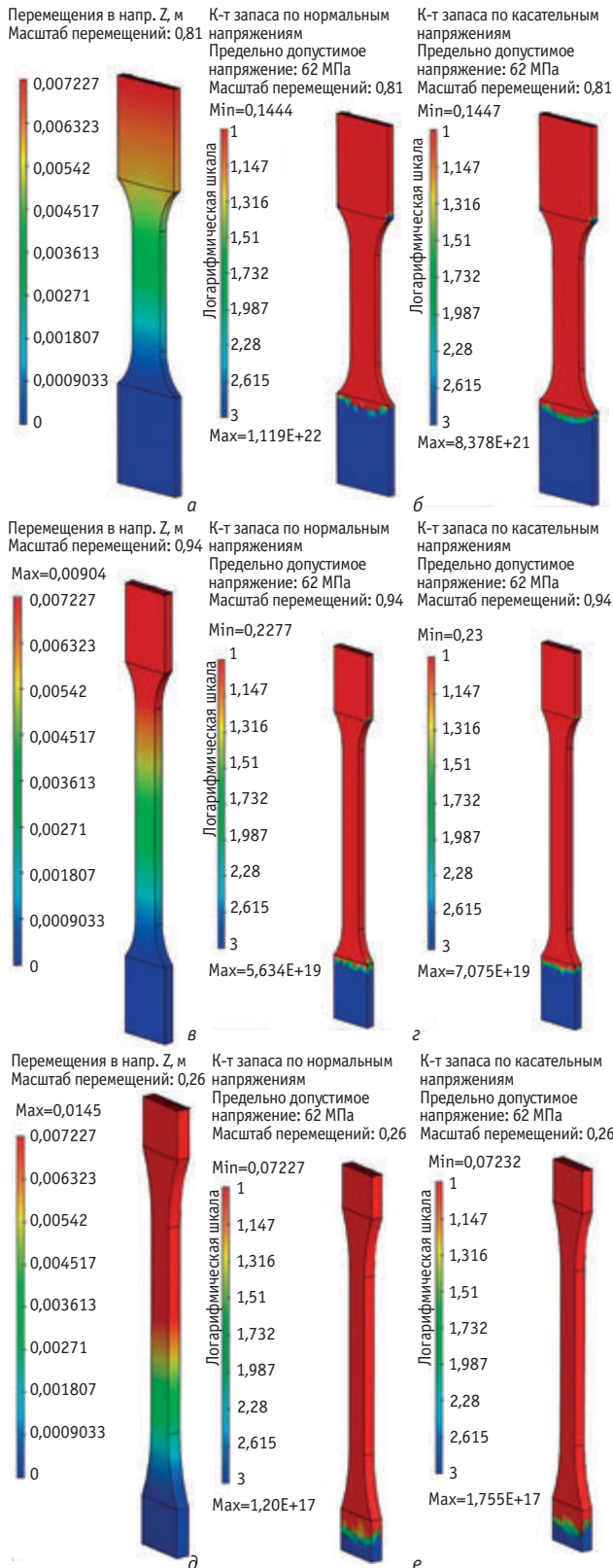


Рис. 6. Сравнительная оценка результатов виртуального эксперимента по коэффициенту запаса
а – образец 1; б – образец 1; в – образец 2 (тип A1); г – образец 2 (тип A1); д – образец 4 (тип A12); е – образец 4 (тип A12)

от 2,71 к 3,613 мм смещается вдоль рабочей длины образца в зависимости от его типа. Для образца типа A12 вышеуказанная область значений расположена ближе к нижней широкой части b_2 образца; для образца типа A1 – в центральной части рабочей L_1 ; для образца 1 – ближе к верхней широкой части образца. Возможно, что данное наблюдение, сделанное в виртуальном эксперименте, может быть принято в качестве индикатора положения места возможного разрушения образца при растяжении.

Для образца 1 сделанное предположение подтверждается натурным экспериментом (см. рис. 2а и рис. 6). Образцы типа A1 и типа A12 испытаны только в виртуальном эксперименте; для них требуется дополнительная проверка сделанного предположения о качественном прогнозировании области разрушения образца.

Сравнение значений коэффициента запаса, полученных для образцов разного типа и рассчитанных с учетом разных критериев прочности, показывает, что в случае линейного напряженного состояния вышеописанные критерии оценки прочности работают одинаковым образом (см. рис. 6).

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

С помощью САЕ-системы «Т-FLEX Анализ» выполнена оценка статической прочности различного типа образцов пластика ПЛА (см. рис. 1 и табл. 2) – поставлен виртуальный эксперимент. Для образца 1 (см. рис. 1) результаты виртуального эксперимента подтверждены натурным экспериментом. На основе полученных для образца 1 результатов проведен дополнительный виртуальный эксперимент для образцов типов A1, A2, A12, A18 (см. рис. 1б и табл. 2).

Принятые для сравнительного анализа критерии прочности позволяют оценить значение коэффициента запаса и на качественном уровне оценить риски появления разрушения в виртуальном эксперименте по растяжению плоского образца (см. рис. 6). Предполагаем, что при отсутствии в расчетной модели виртуального эксперимента критерия разрушения появление трещины может быть идентифицировано по косвенным признакам – сочетанию значений перемещения в направлении оси Z, эквивалентной деформации, коэффициента запаса и результатам натурального эксперимента.

Выдвинутая гипотеза об идентификации в виртуальном эксперименте области разрушения плоского образца по расположению характерных значений перемещения подтверждается натурным экспериментом для образца 1; для образцов типа A1 и типа A12 – требуются дополнительные натурные испытания, что является предметом будущих публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полилактид>. Ссылка доступна по состоянию на 26 апреля 2020 года.
3. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение.
4. ГОСТ 33693-2015 (ISO 20753:2008) Пластмассы. Образцы для испытания (с Поправкой).
5. Свидетельство № 2011618726 о государственной регистрации программы для ЭВМ. T-FLEX Анализ — система конечно-элементного анализа изделий. Правообладатель: ЗАО «Топ Системы». Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 09.11.2011.
6. Запаса прочности коэффициент // Железное дерево — Излучение. — М.: Большая российская энциклопедия, 2008. С. 256. — (Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / Гл. ред. Ю.С. Осипов; 2004—2017, т. 10). ISBN 978-5-85270-341-5.
7. **Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П.** Сопротивление материалов: Учеб. для вузов / 2-е изд. испр. — М.: Высш. шк., 2001. — 560 с.: ил.
8. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Писаренко Г.С.; 2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Наук. думка, 1988. 736 с. ISBN 5-12-000299-4.
9. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полилактид>. Ссылка доступна по состоянию на 26 апреля 2020 года.
10. Справка по конечно-элементному анализу в системе T-FLEX. — М.: ЗАО «Топ Системы».

МАРЕНКОВА Анастасия Викторовна –
Студентка 4-го курса кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московского политехнического университета

ДИКАРЕВА Валерия Витальевна –
Студентка 4-го курса кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московского политехнического университета

ПЕТРОВ Павел Александрович –
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московского политехнического университета

САПРЫКИН Борис Юрьевич –
старший преподаватель кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»,
заведующий лабораторией аддитивных технологий
Московского политехнического университета

ПРОМ-VOLGA 2020
МЕТАЛЛООБРАБОТКА.
МАШИНОСТРОЕНИЕ. СВАРКА

XX межрегиональная специализированная выставка

www.zarexpo.ru

18-20 ноября 2020г.
Волгоград Арена

ВЦ «ЦАРИЦЫНСКАЯ ЯРМАРКА»

тел./факс: (8442) 26-50-34
prom@zarexpo.ru



Формируем будущее вместе

Узнать больше: sandvik.coromant.com

SANDVIK
Coromant