

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Оснастка для испытания на растяжение термопластика в форме прутка для FDM-печати / В.Б. Распопина, Л.И. Шеметов, Д.В. Вершинин, С.Н. Терёхин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.01

Please cite this article in English as (Perm Polytech Style):

Raspopina V.B., Shemetov L.I., Vershinin D.V., Terekhin S.N. The equipment for tensile testing the filament thermoplastic for FDM printing. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 2, pp. 5-16. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.01

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 2, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.01

УДК 539.3

В.Б. Распопина, Л.И. Шеметов, Д.В. Вершинин, С.Н. Терёхин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

**ОСНАСТКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТИКА
В ФОРМЕ ПРУТКА ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ**

Разработан прототип специальной оснастки для испытаний на растяжение прутка для FDM-печати или филамента. В рамках интеграции данной технологии в производственные циклы предприятий машиностроения появилась необходимость контроля качества филамента. Существующее в настоящий момент оборудование в испытательных машинах для испытания тросов, проволок, нитей и других изделий подобного типа – это захваты улиточного типа. Данное оборудование не отвечает характеристикам филамента. Это было выявлено в ходе проведения исследований. Для получения соответствующих данных в работе задействованы конечно-элементный анализ в автоматизированной среде и натурные эксперименты. Был использован филамент из термопластика PetG. В работе были получены две группы данных. Первая группа данных позволила обосновать нецелесообразность применения захватов улиточного типа для испытания филамента. Вторая группа данных послужила основанием для разработки и оценки специальной оснастки для фиксации филамента в клиновидных захватах испытательной машины. Полученный прототип специальной оснастки был протестирован в ходе испытаний на растяжение образцов из филамента. По результатам тестирования удалось получить характеристики термопласта PetG, соответствующие справочным. То есть появилось основание утверждать, что с помощью экспериментальной оснастки были обеспечены необходимые условия для создания деформации центрального растяжения материала в форме филамента. Полученная оснастка позволяет создать методику экспериментального определения предела вынужденной эластичности. Запланировано теоретическое обоснование принятых размеров и формы оснастки. Отдельное внимание планируется уделить выбору материала для её изготовления.

Ключевые слова: аддитивное производство, FDM-печать, филамент, образец, испытание на растяжение, захваты для испытательной машины, параметры напряжённо-деформированного состояния.

V.B. Raspopina, L.I. Shemetov, D.V. Vershinin, S.N. Terekhin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

THE EQUIPMENT FOR TENSILE TESTING THE FILAMENT THERMOPLASTIC FOR FDM PRINTING

The purpose of this work was to develop a prototype of a special equipment for testing the tensile strength of a filament FDM-printing. In order to integrate this technology into the production cycles of machine-building enterprises, it became necessary to control the quality of the filament. The currently existing equipment in testing machines for testing cables, wires, threads and other products of this type are snail-type grips. This equipment does not meet the characteristics of the filament. This was revealed during the research. To obtain the relevant data, finite element analysis in an automated environment and experimental testing are involved in the work. A PetG thermoplastic filament was used. Two groups of data were obtained in the work. The first group of data made it possible to justify the inexpediency of using snail-type grips for testing the filament. The second group of data served as the basis for the development and evaluation of equipment for fixing the filament in the wedge-shaped grips of the test machine. The resulting equipment was tested during the tensile tests of the filament. According to the test results, it was possible to obtain the characteristics of PetG thermoplastics corresponding to the reference ones. That is, there is reason to assert that with the help of experimental equipment, the necessary conditions were provided for creating a deformation of the central tension of the material in the form of a filament. The resulting tooling allows us to obtain a method for experimentally determining the limit of forced elasticity. A theoretical justification of the accepted dimensions and shape of the tooling is planned. Special attention is planned to be paid to the choice of material for its manufacture.

Keywords: additive manufacturing, FDM printing, filament, sample, tensile testing, grippers for testing machine, stress-strain state parameters.

Введение

Неотъемлемой частью научно-технического прогресса (НТП) современного мира стали технологии аддитивного производства [1]. В их основе лежит принципиально новый подход к формированию искусственного физического объекта с заданными характеристиками. С помощью специального технического устройства в соответствии с управляющей программой материал послойно наносится в пределах объёма, ограниченного размерами и формой цифровой модели изготавливаемой детали [2; 3]. Такого рода процессы стали возможными благодаря другой составляющей НТП – цифровым технологиям. Симбиоз физики процесса с его цифровизацией на выходе позволил получить передовые технологии создания высокотехнологичного изделия. К числу главных выгодополучателей в данном случае относятся предприятия авиастроения, автомобилестроения, приборостроения и пр. Аддитивные технологии позволяют значительно сократить производственные циклы, без потери качества изделия. Одной из таких технологий является FDM-технология или FDM-печать (fused deposition modeling – метод послойного наплавления) [4].

Полуфабрикатом для FDM-печати является калиброванная пластиковая нить, часто именуемая филаментом, намотанная на специальную катушку. На отечественном рынке стандартный размер диаметра сечения филаментов составляет $1,75 \pm 0,05$ или $2,85 \pm 0,05$ мм. В настоящее время наблюдается стремительное разрастание линейки инженерно-технических термопластиков, которые могут выдерживать широкий диапазон температур, воздействию вредных химических веществ, интенсивные механические нагрузки и т.д. [5–10].

Важной составляющей для обеспечения требуемого качества FDM-детали является правиль-

ный выбор термопластика. Для этого необходимы знания о его физико-механических свойствах и об оптимальных параметрах его переработки в деталь. Как правило, компания-производитель филамента предоставляет информацию о температурном режиме печати, о физико-механических характеристиках своего изделия как в базовом, так и в переработанном виде (обычно с заполнением в 100 %). Но характеристики пластика от партии к партии, от производителя к производителю варьируются. В частности, это сказывается на механических характеристиках пластика. Отчасти это объясняется спецификой молекулярного строения полимеров, отчасти – особенностями реализации технологии получения пластика. Как следствие, на производстве возникает необходимость экспресс-контроля механических характеристик термопластика перед тем, как приступить к процессу переработки его в деталь. По сути, такой контроль должен стать частью процесса подготовки к производству FDM-детали. Особенно это важно в случае изготовления ответственных деталей, функционал которых предусматривает несущую способность. Более того этого требует система контроля качества продукции на предприятиях машиностроения. Важной составляющей контроля является контроль механических характеристик. Для их оценки проводят испытания соответствующих образцов на специальном оборудовании в центральных заводских лабораториях [11]. В силу своей простоты и эффективности распространёнными являются испытания образцов на растяжение [12–14].

Описание проблемы

К настоящему моменту утверждённый регламент работ по оценке механических характеристик филамента отсутствует. Есть нормативные документы, регламентирующие проведение испытаний

на растяжение пластмасс [15], проволоки, текстильной нити, троса (в том числе из полиамидных материалов), филаментарной нити, ровинга и пр. [16–19]. В них описаны требования, предъявляемые к образцам, испытательным машинам, датчикам нагрузки, захватам, другим аксессуарам эксперимента, к процессу подготовки образцов и прочим компонентам, определяющим ход эксперимента.

Все перечисленные выше нитевидные объекты обладают общими специфическими признаками, обусловленными их функционалом, а именно их продольный размер весьма значительно превосходит характерный размер поперечного сечения и все они в той или иной мере обладают гибкостью. Под гибкостью в данном случае понимают способность объекта изгибаться и закручиваться во всех направлениях без потери прочности и сохраняя свою изначальную структуру. Практически все они, за исключением проволоки и филаментарной нити, образованы путём либо свивания-переплетения (тросы, текстильные нити) простейших продольных элементов, либо нескрученными прядями (ровинг). Иными словами, они имеют дискретную макроструктуру, между элементами которой имеет место всестороннее контактное взаимодействие [20]. Нити, создающие эти структуры, бывают соответственно металлические и неметаллические. Неметаллические нити вырабатывают из природных или химических волокон.

Для экспериментальной оценки механических характеристик данных изделий, как правило, используют захваты улиточного типа. Эти захваты имеют направляющий барабан, препятствующий перегибу образца (рис. 1¹).

Для испытания на растяжение проволоки и филаментарной нити тоже применяют захваты улиточного типа (рис. 2²). Оба этих изделия являются мононитями, то есть их объём непрерывно заполнен одним материалом. Филаментарную нить получают с помощью фильеры из термопластичных материалов. Как правило, это прочные, гибкие и тонкие нити. В частности, из них изготавливают текстильные изделия. Проволока – это металлическая нить. По понятным причинам более толстая, менее гибкая и эластичная, по сравнению с филаментарной нитью.

Появление FDM-печати добавило новую категорию филаментарных нитей. В русскоязычной версии наиболее распространены названия этого изделия – «филамент», «пруток». Только по сравнению с традиционными полимерными филаментарными нитями, филамент для FDM-печати обладает большим диаметром и меньшей гибкостью. Это непременно должно быть учтено при выборе захватов для испытаний на растяжение. К настоящему моменту существующая линейка захватов в испытательных машинах разработана без учёта свойств филамента.

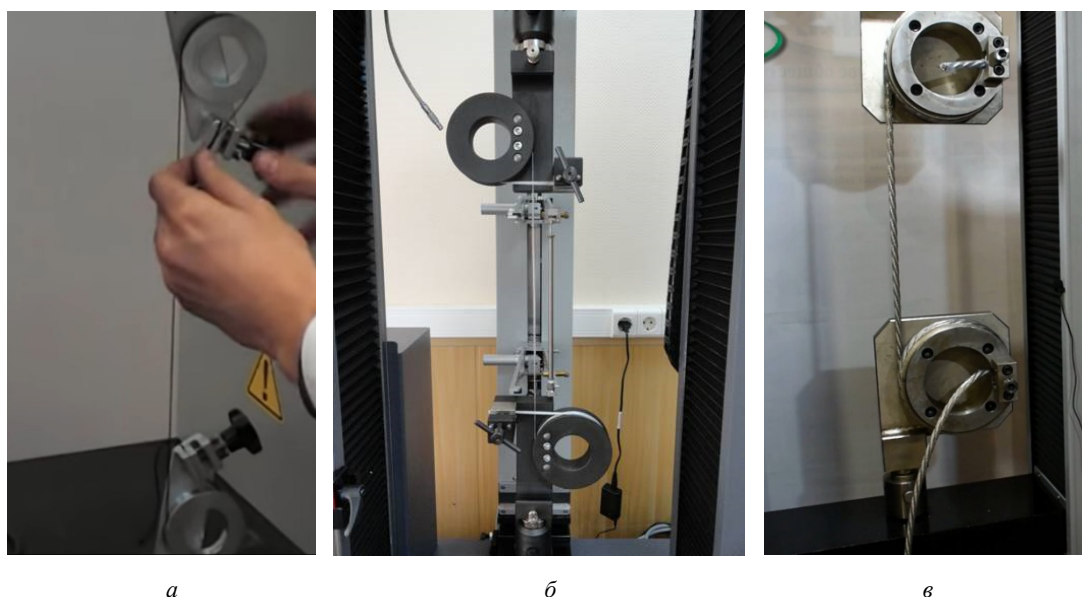


Рис. 1. Испытание на растяжение изделий с нитевидной структурой: *а* – текстильная нить; *б* – ровинговая нить; *в* – металлический трос

¹Фотографии взяты из источников: <https://yandex.ru/video/preview/9097321492034763713>; <https://mydocx.ru/343916.html>; <https://yandex.ru/video/preview/1740881967163661207>

²Фотографии взяты из источника: <https://yandex.ru/video/preview/1740881967163661207>

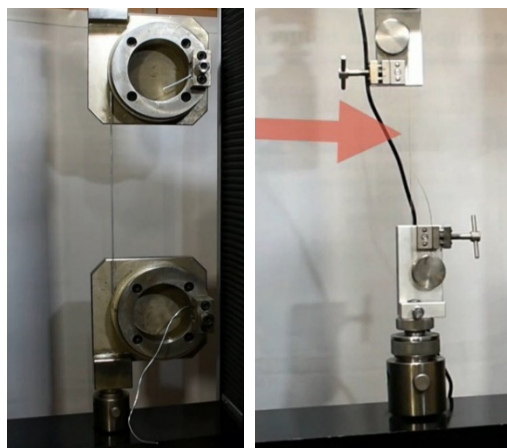


Рис. 2. Испытание проволоки на растяжение

Анализ возможностей существующей типовой оснастки применительно к испытаниям на растяжение филамента

По геометрическим признакам филамент соответствует проволоке. Например, для проволоочной продукции без покрытия диаметр поперечного сечения изменяется в пределах от 0,16 до 10,00 мм. Формально в указанную линейку значений диаметров для проволоки диаметр филамента попадает. Для проволоки с соответствующим диаметром рекомендован диаметр барабана в улиточном захвате порядка 20–40 мм. Проволоку следует обернуть вокруг барабана 1–3 раза. В случае филамента такой способ фиксации нежелателен. Из-за относительно малого радиуса кривизны деформация филамента будет сопровождаться механическими повреждениями в зоне направляющей барабана либо на выходе филамента из направляющей барабана. В частности, в случае филамента из пластика PetG (полиэтилентерефталатгликоль) эти повреждения выглядят как заломы или как начало образования шейки (рис. 3).



Рис. 3. Состояние филамента PetG после накручивания его на барабан диаметром 30 мм

Жёсткость конструкционных термопластиков значительно выше, следовательно, гибкость филамента ещё ниже. Следует отметить, что внешние диаметры сердечников у катушек, в которых термопластики хранятся, составляют порядка 90–100 мм.

Из вышесказанного следует, что для испытания филамента необходим захват, у которого барабан большего диаметра, чем для равной по диаметру проволоки. Однако увеличение этого размера может привести к массивности захватов (см. рис. 2). Массивные захваты характерны для установок со значительной мощностью (см. рис. 1, в), как правило, для испытания металлических тросов с большим диаметром, порядка 10 мм и более. Но такая установка может не «почувствовать» образец филамента или показать результаты с погрешностью ввиду низкой чувствительности к малым разрывным усилиям. Следовательно, мощность испытательной машины должна соответствовать несущей способности образца.

Для оценки применимости улиточных захватов при испытании на растяжение филамента был проведён эксперимент с учётом вышеописанных замечаний. Испытания проводились на универсальной разрывной машине настольного типа Shimadzu AGS-10kNXD мощностью до 10 кН. В число комплектующих установки входят улиточные захваты, диаметр барабана которых 70 мм. Эти захваты были использованы для испытания филамента из белого термопластика PetG производства ABS Maker. Была проведена серия из пяти испытаний. Для образца был выбран отрезок филамента длиной 1150 мм. Такая длина обусловлена размером барабана в захватах и необходимостью снизить влияние захватов на рабочую часть образца филамента. Рабочая часть образца 31 мм. Жёсткость филамента не позволила достигнуть прямолинейности участка нити между захватами сразу после фиксации (рис. 4, а). Прямолинейность была получена после незначительной доводки с помощью подвижного захвата (рис. 4, б). Скорость нагружения образцов – 3 мм/мин. После их разрушения (рис. 4, в) наблюдаются остаточные деформации, равномерно распределённые по всему объёму рассматриваемого участка, порядка 14 %.

Разрушение образцов происходит стабильно в верхнем захвате в зоне выхода филамента из направляющей барабана, то есть в области сопряжения криволинейного и прямолинейного участков филамента (рис. 5). Причём разрушение происходит без образования растущей шейки, характерной для деформации растяжения термопластиков вообще и в форме филамента в частности [21]. В данном случае картина разрушения соответствует квазихрупкому характеру разрушения полимера [22].

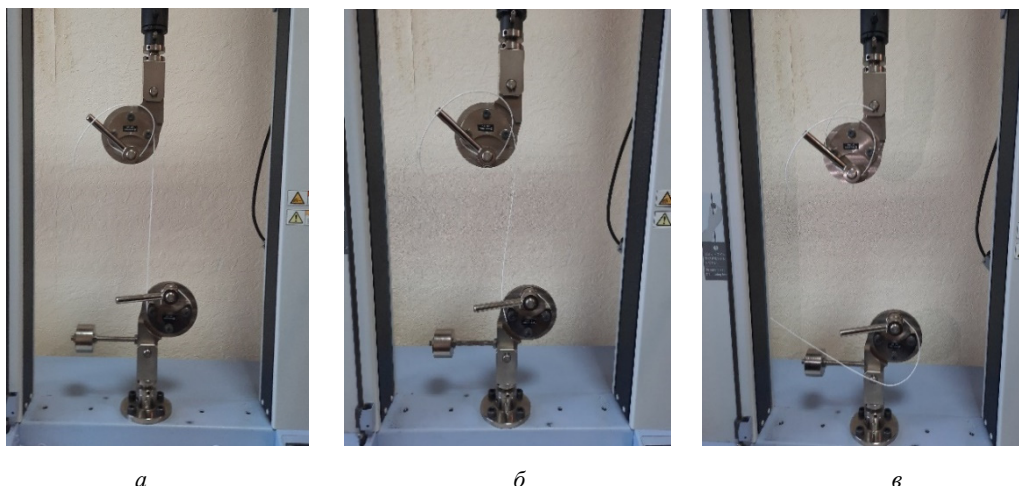


Рис. 4. Испытание на разрыв образца филамента: *а* – сразу после фиксации в захватах; *б* – доводка образца до прямолинейности; *в* – разрыв образца

Напрашивается вывод, что причиной такого явления стало напряжённо-деформированное состояние материала, обусловленное способом фиксации филамента.

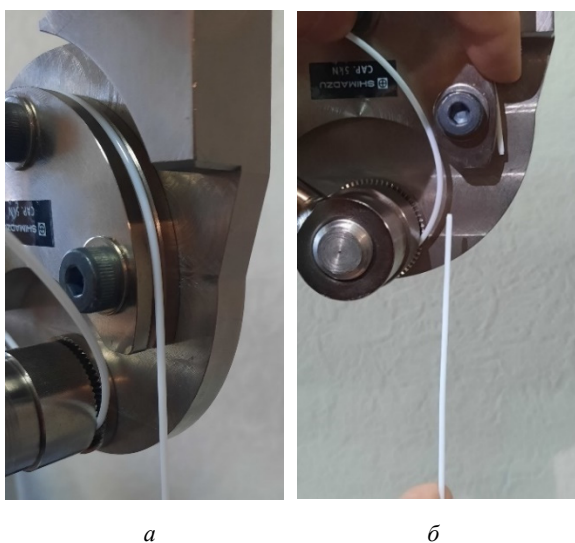


Рис. 5. Филамент в области выхода с направляющей барабана до (*а*) и после (*б*) разрушения

Для понимания характера распределения параметров напряжённо-деформированного состояния по объёму филамента в области направляющей захвата была сформирована модель в среде системы Femap with NX Nastran. За основу принята расчётная схема, представленная на рис. 6.

Конечно-элементная модель построена с помощью стержневых конечных элементов типа beam. Полученные эпюры внутренних силовых факторов для филамента представлены на рис. 7. Прямолинейный участок почти по всей длине испытывает простой вид деформации – чистое растяжение с продольной силой N , равной растягивающей

силе $F=100$ Н. В окрестности сопряжения прямолинейного участка с криволинейным наблюдается появление и постепенный рост поперечного изгиба (рис. 7, *б*, *в*). В этой области филамент испытывает сложный вид деформации: совместное действие поперечного изгиба и растяжения. Причём в окрестности точки перегиба наблюдается «всплеск» поперечной силы и изгибающего момента. На остальной части криволинейного участка действует практически чистый изгиб в сочетании с растяжением. При этом продольная сила незначительно понижается от 100 до 99,06 Н.

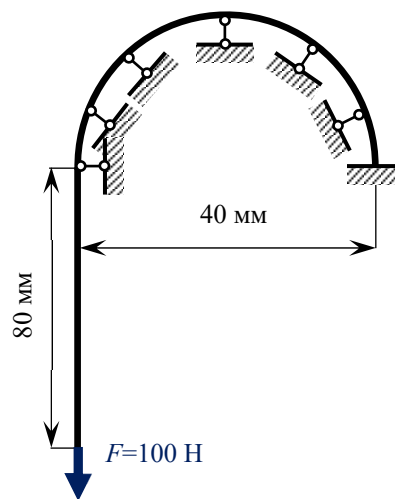


Рис. 6. Расчётная схема филамента в области захвата и части участка между захватами

При такой картине распределения внутренних силовых факторов на криволинейном участке и в его окрестности нормальные напряжения будут обусловлены как продольной силой σ_N , так и изгибающим моментом σ_M . Из сопротивления материалов известно, что в этом случае суммарные

напряжения в крайних точках сечения определяются как $\sigma = N/A \pm M/W$. Это объясняет эпюры максимальных и минимальных суммарных нормальных напряжений (рис. 8).

Полученные данные показывают, что практически во всех сечениях филамента нормальные напряжения – растягивающие: на прямолинейном

участке постоянные по всему сечению (рис. 9, а), на криволинейном участке с небольшим перепадом от 43 до 39 МПа (рис. 9, б). Качественно иная картина в сечении перехода от криволинейного участка к прямолинейному. В этом сечении наблюдается значительный перепад напряжений по высоте сечения (рис. 9, в).

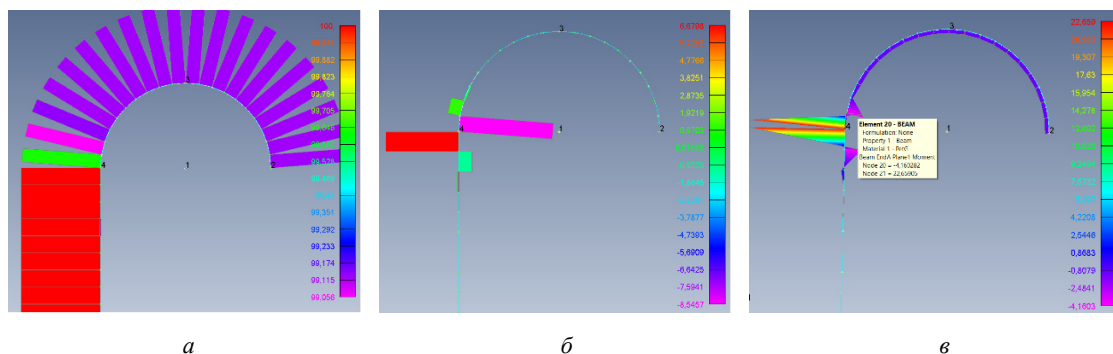


Рис. 7. Эпюры внутренних силовых факторов для филамента, на криволинейном участке опирающегося на барабан захвата: а – эпюра продольной силы; б – эпюра поперечной силы; в – эпюра изгибающего момента

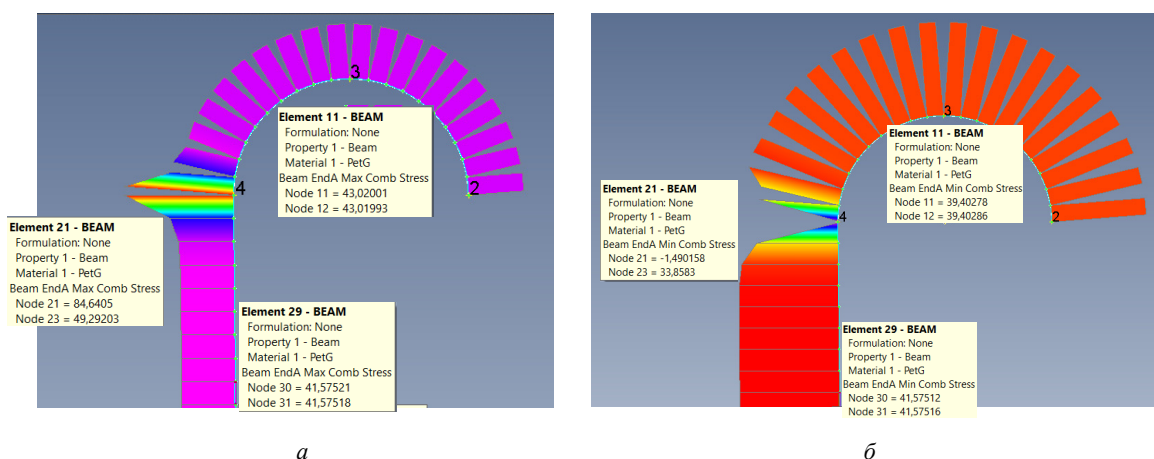


Рис. 8. Эпюры нормальных напряжений: а – эпюра максимальных нормальных напряжений; б – эпюра минимальных нормальных напряжений

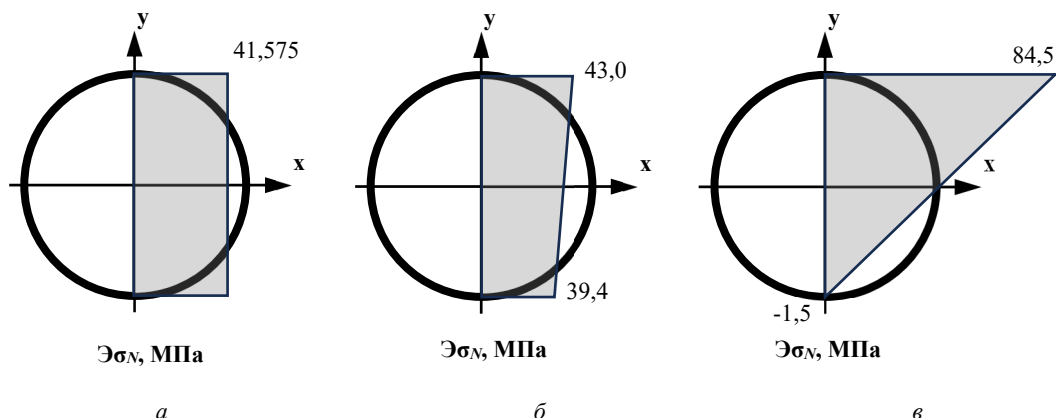


Рис. 9. Распределение нормальных напряжений по высоте сечения филамента: а – на прямолинейном участке; б – на криволинейном участке; в – на границе между прямолинейным и криволинейным участками

Очевидно, что, меняя величину диаметра барабана, можно изменять разницу между максимальными и минимальными нормальными напряжениями. Однако очаг нормальных напряжений не исчезнет. Результат анализа обосновывает место разрушения филамента в ходе эксперимента (см. рис. 5).

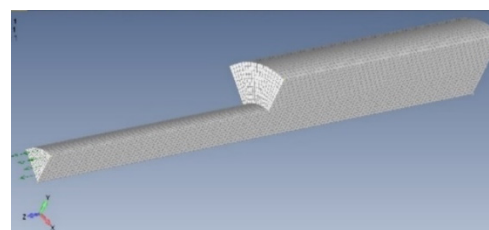
Рассмотренная модель весьма упрощена. Но она отчётливо показывает, что образец испытывает растяжение по всей длине, включая зоны захвата. В этих областях модель показывает растяжение с изгибом. Для понимания процессов, протекающих в деформируемом образце, требуется более глубокий анализ параметров напряжённо-деформированного состояния в области захватов. В частности, следует полнее учесть контактное взаимодействие образца с поверхностью барабана. Нужна трёхмерная модель. Однако полученных данных достаточно для отказа от улиточных захватов при испытании филамента на растяжение.

Решение проблемы

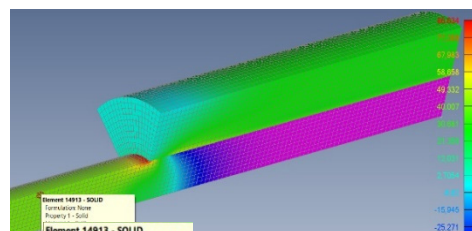
Конструктивное решение захватов в испытательных машинах учитывает особенности геометрии образца и свойства материала [23–26]. Чтобы добиться деформации центрального растяжения при испытании на растяжение образца из филамента, было принято решение разработать специальную оснастку для клиновидных захватов. Эта оснастка в зоне фиксации образца должна создавать одинаковое во всех радиальных направлениях давление на образец. Чтобы обеспечить требуемые граничные условия, было принято решение фиксировать образец в захватах по принципу соединения с натягом. Однако величина натяга не должна приводить к передавливанию образца в захватах, а длина контактной поверхности должна быть достаточной для того, чтобы не произошло проскальзывания филамента.

Чтобы увидеть качественную картину распределения параметров напряжённо-деформированного состояния при таком способе фиксации образца в захватах, была построена объёмная конечно-элементная модель в автоматизированной среде системы Femap with NX Nastran. Для рассматриваемого способа закрепления образца достаточно выполнить анализ для части конструкции с центральным углом в 30° (рис. 10, а). Радиус модели образца филамента – 0,875 мм; натяг обуславливается радиусом канала оснастки – 0,800 мм; в торцевом сечении соединения образца с оснасткой модель жёстко зафиксирована. Интенсивность растягивающей нагрузки равна $41,6 \text{ Н/мм}^2$. Материал задан один и для модели образца, и для модели оснастки. Характеристики материала характерны для термопластика PetG: модуль Юнга 2000 МПа; коэффициент Пуассона 0,4.

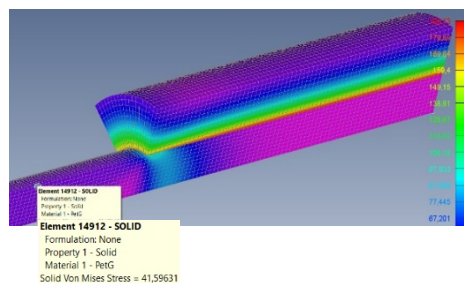
По результатам линейного конечно-элементного анализа модели картина распределения напряжений по объёму растянутого образца показывает, что на расстоянии, равном диаметру образца, от оснастки все точки материала находятся в линейном напряжённом состоянии. Для понимания этого достаточно сравнить в соответствующих точках значения нормальных напряжений, направленных вдоль растягивающей нагрузки, σ_z (рис. 10, б) и значения эквивалентных напряжений, определённых по энергетической теории прочности Мизеса (рис. 10, в). Отличие значений меньше одного процента. Отсюда следует, что все остальные компоненты тензора напряжений настолько малы, что в контексте рассматриваемой задачи их можно принять равными нулю. По плоскостям поперечных сечений нормальные напряжения распределены практически равномерно (отличия менее одного процента), то есть картина соответствует гипотезе плоских сечений. Следовательно, на участке образца между захватами имеет место центральное растяжение.



а



б



в

Рис. 10. Конечно-элементная модель образца филамента в оснастке для захвата: а – исходная модель с нагрузкой; б – карта нормальных напряжений, действующих параллельно растягивающей нагрузке; в – карта эквивалентных напряжений

Точки в объёме образца, приходящиеся на участок внутри оснастки, находятся в неоднородном сложном напряжённом состоянии. Имеет место значительный перепад эквивалентных напряжений от 27 до 97 МПа (рис. 11). Судя по карте эквивалентных напряжений, наиболее опасными будут точки в окрестности границы оснастки.

Из вышесказанного следует, что именно пограничная область должна быть областью появления шейки.

Чтобы проверить сделанные предположения, была изготовлена оснастка для фиксации образца в клиновидных захватах (рис. 12). Оснастка напечатана из термопласта PetG по технологии FDM-печати. В данном случае оснастка из того же материала, что и образец филамента. Крайние участки образца длиной 50 мм фиксируются в оснастке по принципу «соединения с натягом» (см. рис. 12, в). Натяг обеспечивается диаметром канала в оснастке в 1,65 мм (см. рис. 12, а, б). Общая длина образца – 180 мм.

Было испытано три образца. Испытания проводились на испытательной машине Shimadzu AGS-10kNXD (рис. 13, а) при таких же условиях, что и в случае с улиточными захватами. По результатам испытаний получены характерные для статического растяжения полимера в твёрдом деформируемом состоянии [22] графики зависимости между нагрузкой и деформацией (рис. 13, б). Образцы не доводились до разрушения. С позиции феноменологического подхода цель достигнута. Оснастка обеспечивает устойчивую повторяемость требуемой картины деформирования образца. Причём полученное при этом значение предела вынужденной эластичности (аналог предела текучести для металлов) составляет порядка 47 МПа, что соответствует данным о физико-механических характеристиках PetG [27]. После преодоления предела вынужденной эластичности отчётливо наблюдается рост шейки – почти горизонтальный участок кривой.

Эксперимент показал, что шейка начинает формироваться в пограничной области оснастки (рис. 14, а), а растёт в двух направлениях (рис. 14, б).



Рис. 11. Распределение эквивалентных напряжений в окрестности границы между свободным участком филамента и участком в оснастке

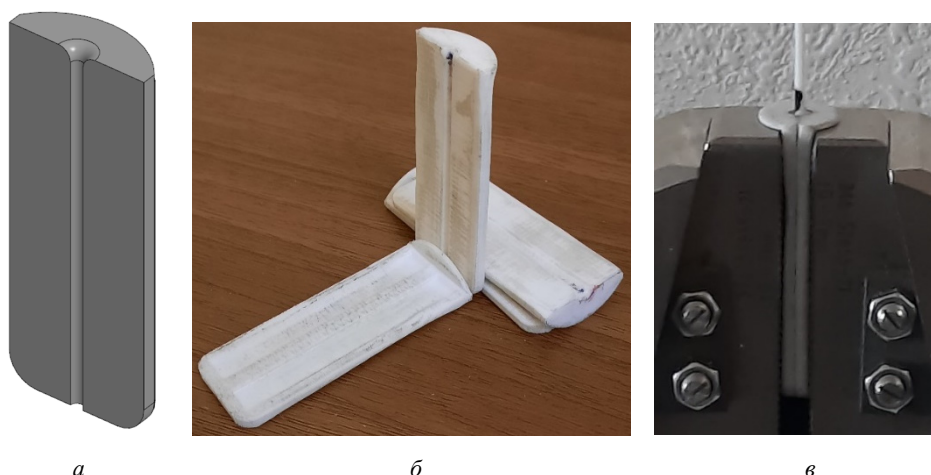


Рис. 12. Оснастка для образца филамента к клиновидному захвату: а – CAD-модель; б – напечатанная оснастка; в – образец, зафиксированный в захвате с помощью оснастки



Рис. 13. Испытание образца филамента: *a* – установленный в испытательной машине с помощью оснастки образец; *б* – график зависимости между нагрузкой и деформацией для установленного образца

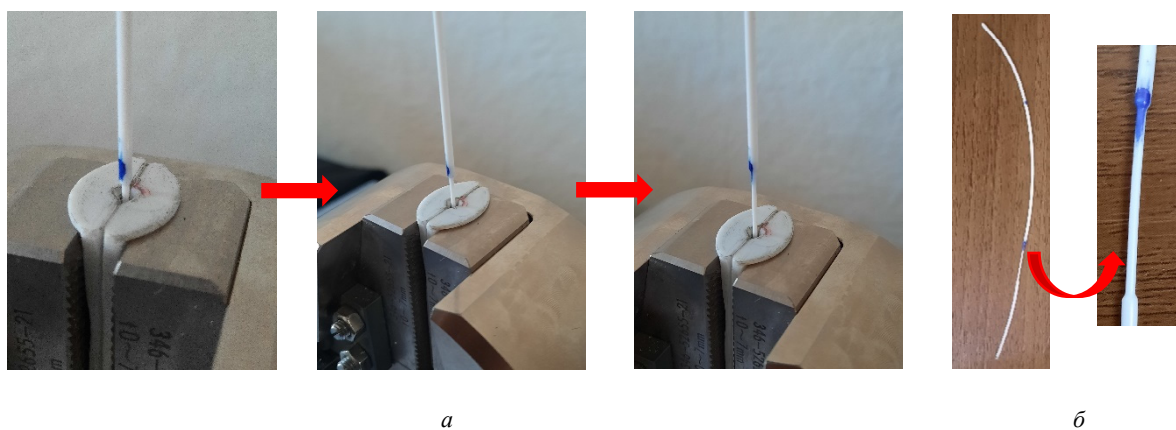


Рис. 14. Испытание образца на растяжение: *a* – рост шейки; *б* – шейка в растянутом образце

Как только в образцах происходило устойчивое формирование шейки, эксперимент останавливался. На данном этапе довести образец до разрушения цели не ставилось. Достаточно было получить значение предела вынужденной эластичности. Для разрушения образца потребуется иная оснастка.

Заключение

По итогам выполненной работы обоснована нецелесообразность применения захватов улиточного типа для испытания на растяжение филамента. В зоне захватов образец из филамента испытывает сложное сопротивление, а именно имеет место сочетание поперечного изгиба с растяжением и контактное взаимодействие с поверхностью барабана. Как следствие, в эти области смещаются очаги напряжений. И предельное состояние для материала наступает вне области растяжения. При этом характер разрушения квазихрупкий – внезапное разрушение, практически без шейки. Для глубокого понимания процессов, обуславливающих такое нетипичное разрушение полимера, планируется

детальный анализ качественной и количественной картины распределения параметров напряжённо-деформированного состояния в области разрушения образца.

Однако на данном этапе работы уже понятно, что для обеспечения условия центрального растяжения образца из филамента необходима симметрия граничных условий относительно продольных главных центральных плоскостей образца. Для этого была смоделирована и изготовлена оснастка для установки образца в клиновидные захваты испытательной машины. Оснастка обеспечивает фиксацию образца по принципу соединения с натягом. С помощью этого решения удалось достигнуть традиционной для полимера картины деформирования при статическом растяжении. Кривая зависимости между деформацией и нагрузкой полностью соответствует канонической картине. На надёжность оснастки указывает устойчивое повторение результатов испытания образцов. Однако полученная оснастка позволяет получить методику экспериментального определения только предела вынуж-

денной эластичности для материала в форме филамента. Для экспериментальной оценки предела прочности такого объекта исследования требуется доработка оснастки. Планируются дальнейшие исследования в этом направлении.

Требуется теоретически обосновать принятые размеры и форму оснастки. Отдельное внимание следует уделить выбору материала для изготовления оснастки.

Библиографический список

1. Евтодьева, М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли / М.Г. Евтодьева // Вестник МГИМО-Университета. – 2020. – № 13(5). – С. 307–330. DOI 10.24833/2071-8160-2020-5-74-307-330
2. Анализ российского рынка 3D-принтеров: итоги 2022 г., прогноз до 2026 г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14063/?ysclid=lokxd21569196248813> (дата обращения: 05.11.2023).
3. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. – Введ. 2017-12-01. – М.: Изд-во: Стандартинформ, 2020. – 16 с.
4. Development of 3D-printer for functionally graded material using fused deposition modelling method / J.Y. Tey, D. Teh, W.H. Yeo [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 268. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/268/1/012019
5. Высокоэффективные пластики Ultem 9085 и 1010. 3D Today. [Электронный ресурс]. – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/evgeniy-grinin/highperformance-plastics-ultem-9085-and-1010> (дата обращения: 05.11.2023).
6. 3D-printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review / D.G. Bekas, Y. Hou, Y. Liu [et al.] // Composites. Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 179. – P. 107540 (1-40). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107540
7. Обзор высокотемпературных FDM-пластиков для промышленной 3D-печати. Top 3D Shop [Электронный ресурс]. – URL: <https://top3dshop.ru/blog/obzor-vysokotemperaturnyh-fdm-plastikov-dlja-promyshlennoj-3d-pechati.html> (дата обращения: 05.11.2023).
8. Озеров, А. Высокоэффективные пластики – реальная альтернатива металлам [Электронный ресурс] / А. Озеров; iQB technologies. – URL: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> (дата обращения: 05.11.2023).
9. Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber – reinforced thermoplastic / T.A. Dutra, R.T.L. Ferreira, H.B. Resende [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – P. 133 (1–15). DOI: 10.1007/s40430-019-1630-1
10. Бабайлова, Д.Н. Роль заводских лабораторий в осуществлении технического прогресса в металлургии [Электронный ресурс] / Д.Н. Бабайлова, А.В. Бармин. – URL: <https://metalspace.ru/production-science/history/1545-rol-zavodskih-laboratorij-v-osushchestvlenii-tekhnikeskogo-progressa-v-metallurgii.html> (дата обращения: 05.11.2023).
11. Толмачев, В.В. Современное состояние метрологического обеспечения испытаний на статическое

- растяжение / В.В. Толмачев, И.Н. Матвеева // Эталоны. Стандартные образцы. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 51–67. DOI: 10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67
12. Tensile testing: Types, Techniques & Applications [Электронный ресурс]. – URL: <https://workshopinsider.com/tensile-testing/> (дата обращения: 15.10.2023).
13. Petraşcu, O.-L. The behavior of composite materials based on polyurethan resin subjected to uniaxial tensile test / O.-L. Petraşcu, R. Manole, A.-M. Pascu // Materials today: proceedings. – 2022. – Vol. 62, part 5. – P. 2673–2678. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.308
14. ГОСТ 11262. 2017/ISO 527-2:2012. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
15. ГОСТ 30055-93. Канаты из полимерных материалов и комбинированные. Технические условия. – М.: Филиал ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 53 с.
16. ГОСТ 25552-82. Изделия крученые и плетеные. Методы испытаний. – М.: ИПК издательство стандартов, 1997. – 27 с.
17. ГОСТ 10446-80. Проволока. Метод испытания на растяжение. – М.: издательство стандартов, 1987. – 9 с.
18. ГОСТ 6611.2-73 / ISO 2062-72, ISO 6939-88. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – М.: ИПК издательство стандартов, 1997. – 36 с.
19. Калентьев, Е.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния пряжи каната с линейным касанием при растяжении и кручении / Е.А. Калентьев, В.В. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 16–28.
20. Dependence between the mechanical characteristics of the material and the FDM sample made from this material / V. Raspopina, A. Pereylygina, L. Shemetov, P. Grigorov // Safety in Aviation and Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". – Cham, 2022. – С. 215–227. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_181
21. Бартнев, Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартнев. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
22. Разработка технологической оснастки для проведения автономных испытаний формообразующей структуры зонтичного рефлектора / А.В. Иванов, К.А. Кушнир, В.О. Шевчугов, А.Н. Климов // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 246–254. DOI: 10.26732/j.st.2022.4.03
23. An innovative tensile test method to evaluate the effect of the loading rate on viscoelastic interfaces / Ximing Xieab, Gang Zhaoab, Chao Zhangb, Jianbo Tangb, Xin Zhouc, Xigao Jiana, Jian Xuab // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – Vol. 276, part A. – P. 108872. DOI: 10.1016/j.engfrac-mech.2022.108872
24. Шеметов, Л.И. Трансформация геометрии образца для механических испытаний конструкционных материалов в FDM-структуре / Л.И. Шеметов, В.Б. Распопина, А.С. Чернышков // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 386–400. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-386-400
25. Астапов, Н.С. Прочность компактного образца из упругопластического структурированного материала / Н.С. Астапов, В.Д. Кургузов // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 200–208. DOI: 10.34759/vst-2022-3-200-208

26. Шумейко, И.А. Анализ пластмасс при их выборе для 3D-печати модели ветроэнергетической установки [Электронный ресурс] / И.А. Шумейко, Н.О. Зайченко // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2021. – № 3(84). – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11408> (дата обращения: 03.12.2023).

References

1. Evtod'eva M.G. Additivnoe proizvodstvo i dopolneniia real'nost' kak novye proizvodstvennye tekhnologii v aviatsionnoi otrasli [Additive Manufacturing and Augmented Reality as New Manufacturing Technologies in the Aviation Industry]. M.G. Evtod'eva. *Vestnik MGIMO-Universiteta*, 2020, no. 13(5), pp. 307–330. DOI 10.24833/2071-8160-2020-5-74-307-330

2. Analiz rossiiskogo rynka 3D-printerov: itogi 2022 g. [Analysis of the Russian 3D printer market: 2022 results, forecast to 2026], prognos do 2026 g.]. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14063/?ysclid=lokxd21569196248813> (data available 05.11.2023).

3. GOST R 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy. Chast' 1. Terminy i opredeleniia, 2017-12-01 [Additive technological processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions]. Moscow: Izdatel'stvo: Standartinform, 2020, 16 p.

4. Tey J.Y., Teh D., Yeo W.H. et al. Development of 3D-printer for functionally graded material using fused deposition modelling method. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 268, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/268/1/012019

5. Vysokoeffektivnye plastiki Ultem 9085 i 1010. 3D Today. [Ultem 9085 and 1010 high performance plastics]. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/evgeniy-grinin/high-performance-plastics-ultem-9085-and-1010> (data available 05.11.2023).

6. Bekas D.G., Hou Y., Liu Y. et al. 3D-printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites. Part B: Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 107540 (1-40). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107540

7. Obzor vysokotemperaturnykh FDM-plastikov dlia promyshlennoi 3D-pechati. Top 3D Shop [Overview of high-temperature FDM plastics for industrial 3D printing. Top 3D Shop]. URL: <https://top3dshop.ru/blog/obzor-vysokotemperaturnykh-fdm-plastikov-dlja-promyshlennoj-3d-pechati.html> (data available 05.11.2023).

8. Ozerov A. Vysokoeffektivnye plastiki – real'naia al'ternativa metallam [High-performance plastics - a real alternative to metals]. A. Ozerov; iQB technologies. URL: <https://blog.iqb.ru/high-performance-polymers/> (data available 05.11.2023).

9. Dutra T.A., Ferreira R.T.L., Resende H.B. et al. Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber – reinforced thermoplastic. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. 41, pp. 133 (1–15). DOI: 10.1007/s40430-019-1630-1

10. Babailova D.N. Rol' zavodskikh laboratorii v osushchestvlenii tekhnicheskogo progressa v metallurgii [Role of plant laboratories in the implementation of technical progress in metallurgy]. D.N. Babailova, A.V. Barmin. URL: <https://metalspace.ru/production-science/history/1545-rol-zavodskikh-laboratorij-v-osushchestvlenii-tekhnicheskogo-progressa-v-metallurgii.html> (data available 05.11.2023).

11. Tolmachev V.V. Sovremennoe sostoianie metrologicheskogo obespecheniia ispytanii na staticheskoe rastiashenie [Current state of metrological support of static tensile tests]. V.V. Tolmachev, I.N. Matveeva. *Etalony. Standartnye obratzsy*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 51–67. DOI: 10.20915/2077-1177-2022-18-1-51-67

12. Tensile testing: Types, Techniques & Applications. URL: <https://workshopinsider.com/tensile-testing/> (data available 15.10.2023).

13. Petraşcu, O.-L. The behavior of composite materials based on polyurethan resin subjected to uniaxial tensile test. O.-L. Petraşcu, R. Manole, A.-M. Pascu. *Materials today: proceedings*, 2022, vol. 62, part 5, pp. 2673–2678. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.308

14. GOST 11262. 2017/ISO 527-2:2012. Plastmassy. Metod ispytaniia na rastiashenie [Plastics. Tensile test method]. Moscow: Izdatel'stvo: Standartinform, 2018, 24 p.

15. GOST 30055-93. Kanaty iz polimernykh materialov i kombinirovannye. Tekhnicheskie usloviia [Ropes made of polymeric materials and combined. Technical conditions]. Moscow: Filial IPK Izdatel'stvo standartov, 2003, 53 p.

16. GOST 25552-82. Izdeliia kruchenye i pletenye. Metody ispytaniia [Twisted and woven articles. Test methods]. Moscow: IPK izdatel'stvo standartov, 1997, 27 p.

17. GOST 10446-80. Provoloka. Metod ispytaniia na rastiashenie [Wire. Tensile test method]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987, 9 p.

18. GOST 6611.2-73 / ISO 2062-72, ISO 6939-88. Niti tekstil'nye. Metody opredeleniia razryvnoi nagruzki i udlineniia pri razryve [Textile threads. Methods of determination of breaking load and elongation at break]. Moscow: IPK izdatel'stvo standartov, 1997, 36 p.

19. Kalent'ev E.A. Chislenni analiz napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia priadi kanata s lineinym kasaniiem pri rastiashenii i kruchenii [Numerical analysis of stress-strain state of a wire rope strand with linear contact in tension and torsion] E.A. Kalent'ev, V.V. Tarasov. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 16–28.

20. Raspopina V., Perelygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence between the mechanical characteristics of the material and the FDM sample made from this material. *Safety in Aviation and Space Technologies. Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century"*. Cham, 2022, pp. 215–227. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_181

21. Bartenev G.M. Prochnost' i mekhanizm razru-sheniia polimerov [Strength and fracture mechanism of polymers]. G.M. Bartenev. Moscow: Khimiia, 1984, 280 p.

22. Ivanov A.V., Kushnir K.A., Shevchugov V.O., Klimov A.N. Razrabotka tekhnologicheskoi osnastki dlia provedeniia avtonomnykh ispytaniia formoobrazuiushchei struktury zontichnogo reflektora [Development of technological tooling for autonomous testing of the molding structure of the umbrella reflector]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 246–254. DOI: 10.26732/j.st.2022.4.03

23. Ximing Xieab, Gang Zhaoab, Chao Zhangb, Jianbo Tangb, Xin Zhouc, Xigao Jiana, Jian Xuab. An innovative tensile test method to evaluate the effect of the loading rate on viscoelastic interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*,

2022, vol. 276, part A, p. 108872. DOI: 10.1016/j.engfrac-mech.2022.108872

24. Shemetov L.I. Transformatsiia geometrii ob-raztsa dlia mekhanicheskikh ispytaniy konstruksionnykh materialov v FDM-strukture [Specimen geometry transformation for mechanical testing of structural materials in FDM structure]. L.I. Shemetov, V.B. Ras-popina, A.S. Chernyshkov. *Polytech Journal*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 386–400. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-386-400

25. Astapov N.S. Prochnost' kompaktnogo obraztsa iz uprugoplasticheskogo strukturirovannogo materiala [Strength of a compact specimen made of elastoplastic structured material]. N.S. Astapov, V.D. Kurguzov. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo institute*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 200–208. DOI: 10.34759/vst-2022-3-200-208

26. Shumeiko I.A. Analiz plastmass pri ikh vybore dlia 3D-pechati modeli vetroenergeticheskoi ustanovki [Analyzing plastics in their selection for 3D printing a wind turbine model]. I.A. Shumeiko, N.O. Zaichenko. *Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn.*, 2021, no. 3(84). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11408> (data available 03.12.2023).

Поступила: 16.12.2023

Одобрена: 17.04.2024

Принята к публикации: 13.05.2024

Об авторах

Распопина Вера Борисовна (Иркутск, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; e-mail: vbr2604@mail.ru).

Шеметов Лев Игоревич (Иркутск, Российская Федерация) – аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; e-mail: semetof@yandex.ru).

Вершинин Даниил Владимирович (Иркутск, Российская Федерация) – студент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; e-mail: dvigasin@mail.ru).

Терехин Сергей Николаевич (Иркутск, Российская Федерация) – студент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; e-mail: erg.teryoxin@yandex.ru).

About the authors

Vera B. Raspopina (Irkutsk, Russian Federation) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Operation of Aviation Equipment, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation; e-mail: vbr2604@mail.ru).

Lev I. Shemetov (Irkutsk, Russian Federation) – post-graduate student, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation; e-mail: semetof@yandex.ru).

Daniil V. Vershinin (Irkutsk, Russian Federation) – Student, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation; e-mail: dvigasin@mail.ru).

Sergei N. Terekhin (Irkutsk, Russian Federation) – Student, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation; e-mail: erg.teryoxin@yandex.ru).

Финансирование. Статья написана по результатам работ, выполненных за счёт гранта по поддержке исследований и разработок в рамках программы «Приоритет 2030» в целях реализации Программы развития ИРНТУ. Направление – «Инициативные проекты».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.