

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776

3D-PRINTING FROM PLASTICS: INNER STRUCTURE INFLUENCE ON THE STRENGTH

V. M. Petrov¹, S. N. Bezpal'chuk¹, S. P. Yakovlev²

¹ — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
St. Petersburg, Russian Federation

Development of ship structures production additive technologies implies, among other things, provision and control of product quality. In this work, on the polylactide example, is investigated materials for 3D-printing strength variation during thread melting and formed by filaments inner structure constructing. Experiments showed that strength doesn't change during melting, and depends nonmonotonically from infill density. Last feature confirms by finite-element modelling: during small (less than 50 percent) infill density, when infill density increases, characteristic inner structure cell size decreases, what leads to sharp increase of stress concentrators per volume unit number (respectively, significant increasing of probable defects number in concentrators surroundings). During further (more than 50 percent) infill density increasing, part of filaments contact surface in surface with nonzero normal external load projection is becoming more than 50 percent, and structure strength determines by filament adhesion.

Results obtained points that when infill density is low (less than 50 percent), we should to control firstly filament mechanical strength, and determined by printing head positioning accuracy accuracy of filaments (which are forming inner structure and shell of part designed) location; technological parameters, which influence on partitions between cells rounding radiuses. While infill density is high (more than 50 percent) — melt falling from printing head extruder nozzle high, filament stacking and filament solidification times relation, what determines filaments adhesion; technological defects, which are impeding to filaments adhesion; turning special attention on material supplied chemical composition, and responsible for the aging of material time and conditions of it's storage. Recommendations listed may form the basis of automatic technological manufacturing using 3D-printing products strength control concept.

For modelling and structural analysis, seems possible to introduce elementary volume for cell structure. Phenomenological parameters can be obtained using mechanical (while infill less than 50 percent) or adhesion characteristics.

Keywords: additive technologies, 3D printing, mechanical tests, physical and mechanical properties, internal structure, stress concentration, adhesion, destruction, finite element simulation, test standards, technological strength control, conjecture hypothesis.

For citation:

Petrov, Vladimir M., Sergey N. Bezpal'chuk, and Sergey P. Yakovlev. "3D-printing from plastics: inner structure influence on the strength." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.

УДК: 004.9, 620.172.2, 67.02

О ВЛИЯНИИ СТРУКТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ 3Д-ПЕЧАТИ

В. М. Петров¹, С. Н. Безпальчук¹, С. П. Яковлев²

¹ — Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Освоение аддитивных технологий производства судовых конструкций подразумевает в том числе обеспечение и контроль качества получаемых изделий. В работе на примере полилактида, поставляемо-

го в форме нити в катушках, исследуется изменение прочности материалов для 3D-прототипирования в процессе изготовления состоящей из волокон ячеистой структуры. Испытания показали, что прочность при плавке практически не меняется, а от плотности заполнения внутреннего объема зависит немонотонно. Последняя особенность подтверждается конечно-элементным моделированием: с увеличением плотности заполнения уменьшается размер ячейки внутренней структуры, что приводит к возрастанию числа концентраторов напряжений на единицу объема и, соответственно, к повышению вероятного числа дефектов, попадающих в области концентрации пропорционально квадрату числа ячеек на единицу длины. При дальнейшем (свыше 50 %) увеличении плотности заполнения доля поверхностей сопряжения волокон в общей площади поверхности волокон, на которую передается нормальная нагрузка, становятся больше 50 %, и прочность структуры начинает определяться адгезией волокон.

Полученные результаты указывают на то, что при невысокой плотности заполнения в процессе изготовления изделий следует контролировать, в первую очередь, механическую прочность волокон и определяемую точностью позиционирования печатающей головки точность их расположения, влияющие на радиусы скругления перегородок между ячейками технологические параметры, при большой плотности заполнения — высоту падения расплава из форсунки экструдера печатающей головки, соотношение времени укладывания волокна и времени его затвердевания, определяющие адгезионное сцепление волокон, а также технологические дефекты, препятствующие адгезии, обращая особое внимание на химический состав поставляемого материала, а также ответственные за старение время и условия его хранения. Перечисленные рекомендации могут быть положены в основу концепции технологического управления прочностью изделий, получаемых методом 3D-печати.

В целях расчёта и моделирования представляется возможным ввести понятие «физически бесконечно малого объема структуры». Феноменологические параметры следует при этом определять через механические либо адгезионные характеристики в зависимости от плотности заполнения внутреннего объема изделия.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, механические испытания, физико-механические свойства, внутренняя структура, концентрация напряжений, адгезия, разрушение, конечно-элементное моделирование, стандарты на испытания, технологическое управление прочностью, гипотеза сплошности.

Для цитирования:

Петров В. М. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати / В. М. Петров, С. Н. Безпальчук, С. П. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.

Введение (Introduction)

Широко известно, что в настоящее время аддитивные технологии позиционируются как технологии, способные заменить традиционные подходы к изготовлению деталей сложной геометрической формы самого различного назначения (в том числе элементов конструкций водного транспорта). Вместе с тем нельзя утверждать, что прочностные характеристики и физико-механические свойства получаемых деталей идентичны параметрам материала и в каждом конкретном случае известны. Изготавливаемые по технологии 3D-печати изделия имеют, как правило, ячеистую внутреннюю структуру, процесс их получения предусматривает фазовые переходы материала. Таким образом, на прочность изделия, помимо прочности исходного материала, зависящей также от времени и условий его хранения, химического состава красителей и других факторов, определяющих влияние физических и физико-химических процессов, оказывают влияние также параметры внутренней структуры заполнения:

- плотность, выражаемая в процентном содержании материала во внутреннем объеме изделия; форма и относительные размеры структурных элементов (в частности, отношение размера ячейки к толщине стенки между ячейками);
- параметры технологии получения изделий (высота падения подаваемого из форсунки экструдера печатающей головки материала, температура подаваемого материала);
- диаметр форсунки, скорость подачи (расход через форсунку и др.);
- условия окружающей среды, влияющие на скорость и характер затвердевания материала и т. д.

Выполненный обзор литературных источников [1] – [10] не позволяет сделать вывод о систематическом характере исследований о влиянии перечисленных факторов на прочность получаемых по технологии 3D-печати изделий. Настоящей работой открывается цикл статей, ставящий своей целью выработку магистрального направления систематизации на базе исследования влияния основных факторов на прочность изделий. Результатами исследований должны явиться массивы физико-механических характеристик и диаграмм растяжения материалов различной внутренней структуры, полученные обобщением результатов испытаний, а также стандарты на испытания материалов изделий, получаемых методом 3D-печати. Испытания каждого вида изделий проводятся в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

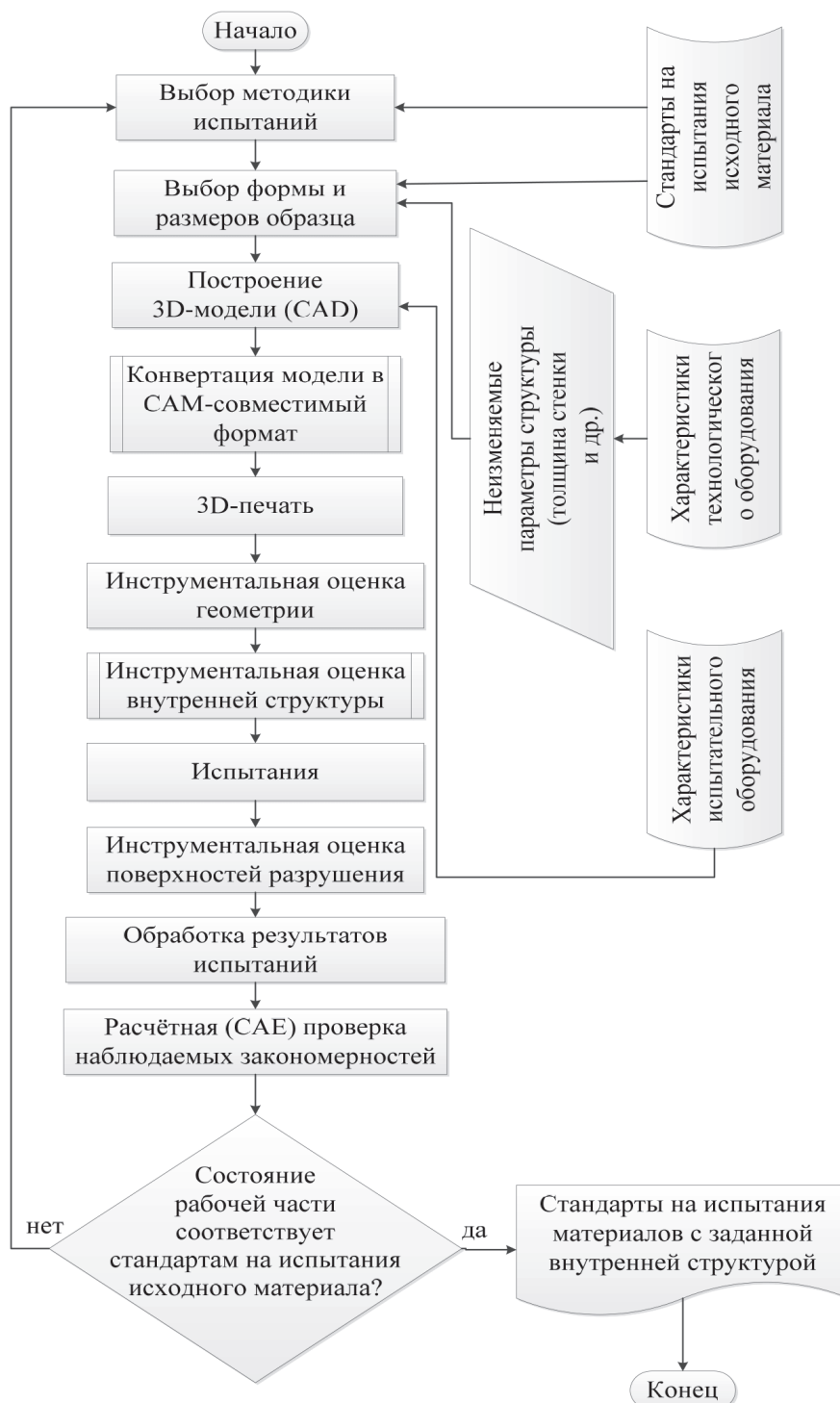


Рис. 1. Блок-схема алгоритма испытаний

Методы и материалы (Methods and Materials)

Одним из основных недостатков многих материалов для 3D-печати (гипсовые композиты, отдельные виды пластиков и др.) является хрупкость, что обуславливает особую актуальность исследования их прочности. Для анализа выбран один из наиболее хрупких (оценка произведена по ударной вязкости) пластиков — полилактид (PLA, плотность 1200 – 1250 кг/м³, предел прочности при изгибе 65 МПа, модуль упругости при изгибе 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,4, относительное удлинение при разрыве 4,43 %, ударная вязкость 4,28 кДж/м²) производителя *BestFilament*, Россия (диаметр нити — 1,75 мм, краситель — диоксид титана (марка «Версал зелёный BG», производитель — *Synthesia*, Чехия), срок хранения (учёт важен вследствие охрупчивания материала при старении) — 12 мес., фактический срок хранения — 6 мес. при нормальных условиях.

Из всего множества факторов, влияющих на прочность изделий из пластиков (время хранения исходного материала, химический состав красителя, процентная плотность и структура (форма ячеек) заполнения внутренних объёмов), для исследования была выбрана плотность заполнения. Изучался предел прочности при одноосном растяжении. Для выяснения прочности исходного материала, поставляемого в форме нити диаметром 1,75 мм, намотанной в катушку внутренним диаметром 6,7 см и внешним 17 см (соответственно имеет место начальная кривизна нити), испытывались по стандартной методике 10 распрямлённых фрагментов нити, длиной 120 мм каждый (длина рабочей части 80 мм, размер законцовок для крепления образца в захватах испытательной машины 20 мм с каждой стороны) — рис. 2, а.

Испытания проводились стандартным методом в Механической лаборатории СПбГАСУ на разрывной машине INSTRON 5969. Прочность структурного элемента (волокна), переплавленного при 3D-печати (использовался 3D-принтер PrismMini фирмы *3Dquality*) материала определялась испытаниями ленты (полосы) толщиной в одно волокно (0,4 мм — диаметр форсунки печатающей головки 3D-принтера) и шириной в 20 волокон, т. е. 8 мм (рис. 2, б). Поскольку с увеличением высоты падения расплава из форсунки экструдера печатающей головки адгезионная прочность нитей падает, технологически целесообразно изготавливать ленты при высоте падения 0,25 мм. В таком случае толщина образца составляет 0,25 мм, на ширине уместится 10 волокон. Длина рабочей части ленты составляла 10 наибольших поперечных размеров (80 мм), размер зон законцовок с каждой стороны — 20 мм. В партии было 10 образцов. Волокна при печати укладывались в горизонтальной плоскости. Аналогичным образом изготавливалось и испытывалось одно волокно.

Отметим, что технологические остаточные напряжения снижают прочность имеющей плотность заполнения 100 % структуры по сравнению с прочностью переплавленного материала, что не позволяет использовать для подобных испытаний образцы со значительным числом волокон в двух поперечных измерениях. Исследовалась прочность каркаса (оболочки) рабочей части образца для испытаний на растяжение (рис. 2, в). Для рассматриваемого нового материала, на основании п. 2.2 ГОСТ 14359-69, использовались стандартные образцы согласно ГОСТ 11262-80, тип 1. Толщина стенки оболочки t задавалась равной 1,2 мм (трём волокнам материала) для обеспечения жёсткости образцов. В силу указанного обстоятельства, стандартная толщина образца (2 мм) была увеличена до 5 мм. Образцы изготавливались в горизонтальном положении, при наклоне волокон к главным осям сечения 45°.

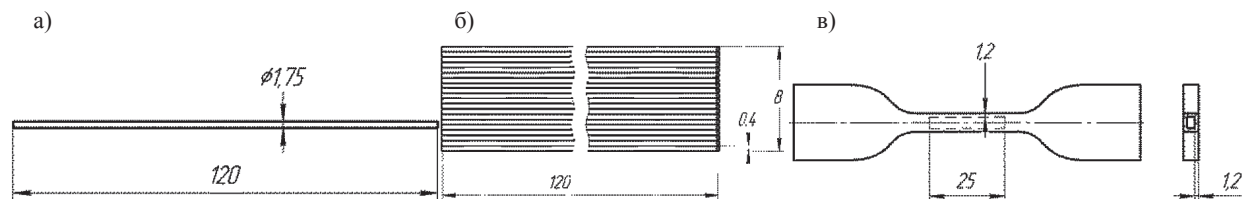


Рис. 2. Эскизы образцов для определения характеристик исходного и переплавленного материала:

а — нить исходного материала; б — лента из волокон переплавленного материала;

в — изготовленный на 3D-принтере каркас рабочей части

Прочность ячеистой структуры исследовалась на аналогичных образцах (рис. 3). Образцы изготавливались (выращивались) послойной укладкой волокон расплавленного полилактида в горизонтальном и вертикальном положении. Плотность заполнения объема образцов варьировалась от 20 до 80 % с шагом 30 % (размер ячейки составлял 4,0; 0,8 и 0,4 мм соответственно на рис. 4). В каждой партии, соответствующей той или иной комбинации двух указанных параметров (угла наклона оси образца к горизонтальной плоскости и плотности заполнения), было пять образцов. Стенки образцов, изготавливаемые послойным обходом контура, составляющие внутреннюю структуру (квадратные ячейки) волокна, укладывались под углом 45° к оси образца при горизонтальном расположении последнего и к главным осям сечения при вертикальном.

Алгоритм построения структуры взаимно ортогональных волокон предусматривал укладку целого слоя либо нескольких слоёв в одном направлении с последующим изменением направления движения печатающей головки на 90° . Контур и внутренняя структура строились независимо (ориентация ячеек в плоскости продольного либо поперечного сечения образца определяется ориентацией образца на столе 3D-принтера при изготовлении), сопряжение заполнения и внешней стенки (оболочки) происходит при затвердевании расплава.

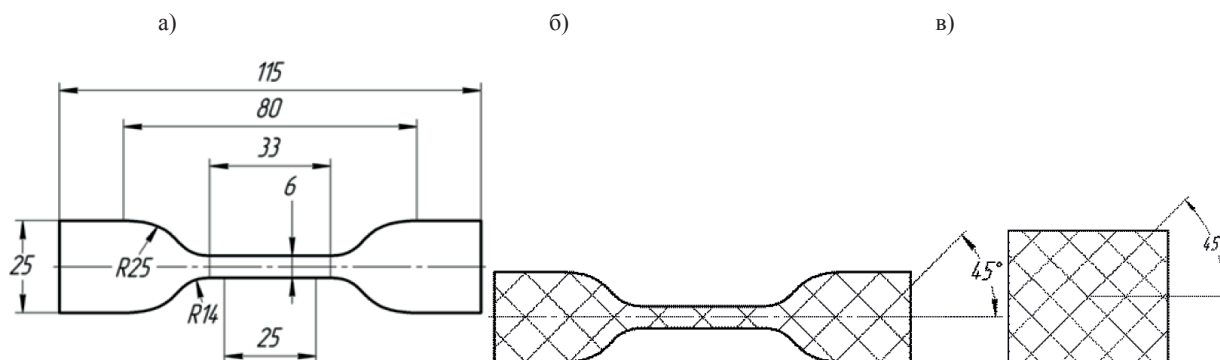


Рис. 3. Эскиз образца для определения характеристик ячеистой структуры (а) и расположение ячеек для образцов, изготавливаемых в горизонтальном (б) и вертикальном (в) положении

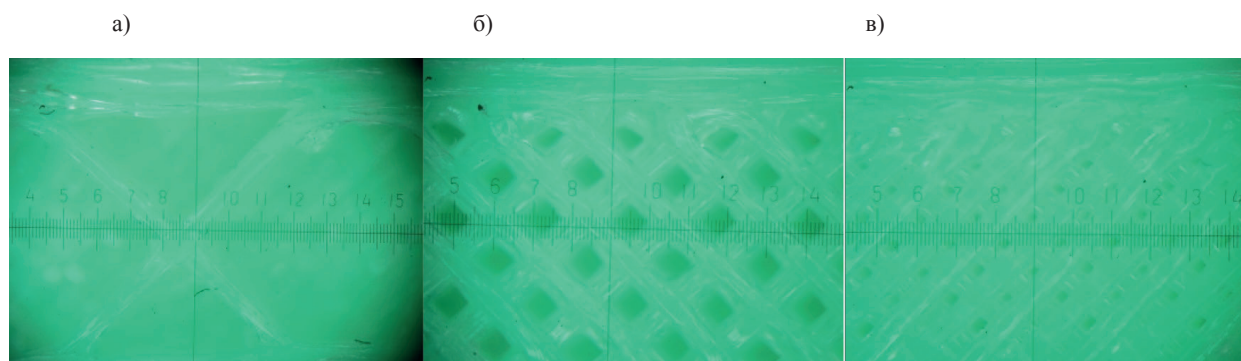


Рис. 4. Внутренняя структура образцов с различной плотностью заполнения: а — 20 %; б — 50 %; в — 80 %

Экспериментально оценивалось условное брутто-напряжение, соответствующее пределу прочности (характеристика несущей способности). Испытания проводились стандартным методом в Механической лаборатории СПбГАСУ на разрывной машине INSTRON 5982 с установленным экстензометром (рис. 5).



Рис. 5. Схема испытаний образцов на разрывной машине INSTRON 5982

Ячеистая структура получаемых материалов обуславливает наличие значительного числа внутренних углов (концентраторов напряжений) на единицу объёма, технология изготовления последовательной укладкой волокон расплавленного пластика — существенное влияние адгезии волокон на прочность. Можно показать, что с уменьшением размера ячейки области концентрации от соседних углов стремятся к объединению и при определённом размере, соответствующем равномерному распределению напряжений с отклонениями, не превышающими отклонения, вызванные дефектами материала, ячеистый материал ведёт себя как сплошная ортотропная среда. Тогда весьма корректным будет понятие *физически бесконечно малого объёма внутренней структуры*, вводимое по аналогии с атомно-молекулярной структурой. Фактором, лимитирующим прочность, оказывается адгезия волокон. При этом в расчётной модели можно пренебречь адгезией заполнения к оболочке, ввиду сравнительно малой доли площади контакта волокон внутренней структуры с волокнами оболочки в общей площади контакта волокон, и рассматривать структуру волокон как полубесконечную (на практике — с характерным размером, много большим размера сечения волокна, порядка ширины рабочей части образца).

Качественный анализ концентрации напряжений проводился в упругой постановке задачи, на концептуальных моделях, описывающих влияние того или иного фактора на прочность. Так, для изучения адгезии достаточно рассмотреть два жёстко соединённых слоя, нагружаемых для оценки коэффициента концентрации напряжений единичным растягивающим брутто-напряжением (для образцов, выращенных в горизонтальном положении) в наклонённых к оси на угол 45° сечениях волокон (поперечное сечение волокна считалось квадратным со стороной 0,4 мм и скруглениями углов радиусом 0,1 мм) — рис. 6, а либо нормально к боковым поверхностям волокон для образцов, изготовленных в вертикальном положении — рис. 6, б. Единичное брутто-напряжение пересчитывалось по соотношению брутто- и нетто-площадей в нетто-напряжение и прикладывалось к нетто-площади. При этом оказалось достаточным рассмотреть $\frac{1}{4}$ часть объёма расчёта, приняв его нагружение симметричным. В расчёте вводились условия на плоскостях симметрии, а также ограничение перемещений расположенных с одной стороны боковых граней по нормали к плоскости сопряжения волокон.

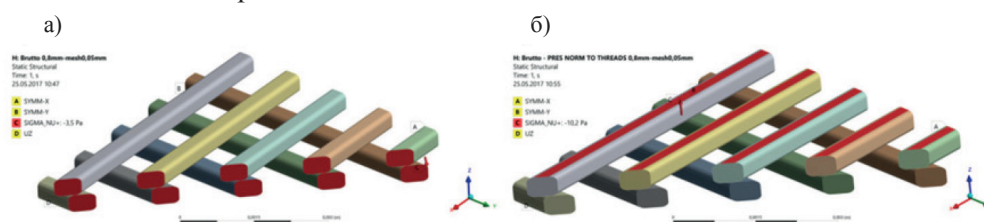


Рис. 6. Расчётная модель структуры заполнения для исследования адгезионной прочности:
а — нагружение в плоскости волокон; б — нагружение по нормали к волокнам

Изучение влияния характерного размера структуры ячеек на её механическую прочность производилось по схеме плоской деформации (рис. 7), не учитывающей волокнистую структуру образца и, соответственно, возможность нарушения адгезии волокон. В этом случае стенки воспринимают значительную долю нагрузки, а потому их учёт обязателен. Рассматривалась 1/2 рабочей части, нагруженная по торцу единичным брутто-напряжением (пересчитанным, как и в предыдущем случае, в нетто-напряжение) и закреплённая по противоположному торцу согласно условию симметрии и условию отсутствия перемещения образца по оси y как абсолютно твёрдого тела (в последнем случае принималось равным нулю перемещение v в начале координат, что, вообще говоря, создаёт краевой эффект). Таким образом, были рассмотрены только выращенные в горизонтальном положении образцы, нагружаемые в плоскости внутренней структуры ячеек.

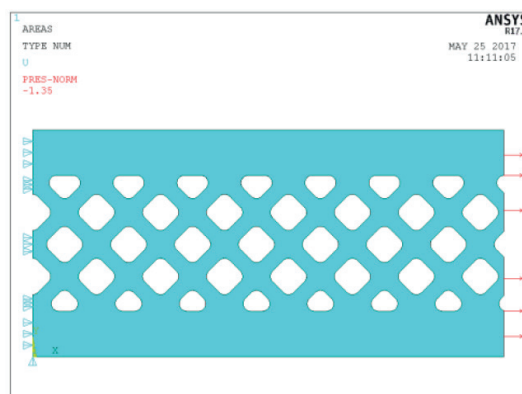


Рис. 7. Расчётная модель рабочей части образца для исследования механической прочности

И в том и в другом случае исследовалась концентрация вдали от зон проявления краевых эффектов. Последнее обстоятельство, в частности, позволяет отойти от строгости формулировки граничных условий. Характерные коэффициенты концентрации напряжений оценивались по эквивалентным напряжениям. Проведённые эксперименты показали, что материал хрупкий, а потому за эквивалентное принималось напряжение по гипотезе наибольших касательных.

Результаты (Results)

В таблице обобщены экспериментальные величины предела прочности полилактида в форме исходного материала, материала после переплавки, а также материала ячеистой структуры, получаемых методом 3D-печати изделий, с различной процентной плотностью заполнения внутреннего объёма.

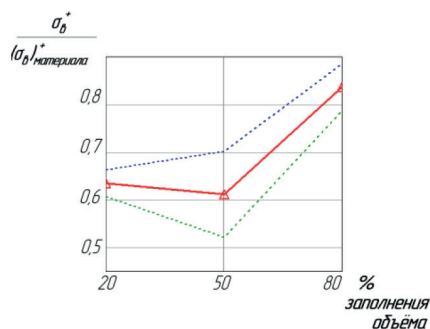
Предел прочности полилактида (PLA) при растяжении

PLA	Исходный материал	Переплавленный материал			Ячеистая структура					
					растяжение в плоскости волокон			растяжение по нормали к волокнам		
					плотность заполнения, %			плотность заполнения, %		
					20	50	80	20	50	80
σ_b^+ , МПа	50,93 $\pm 2,08$	42,76 $\pm 7,05$	53,79 $\pm 6,42$	44,39 $\pm 2,82$	32,31 $\pm 1,43$	31,16 $\pm 4,57$	42,60 $\pm 2,49$	32,31 $\pm 1,43$	29,39 $\pm 4,85$	39,20 $\pm 2,07$

На рис. 8 и 9 представлены зависимости относительного (по отношению к нити диаметром 1,75) предела прочности с доверительным интервалом (эксперимент, рис. 8, а) и соответствующего ему характерного коэффициента концентрации напряжений α_σ (расчёт см. на рис. 8, б)

от плотности заполнения, для образцов, выращенных, соответственно, в горизонтальном и вертикальном положении, т. е. нагружаемых в плоскости внутренней структуры либо нормально к ней. В соответствии с отмеченными ранее закономерностями расчётные зависимости составлены из двух ветвей: *механической*, полученной расчётным способом по схеме плоской деформации при малом заполнении, и *адгезионной* — при большом.

а)



б)

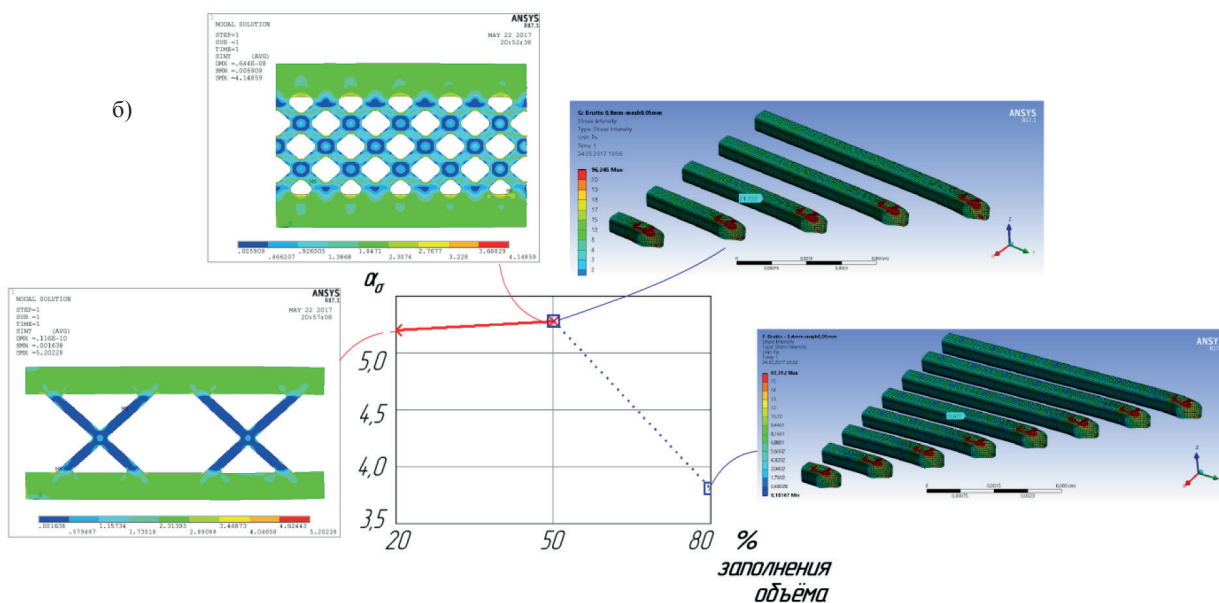
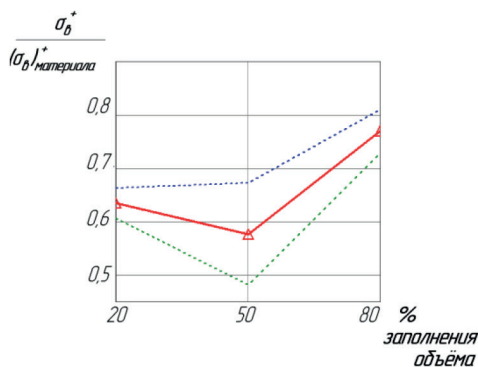


Рис. 8. Опытный (а) и расчётный (б) показатели прочности образцов, изготовленных горизонтально

Правая ветвь зависимости (см. рис. 8, б) масштабирована к левой ветви графика по центральному (при заполнении 50 %) значению α_{σ} , для масштабирования правой ветви зависимости (рис. 9, б) использован тот же множитель, поскольку левая ветвь по схеме плоской деформации не может быть получена.

а)



б)

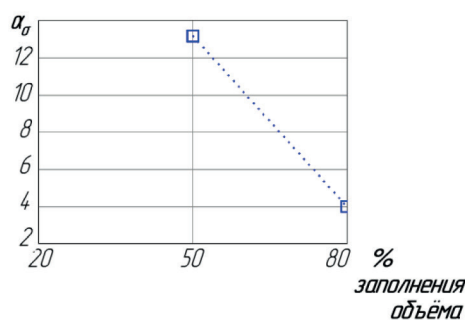


Рис. 9. Опытный (а) и расчётный (б) показатели прочности образцов, изготовленных вертикально

На рис. 10 – 11 показаны опытные диаграммы растяжения различных образцов в партии, на рис. 12 и 13 — характерные микрофотографии поверхности разрушения при той или иной плотности заполнения.

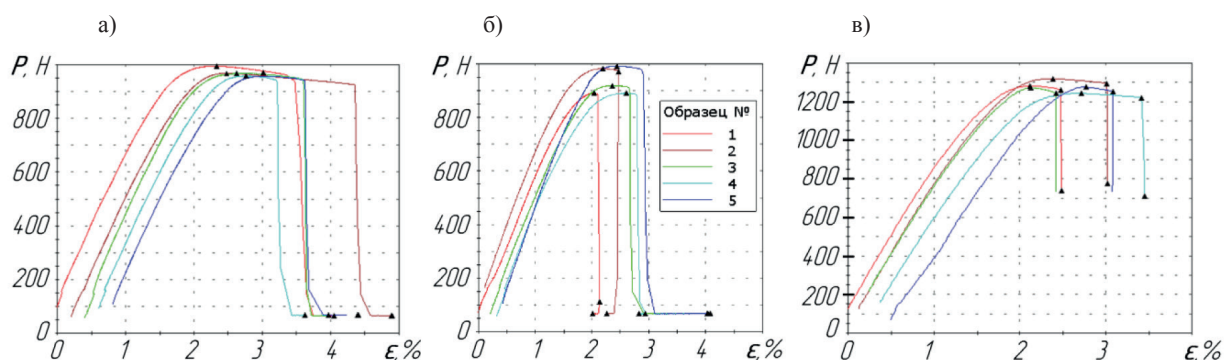


Рис. 10. Экспериментальные диаграммы растяжения образцов, изготовленных в горизонтальном положении, при различной плотности заполнения: а — 20 %; б — 50 %; в — 80 %

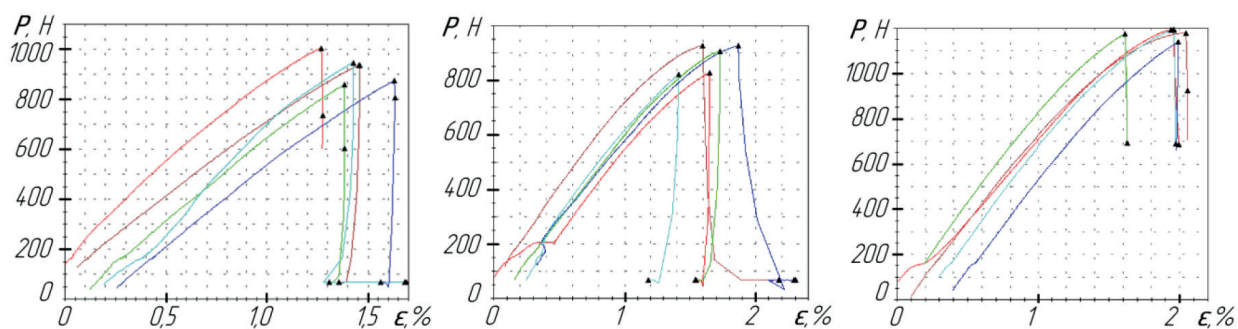


Рис. 11. Экспериментальные диаграммы растяжения образцов, изготовленных в вертикальном положении, при различной плотности заполнения: а — 20 %; б — 50 %; в — 80 %

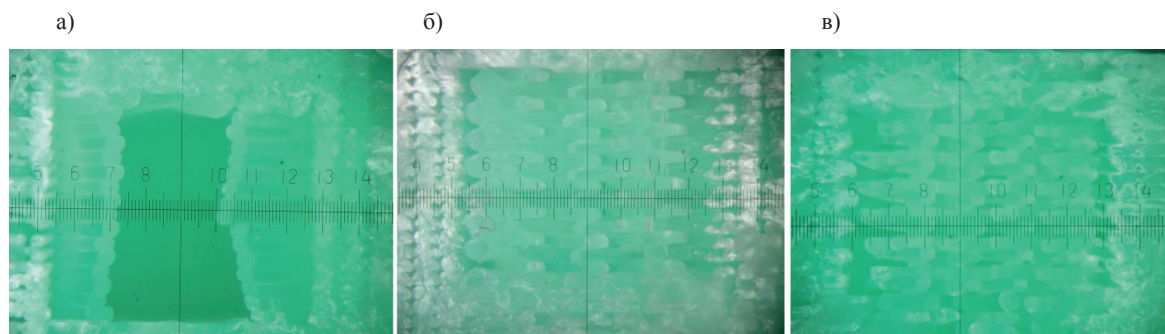


Рис. 12. Микрофотографии разрушенной поверхности образцов, изготовленных в горизонтальном положении: а — 20 %; б — 50 %; в — 80 %

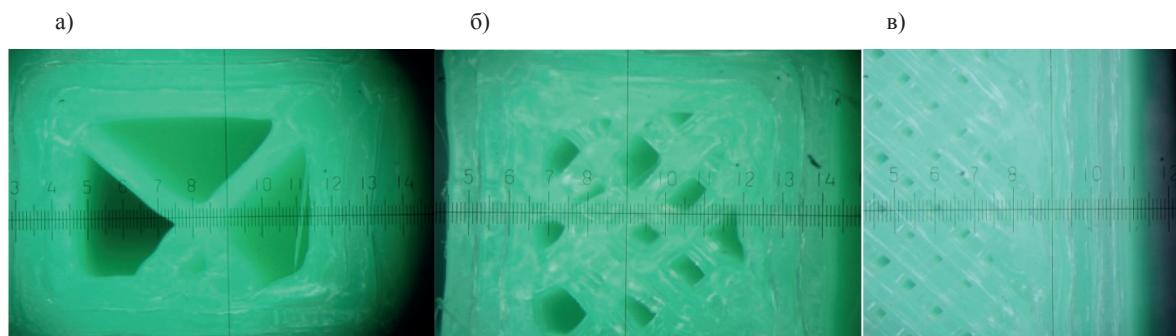


Рис. 13. Микрофотографии разрушенной поверхности образцов, изготовленных в вертикальном положении: а — 20 %; б — 50 %; в — 80 %

Обсуждение (Discussion)

Испытания показали примерно одинаковую прочность исходного и переплавленного материала. В последнем случае прочность отдельных волокон существенно лимитируется технологией их отделения от подложки — один из образцов показал прочность 50,66 МПа. Вопреки ожиданиям, монотонного повышения прочности с ростом плотности заполнения нет (см. рис. 8 и 9), отдельного рассмотрения требует наблюдаемое снижение прочности при близком к 50 % заполнении. Так или иначе, неувеличение прочности можно объяснить возрастанием числа концентраторов на единицу объёма, что помимо усиления их взаимодействия друг с другом повышает вероятность попадания дефектов материала в области концентрации.

Как эксперимент (сравнение рис. 8, а и рис. 9, а), так и расчёт (сравнение рис. 8, б и рис. 9, б соответственно) показывают, что адгезионная прочность ниже механической. Причём расчёт даёт существенно заниженные по сравнению с экспериментом предельные напряжения. Необходимо также учесть, что масштабный множитель для правой ветви зависимости рис. 8, б существенно меньше единицы, что, по всей видимости, объясняется неучётом адгезии со стенками и приближённостью схемы нагружения. Первый фактор является более существенным для нагружаемых нормально к плоскости волокон образцов, прочность которых лимитируется адгезией волокон. Действительно, при нагружении волокон в их плоскости разрушение образца происходит по механизму разрыва волокон (в прочности преобладает механическая составляющая), при нагружении нормально к плоскости — по механизму отрыва волокон друг от друга (превалирует адгезионная компонента). В последнем случае необеспечение адгезии отдельных волокон вследствие ошибки в работе управляющей программы может привести к разрушению детали (рис. 14).

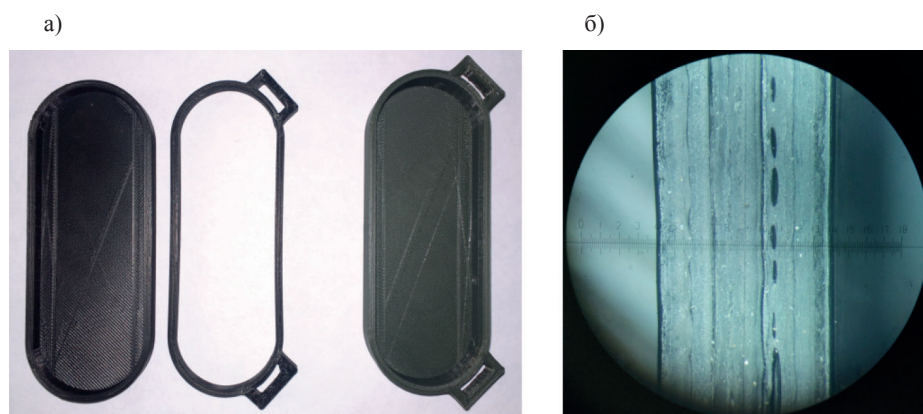


Рис. 14. Пример разрушения детали за счёт отрыва нитей по всему контуру:

а — разрушенная деталь рядом с аналогичной неразрушенной;

б — микрофотография поверхности разрушения

Заключение (Conclusion)

Проведённые исследования показали, что существенное влияние на прочность получаемых аддитивным способом изделий из ячеистых пластиков оказывают концентрация напряжений в углах ячеек и адгезия составляющих структуру волокон. При невысокой плотности заполнения, когда ячейки тонкостенные, прочность изделия лимитирует концентрация механических напряжений, при этом учёт каждого конкретного волокна в расчёте не обязателен. При большой плотности (большой степени сплошности, за меру которой можно принять отношение нетто- и брутто-площадей сечения) определяющее влияние на прочность изделия оказывает адгезия волокон. Линия разграничения приблизительно соответствует плотности заполнения 50 %, представляется возможным связать её с долей поверхностей сопряжения волокон в общей поверхности, проекция внешней нагрузки на которую отлична от нуля. Также представляется возможным ввести для расчёта ячеистой структуры понятие *физически бесконечно малого объёма* и определять феноменологические параметры через физико-механические либо адгезионные характеристики.

Прочность материала при переплавке снижается, пластичность тонкой плёнки ленты толщиной 0,25 мм существенно выше, чем для нити исходного материала. Вопрос зависимости основных физико-механических характеристик получаемых аддитивно изделий из полилактида от скорости нагружения требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galeta T. Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects / T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši // *Procedia Engineering*. — 2016. — Vol. 149. — Pp. 100–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.644.
2. Galeta T. Influence of Processing Factors on the Tensile Strength of 3D-printed Models / T. Galeta, I. Kladari, M. Karaka // *Materials and technology*. — 2013. — Vol. 47. — № 6. — Pp. 781–788.
3. Impens D. Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components / D. Impens, R. J. Urbanic // *IFAC-PapersOnLine*. — 2015. — Vol. 48. — Is. 3. — Pp. 652–657. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.156.
4. Rankouhi B. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. — 2016. — Vol. 16. — Is. 3. — Pp. 467–481. DOI: 10.1007/s11668-016-0113-2.
5. Torrado A. R. Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns / A. R. Torrado, D. A. Roberson // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. — 2016. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 154–164. DOI: 10.1007/s11668-016-0067-4.
6. Torrado Perez A. R. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials / A. R. Torrado Perez, D. A. Roberson, R. B. Wicker // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. — 2014. — Vol. 14. — Is. 3. — Pp. 343–353. DOI: 10.1007/s11668-014-9803-9.
7. Mohamed O. A. Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik, M. Nikzad, J. Azadmanjiri // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2016. — Vol. 25. — Is. 7. — Pp. 2922–2935. DOI: 10.1007/s11665-016-2157-6.
8. Wenzheng W. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study Between PEEK and ABS / W. Wenzheng, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao // *Materials*. — 2015. — Vol. 8. — Is. 9. — Pp. 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.
9. Christiyani K. G. J. Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer / K. G. J. Christiyani, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. — 2016. — Pp. 1–5. DOI: 10.1007/s40032-016-0344-8.
10. Li D. Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects / D. Li, N. Dai, X. Jiang, X. Chen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2016. — Vol. 83. — Is. 9-12. — Pp. 1627–1635. DOI: 10.1007/s00170-015-7704-z.

REFERENCES

1. Galeta, Tomislav, P. Raos, J. Stojšić, and I. Pakši. "Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects." *Procedia Engineering* 149 (2016): 100–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.644.
2. Galeta, Tomislav, I. Kladari, and M. Karaka. "Influence of Processing Factors on the Tensile Strength of 3D-printed Models." *Materials and technology* 47.6 (2013): 781–788.
3. Impens, David, and R. J. Urbanic. "Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components." *IFAC-PapersOnLine* 48.3 (2015): 652–657. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.156.
4. Rankouhi, B., S. Javadpour, F. Delfanian, and T. Letcher. "Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16.3 (2016): 467–481. DOI: 10.1007/s11668-016-0113-2.
5. Torrado, Angel R., and David A. Roberson. "Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16.1 (2016): 154–164. DOI: 10.1007/s11668-016-0067-4.

6. Torrado Perez, Angel R., David A. Roberson, and Ryan B. Wicker. "Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 14.3 (2014): 343–353. DOI: 10.1007/s11668-014-9803-9.
7. Mohamed, Omar Ahmed, Syed Hasan Masood, Jahar Lal Bhowmik, Mostafa Nikzad, and Jalal Azadmanjiri. "Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment." *Journal of Materials Engineering and Performance* 25.7 (2016): 2922–2935. DOI: 10.1007/s11665-016-2157-6.
8. Wu, Wenzheng, Peng Geng, Guiwei Li, Di Zhao, Haibo Zhang, and Ji Zhao. "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study Between PEEK and ABS." *Materials* 8.9 (2015): 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.
9. Christiyani, K. G. Jaya, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu. "Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* (2016): 1–5. DOI: 10.1007/s40032-016-0344-8.
10. Li, Dawei, Ning Dai, Xiaotong Jiang, and Xiaosheng Chen. "Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.9-12 (2016): 1627–1635. DOI: 10.1007/s00170-015-7704-z.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Маркович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: tehmeh@spbgasu.ru

Безпальчук Сергей Николаевич —
заведующий межкафедральной лабораторией,
директор испытательного центра
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: ualaes@mail.ru

Яковлев Сергей Павлович — аспирант
Научный руководитель:
Иванов Константин Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова»
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. 1-я Красноармейская, 1
e-mail: yakovlev_sp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov, Vladimir M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: tehmeh@spbgasu.ru

Bezpal'chuk, Sergey N. —
Inter-departmental Laboratory Head,
Testing Center Head
Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: ualaes@mail.ru

Yakovlev, Sergey P. — Postgraduate
Supervisor:
Ivanov, Konstantin M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Baltic state technical university «VOENMEH»
named after D.F. Ustinov
1 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: yakovlev_sp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 июля 2017 г.
Received: July 15, 2017.