

А. М. Буруруев, В. М. Козинцев, Е. В. Мурашкин, А. Л. Попов, Д. А. Челюбеев,
А. В. Ченцов, П. С. Бычков

О ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ В АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. В настоящей статье обсуждается релаксация напряжений и ползучесть в образце, полученном аддитивным способом. Образец изготавливается методом послойной фотополимеризации. Эксперимент представляет собой сжатие двух противоположных граней образца. Предложена схема экспериментальной установки и метод измерения параметров напряженно-деформированного состояния. Предложена аппроксимация кривой ползучести. Метод спекл-интерферометрии используется для исследования ползучести образца без нагрузки в процессе релаксации напряжений. Получены закономерности между релаксацией напряжений в фотополимере и ползучестью.

Ключевые слова: 3D-печать, поверхностный рост, остаточное напряжение, ползучесть, релаксация, фотополимер, кривая релаксации

DOI: 10.26293/chgpu.2019.41.3.010

УДК: 539.374

Введение

Изготовление изделий путем добавления нового материала широко используется в современной инженерной практике [1]. К таким способам аддитивного производства

© Буруруев А. М., Козинцев В. М., Мурашкин Е. В., Попов А. Л., Челюбеев Д. А., Ченцов А. В., Бычков П. С. 2019

Буруруев Алексей Михайлович

e-mail: alexey@buruguev.ru, ведущий инженер лаборатории моделирования в МДТТ ИПМех РАН, г. Москва, Россия.

Козинцев Виктор Михайлович

e-mail: kozincev@mail.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, г. Москва, Россия.

Мурашкин Евгений Валерьевич

e-mail: murashkin@ipmnet.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования в МДТТ ИПМех РАН, г. Москва, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-19-01257.

Поступила 09.09.2019

относятся: лазерная стереолитография, селективное лазерное спекание, электронно-лучевая плавка, моделирование методом наплавления, метод многоструйного моделирования, изготовление объектов с использованием ламинирования, 3D-печать, DLP (Digital Light Processing — цифровая обработка светом) [2], компьютерная осевая литография, послойное бетонирование.

Основным расходным материалом для методом DLP является жидкий фотополимер, воскообразные субстанции, а также материалы. В 3D-принтерах этого типа используется схожая система облучения световым потоком в соответствии с заданной программой на расходный материал. Под действием ультрафиолета фотополимер затвердевает, образуя слой будущего изделия. Моделирование продолжается слой за слоем, пока объект не будет полностью готов.

Проявление свойств ползучести и релаксации напряжений в разной степени характерно для всех конструкционных материалов [3, 4, 5, 6]. Наиболее заметно их проявление в пластических материалах. Не исключением являются и материалы, используемые в аддитивных технологиях [7, 8, 9].

Известны и регламентированы в стандартах испытания на ползучесть и релаксацию. Для этого создаются идеализированные условия, например, жесткого заземления краев нагруженного образца, или весового нагружения свободно висящего образца, обеспечивающие проявление только одного из этих свойств. Однако в большинстве случаев на практике нагруженные элементы находятся в упругом контакте с другими элементами конструкции. В результате происходит одновременное и взаимовлияющее проявление свойств как релаксации, так и ползучести их материалов.

В настоящей работе рассматриваются как чисто релаксационные свойства образцов из фотополимерных материалов, изготовленных послойно методом трехмерной печати с помощью 3D принтера DLP-типа, так и проявления этих свойств в условиях ползучести. Для этого была собрана измерительная установка (рис. 1), состоящая из тисков, в которых зажимался образец 2, S-образного датчика силы 1, данные с которого поступали на силоизмерительный преобразователь ТЕНЗО-М и далее обрабатывались в ЭВМ, упругой пластины 4 между силоизмерительным датчиком и образцом, выступающий край которой контактировал с субмикронным датчиком перемещений 3, также соединенным с ЭВМ.

© Буруруев А. М., Козинцев В. М., Мурашкин Е. В., Попов А. Л., Челюбеев Д. А., Ченцов А. В., Бычков П. С. 2019

Попов Александр Леонидович

e-mail: rorov@ipmnet.ru, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, г. Москва, Россия.

Челюбеев Дмитрий Анатольевич

e-mail: rorov@ipmnet.ru, младший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, г. Москва, Россия.

Ченцов Александр Викторович

e-mail: chentsov@ipmnet.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник механики технологических процессов, г. Москва, Россия.

Бычков Павел Сергеевич

e-mail: bychkov@ipmnet.ru, младший научный сотрудник лаборатории моделирования в МДГТ, г. Москва, Россия.

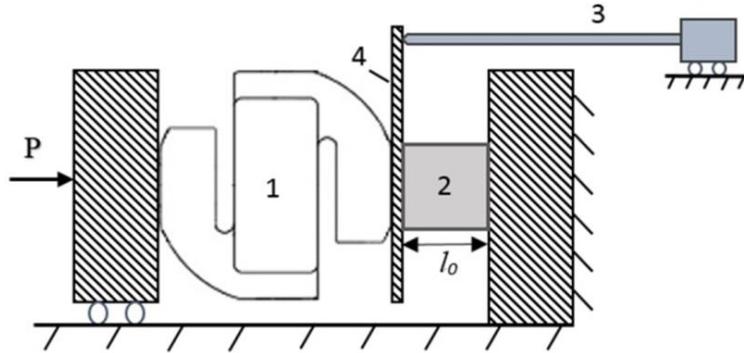


Рис. 1. Схема установки для определения кривой релаксации: 1 – S-образный тензодатчик, 2 – фотополимерный образец, 3 – субмикронный датчик перемещений, 4 – упругая пластина.

Образцы в форме параллелепипедов с размерами $20 \times 20 \times 40$ мм и кубиков с длиной грани 20 мм были напечатаны из фотополимера АВ 710 В. Послойная печать производилась с постоянной толщиной слоя City0,1 мм и пятнадцатисекундной засветкой каждого слоя. После снятия образцов с подложки выполнялась их дополимеризация путем засвечивания ртутной лампой до стадии ликвидации липкости образцов. Получаемый в результате процесса полимеризации материал обладал свойствами упругости и ползучести [3].

Оценка уровня нагружения образца, при котором приложенные нагрузки не приводили бы к появлению пластических деформаций, делалась на основании диаграммы сжатия одного из образцов, получаемой с помощью пресса ДТС-06-100. Непосредственное выполнение экспериментов проводилось с исходной сжимающей силой 7000 Н, что соответствовало среднему значению зоны упругости на диаграмме. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости напряжения от времени $\sigma(t)$ на начальном этапе – 10 минут (рис. 2а) и на продолжительном интервале времени – 5 часов (рис. 2б).

Полученная кривая похожа на известные зависимости для полимерных образцов [3] и может быть аппроксимирована по методике [10] в виде суммы экспонент с привлечением четырех характерных времен релаксации:

$$\sigma(t) = \sum_{k=1}^4 \sigma_k(t), \sigma_k(t) = a_k \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right), \quad k = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

где a_k, τ_k – аппроксимирующие постоянные; t – время.

Постоянные a_k, τ_k подбирают так, чтобы каждое из слагаемых суммы (1) корректно аппроксимировало соответствующий участок релаксации экспериментальной кривой. Результаты такого подбора приведены на рис. 3.

Вычисленные значения τ_k характерных времен релаксации можно представить в виде ступенчатой функции $\tau(t)$ (рис. 4):

$$\tau(t) = \sum_{k=1}^4 \tau_k [H(t - t_{k-1}) - H(t - t_k)], \quad t_0 = 0, t_4 = T,$$

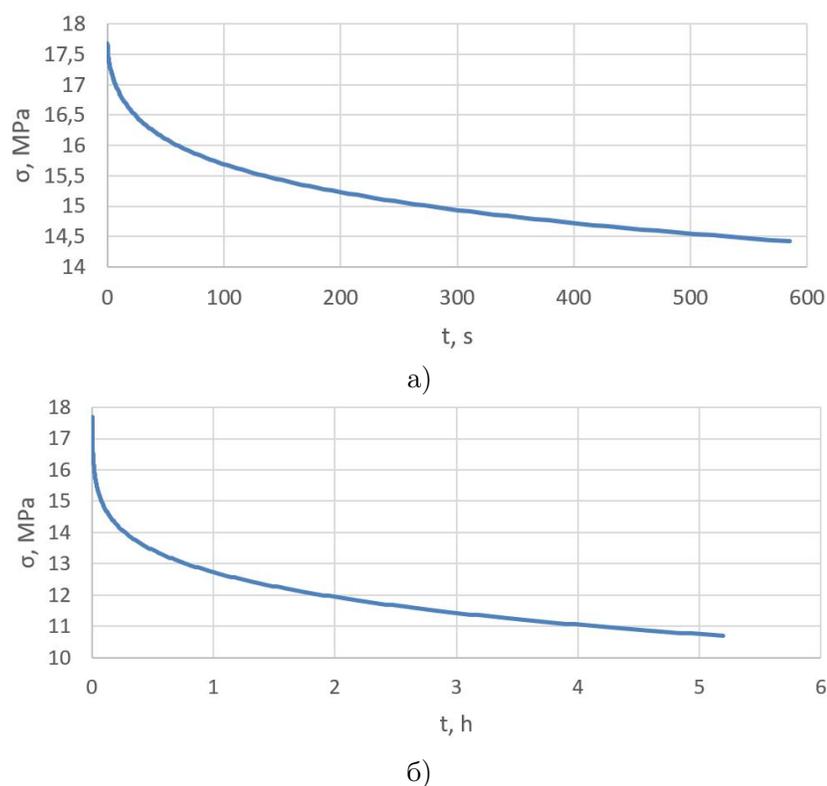


Рис. 2. Кривая релаксации напряжения в фотополимерном образце: а) на начальном этапе (0-10 мин); б) на длительном промежутке (0 – 5 ч).

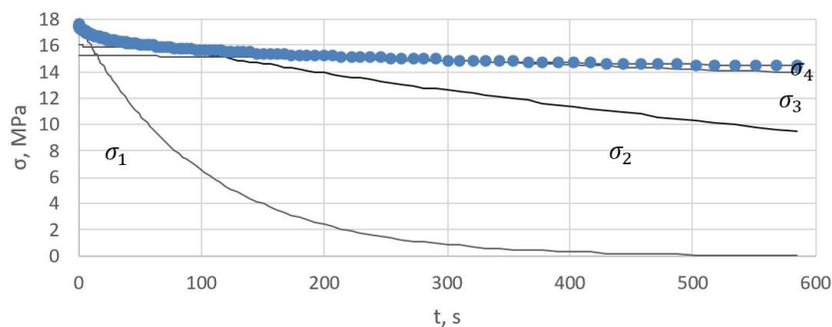


Рис. 3. Аппроксимации $\sigma_k(t)$ кривой релаксации, приведенной на рис. 2а.

где $H(t)$ – функция Хевисайда; T – полное время релаксации для кривой, изображенной на рис. 2а; t_k – моменты времени, определяющие интервалы, в которых функции $\sigma_k(t)$ наиболее близки к аппроксимируемой $\sigma(t)$. Следует отметить близкий к линейному закон изменения среднего (по участкам) времени релаксации (см. рис. 4).

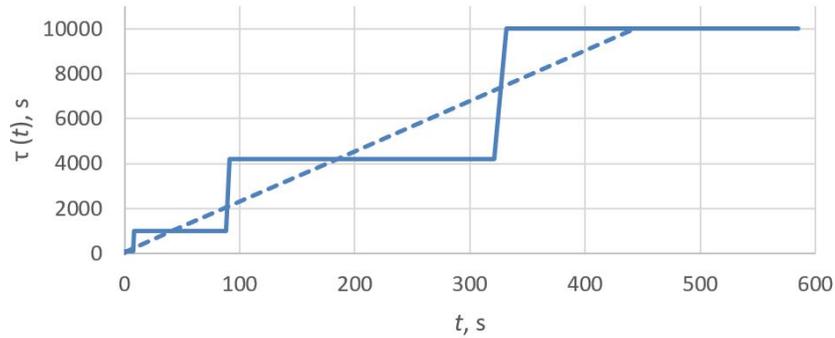


Рис. 4. Аппроксимации ступенчатыми функциями четырёх времён релаксации на характерных участках экспериментальной кривой релаксации; центральные точки участков с одинаковыми значениями времён релаксации соединены штриховой линией.

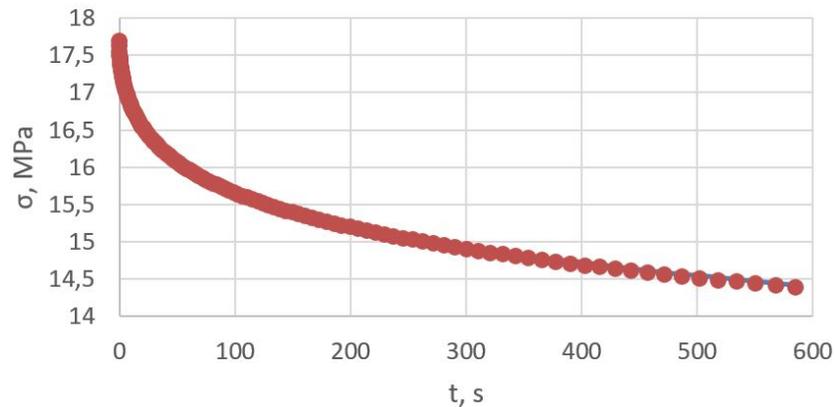


Рис. 5. Кривая релаксации и ее адаптивная аппроксимация.

Из этого следует, что наборы времён релаксации, выражающиеся ступенчатыми функциями, могут быть представлены линейными зависимостями. Это даёт возможность адаптивной аппроксимации в виде:

$$\sigma(t) = \sigma_0(t_0) \exp\left(-\frac{t-t_0}{a(t-t_0)+b}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_0(t_0)$ - напряжение в момент t_0 начала релаксации.

Функция (2) содержит всего два аппроксимирующих параметра a , b . В качестве иллюстрации на рис. 5 представлена такая аппроксимация сплошной тонкой линией.

Таким образом, предложенная адаптивная аппроксимация обеспечивает достаточную степень приближения к экспериментально полученной кривой релаксации напряжения в фотополимерном образце.

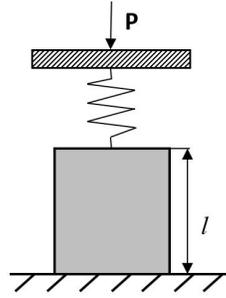


Рис. 6. Схема нагружения образца.

При сжатии образца через упругую пружину, в качестве которой выступает s-образный силоизмерительный датчик, релаксация напряжений в образце после остановки нагружения сопровождается его дополнительным сжатием, вызванным распрямлением s-образной пружины ввиду снижения сжимающей нагрузки. Это сжатие можно трактовать как ползучесть образца в условиях релаксации напряжений.

На рис. 6 изображена схема нагружения образца длиной l и площадью поперечного сечения F силой P через упругий элемент жесткостью c , при которой проявляется эффект ползучести образца в условиях релаксации напряжений. В соответствии с этой схемой считаем, что вначале происходит быстрое нагружение образца до значения силы $P = P_0$, вызывающей в образце напряжение $\sigma_0 = P_0/F$. При этом произойдет упругое сжатие образца на величину

$$\Delta l_e = \frac{P_0 l}{EF},$$

где E - модуль упругости материала образца.

Если бы образец был абсолютно жестким, то сокращение длины пружины при сжатии ее силой P_0 произошло бы на величину $u_0 = P_0/c$. Ввиду податливости образца, это перемещение будет меньше на величину Δl_e .

Следовательно, к моменту остановки нагружения имело место равенство:

$$\left(u_0 - \frac{\sigma_0 l}{E}\right) c = \sigma_0 F \quad (3)$$

После остановки нагружения образец переходит в стадию релаксации, совмещенной с ползучестью, в процессе которой возникает деформация $\varepsilon_r(t)$ и соответствующее ей сжатие образца $\Delta l_r = l\varepsilon_r(t)$. Тогда в момент времени t после начала релаксации сжатие пружины будет определяться равенством:

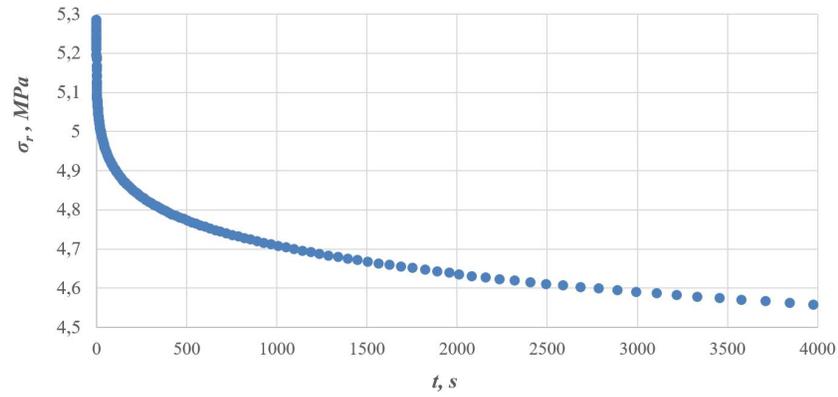
$$[u_0 - l\varepsilon_r(t)] c = \sigma_r(t) F \quad (4)$$

Исключая начальное смещение u_0 из равенств (3), (4), получим линейную зависимость между релаксирующим напряжением $\sigma_r(t)$ и деформацией ползучести $\varepsilon_r(t)$:

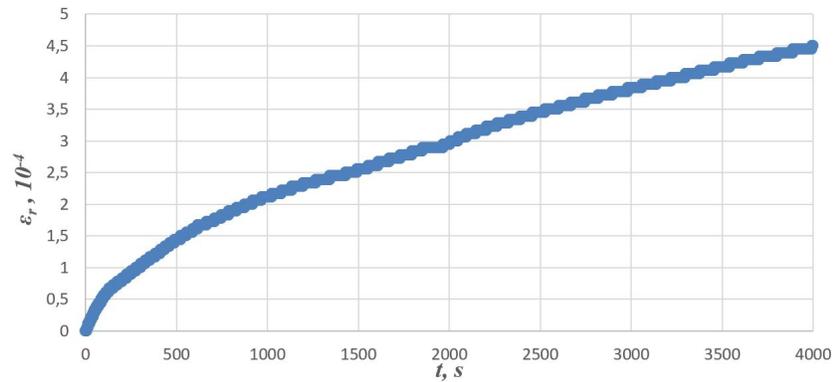
$$\sigma_r(t) = \sigma_0 - \frac{cl}{F} [\varepsilon_r(t) - \varepsilon_0], \quad \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E}. \quad (5)$$

На рис. 7 представлены, полученные экспериментально, зависимости $\sigma_r(t)(a)$, $\varepsilon_r(t) - (b)$ и вычисленная по этим кривым $\sigma_r(\varepsilon_r) - (c)$, нанесенная сплошной линией, в сопоставлении с теоретической зависимостью, построенной по формуле (5), нанесенной

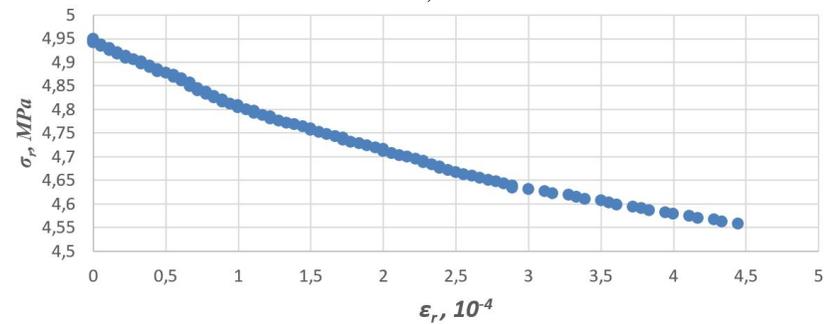
пунктирной линией; значение для жесткости s-образного силоизмерительного датчика было вычислено по данным документации к нему, где говорилось, что продольное смещение датчика при максимально допустимой нагрузке в $2T$ составляет 0,4 мм.



а)



б)



с)

Рис. 7.

Отметим, что в формуле (5), в отличие от стадии упругой разгрузки, снижение напряжения в образце происходит при росте его деформации. Подобный эффект был описан ранее в [10], где рассматривался стержень, находящийся в состоянии ползучести, соединённый с предварительно растянутой пружиной.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution // *Business horizons*. 1990. Vol. 55. P. 155–162.
- [2] Wu G.-H., Hsu S.-h. polymeric-based 3D printing for tissue engineering // *Journal of medical and biological engineering*. 2015. Vol. 35, no. 3. P. 285–292.
- [3] Работнов Ю. Н., Милейко С. Т. Кратковременная ползучесть. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970.
- [4] Бажин А. А., Мурашкин Е. В. Математическое моделирование усложненных реологических свойств материалов в условиях больших деформаций // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2010. № 2. С. 71–76.
- [5] Bazhin A., Murashkin E. Creep and stress relaxation in the vicinity of a micropore under the conditions of hydrostatic loading and unloading // *Doklady Physics / Springer*. Vol. 57. 2012. P. 294–296.
- [6] Bazhin A., Burenin A., Murashkin E. Simulation of the process of the accumulation of large irreversible deformations under plastic flow and creep conditions // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016. Vol. 80, no. 2. P. 182–189.
- [7] Manzhirov A. V. Advances in the theory of surface growth with applications to additive manufacturing technologies // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. P. 11–16.
- [8] Application of the probe hole method for diagnostics of shrinkage stresses in products of additive technologies / A. Popov, V. Kozintsev, A. Levitin et al. // *IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials (Moscow, Russia, August 20-25. Vol. 2018. 2018. p. 66.*
- [9] Determination of Residual Stresses in Products in Additive Production by the Layer-by-Layer Photopolymerization Method / P. Bychkov, V. Kozintsev, A. Manzhirov et al. // *Mechanics of Solids*. 2017. Vol. 52, no. 5. P. 524–529.
- [10] Goldstein R., Popov A., Chentsov A. Calculation experimental technique for predicting the relaxation properties of thin polymer fibers during long-term loading // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016. Vol. 2016, no. 10. P. 951–955.

A. M. Bururuev, V. M. Kozintsev, E. V. Murashkin, A. L. Popov, D. A. Chelubeev,
A. V. Chentsov, P. S. Bychkov

**ON CREEP AND RELAXATION IN ADDITIVE MANUFACTURED PARTS
FROM PHOTOPOLYMER MATERIAL**

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
101, korp. 1, pr. Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation.*

Abstract. In present paper the stress relaxation and creep in additive produced sample is discussed. The sample is manufactured by layer-by-layer photopolymerization. The experiment is the compression in two opposite faces. The scheme of experimental facility and measurement method are proposed. Stress relaxation is are plotted. The approximation of creep curve is discussed. The speckle-interferometry technique is used for a creep of load-free faces of the sample during stress relaxation process observation. The ratio between stress relaxation in a photopolymer and creep are obtained.

Keywords: 3D printing, surface growth, residual stress, creep, relaxation, photopolymer, relaxation curve

REFERENCES

- [1] Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution // Business horizons. 1990. Vol. 55. P. 155–162.
- [2] Wu G.-H., Hsu S.-h. Polymeric-based 3D printing for tissue engineering // Journal of medical and biological engineering. 2015. Vol. 35, no. 3. P. 285–292.
- [3] Bazhin A., Murashkin E. Creep and stress relaxation in the vicinity of a micropore under the conditions of hydrostatic loading and unloading // Doklady Physics / Springer. Vol. 57. 2012. P. 294–296.

Bururuev Aleksei Mikhailovich

e-mail: alexey@bururuev.ru, Leading Engineer of the Laboratory for Modeling in Mechanics of Solids IPMech RAS, Moscow, Russia.

Kozintsev Viktor Mikhailovich

e-mail: kozincev@amil.ru, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Laboratory of Mechanics and Fracture of Materials and Structures, IPME RAS, Moscow, Russia.

Murashkin Evgenii Valerievich

e-mail: murashkin@ipmnet.ru, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Modeling Laboratory at MDTT IPMeh RAS, Moscow, Russia.

Popov Alexander Leonidovich

e-mail: popov@ipmnet.ru, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Leading Researcher, Laboratory of Mechanics and Fracture of Materials and Structures, IPME RAS, Moscow, Russia.

Chelyubeev Dmitry Anatolyevich

e-mail: popov@ipmnet.ru, Junior Researcher, Laboratory of Mechanics and Fracture of Materials and Structures, IPMech RAS, Moscow, Russia.

Chentsov Aleksandr Viktorovich

e-mail: chentsov@ipmnet.ru, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Mechanics of Technological Processes, Moscow, Russia.

Bychkov Pavel Sergeevich

e-mail: bychkov@ipmnet.ru, Junior Researcher, Modeling Laboratory at MDTT, Moscow, Russia.

-
- [4] Bazhin A., Burenin A., Murashkin E. Simulation of the process of the accumulation of large irreversible deformations under plastic flow and creep conditions // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016. Vol. 80, no. 2. P. 182–189.
 - [5] Bazhin A. A., Murashkin E. V. Mathematical modeling of the complicated rheological properties of materials under conditions of large deformations // *Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after YA Yakovleva. Series: Limit State Mechanics*. 2010. no. 2. P. 71–76.
 - [6] Manzhirov A. V. Advances in the theory of surface growth with applications to additive manufacturing technologies // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. P. 11–16.
 - [7] Application of the probe hole method for diagnostics of shrinkage stresses in products of additive technologies / A. Popov, V. Kozintsev, A. Levitin et al. // *IUTAM Symposium on Mechanical design and analysis for AM technologies. Symposium materials (Moscow, Russia, August 20-25. Vol. 2018. 2018. p. 66.*
 - [8] Determination of Residual Stresses in Products in Additive Production by the Layer-by-Layer Photopolymerization Method / P. Bychkov, V. Kozintsev, A. Manzhirov et al. // *Mechanics of Solids*. 2017. Vol. 52, no. 5. P. 524–529.
 - [9] Rabotnov Y. N., Mileyko S. T. *Short-Term Creep*. Science. Ch. ed. Phys.–Math. lit., 1970.
 - [10] Goldstein R., Popov A., Chentsov A. Calculation experimental technique for predicting the relaxation properties of thin polymer fibers during long-term loading // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016. Vol. 2016, no. 10. P. 951–955.