

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПЭВП

С.В. Литвинов, Л.И. Лесняк, С.Б. Языев, И.М. Зотов

Степан Викторович Литвинов*, Любовь Ивановна Лесняк*, Сердар Батырович Языев,
Иван Михайлович Зотов

Кафедра «Сопротивление материалов», Донской государственной технической университет, пл. Гагарина, 1,
Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344000

E-mail: litvstep@gmail.com*, trush-l@mail.ru*, serdariaziev@gmail.com, z-o-t-o-v@mail.ru

Изменение напряженно-деформированного состояния с течением времени в конструкциях и их элементах из полимерных материалов может быть весьма существенно. Связано это с выраженной реологией полимеров. Одним из наиболее точных законов связи напряжения-деформации является обобщенное нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича, которое учитывает три реологических параметра: модуль высокоэластичности, модуль скорости и коэффициент начальной релаксационной вязкости. Значительное влияние на физико-механические параметры полимера также оказывают различные факторы: наличие температурного поля и ионизирующего излучения, наличие добавок в полимере и так далее. В статье приводятся результаты математического моделирования диска в осесимметричной постановке из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) под действием механического осевого давления. Данная модель выбрана в связи с наиболее частым использованием ПЭВП облученного и с добавками в медицине, в том числе и для изготовления ортопедических протезов. Рассматриваются разные составы ПЭВП: под действием ионизирующего излучения, с добавками гидроксиапатита и при их совместном влиянии. Все физико-механические параметры ПЭВП от дозы ионизирующего излучения и доли введенного гидроксиапатита описываются математическими выражениями, полученными в научной школе профессора Б.М. Языева на основе анализа соответствующих кривых релаксации полимера. Результаты решения задачи показали, что основные базовые напряжения (радиальное, окружное и осевое) изменяются с течением времени по-разному. Рост величины основных базовых напряжений может быть в 2-2,5 раза. Если же анализ проводится по главным напряжениям, то их величина увеличивается примерно в 1,5 раза. Кроме того, изменение главных напряжений наблюдается даже тогда, когда по основным базовым напряжениям оно не наблюдается.

Ключевые слова: полиэтилен высокой плотности, гидроксиапатит, гамма-излучение, реология, ползучесть, неоднородность, закон Максвелла-Гуревича, метод конечных элементов

INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL BODY OF MODIFIED HDPE

S.V. Litvinov, L.I. Lesniak, S.B. Yazyev, I.M. Zotov

Stepan V. Litvinov*, Lyubov I. Lesniak*, Serdar B. Yazyev, Ivan M. Zotov

Department of "Strength of Materials", Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, 344000,
Russia

E-mail: litvstep@gmail.com*, trush-l@mail.ru*, serdariaziev@gmail.com, z-o-t-o-v@mail.ru

The change in the stress-strain state over time in structures and their elements from polymeric materials can be quite substantial. This is due to the pronounced rheology of the polymers. One of the most accurate laws of stress-strain bond is generalized nonlinear Maxwell-Gurevich equation, which takes into account three rheological parameters: the modulus of elasticity, the velocity modulus and the coefficient of initial relaxation viscosity. A significant influence on the physico-mechanical parameters of the polymer is also exerted by various factors: the presence of a temperature field and ionizing radiation, the presence of additives in the polymer and so on. The paper presents the results of mathematical modeling of a disc made of high-density polyethylene (HDPE) in an axisymmetric setting under the influence of mechanical axial pressure. This model is chosen because of the most frequent use of HDPE irradiated and with additives in medicine,

including for the manufacture of orthopedic prostheses. Different compositions of HDPE are considered: under the influence of ionizing radiation, with additives of hydroxyapatite and with their combined effect. All physico-mechanical parameters of HDPE (dose of ionizing radiation and the fraction of hydroxyapatite injected) are described by mathematical expressions obtained in the scientific school of Professor B.M. Yazyev on the basis of an analysis of the corresponding polymer relaxation curves. The results of the solution of the problem have shown that the basic stresses (radial, circumferential and axial) vary in the course of time in different ways. The growth of the value of the primary basic stresses can be 2-2.5 times. If the analysis is carried out on the main stresses, then their value increases by approximately 1.5 times. Also, the change in the principal stresses is observed even when it is not observed for the basic stresses.

Key words: high density polyethylene, hydroxyapatite, gamma radiation, viscoelastic deformations, creep, inhomogeneity, Maxwell-Gurevich law, finite element method

Для цитирования:

Литвинов С.В., Лесняк Л.И., Языев С.Б., Зотов И.М. Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрического тела из модифицированного ПЭВП. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 118–122

For citation:

Litvinov S.V., Lesniak L.I., Yazyev S.B., Zotov I.M. Investigation of stress-strain state of cylindrical body of modified HDPE. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 7. P. 118–122

ВЕДЕНИЕ

В медицине с проблемой ограниченного движения человека давно борются при помощи протезирования и имплантирования. Но поиск лучшего искусственного материала, который подходил бы для этой задачи, является актуальным и сегодня.

Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) является одним из наиболее распространенных искусственных материалов, используемых при изготовлении имплантов и протезов, благодаря его биосовместимости, то есть его характеристики совпадают с характеристиками естественной кости [1-6]. Это свойство очень важно, так как оно исключает возможность развития остеопороза при эксплуатации протеза. Но реология, низкий модуль упругости и низкая биологическая активность накладывают некоторые ограничения на его использование.

В работах [7-13] были предприняты попытки улучшения вышеупомянутых свойств, в том числе и добавлением различных примесей к основному составу ПЭВП. Одной из таких добавок может быть гидроксиапатит (ГА), который положительно влияет на композитную жесткость и биологическую активность. Прочность ПЭВП обеспечивает себе сам. Вязкоупругое поведение материала легко описывается во времени и позволяет сделать прогноз о длительной прочности [14-20]. Таким образом, использование ГА в качестве армирующего элемента полимерного материала благоприятно сказывается и на биологической активности, и на реологическом поведении ПЭВП.

Гамма-излучение – один из часто используемых способов стерилизации в медицине многих

лекарственных препаратов, так как оно разлагает молекулы ДНК любых живых организмов. Но это еще не все. Радиация является причиной изменения молекулярной структуры полимера. Под воздействием гамма-излучения плотность сцепления длинных молекулярных цепей и концентрация связывающих молекул увеличиваются. Таким образом, стерилизация благоприятно сказывается на процессе сшивки молекулы композита.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции зависит от многих факторов: геометрии, способа закрепления, вида нагружения, состава материала и многого другого. А если вопрос касается полимеров, то составу необходимо уделить особое внимание. Потому что в зависимости от того, что это за полимер, были ли добавки и если были, то в каком количестве, и подвергался ли материал облучению, физико-механические параметры значительно варьируются. Что в свою очередь весьма ощутимо влияет на НДС конструкции.

Учениками школы Б.М. Языева получены выражения, определяющие физико-механические параметры ПЭВП в зависимости от доли ГА и уровня облучения Φ . Они имеют следующий вид:

Модуль упругости:

$$1. E(\text{ГА}, \Phi) = 694 + 1251 \cdot \text{ГА} + 2,908 \cdot \Phi - 4,498 \cdot \text{ГА} \cdot \Phi \text{ [МПа]} \quad (1)$$

Модуль высокоэластичности:

$$2. E_{\infty}(\text{ГА}, \Phi) = 228,9 + 1093 \cdot \text{ГА} + 2,276 \cdot \Phi - 1,5 \cdot \text{ГА} \cdot \Phi \text{ [МПа]} \quad (2)$$

Модуль скорости:

$$3. m^*(\text{ГА}, \Phi) = 5,545 + 8,501 \cdot \text{ГА} + 0,01283 \cdot \text{ГА} \text{ [МПа]} \quad (3)$$

Коэффициент начальной релаксационной вязкости:

$$4. \eta_0^*(\Gamma A, \Phi) = 1113 + 2398 \cdot \Gamma A + 8,877 \cdot \Phi - 32,64 \cdot \Gamma A \cdot \Phi \text{ [МПа} \cdot \text{ч]} \quad (4)$$

Анализ выражений (1)-(4) показывает, что с ростом доли ΓA и уровня облучения Φ все упругие и реологические параметры увеличиваются, некоторое исключение составляет коэффициент начальной релаксационной вязкости, который при одновременном введении ΓA и облучении материала имеет величину примерно такую же, как только при введении ΓA или только облучении ПЭВП.

Для оценки влияния на напряженно-деформированное состояние полимерного тела различных сочетаний добавок и уровня ионизирующего излучения была рассмотрена задача: плоская шайба под действием сжимающей нагрузки, которая может являться примитивной моделью протеза. Постановка задачи и расчетная схема приведена на рис. 1.

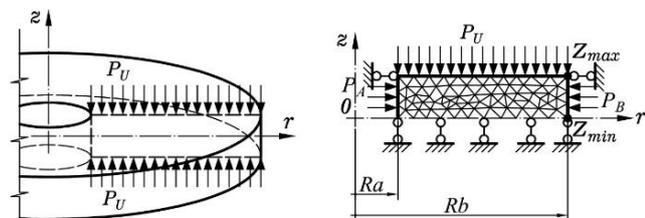


Рис. 1. Цилиндрическое сжимаемое тело конечной длины: постановка задачи и расчетная схема. R_a — внутренний радиус цилиндра; R_b — внешний радиус цилиндра; P_U — давление на торцах цилиндра; P_A — давление на внутренней грани цилиндра; P_B — давление на внешней грани цилиндра

Fig. 1. Cylindrical compressible body of finite length: problem statement and design scheme. R_a is the inner radius of the cylinder; R_b is outer radius of the cylinder; P_U is the pressure at the ends of the cylinder; P_A — the pressure on the inner face of the cylinder; P_B — pressure at the outer face of the cylinder

Высота тела $h = 1 \text{ см} = 0,010 \text{ м}$. Вследствие того, что тело симметрично относительно горизонтальной оси, достаточно рассмотреть только половину образца, в результате чего исходные данные принимают следующий вид: давление на внутренней грани цилиндра $P_A = 0 \text{ МПа}$, давление на внешней грани цилиндра $P_B = 0 \text{ МПа}$, давление на верхнем торце цилиндра $P_U = -10 \text{ МПа}$ (минус – сжатие), внутренний радиус $R_a = 0,010 \text{ м}$, внешний радиус $R_b = 0,050 \text{ м}$, координата нижней точки $z_{\min} = 0 \text{ м}$, координата верхней точки $z_{\max} = h/2 = 0,005 \text{ м}$. Предел времени, до которого происходит расчет $\text{limTime} = 10 \text{ ч}$, число интервалов разбиения по времени $\text{qnIntT} = 20 \text{ шт}$. Временные интервалы переменные, отношение последнего интервала времени

к самому первому – 100. Моделирование было произведено методом конечных элементов. Элементы использовались треугольные таким образом, чтобы сторона элемента не превышала такой величины, чтобы по высоте цилиндра вместились не менее 10 элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет напряженно-деформированного состояния полимерной конструкции производился с использованием нелинейного обобщенного уравнения связи Максвелла-Гуревича [19]. В результате проведенных расчетов были построены двумерные графики распределения радиальных, окружных, осевых и касательных напряжений в разные моменты времени в зависимости от доли ΓA и наличия ионизирующего излучения. Анализируя данные графики, можно сделать вывод, что напряжения в конце расчетного периода по сравнению с начальным увеличиваются в 2-2,5. Данные графики не приводятся в статье, так как они являются громоздкими и малоинформативными. Более информативными являются графики распределения максимальных и минимальных значений радиальных, окружных, осевых и касательных напряжений во времени, приведенные на рис. 2.

Также был проведен анализ изменения главных напряжений: максимального σ_1 и минимального σ_3 (рис. 3). Для этого были выделены максимальные и минимальные значения напряжений, а затем построены графики изменения этих параметров во времени. На них отчетливо видно изменение уровня напряжений с течением времени в 2-2,5 раза. Исключение составляют главные напряжения, которые имеют значительные величины в начальный момент времени и увеличиваются не более, чем в 1,5 раза к концу расчетного периода.

Отличие между базовыми напряжениями (радиальным, окружным, осевым и касательным) от главных заключается и в разнице проявления реологических процессов. Так, при отсутствии добавок и наличии ионизирующего излучения, базовые напряжения стабилизировались через 7 ч с момента приложения нагрузки, а если проводить анализ изменения главных напряжений, они не стабилизировались и к 10 ч, то есть к концу расчетного периода. В случае наличия максимальных добавок ΓA в полимере и облучением его ионизирующим излучением, уровень как базовых, так и главных напряжений уменьшается на $\approx 10\%$, по сравнению с нетронутым образцом полимера. Кроме того, стабилизация базовых напряжений наблюдается примерно через 4 ч от начала расчета, главных – через 6 ч.

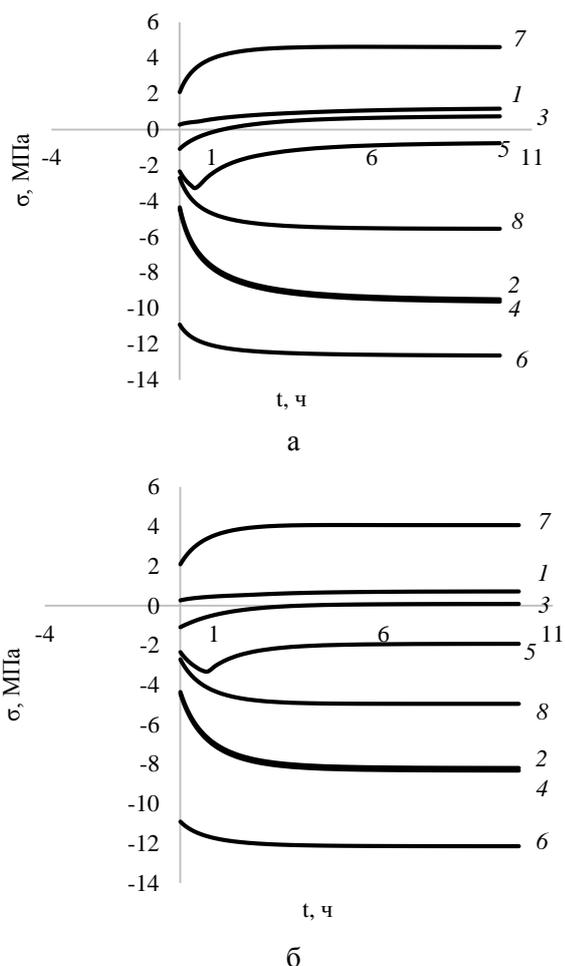


Рис. 2. Распределение максимальных и минимальных значений напряжений во времени: а — ГА=0 %, Φ=0 кГр; б — ГА=30 %, Φ=70 кГр; 1 — $\sigma_{r,max}$; 2 — $\sigma_{r,min}$; 3 — $\sigma_{\theta,max}$; 4 — $\sigma_{\theta,min}$; 5 — $\sigma_{z,max}$; 6 — $\sigma_{z,min}$; 7 — $\tau_{rz,max}$; 8 — $\tau_{rz,min}$

Fig. 2. Distribution of maximum and minimum stress values over time: а — GA=0 %, F=0 kGy; б — GA=30 %, F=70 kGy; 1 — $\sigma_{r,max}$; 2 — $\sigma_{r,min}$; 3 — $\sigma_{\theta,max}$; 4 — $\sigma_{\theta,min}$; 5 — $\sigma_{z,max}$; 6 — $\sigma_{z,min}$; 7 — $\tau_{rz,max}$; 8 — $\tau_{rz,min}$

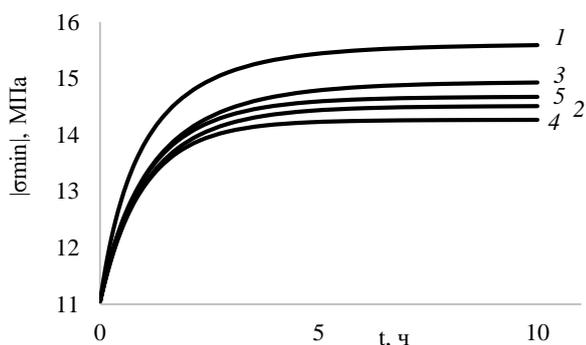


Рис. 3. Изменение во времени наименьших главных (сжимающих) напряжений σ_3 в теле с течением времени: 1 — ГА=0 %, Φ=0 кГр; 2 — ГА=30 %, Φ=0 кГр; 3 — ГА=0 %, Φ=70 кГр; 4 — ГА=30 %, Φ=70 кГр; 5 — ГА=15 %, Φ=35 кГр

Fig. 3. The change in time of the lowest principal (compressive) stresses σ_3 in the body over time: 1 — GA=0 %, F=0 kGy; 2 — GA=30 %, F=0 kGy; 3 — GA=0 %, F=70 kGy; 4 — GA=30 %, F=70 kGy; 5 — GA=15 %, F=35 kGy

Образец, в который был добавлен ГА и облученный половинной дозой, показывал примерно средние свойства между «чистым» образцом и образцом с полным добавлением ГА и полным уровнем ионизирующего излучения.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа напряженно-деформированного состояния полимерного тела с течением времени доказано, что базовые напряжения (радиальные, окружные и осевые) изменяются не в фазе с главными напряжениями, соответственно, для оценки прочностных свойств конструкции необходимо оценивать именно главные напряжения.

Дальнейшее развитие может быть связано с анализом НДС полимерной конструкций не только от наличия ГА и ионизирующего излучения, но и от наличия иных добавок и внешних воздействий.

Расчеты могут быть использованы в области полимерной механики для определения напряженно-деформированного состояния цилиндрических тел в осесимметричной установке, а также в производстве полимерных труб и других отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Nagels J., Stokdijk M., Rozing P.M. Stress shielding and bone resorption in shoulder arthroplasty. *J. Should. Elbow Surg.* 2003. V. 12. N 1. P. 35–39. DOI: 10.1067/mse.2003.22.
2. Albano C. Evaluation of a composite based on high-density polyethylene filled with surface-treated hydroxyapatite. *Polym. Bull.* 2009. V. 62. N 1. P. 45–55. DOI: 10.1007/s00289-008-1011-x.
3. Fang L., Leng Y., Gao P. Processing and mechanical properties of HA/UHMWPE nanocomposites. *Biomaterials.* 2006. V. 27. N 20. P. 3701–3707. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2006.02.023.
4. Husin M.R. Effect of hydroxyapatite reinforced high density polyethylene composites on mechanical and bioactivity properties. *Key Eng. Mater. Trans. Tech. Publ.* 2011. V. 471. N 6. P. 303–308. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.303.
5. Wannomae K.K. The effect of real-time aging on the oxidation and wear of highly cross-linked UHMWPE acetabular liners. *Biomaterials.* 2006. V. 27. N 9. P. 1980–1987. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2005.10.002.
6. Zuo Y. Novel bio-composite of hydroxyapatite reinforced polyamide and polyethylene: Composition and properties. *Mater. Sci. Eng.: A.* 2007. V. 452. P. 512–517. DOI: 10.1016/j.msea.2006.11.138.
7. Albano C. Prediction of mechanical properties of composites of HDPE/HA/EAA. *J. Mechan. Behavior Biomed. Mater.* 2011. V. 4. N 3. P. 467–475. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2010.12.008.
8. Pieliowska K., Blazewicz S. Bioactive polymer/hydroxyapatite (nano) composites for bone tissue regeneration. *Biopolymers.* Springer Berlin Heidelberg. 2010. С. 97–207. DOI: 10.1007/12_2010_50.

9. **Fouad H.** Assessment of function-graded materials as fracture fixation bone boneplates under combined loading conditions using finite element modelling. *Med. Eng. Phys.* 2011. V. 33. N 4. P. 456–463. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.11.013.
10. **Fouad H.** Effects of the bone-plate material and the presence of a gap between the fractured bone and plate on the predicted stresses at the fractured bone. *Med. Eng. Phys.* 2010. V. 32. N 7. P. 783–789. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.05.003.
11. **Kane R.J., Converse G.L., Roeder R.K.** Effects of the reinforcement morphology on the fatigue properties of hydroxyapatite reinforced polymers. *J. Mechan. Behave. Biomed. Mater.* 2008. V. 1. N 3. P. 261–268. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2008.01.004.
12. **Younesi M., Bahrololoom M.E.** Producing toughened PP/HA-LLDPE ternary bio-composite using a two-step blending method. *Mater. Des.* 2009. V. 30. N 10. P. 4253–4259. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.04.029.
13. **Li K., Tjong S.C.** Preparation and mechanical and tribological properties of high-density polyethylene/hydroxyapatite nanocomposites. *J. Macromol. Sci.* 2011. V. 50. N 7. P. 1325–1337. DOI: 10.1080/00222348.2010.516154.
14. **Fouad H.** Characterization and processing of high density polyethylene/carbon nano-composites. *Mater. Des.* 2011. V. 32. N 4. P. 1974–1980. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.066.
15. **Fouad H., Elleithy R.** High density polyethylene/graphite nano-composites for total hip joint replacements: Processing and in vitro characterization. *J. Mechan. Behav. Biomed. Mater.* 2011. V. 4. N 7. P. 1376–1383. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2011.05.008.
16. **Fouad H., Elleithy R., Alothman O. Y.** Thermo-mechanical, wear and fracture behavior of high-density polyethylene/hydroxyapatite nano composite for biomedical applications: effect of accelerated ageing. *J. Mater. Sci. Technol.* 2013. V. 29. N 6. P. 573–581. DOI: 10.1016/j.jmst.2013.03.020.
17. **Fouad H.** Effect of long term natural aging on the thermal, mechanical, and viscoelastic behavior of biomedical grade of ultra high molecular weight polyethylene. *J. Appl. Polym. Sci.* 2010. V. 118. N 1. P. 17–24. DOI: 10.1002/app.32290.
18. **Mourad A. H., Fouad H., Elleithy R.** Impact of some environmental conditions on the tensile, creep, creep recovery, relaxation, melting and crystallinity behaviour of UHMWPE-GUR 410-medical grade. *Mater. Des.* 2009. V. 30. N 10. P. 4112–4119. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.05.001.
19. **Litvinov S.V., Trush L.I., Avakov A.A.** Some features in the definition of the temperature field in axisymmetric problems. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076449.
20. **Alothman O.Y.** Thermal, creep-recovery and viscoelastic behavior of high density polyethylene/hydroxyapatite nano particles for bone substitutes: effects of gamma radiation. *Biomed. Eng. Online.* 2014. V. 13. N 1. DOI: 10.1186/1475-925X-13-125.

Поступила в редакцию (Received) 21.06.2018

Принята к опубликованию (Accepted) 25.03.2019