

Методика испытания образцов из эластомеров для получения механических характеристик их гиперупругости и конечно-элементного моделирования деформируемых сборных конструкций

Д. А. Михайлов¹, А. А. Пыхалов^{1,2}✉, Е. В. Зеньков^{1,2}, А. И. Артюнин²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ pykhalov_aa@mail.ru

Резюме

В работе рассматриваются механические характеристики изделий из эластомеров, в том числе резины, имеющих широкую область применения. Исследование напряженно-деформированного состояния этих изделий является актуальным и ему посвящено большое количество работ. Актуальность темы определяется тем, что остаются вопросы изучения крепления эластомеров, т. е. их работы в условиях сопряжения с деталями из металлов. Развитие подходов решения этой нелинейной задачи имеет особое значение в таких отраслях, как авиация, энергетика, машиностроение и других высокотехнологичных производствах. В этом случае к эластомерам предъявляются высокие требования в связи с широким диапазоном температур и перегрузок на всех этапах жизненного цикла изделия. В частности, к особым требованиям к эластомерам относятся: эластичность, механические характеристики и стойкость к различным агрессивным средам. В статье представлено экспериментальное исследование эластомеров относительно стандартных и нестандартных условий эксплуатации, а также перечень узлов, имеющих перспективные решения с использованием эластомерных материалов. Поведение металлов хорошо изучено и существует множество источников информации об их механических свойствах, в то время как жесткостные характеристики эластомерных материалов в открытом доступе отсутствуют. В данном исследовании предлагаются диаграммы растяжения материала, также здесь отражен порядок действий, с помощью которых осуществляется получение механических характеристик эластомера, и показаны результаты проведения натурных испытаний и конечно-элементного моделирования. Испытания, проведенные на использованном оборудовании в соответствии с ГОСТ 270-75, обеспечивают получение корректных механических характеристик эластомерного материала с помощью утилиты Experimental Data Fitting.

Ключевые слова

авиация, эластомерные материалы, упругопрочностные свойства резины, потенциал энергии деформации, натурные испытания, конечно-элементное моделирование

Для цитирования

Михайлов Д. А. Методика испытания образцов из эластомеров для получения механических характеристик их гиперупругости и конечно-элементного моделирования деформируемых сборных конструкций / Д. А. Михайлов, А. А. Пыхалов, Е. В. Зеньков, А. И. Артюнин. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 4 (72). – С. 38–47. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).38-47

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2021, поступила после рецензирования: 17.09.2021, принята к публикации: 10.10.2021

Technique for testing samples from elastomers to obtain the mechanical characteristics of their hyperelasticity and finite element modeling of deformable assembly structures

D. A. Mikhailov¹, A. A. Pykhalov^{1,2}✉, E. V. Zen'kov^{1,2}, A. I. Artyunin²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ pykhalov_aa@mail.ru

Abstract

Products made of elastomers, including rubber, have a wide field of application, and at present a large number of works are devoted to the study of their stress-strain state. However, questions remain when studying their collaboration with parts from other materials in contact with them. These issues are of particular relevance in aviation, in particular, due to the high density of the arrangement of complex mechanisms, the diversity of parts, etc. Also, high requirements for aviation elastomers are imposed in connection with a wide range of temperatures and overloads during operation. products. These requirements include: preservation of elastic properties, physical and mechanical properties, resistance to various aggressive environments. This paper presents a list

of components of various aircraft systems manufactured using rubber. The paper presents the study of the mechanical characteristics of products made of elastomers, including rubber, which have a wide range of applications. The study of the stress-strain state of these products is relevant and a large number of works are devoted to it. The relevance of the presented work is determined by the fact that there remain questions of studying the fastening of elastomers, that is, their work in conditions of conjugation with metal parts. The development of approaches to solving this nonlinear problem is of particular relevance in such industries as aviation, energy, mechanical engineering and other high-tech industries. In this case, high requirements are imposed on elastomers due to a wide range of temperatures and overloads at all stages of the product life cycle. In particular, the special requirements for elastomers include: elasticity, mechanical characteristics and resistance to various aggressive media. This paper presents an experimental study of elastomers relative to standard and non-standard conditions, as well as a list of nodes that have promising solutions using elastomeric materials.

Keywords

aviation, elastomeric materials, determination of elastic strength properties of rubber, strain energy potential, full-scale tests, finite element modeling

For citation

Mikhailov D. A., Pykhlov A. A., Zen'kov E. V., Artynin A. I. Metodika ispytaniya obraztsov iz ehlastomerov dlya polucheniya mekhanicheskikh kharakteristik ikh giperuprugosti i konechno- ehlementnogo modelirovaniya deformiruemykh sbornykh konstruksij [Technique for testing samples from elastomers to obtain the mechanical characteristics of their hyperelasticity and finite element modeling of deformable assembly structures]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 4 (72), pp. 38–47. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.4(72).38-47

Article Info

Received: 09.09.2021, Revised: 17.09.2021, Accepted: 10.10.2021

Введение

Изделия из эластомеров, в том числе резины, имеют широкую область применения, и в настоящее время исследованию их напряженно-деформированного состояния посвящено большое количество работ. Однако остаются вопросы при изучении их совместной работы с деталями из других материалов, находящихся с ними в контакте. Особую актуальность эти вопросы имеют в авиации в связи с высокой плотностью компоновки сложных механизмов, многоменклатурностью деталей и др. Также высокие требования к авиационным эластомерам предъявляются в связи с широким диапазоном температур и перегрузок при эксплуатации изделия. К этим требованиям относятся: сохранение эластических

свойств, физико-механических показателей, стойкость к различным агрессивным средам. В настоящей работе представлен перечень узлов различных систем летательного аппарата (ЛА), произведенных с использованием резины.

При изготовлении деталей и сборке узлов производство опирается на результаты анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) математических моделей тел. Использование метода конечных элементов позволяет определить параметры НДС детали или узла с высокой степенью соответствия результатам натурных испытаний [1]. В машиностроительной отрасли значительную роль играют резино-технические изделия, выполняющие демпфирующие и герметизирующие функции.



Рис. 1. Фланцевое соединение топливного бака самолета

Fig. 1. Flange connection of aircraft fuel tank

Применение эластомеров в авиации

Широкое применение в производстве деталей ЛА получили силиконовые резины: они используются в качестве уплотнителей, мембран, профильных деталей для герметизации, выдерживающих действие низких температур в высоких слоях атмосферы, значительных концентраций озона и солнечной радиации [2]. Из них изготавливают различные прокладки, уплотнительные кольца в гидравлических и других жидкостных системах самолета, кожухи антиобледенителей, уплотнители топливных баков и противопожарных перегородок, амортизирующие подушки приборов, амортизаторы, поглощающие удары или вибрации без ослабления прочности связи между резиной и металлическими фланцами детали [3]. На ЛА используется большое количество проводов и кабелей с силиконовой изоляцией. Новейшие резиновые смеси применяются для изготовления герметичных кислородных масок для экипажа.

Фланцевые соединения (рис. 1), обеспечивающие герметичность топливных баков в местах стыков трубопроводов, очень массивные [4], а возможность уменьшения его толщины и рассмотрения задачи совместной работы резины и металла при расширении позволит снизить общую массу.

С этой же целью можно рассмотреть задачи соединений с применением жесткой резины и уменьшить вес агрегатов за счет гидроаккумуляторов и топливных систем с меньшей массой.

Более детальное изучение соединений металлических нитей брекера с резиновыми наполнителями [5] (рис. 2) позволит выявить недостатки и определить параметры, повышающие срок службы пневматиков, разрушающихся в условиях посадки.

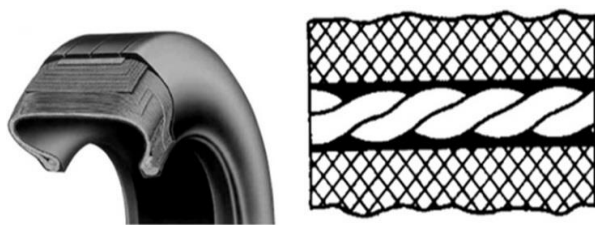


Рис. 2. Соединение резины с металлом, полученное в процессе вулканизации

Fig. 2. Rubber-to-metal bonding obtained during the vulcanization process

В современном машиностроении такие соединения, а также соединения в эластомерных композитах (рис. 3), осуществляются с помощью латунирования, при котором достигается наибольшая прочность, температуростойкость, вибростойкость и хорошее сопротивление удару [6].

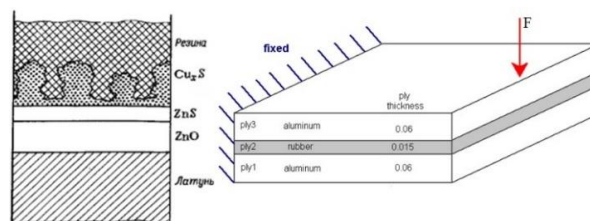


Рис. 3. Резинометаллический композит, полученный в процессе вулканизации резины с алюминием с предварительным латунированием металлической поверхности

Fig. 3. Rubber-metal composite obtained in the process of vulcanization of rubber with aluminum with preliminary brass plating of the metal

Для чистоты проведения процесса латунирования поверхность металла предварительно обезжиривают растворителем, а затем раствором щелочи путем подвешивания на электрод и пропускания электрического тока через материал. Самая ответственная операция – осаждение латуни. В данном случае анодами являются пластины с 60–70 % содержанием меди и 30–40 % содержанием цинка. Таким образом, вулканизация резины с алюминием производится с предварительным электрическим осаждением латуни на поверхность металла в электролизерах. В процессе нагрева образуется промежуточная пленка, и продукт реакции Cu_xS вырастает в фазу эластомера с множеством точек физического взаимодействия. Недостатком данного метода являются сложности в равномерном осаждении материала на детали сложной конфигурации.

Изучение диссипативных и сцепных свойств резины наряду с ее износостойкостью в совокупности с более высокими механическими характеристиками металлов, таких как модуль упругости и коэффициент Пуассона, позволит создавать композитные конструкции с высоким пределом усталостной прочности. Такие конструкции будут актуальны для торсионов винтов вертолетов [7] (рис. 4).

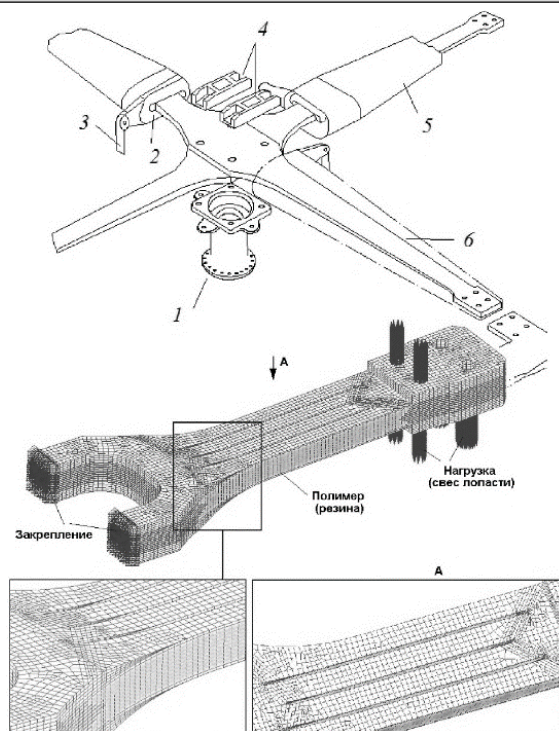


Рис. 4. Винт вертолета с эластомерными торсионами:
1 – втулка; 2 – центрирующая сферическая опора; 3 – поводок управления шагом лопасти; 4 – кронштейны крепления; 5 – кожух; 6 – упругий торсион

Fig. 4. Helicopter propeller with elastomeric torsion bars:
1 – bushing; 2 – centering spherical bearing;
3 – leash for controlling the blade pitch;
4 – mounting brackets; 5 – casing;
6 – elastic torsion bar

Здесь втулка несущего винта в своей конструкции имеет упругий торсион балочного типа из полимера (резины), который воспринимает центробежную силу и заменяет шарниры, тем самым обеспечивая необходимые перемещения лопастей за счет собственной податливости, и выполняет функции осевого, вертикального и горизонтального шарниров.

Важнейшее преимущество эластомеров – возможность создания из них элементов конструкции с заранее заданными свойствами, наиболее полно соответствующими характеру и условиям работы торсиона в составе втулки несущего винта [8]. Альтернативным вариантом данной сборочной единицы является трехшарнирная втулка с эластомерными подшипниками (рис. 5).

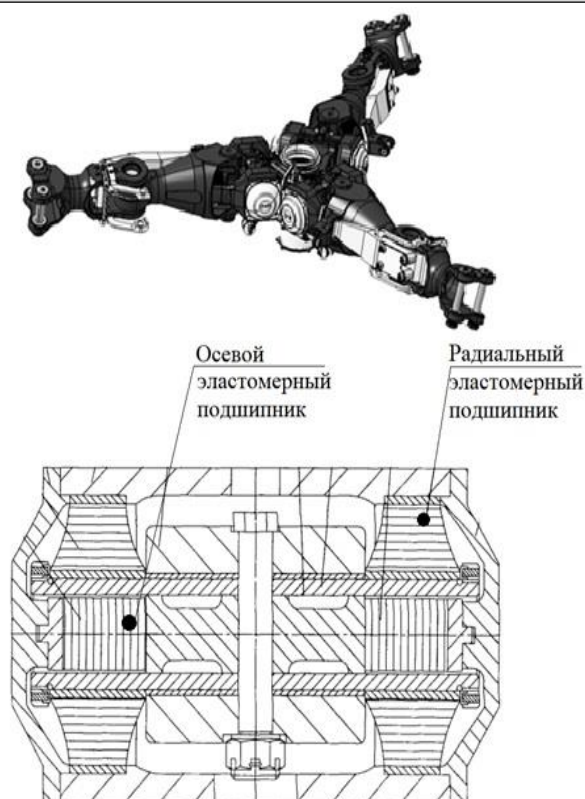


Рис. 5. Трехшарнирная втулка с эластомерными подшипниками в шарнирах
Fig. 5. 3-pivot sleeve with elastomeric bearings in joints

Данная конструкция исключает необходимость применения торсионов, сокращает время на техническое обслуживание, увеличивает надежность конструкции. Здесь отсутствие трущихся деталей уменьшает износ узлов, что повышает надежность и ресурс конструкции [9].

При проведении математического моделирования указанных конструкций, контактное взаимодействие частей которых описано в работе [10], появляются проблемы на этапе задания механических характеристик эластомерных материалов ввиду отсутствия информации об их жесткостных характеристиках в открытом доступе. Для их получения предлагается получить диаграммы растяжения материала.

Применяемые материалы и оборудование

В качестве образца используется лопатка с размерами, регламентированными ГОСТ 270-75 (рис. 6), изготовленная из технической резины [11].

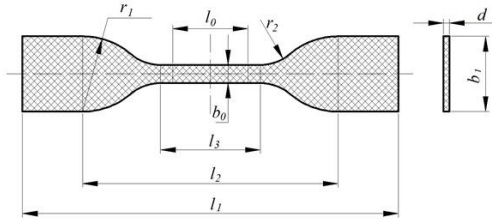


Рис. 6. Размеры лопатки по ГОСТ 270-75
Fig. 6. Blade dimensions in accordance with GOST 270-75

На рис. 7 показан выбранный образец для проведения испытаний.

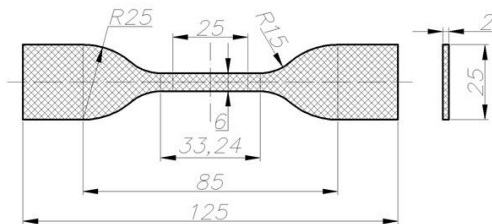


Рис. 7. Образец № 1 по ГОСТ 270-75
Fig. 7. Sample № 1 in accordance with GOST 270-75

В качестве используемого оборудования в испытании будет применена установка INSTRON 5982, характеристики которой сведены в табл. 1. На рис. 8 показан общий вид установки и вид с установленным образцом.



Рис. 8. Универсальная электромеханическая испытательная машина INSTRON 5982
Fig. 8. Universal electromechanical testing machine INSTRON 5982

Данная машина обеспечивает надежное закрепление образца по установочным меткам и измерение силы при заданных удлинениях.

Таблица 1. Характеристики машины INSTRON 5982
Table 1. Characteristics of the INSTRON 5982 machine

Параметр	Показатель
Статическая нагрузка	до 100 кН
Разрешение сервопривода по перемещению	0,08 мкм
Точность измерения перемещения	± 0,05 % от измеряемой величины
Скорость испытания	0,005–1016 мм/мин
Точность скорости привода	± 0,05 % от установленной

Процесс проведения испытаний

Согласно ГОСТ 270-75, испытания необходимо проводить со скоростью растяжения 500 мм/мин и при температуре 23 ± 2 °С. Три образца, разрушенные вследствие растяжения с указанными параметрами, показали практически идентичные результаты (рис. 9).

При испытаниях было выявлено, что скорость растяжения оказывает существенное влияние на предел прочности [12] (рис. 10).

Основа программного комплекса

В теории тонких оболочек для несжимаемого материала, такого как резина, зависимость напряжения от деформации определяется согласно закону упругости [13]:

$$\sigma_i = \lambda_i \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - \lambda_3 \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_3},$$

где W – потенциал энергии деформации, зависящий от главных кратностей удлинений λ_1 , λ_2 , λ_3 (рис. 11), и углов, определяющих направление главных осей тензора кратностей удлинений α , β , γ зависимость между которыми определяется разными моделями материала.

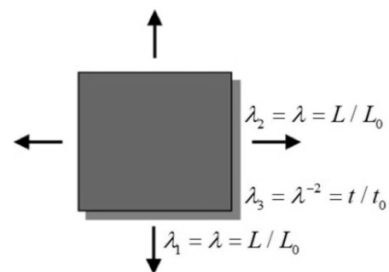


Рис. 11. Главные относительные удлинения (кратности) на примере двухосного растяжения
Fig. 11. Principal elongations (folds) by the example of 2-axial tension

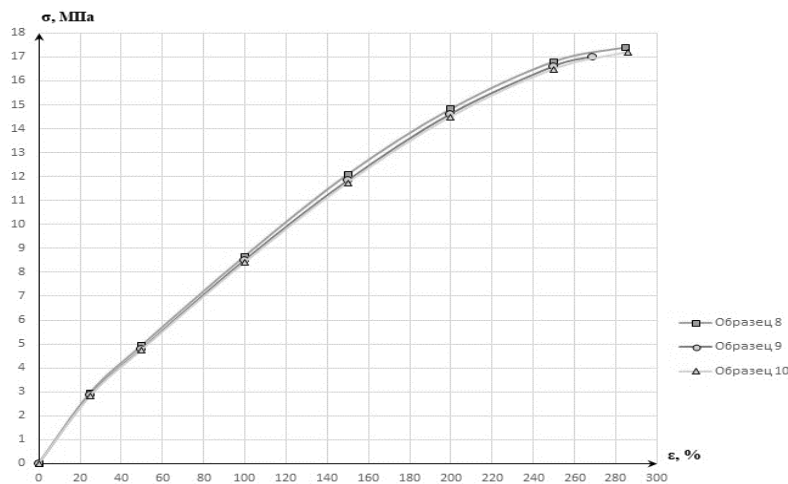
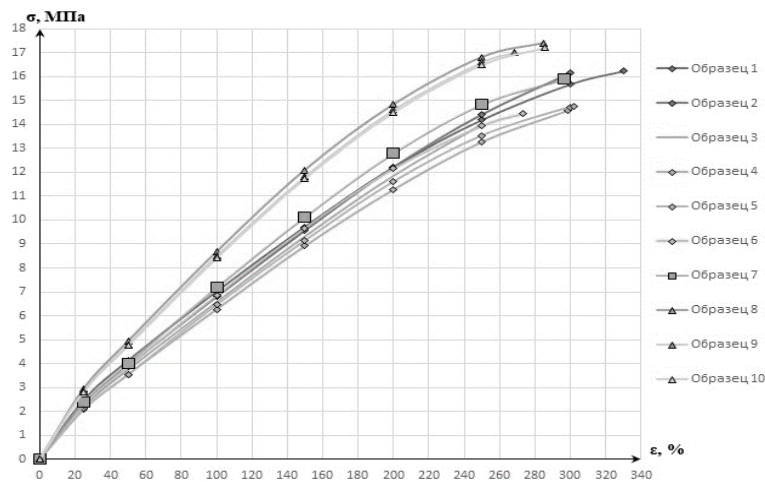


Рис. 9. Диаграмма растяжения образцов № 8, 9 и 10 со скоростью 500 мм/мин.
Fig. 9. Tension diagram for specimens No. 8, 9 and 10 at a speed of 500 mm/min.



$V_{1, 2, 3, 4, 5, 6} = 50$ мм/мин; $V_7 = 100$ мм/мин; $V_{8, 9, 10} = 500$ мм/мин (ГОСТ)

Рис. 10. Сравнение диаграмм растяжения образцов с различной скоростью растяжения
Fig. 10. Comparison of tensile diagrams for specimens with different tensile rates

В применяемых моделях материала для упрощения их вида указанные удлинения используются в виде трех инвариантов деформации I [14]:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 &= \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_1\lambda_3, \\ I_3 &= \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2. \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью кратностей удлинений возможно вычисление относительного изменения объема (эластичной объемной деформации) J :

$$J = J_{el} = \frac{V}{V_0} = \lambda_1\lambda_2\lambda_3.$$

При чистом сдвиге используется понятие девиаторных деформаций, инварианты которых вычисляются [14]:

$$\bar{I}_i = \frac{I_i}{\sqrt[3]{J^2}},$$

где $i = 1, 2, 3$ (см. уравнения (1)). Общий вариант записи потенциала энергии деформации W называется полиномиальной моделью материала:

$$W = \sum_{i+j}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J_{el} - 1)^{2k},$$

где C_{ij} , N , d_k – константы гиперупругого материала, определяемые для каждой модели экспериментальным путем [15].

Одной из наиболее распространенных видов потенциала энергии деформации – двух-параметрическая модель Муни – Ривлина [16]:

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d_k}(J_{el} - 1)^2,$$

где ν – коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio); K_0 – начальный объемный модуль (Bulk Modulus); d_k – параметр сжимаемости материала:

$$d_k = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}} = \frac{2}{K_0}.$$

Обработка полученных результатов

Результаты испытаний (рис. 8) необходимо занести в таблицу и сохранить в формате .csv (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний, занесенные в Excel и сохраненные в формате .csv
Table 2. Test results recorded in Excel and saved in .csv format

ε	0	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	2,6855
σ	0	1,612	2,705	4,8	6,684	8,256	9,383	9,603

В результате обработки утилитой Experimental Data Fitting [17] данных получены коэффициенты жесткости $C_{10} = 1,4307944$ и $C_{01} = -0,15372042$ (рис. 12).

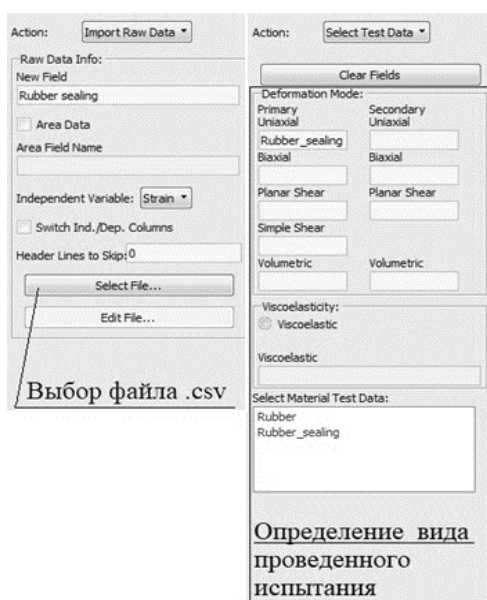


Рис. 12. Задание исходных данных для расчета жесткостных характеристик материала образца
Fig. 12. Setting the initial data for the calculation stiffness characteristics of the sample material

После добавления в окно обработки информации таблицы с данными растяжения материала и ее привязки к типу проведенного испытания появляется окно с запросом на вычисление свойств (рис. 13).

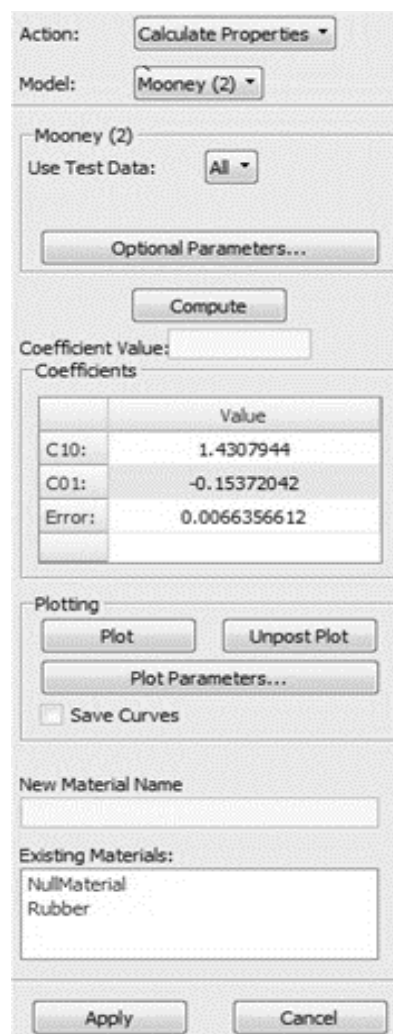


Рис. 13. Построение модели Полимерного резиноподобного материала с помощью инструмента MSC.Software Patran Experimental Data Fitting
Fig. 13. Building a model of a polymer rubber-like material using the MSC. Software Patran Experimental Data Fitting tool

Для верификации результатов и дальнейшего использования полученных данных необходимо произвести расчет с применением конечно-элементного моделирования растяжения образца, изготовленного из материала с полученными механическими характеристиками. Подготовка модели к расчету показана на рис. 14.

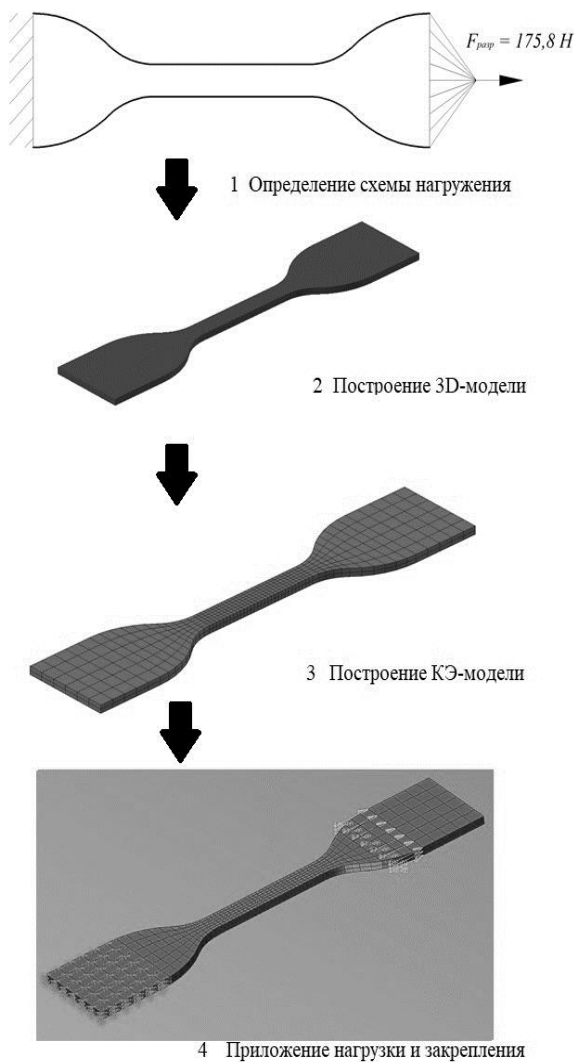


Рис. 14. Подготовка модели к расчету
Fig. 14. Preparing the model for calculation

На рис. 15 и 16 изображены результаты натурных испытаний и конечно-элементного моделирования.

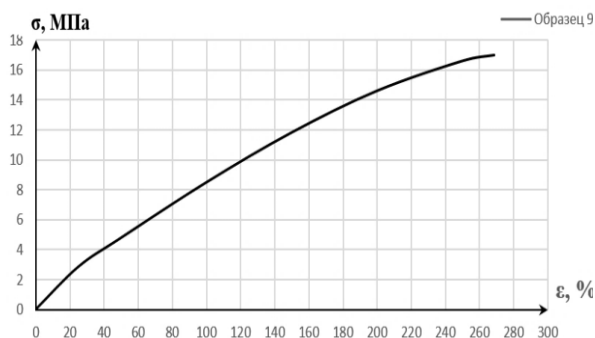


Рис. 15. Результаты натурных испытаний
Fig. 15. Field test results

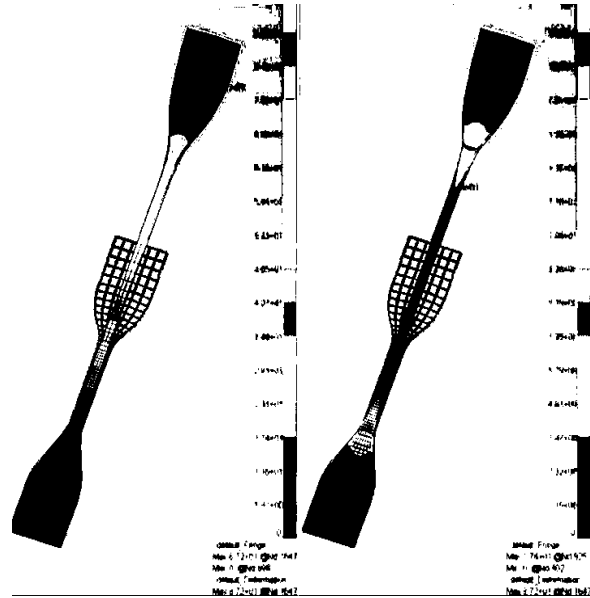


Рис. 16. Результаты конечно-элементного моделирования
Fig. 16. FE-simulation results

При натурных испытаниях разрушение образца № 9 произошло при $\Delta l = 87,2$ мм, $F = 175,8$ Н, $\sigma_{\max} = 16,99$ МПа. При конечно-элементном моделировании в ПО MSC.Patran с использованием Marc при достижении образцом с характеристиками $C_{10} = 1,4307944$ и $C_{01} = -0,15372042$ перемещения в 87,2 мм материал испытал напряжение в 17,4 МПа. Погрешность составила приблизительно 2,5 %, что говорит о наличии внутренних дефектов и неточности при изготовлении образца.

Заключение

После проведения испытаний выявлены следующие особенности работы эластомеров:

- кривые растяжения носят явно нелинейный геометрический характер;
- резина имеет предельное значение и разрывается при определенной величине напряжения;

– характер кривой зависит от скорости деформирования, поэтому этот фактор учитывается ГОСТ 270-75 и закладывается в конечно-элементной модели;

– проведение испытаний на использованном оборудовании в соответствии с ГОСТ 270-75 обеспечивает получение корректных механических характеристик эластомерного материала с помощью утилиты Experimental Data Fitting.

В связи с этим остается актуальным изучение работы эластомеров в условиях сопряжения с металлическими деталями и их крепления с учетом скорости нагружения. Дополнительно

предполагается изучение влияния латунирования, а также работы демпфирования по математическим моделям, описанным в источнике [18].

Список литературы

1. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. Москва: Издательство «Мир», 1975 г. 541 с.
2. Пономарев П.В. Разработка силиконовых резин и герметиков с повышенной термо-, огнестойкостью: специальность 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пономарев Павел Владимирович: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. 124 с.
3. Аверко-Антонович Ю.О., Омельченко Р.Я., Охотина Н.А., Эбич Ю.Р. Технология резиновых изделий. Ленинград: Химия, 1991. 351 с.
4. Голубев А.И., Кондаков Л.А., Овандер В.Б., Гордеев В.В., Фурманов Б.А., Кармугин Б.В. Уплотнения и уплотнительная техника. М.: Машиностроение, 1986. 234 с.
5. Жеребков С.К. Крепление резины к металлам. М.: Госхимиздат. Москва, 1966. 348 с.
6. Смекни. URL: <https://smekni.com/a/172400/kreplenie-reziny-k-metallam/>. Режим доступа: свободный. Текст. Изображение: электронные.
7. Бурцев Б.Н., Вагис В.П., Селеменов С.В. Соосный несущий винт вертолета. Конструкция и аэромеханика. М.: Фирма «Камов», 2004 г., 30 с.
8. Башаров Е.А., Ткаченко С.А. Конструкция втулок винтов вертолета. М.: МАИ, 2019. 104 с.
9. Вагин А.Ю., Михеев С.В., Плущевский А.М., Осмоловский Р.Ф. Несущий винт винтокрылого летательного аппарата с системой складывания лопастей. Патент № 2376201 С2 Российская Федерация, МПК В64С 27/32, В64С 27/39: №2008118006: заявл. 08.05.2008: опубл. 20.12.2009 / заявитель: ОАО «Камов»
10. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пыхалов Анатолий Александрович: Московский государственный авиационный институт, 2006. 428 с.
11. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении = Rubber. Method for determining elastic tensile properties: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 03.02.82 N 439: введен впервые: дата введения 1978-01-01 / разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. Москва: Стандартинформ, 2008. 11 с.
12. Бергштейн Л.А. Лабораторный практикум по технологии резины. Москва: Химия, 1989 г. 248 с.
13. Колпак Е.П. Большие деформации резиновых мембран // Молодой учёный. 2014. №16 (75). С. 78-83.
14. Шмурак М.И., Кучумов А.Г., Воронова Н.О. Анализ гиперупругих моделей для описания поведения мягких тканей организма человека // Master's Journal. №1. 2017. С. 230 – 243.
15. Финк Т.Б. Взаимодействие гиперупругих тел с жесткими телами. Казань: Казанский (Приволжский) Федеральный университет, 2015. 21 с.
16. Википедия. Интернет-энциклопедия. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic_material. Режим доступа: свободный. Текст. Изображение: электронные.
17. Слезкин Д.В. Построение модели полимерного резиноподобного материала с помощью инструмента MSC.Software Patran Experimental Data Fitting. Москва: MSC Software Corporation, 2008. 20 с.
18. Тимошенко С. П. Янг С. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

References

1. Zenkevich O.C. Metod konechnyh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.
2. Ponomarev P.V. Razrabotka siloksanovykh rezin i germetikov s povyshennoj termo-, ognestojkost'yu: dis. ... kand. tekhn. nauk. [Development of siloxane rubbers and sealants with increased thermal and fire resistance: Ph.D. (Engineering) diss.]. Kazan', KNRTU, 2019. 124 p.
3. Averko-Antonovich Yu.O., Omel'chenko R.Ya., Okhotina N.A., Ebich Yu.R. Tekhnologiya rezinovykh izdelij [Technology of rubber products]. Leningrad: Khimiya, 1991. 351 p.
4. Golubev A.I., Kondakov L.A., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika [Seals and sealing equipment]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 234 p.
5. Zhrebkov S.K. Kreplenie reziny k metallam [Fixing rubber to metals]. Moscow: Goskhimizdat Publ., 1966. 348 p.
6. Smekni. URL: <https://smekni.com/a/172400/kreplenie-reziny-k-metallam/>. Rezhim dostupa: svobodnyj. Tekst. Izobrazhenie: elektronnye.
7. Burcev B.N., Vagis V.P., Selemenev S.V. Soosnyj nesushchij vint vertoleta. Konstrukciya i aeromekhanika [The coaxial rotor of the helicopter. Construction and aeromechanics]. Moscow: Firma «Kamov» Publ., 2004. 30 p.
8. Basharov E.A., Tkachenko S.A. Konstrukciya vtukov vintov vertoleta [Helicopter propeller bushings design]. Moscow: MAI Publ., 2019. 104 p.

9. Vagin A.Yu., Miheev S.V., Plushchevskij A.M., Osmolovskij R.F. Patent RU 2376201 C2, 08.05.2008.
10. Pyhalov A.A. Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamičeskogo analiza sbornyh rotorov turbomashin: dis. ... dok. tekhn. nauk [Contact problem of static and dynamic analysis of assembled turbomachine rotors: D. Sc. (Engineering) diss.]. Moscow: MAI Publ., 2006. 428 p.
11. Rezina. Metod opredeleniya uprugoprochnostnyh svojstv pri rastyazhenii GOST 270-75 [Rubber. Method for determining elastic tensile properties, state standard 270-75]. Moscow: Standartinform, 2008, 11 p.
12. Bergshtejn L.A. Laboratornyj praktikum po tekhnologii reziny [Laboratory practicum on rubber technology]. Moscow: Khimiya Publ., 1989. 248 p.
13. Kolpak E.P. Bol'shie deformatsii rezinovykh membrane [Large deformations of rubber membranes]. *Molodoj uchyonyj [Young scientist]*, 2014, No. 16(75). pp. 78-83.
14. Shmurak M.I., Kuchumov A.G., Voronova N.O. Analiz giperuprugih modelej dlya opisaniya povedeniya myagkih tkanej organizma cheloveka [Analysis of hyperelastic models to describe the behavior of soft tissues of the human body]. *Zhurnal magistra [Master's Journal]*, 2017, no 1, pp. 230 – 243.
15. Fink T.B. Vzaimodejstvie giperuprugih tel s zhestkimi telami [Interaction of hyperelastic bodies with rigid bodies]. Kazan': Kazanskij (Privolzhskij) Federal'nyj universitet Publ., 2015. 21 p.
16. Vikipediya. Internet-entsiklopediya. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperelastic_material.
17. Slezkin D.V. Postroenie modeli polimernogo rezinopodobnogo materiala s pomoshch'yu instrumenta MSC.Software Patran Experimental Data Fitting [Building a model of a polymer rubber-like material using the MSC.Software Patran Experimental Data Fitting]. Moscow: MSC Software Corporation Publ., 2008. 20 p.
18. Timoshenko S. P. Yang S. H., Uiver U. Kolebaniya v inzhenernom dele [Vibration problems in engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.

Информация об авторах

Михайлов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Механика и сопротивление материалов», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: deemass835@gmail.com

Пыхалов Анатолий Александрович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru

Зеньков Евгений Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Механика и сопротивление материалов», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, доцент кафедры «Управление качеством и инженерная графика» Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: jovanny1@yandex.ru

Артюнин Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: artyunin_ai@irgups.ru.

Information about the authors

Dmitrij A. Mikhaylov – Post-Graduate Student of the Department «Mechanics and Strength of Materials», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: deemass835@gmail.com

Anatolij A. Pykhalov – Doctor of Engineering Science, the Full Professor of Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pykhalov_aa@mail.ru

Evgenij V. Zen'kov – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of department «Mechanics and resistance of materials», Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Associate Professor of department «Quality management and engineering graphics», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: jovanny1@yandex.ru

Anatolij I. Artyunin – Doctor of Engineering Science, the Full Professor of the Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: artyunin_ai@irgups.ru.