

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-78-84

<sup>1,\*</sup>Куделин Д.В., <sup>2</sup>Несиоловская Т.Н.<sup>1</sup>ООО «Научно-технический центр «Интайр»<sup>2</sup>Ярославский государственный технический университет

\*E-mail: kvmbaikal@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Аннотация.** Проведено компьютерное моделирование процесса нагружения резиновой мембраны сферическим индентором посредством пакета для конечно-элементного анализа. Показано, что в сложнапряженном состоянии резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3 существенно уступают по прочностным свойствам как при отсутствии, так и при наличии концентратора напряжений резинам на основе аморфного каучука СКМС-30АРК, в то время как при одноосном растяжении превосходят их. Выявлено, что в условиях сложнапряженного состояния, наполненные 40 мас.ч. технического углерода N339 резины на основе каучука СКИ-3 обладают низкой стойкостью к касательным напряжениям, уступая вулканизатам СКМС-30АРК и СКД, что обуславливает низкие прочностные свойства резин на его основе в сравнении с прочностными характеристиками, определенными в условиях одноосного растяжения. Анализ прочностных свойств резин при наличии концентратора напряжений показал, что в условиях сложнапряженного состояния максимальными значениями сопротивления раздиру обладают резины на основе аморфного каучука СКМС-30АРК, превосходя вулканизаты СКИ-3 и СКД по данному показателю, соответственно, в ~ 4 и 2 раза. При одноосном растяжении наиболее важным фактором является способность материала к ориентационному упрочнению, обусловленная регулярностью структуры каучука и наличием усиливающего наполнителя, а в сложнапряженном состоянии на первый план, с точки зрения прочностных свойств резин, выходит плотность узлов флуктуационной сетки зацеплений.

**Ключевые слова:** резиновые мембраны, сложнапряженное состояние, одноосное растяжение, прочностные свойства, сопротивление раздиру.

**Введение.** Тонкостенные резиновые изделия (например, резиновые мембраны) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Стандартный подход к проектированию резиновых мембран включает в себя разработку рецептуры и последующее проведение испытаний – лабораторных и эксплуатационных [1–5]. Первичной проблемой является построение рецептуры резиновой мембраны. Основными требованиями, которые предъявляются к резинам для изготовления мембран, являются высокая прочность, эластичность, сопротивление раздиру, усталостная выносливость, химическая инертность, а также малые остаточные деформации. Эти свойства могут быть обеспечены различными сочетаниями каучуков и ингредиентов. При этом поиск оптимального состава резины носит случайный характер.

Условия эксплуатации резиновых мембран предполагают сложный характер нагружения, что, соответственно, приводит к разнообразию характера и зон потенциальных разрушений, которые проявляются в процессе работы изделия. В настоящее время, при разработке рецептур для мембран, в большинстве случаев, применяют стандартные методы оценки физико-механических свойств резин, основанные на одноосном растяжении-сжатии. Это несоответствие испытательных методов и условий работы изделий существенно усложняет анализ их поведения в процессе эксплуатации. Таким образом, существующий процесс проектирования резиновых мембран является материалоемким, т.к. требует проведения большого массива экспериментальных исследований, и не может обеспечить корректность полученных данных, поскольку лабораторные испытания не отражают реальных условий эксплуатации резин. Кроме того, требует значительных временных затрат.

В этой связи актуальным представляется исследование влияния условий испытания на прочностные свойства тонкостенных резинотехнических изделий при отсутствии и наличии концентратора напряжений.

**Методика эксперимента.** Существующие в настоящее время методы испытаний резин в сложнапряженном состоянии либо недостаточно точные, либо требуют штучного дорогостоящего оборудования [6]. После анализа существующих методов, был выбран метод продавливания круглой резиновой мембраны стальным шарообразным индентором, предложенный в работе [7]. Он отличается простотой реализации, и кроме того обеспечивает высокую точность и достоверность результатов. Авторы исследуют стойкость резин к проколу и прорыву при воздей-

ствии контртела на образец, при этом используют инденторы небольшого диаметра (до 8 мм). Для того чтобы исключить возможность катастрофического разрушения образца, в настоящей работе использовался индентор диаметр которого был близок к радиусу мембраны [8, 9].

Существующие в настоящее время методы компьютерного моделирования, например метод конечных элементов, также позволяют существенно расширить возможности традиционных экспериментальных исследований в плане анализа физико-механических свойств материалов и напряженно-деформированного состояния изделий при эксплуатации. Поэтому в работе для анализа свойств резин было решено пойти на компромисс путем сочетания эксперимента и моделирования процесса индентирования резиновой мембраны в программном комплексе для конечно-элементного анализа [10–16]. В свою очередь экспериментальная работа включала получение кривой «напряжение – удлинение» при одноосном растяжении для расчета параметров модели Йюха (1) [14, 15, 18], хорошо учитывающей нелинейность изменения свойств резин при моделировании методом конечных элементов и индентирование резиновой мембраны до разрушения с целью получения значений максимальных перемещений индентора для различных полимеров:

$$F = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J_{e1} - 1)^{2i} \quad (1)$$

где  $\bar{I}_1$  – первый девиаторный инвариант тензора деформации;  $J_{e1}$  – упругая объемная кратность деформации;  $C_{i0}$  – константы, характеризующие свойства материала;  $D_i$  – параметр, характеризующий объемную сжимаемость материала.

Объектами исследования в работе стали наполненные 40 мас.ч. техуглерода N339 резины на основе широко применяющихся в промышленности РТИ каучуков: СКИ-3, СКМС-30АРК и СКД.

**Основная часть.** Для того чтобы сопоставить результаты конечно-элементного расчета с прочностью при одноосном растяжении использовалась функция (2).

$$F(S_1, S_2) = a * S_1 + (1 - a) * S_2 = C \quad (2)$$

где  $a$  и  $C$  – экспериментально определяемые коэффициенты:  $a = \frac{S_2}{(f_p + S_2 - S_1)}$  – характеризует относительный вклад первого инварианта (нормальных напряжений) в прочность, соответственно  $(1-a)$  характеризует стойкость к касательным напряжениям.

$S_1$  и  $S_2$  – первый и второй инварианты тензора напряжений

$C = f_p * a$  – характеризует абсолютную прочность материала.

$f_p$  – условная прочность при одноосном растяжении, МПа.

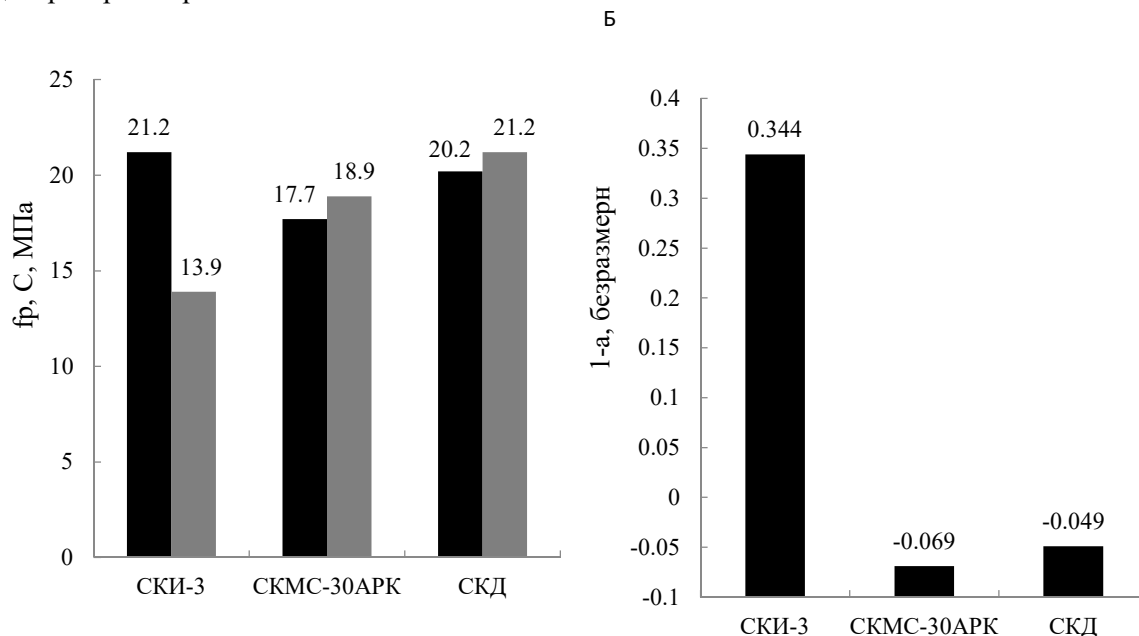
На рис. 1 представлены результаты испытаний резин при одноосном растяжении и расчета процесса нагружения резиновой мембраны в пакете для конечно-элементного анализа.

При одноосном растяжении различия в прочностных свойствах исследуемых резин слабо выражены. В сложнапряженном состоянии ситуация иная. Анализируя коэффициенты «С» и «1-а» функции (2) можно заключить, что минимальными прочностными характеристиками, которые подтверждаются значениями коэффициента «С», обладают резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3, что по всей вероятности связано с их низкой стойкостью к касательным напряжениям, т.е. сдвиговым напряжениям в таком режиме нагружения (рис. 1). В том случае, когда на макромолекулярные цепи действует сила, направленная только по нормали к поперечному сечению образца, как в случае одноосного растяжения, в резинах на основе каучука СКИ-3 процессы ориентационной кристаллизации и ориентационного упрочнения протекают без затруднений. В случае же появления сдвиговых напряжений, ориентирование молекул затруднено, что, в конечном итоге, приводит к снижению прочностных свойств резин на основе этого каучука.

Сравнивая полученные результаты с условной прочностью при одноосном растяжении можно заключить, что в сложном напряженно-деформированном состоянии резины на основе кристаллизующегося каучука СКИ-3 не имеют явно выраженного преимущества перед резинами на основе каучуков БНКС-28, СКМС-30АРК и СКД. Более того, при сравнительно небольших деформациях уступают им.

Очень часто эластомерная часть тонкостенных РТИ в процессе эксплуатации находится не только в сложнапряженном состоянии, но и должна противостоять внешним механическим воздействиям. Это могут быть как неравномерности напряжений и деформаций в материале, так и дефекты различной природы: механические повреждения, возникающие при работе изделия, трещины сетки старения, технологические дефекты, а так же конструктивные особенности, например, крепежные отверстия, ребра жесткости, перепускные отверстия и т.д. Как правило, именно эти дефекты вызывают разрушение материала и, следовательно, являются причиной выхода изделия из строя [17, 19]. В этой связи интересным представляется исследование особенностей формирования прочностных свойств резин в

сложнонапряженном состоянии при наличии концентратора напряжений.



Черные столбцы на рисунке «А» соответствуют условной прочности  $f_r$ , а серые – коэффициенту  $C$   
 Рис. 1. Значения прочностных показателей резин при одноосном растяжении и сложнонапряженном состоянии (А) и стойкость к касательным напряжениям (Б)

Исследования проводили на таких же образцах-мембранах, что и в случае анализа прочностных свойств резин без дефекта. Концентрация напряжений создавалась путем нанесения надреза в центральной части мембраны глубиной  $0,5 \div 6$  мм.

В условиях одноосного растяжения резины на основе СКИ-3 по значению сопротивления раздиру существенно превосходят резины на основе некристаллизующихся каучуков (рис. 2). Особенно это выражено при небольшой величине дефекта, когда ориентация макромолекул

способна в значительной степени компенсировать влияние перенапряжений в вершине трещины на процесс разрушения материала. Однако с увеличением длины надреза, различия эти нивелируются, в первую очередь за счет интенсивного снижения прочности резин на основе СКИ-3. Так, при увеличении длины надреза от 0,5 до 6 мм сопротивление раздиру резин на основе СКИ-3 падает в 11 раз, на основе других каучуков примерно в 5.

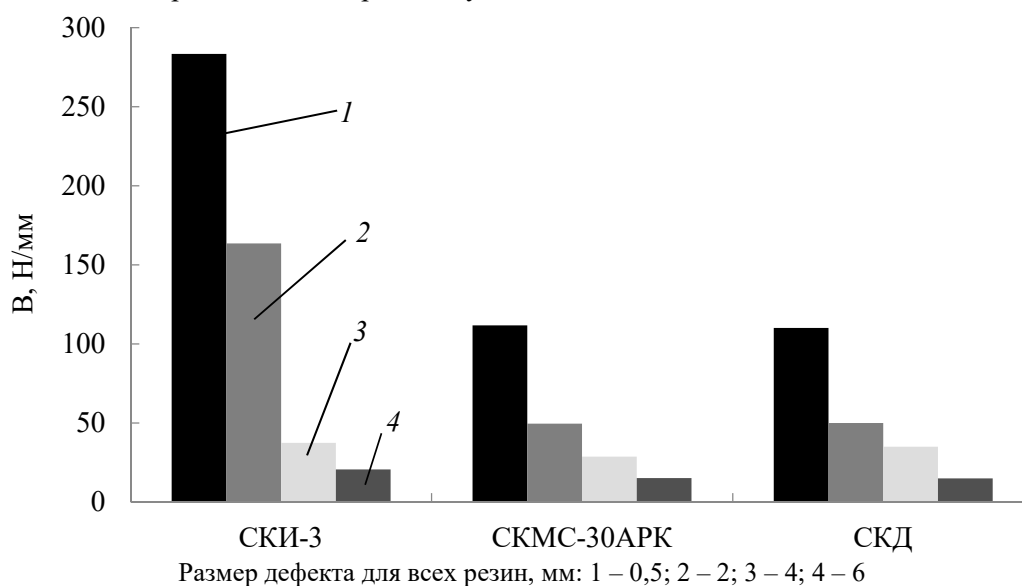
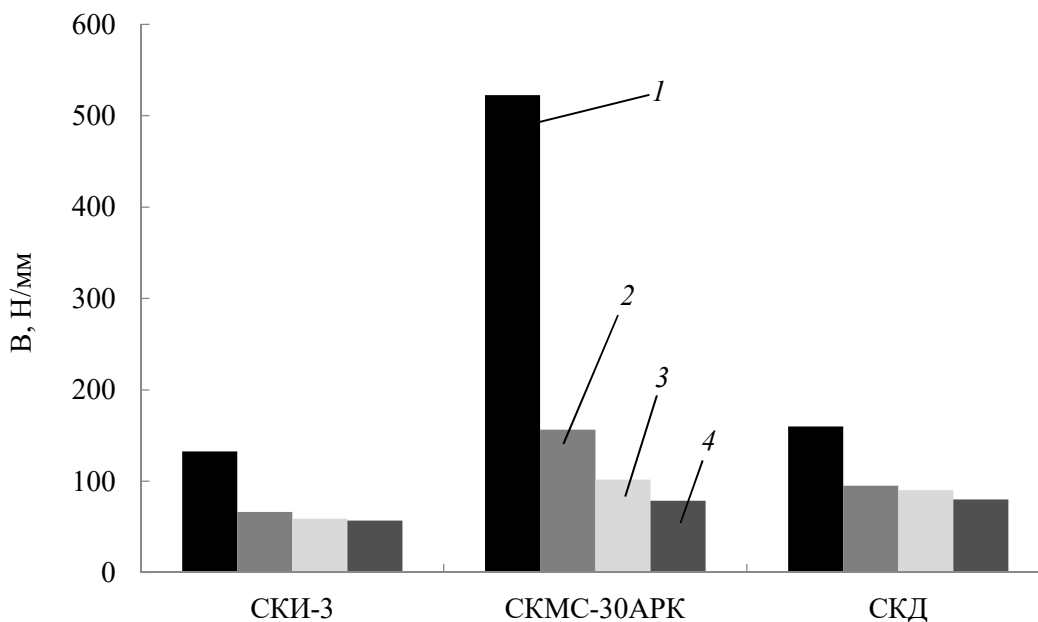


Рис. 2. Сопротивление раздиру резин при одноосном растяжении

В то же время, в условиях сложнапряженного состояния (рис. 3) характер поведения резин меняется. Если при одноосном растяжении наиболее высокий уровень прочностных свойств вулканизатов, во всем исследованном диапазоне длин дефекта, обеспечивается каучуком СКИ-3

(рис. 2), то при индентировании мембран, максимальное значение сопротивления раздиру обеспечивает нерегулярный и малополярный каучук СКМС-30АРК, а сопротивление раздиру резин на основе СКД и СКИ-3 ниже ~ в 2 ÷ 4 раза (в зависимости от размера дефекта).



Размер дефекта для всех резин, мм: 1 – 0,5; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 6  
 Рис. 3. Сопротивление раздиру резин в сложнапряженном состоянии

Выявленные различия обусловлены, по всей видимости, тем, что при испытании в условиях сложнапряженного состояния происходит разрушение исходной надмолекулярные структуры материала на начальной стадии деформирования. Далее образуется надмолекулярная структура, ориентированная в окружном, относительно центра образца, направлении. При дальнейшем растяжении, по мере достижения критического напряжения в вершине надреза, дефект должен прорасти по прямой - от центра к периферии

образца, т.е. в радиальном направлении. Однако трещина растет в окружном направлении за счет «расслаивания» предварительно сориентированных надмолекулярных структур. Последнее оказывается наиболее характерным для резин на основе каучука СКИ-3 (рис. 4.), для которого предварительная ориентация в окружном направлении, до начала разрушения, протекает в наибольшей степени, а также для резин на основе регулярного каучука СКД.

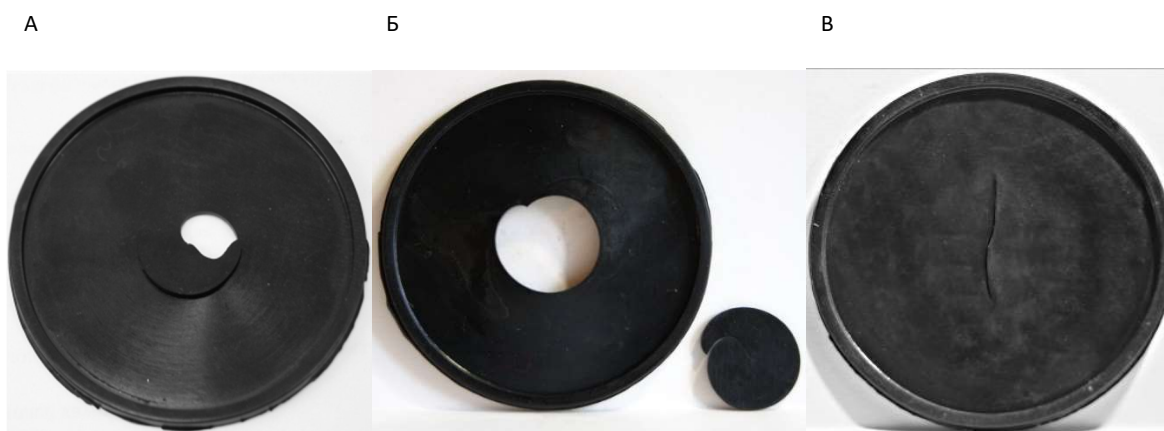


Рис. 4. Характер разрушения резин на основе каучуков СКИ-3 (А), СКД (Б) и СКМС-30АРК (В)

У резин на основе некристаллизующегося каучука СКМС-30АРК трещина растет в ради-

альном направлении, т.к. данный полимер обладает высокой степенью разветвленности макро-

молекул, вследствие чего предварительная ориентация оказывается незначительной. При этом макромолекулы не связанные в надмолекулярные структуры (расположенные в аморфных областях) до начала разрушения, ориентируются и образуют структуры перпендикулярные направлению прорастания дефекта.

Как известно [1, 6] аморфные каучуки не обеспечивают вулканизатам существенную способность к тяжёлообразованию. Введение технического углерода приводит к увеличению способности к тяжёлообразованию резин на основе каучука СКМС-30АРК, что выражается ростом сопротивления раздиру. Уровень сопротивления раздиру выше для сложнонапряженного состояния во всем диапазоне наполнения техническим углеродом. По-видимому, тяжи нужно рассматривать как одну из составляющих процесса усиления. Среднее натяжение цепей будет играть преобладающую роль и зависит от локального изменения взаимного расположения соседних агрегатов в процессе деформирования всего образца. В сложнонапряженном состоянии при деформировании происходят как повороты агрегатов [21], так и увеличение расстояния между частицами наполнителя, поэтому можно предположить, что в данном случае существует совокупность цепей, имеющих разные функции распределения по напряжениям, что обеспечивает рост предельной нагрузки.

Таким образом, и при наличии концентраторов напряжения режим нагружения по-разному сказывается на формировании прочностных свойств резин. Если при одноосном растяжении наиболее важным фактором является способность материала к ориентационному упрочнению, обусловленная регулярностью структуры каучука и наличием усиливающего наполнителя, то в сложнонапряженном состоянии на первый план, с точки зрения уровня сопротивления раздиру резин, выходит плотность узлов флуктуационной сетки зацеплений [2, 20]. В том случае, когда материал обладает как способностью к ориентационному упрочнению, так и высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия [2, 20], в условиях сложнонапряженного состояния наблюдается экстремально высокий рост сопротивления раздиру резин, отсутствующий при применении стандартных методов определения свойств резин.

**Выводы.** Полученные результаты открывают новые пути совершенствования рецептур тонкостенных резинотехнических изделий, условия эксплуатации которых предполагают работу в сложном напряженно-деформированном состоянии, а также контакт с твердыми телами, вызы-

вающими механические повреждения, технологические дефекты, либо имеющих конструкционно обусловленные концентраторы напряжений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с.
2. Дик Дж. С. Технология резины: Рецепт-роостроение и испытания. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 620 с.
3. Касперович А.В., Шашок Ж.С., Вишневский К.В. Технология производства резинотехнических изделий. Минск. БГТУ, 2014. 108 с.
4. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резиновых изделий и технологической оснастки. М.: Истек, 2009. 417 с.
5. Мартин Дж. М., Смит У.К. Производство и применение резинотехнических изделий. СПб.: Профессия, 2006. 480 с.
6. Присс Л.С. Физика упругости резины. Теория высокоэластичности. М.: Научно-технический центр "НИИШП", 2010. 364 с.
7. Хромов М.К. О связи показателей разрушения при прорыве с упруго-прочностными свойствами резин // Каучук и резина. 1981. № 8. С. 6–9.
8. Несиоловская Т.Н., Куделин Д.В. Комплексный подход к проектированию тонкостенных резиновых изделий // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 229–233.
9. Несиоловская Т.Н., Ветошкин А.Б., Куделин Д.В. Оценка прочностных свойств тонкостенных резиновых изделий в условиях сложнодеформированного состояния // Известия вузов. Химия и хим. технология. 2012. Том 55. № 7. С. 97–100.
10. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Книжный дом «Либроком», 2015. 272 с.
11. Морозов Е.М., Левин В.А., Вершинин А.В. Прочностной анализ: Фидесис в руках инженера. М.: Ленанд, 2015. 408 с.
12. Золочевский А.А., Беккер А.А. Введение в ABAQUS. Харьков, 2011. 49 с.
13. Khennane A. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press. 2013. 487 p. DOI: 10.1201/b15042
14. Yeoh O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber // Rubber Chemistry and Technology. 1993. Vol. 66. Pp. 754–771.
15. Kaliske M. On the Finite Element Implementation of Rubber-like Materials at Finite Strains

// Engineering Computations. 1997. Vol.14. №. 2. Pp. 216–232.

16. Gokhale Nitin S., Deshpande Sanjay S., Bedekar Sanjeev V. Practical Finite Element Analysis. Finite To Infinite. 2008. 446 p.

17. Selvadurai A.P.S. Deflections of a rubber membrane // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. Vol. 54, No. 6. Pp. 1093–1119. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.01.001

18. Truesdell C., Noll W. The Non-Linear Field Theories of Mechanics Third Edition. Berlin – Heidelberg - New York: Springer-Verlag. 2004. XXIX. 602 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10388-3

19. Kaang Shinyoung, Jin Young Woong, Huh Yang-il, Lee Wan-Jin, Im Wan Bin. A test method to measure fatigue crack growth rate of rubbery materials // Polymer Testing. 2006. Vol. 25. No. 3. Pp. 347–352 DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.12.005

20. Bertram A. Elasticity and Plasticity of Large Deformations: An Introduction Springer-Verlag Berlin. 3rd edition. 2012. 345 p. DOI: 10.1007/978-3-642-24615-9

21. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? М.: Издательство машиностроение-1, 2005. 244 с.

#### Информация об авторах

**Куделин Дмитрий Вячеславович**, соискатель, ведущий специалист. E-mail: kvmbaikal@yandex.ru. ООО «Научно-технический центр «Интайр». Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, д. 81.

**Несиоловская Татьяна Николаевна**, доктор технических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета. E-mail: nesiolovskaya@yustu.ru. Ярославский государственный технический университет. Россия, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88.

Поступила в ноябре 2019 г.

© Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н., 2020

<sup>1,\*</sup>*Kudelin D.V.*, <sup>2</sup>*Nesiolovskaya T.N.*

<sup>1</sup>R&D “Center “Intire” LLC

<sup>2</sup>Yaroslavsky State Technical University

\*E-mail: kvmbaikal@yandex.ru

## INFLUENCE OF TEST CONDITIONS ON STRENGTH PROPERTIES OF THIN-WALL RUBBER PRODUCTS

**Abstract.** A computer simulation of the loading of the rubber membrane by a spherical indenter is performed using a finite element analysis package. It is shown that in the complex stress state rubber based on crystallize rubber IR are significantly inferior in strength properties as in the absence and in the presence of stress concentrator to rubber based on amorphous rubber SBR, while in uniaxial tension they are superior. It is revealed that in the complex stress state, rubbers based on IR rubber filled with 40 parts by weight of carbon black N339 have low resistance to shear stresses, inferior to SBR and BR vulcanizates, which results in low strength properties of rubbers based on it in comparison with strength characteristics determined under uniaxial tension. An analysis of the strength properties of rubbers in the presence of a stress concentrator shows that in a complex stress state, rubbers based on amorphous SBR rubber have the maximum tear resistance, exceeding IR and BR vulcanizates by this indicator, respectively by ~ 4 and 2 times. Under uniaxial tension, the most important factor is the ability of the material to orientation hardening, due to the regularity of the rubber structure and the presence of reinforcing filler, and in the complex-stressed state, the most important factor is a density of the nodes of the fluctuation mesh from the point of view of strength properties.

**Keywords:** rubber membranes, complex stress state, uniaxial tension, strength properties, tear resistance.

### REFERENCES

1. Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. The Great reference of rubberman. V. 2. Rubber and rubber products [Bolshoy spravochnik rezinshika. V. 2. Rezini i rezinotekhnicheskie izdeliya]. M.: Publishing Center Tekhinform MAI LLC. 2012. 664 p. (rus)

2. Dick J.S. Rubber Technology: Formulation and Testing [Technologia rezini. Recepturostroenie I ispitania]. SPb.: Scientific foundations and technologies. 2010. 620 p. (rus)

3. Kasperovich A.V., Shashok Zh.S., Vishnevsky K.V. Rubber products technology [Technologia rezinovich izdelii]. Minsk: BSTU. 2014. 108 p. (rus)

4. Lepetov V.A., Yurtsev L.N. Calculations and design of rubber products and industrial equipment [Rascheti i konstruirovaniye rezinovich izdelii I technologicheskoi ostnastki]. M.: Istek. 2009. 417p. (rus)

5. Martin J.M., Smith W.K. Production and use of rubber products [Proizvodstvo i primeneniye rezi-notekhnicheskikh izdelii]. SPb.: Professia. 2006. 480 p. (rus)
6. Priss L.S. Physics of elasticity of rubber. Theory of high elasticity [Fizika uprugosti rezini. Teoriya visokoelastichnosti]. M.: Nauch.-Techn. Center "NIISHP". 2010. 364 p. (rus)
7. Khromov M.K. On the relationship of breakdown indicators during breaking with the elastic-strength properties of rubbers [Osviazi pokazateley razrucheniya pri prorive s uprugo-prochnostnimi svoystvami rezin]. Kauchyik i resina. 1981. No. 8. Pp. 6–9. (rus)
8. Nesiolovskaya T.N., Kudelin D.V. An integrated approach to the design of thin-walled rubber products [Kompleksnij podhod k proektirovaniyu tonkostennih rezinovykh izdelij]. Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. No. 2 Kazan, 2012. Pp. 229–233. (rus)
9. Nesiolovskaya T.N., Vetoshkin A.B., Kudelin D.V. Evaluation of the strength properties of thin-walled rubber products under complex-deformed conditions [Ocenka prochnostnih svoystv tonkostennih rezinovykh izdelii v usloviyah slognoseformirovannogo sostoyaniya]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimia i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2012. Vol. 55. No. 7. Pp. 97–100. (rus)
10. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS in the Engineer's Hands: A Practical Guide [ANSYS v rukah ingenera. Prakticheskoe rukovodstvo]. M.: Knizhnyy dom "Librocom". 2015. 272 p. (rus)
11. Morozov E.M., Levin V.A., Vershinin A.V. Strength analysis: Fidesis in the hands of an engineer [Prochnostnoy analiz. FIDESYS v rukah ingenera]. M.: Lenand. 2015. 408 p. (rus)
12. Zolochovsky A.A., Becker A.A. Introduction to ABAQUS [Vvedeniye v ABAQUS]. Teaching aid. Kharkiv. 2011. 49 p. (rus)
13. Khennane A. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press. 2013. 487 p. DOI: 10.1201/b15042
14. Yeoh O.H. Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. Rubber Chemistry and Technology. 1993. Vol. 66. Pp. 754–771.
15. Kaliske M. On the Finite Element Implementation of Rubber-like Materials at Finite Strains. Engineering Computations. 1997. Vol. 14. No. 2. Pp. 216–232.
16. Gokhale Nitin S., Deshpande Sanjay S., Bedekar Sanjeev V. Practical Finite Element Analysis. Finite To Infinite. 2008. 446 p.
17. Selvadurai A.P.S. Deflections of a rubber membrane. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. V. 54, No. 6. Pp. 1093–1119. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.01.001
18. Truesdell C., Noll W. The Non-Linear Field Theories of Mechanics. 3rd edition. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag. 2004. XXIX. 602 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10388-3
19. Kaang Shinyoung, Jin Young Woong, Huh Yang-il, Lee Wan-Jin, Im Wan Bin. A test method to measure fatigue crack growth rate of rubbery materials. Polymer Testing. 2006. V. 25. No. 3. Pp. 347–352. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2005.12.005
20. Bertram A. Elasticity and Plasticity of Large Deformations: An Introduction Springer-Verlag Berlin. 3rd edition. 2012. 345 p. DOI: 10.1007/978-3-642-24615-9
21. Potapova L.B., Yarcev V.P. Mechanics of materials under biaxial stress state. How are ultimate stresses predicted? [Mechanika materialov pri slognose nom napryajennom sostoyanii. Kak predskazivaut predelnie napryajeniya?]. M.: Engineering Publishing House-1. 2005. 244 p. (rus)

#### Information about the authors

**Kudelin, Dmitriy V.** Postgraduate student. E-mail: kvmbaikal@yandex.ru. R&D Center "Intire" LLC. Russia, 150003, Yaroslavl, st. Sovetskaya, 81.

**Nesiolovskaya, Tatiana N.** DSc, Professor. E-mail: nesiolovskayatn@ystu.ru. Yaroslavl State Technological University. Russia, 150023, Yaroslavl, Moskovsky av., 88.

---

*Received in November 2019*

#### Для цитирования:

Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н. Влияние условий испытаний на прочностные свойства тонкостенных резиновых изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 1. С. 78–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-78-84

#### For citation:

Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N. Influence of test conditions on strength properties of thin-wall rubber products. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 1. Pp. 78–84. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-78-84