

УДК 678.046

Ж. С. Шашок

Белорусский государственный технологический университет

**УПРУГОПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РЕЗИН НА ОСНОВЕ БНКС-18
С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
И МАЛОАКТИВНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ**

Изучено влияние трех наноструктурных углеродных материалов: нефункционализованного и функционализированных амино- и кислородсодержащими группами на упругопрочностные свойства и стойкость резин к тепловому старению. Исследована структура вулканизатов до и после теплового старения методом равновесного набухания. В качестве объектов исследования использованы композиции на основе полярного каучука специального назначения БНКС-18, наполненные малоактивным техническим углеродом марки N772 в количестве 25 и 50 мас. ч. Установлено, что введение углеродных наноматериалов в эластомерные композиции на основе полярного каучука БНКС-18 с малоактивной маркой технического углерода N772 приводит к получению вулканизатов с более высокими на 3,1–36,1% эластическими показателями как до, так и после теплового старения и различающимися по прочностным свойствам на 6,0–11,3% в зависимости от типа наноматериала. Определено, что использование всех углеродных наноматериалов в дозировках от 0,1 до 0,3 мас. ч. при определенном содержании технического углерода способствует повышению стойкости резин к воздействию температурно-силовых полей, что связано с их влиянием на формирование в процессе вулканизации природы поперечных связей и возможным участием углеродных наноматериалов в протекании в резине процессов термоокислительной деструкции.

Ключевые слова: эластомерная композиция, углеродный наноструктурный материал, условная прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, стойкость к тепловому старению, плотность поперечного сшивания.

Для цитирования: Шашок Ж. С. Упругопрочностные свойства резин на основе БНКС-18 с углеродными наноструктурными материалами и малоактивным техническим углеродом // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 88–94.

Zh. S. Shashok

Belarusian State Technological University

**ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES OF RUBBERS BASED ON BNKS-18
WITH CARBON NANOSTRUCTURAL MATERIALS
AND LOW-ACTIVE TECHNICAL CARBON**

The influence of three nanostructured carbon materials, nonfunctionalized and functionalized with amino and oxygen-containing groups, on the elastic-strength properties and resistance of rubbers to heat aging was studied. The structure of vulcanizates before and after heat aging was investigated by the method of equilibrium swelling. Compositions based on polar rubber of special purpose BNKS-18, filled with low-activity carbon black of the N772 grade in the amount of 25 and 50 phr. It was established that the introduction of carbon nanomaterials into elastomeric compositions based on polar rubber BNKS-18 with a low-activity carbon black of the N772 grade leads to the production of vulcanizates with 3.1–36.1% higher elastic indicators, both up to and after heat aging and differing in strength properties by 6.0–11.3%, depending on the type of nanomaterial. It has been determined that the use of all carbon nano-materials in dosages from 0.1 to 0.3 phr at a certain content of carbon black enhances the resistance of rubbers to temperature-force fields, which is associated with their influence on the formation of the nature of cross-links during vulcanization and the possible participation of carbon nanomaterials in the course of thermal oxidative destruction in rubber.

Key words: elastomeric composition, carbon nanostructured material, conventional tensile strength, elongation at break, heat aging resistance, cross-linking density.

For citation: Shashok Zh. S. Elastic and strength properties of rubbers based on BNKS-18 with carbon nanostructural materials and low-active technical carbon. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 88–94 (In Russian).

Введение. Структура резин, как и многих других материалов, неоднородна. Местная концентрация напряжений может быть следствием наличия в резине материальных дефектов (микротрещин, полостей, включений, нарушений химической структуры) и структурной неоднородности материалов (неодинаковая длина участков молекулярных цепей, заключенных между узлами вулканизационной сетки, наличие несвязанных в сетку концов макромолекул, зависящее от молекулярной массы каучука, неравномерное распределение связей по объему вулканизата, наличие упорядоченных областей, кристаллических включений в аморфной фазе каучука, присутствие твердой и мягкой фазы в наполненных резинах, наличие поверхности раздела фаз и др.). Такие микродефекты и микронеоднородности являются очагами, дающими начало разрушению в материале, находящемся под нагрузкой. Согласно статистической теории С. Н. Журкова и А. П. Александрова [1, 2], прочность материалов определяется наиболее опасным дефектом, а распределение дефектов в материале носит статистический характер, поэтому маловероятно в разных образцах одной и той же резины встретить дефекты одинаковой степени опасности. Следовательно, различные образцы одной и той же резины могут иметь разную прочность.

Основная часть. Целью данной работы являлось изучение влияния на упругопрочностные свойства и стойкость к тепловому старению резин на основе БНКС-18 трех различных наноматериалов: нефункционализированного и функционализированных амино- и кислородсодержащими группами.

В работе использовался высокодисперсный углеродный наноматериал (УНМ), полученный на предприятии «Перспективные исследования и технологии» (Минск) (ТУ ВУ690654933.001–2011). Было опробовано три типа наноматериала. Первый (УНМ1) – материал, представляющий собой смесь углеродных нанотрубок и нановолокон с примесями аморфного углерода. Второй и третий материалы прошли специальную обработку (функционализацию) для прививки кислородсодержащих групп (УНМ2) и аминогрупп (УНМ3).

В качестве объектов исследований использовались эластомерные композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18. В композиции вводился малоактивный технический углерод марки N772 в дозировках 25 и 50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

Упругопрочностные свойства резин определялись в соответствии с ГОСТ 270–75. Стойкость резин к тепловому старению оценивалась по ГОСТ 9.024–74 (температура 125°C, 72 ч). Концентрация поперечных связей в материале определялась методом равновесного набухания [3],

с помощью которого были рассчитаны плотность поперечного сшивания, средняя молекулярная масса отрезка цепи, заключенного между двумя поперечными связями, и концентрация поперечных связей.

На основании полученных результатов исследования упругопрочностных свойств резин на основе БНКС-18 с наноструктурными материалами и техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. (табл. 1) выявлено, что до теплового старения резины с углеродными наноматериалами УНМ1 и УНМ2 не имеют существенных различий прочностных свойств по сравнению с резиной, не содержащей нанодобавку. Значение условной прочности при растяжении для резины без нанодобавки составляет 9,15 МПа, а для резин с углеродными наноматериалами находится в пределах 8,60–10,18 МПа. Резины с УНМ3 характеризуются повышенными на 8,1–11,3% показателями прочностных свойств. При этом эластические свойства резин со всеми исследуемыми нанодобавками выше, поскольку значение относительного удлинения при разрыве для резин с наноматериалами составляет от 380 до 490%, а для резины без добавки – 360%.

Таблица 1

Упругопрочностные свойства резин на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. и УНМ

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	Условная прочность при растяжении, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	
		до старения	после старения	до старения	после старения
Без УНМ	–	9,15	4,91	360	300
УНМ1	0,1	8,60	4,24	440	340
	0,2	9,76	4,21	390	350
	0,3	9,55	4,18	400	350
	0,4	9,61	5,05	390	340
	0,5	9,28	4,23	380	340
УНМ2	0,1	9,78	5,86	480	320
	0,2	9,80	7,45	460	350
	0,3	9,11	7,01	450	345
	0,4	9,02	6,98	450	330
	0,5	8,91	6,99	460	340
УНМ3	0,1	9,89	5,54	490	350
	0,2	10,18	6,64	490	380
	0,3	10,02	6,12	480	350
	0,4	9,94	6,03	470	340
	0,5	9,89	5,87	470	340

При увеличении длины поперечной связи до определенной величины облегчается перегруппировка молекулярных цепей под действием

механических напряжений. Это объясняет повышенные прочностные свойства, эластичность и сопротивление образованию трещин при многократных деформациях у резин, содержащих более длинные полисульфидные поперечные связи по сравнению с углерод-углеродными. Как правило, наилучшим комплексом физико-механических свойств обладают резины, содержащие поперечные связи различной химической природы [4]. Впервые полученные данные по определению упругопрочностных свойств резин на основе полярного каучука БНКС-18, содержащих малоактивный технический углерод марки N772 и углеродные наноструктурные материалы, свидетельствуют о различиях пространственных сеток вулканизатов, формирование которых осуществлялось в процессе вулканизации смесей [5].

Результаты определения изменения упругопрочностных свойств резин на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. и углеродными наноструктурными материалами после теплового старения (табл. 2) показали, что использование в составе резин нефункционализированного наноматериала УНМ1 приводит к наибольшему снижению условной прочности при растяжении, но наилучшему сохранению эластических свойств вулканизатов.

Таблица 2

Изменение упругопрочностных показателей резин на основе БНКС-18 с 25 мас. ч. технического углерода марки N772 и УНМ после теплового старения

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	Изменение условной прочности при растяжении S_{σ} , %	Изменение относительного удлинения при разрыве S_{ϵ} , %
Без УНМ	–	–46,3	–16,7
УНМ1	0,1	–50,7	–22,7
	0,2	–56,9	–10,3
	0,3	–56,2	–12,5
	0,4	–47,5	–12,8
	0,5	–54,4	–10,5
УНМ2	0,1	–40,1	–33,3
	0,2	–24,0	–23,9
	0,3	–23,1	–23,2
	0,4	–22,6	–26,7
	0,5	–21,5	–26,1
УНМ3	0,1	–43,9	–28,6
	0,2	–34,8	–22,4
	0,3	–38,9	–27,1
	0,4	–35,4	–27,7
	0,5	–40,6	–27,7

Изменение условной прочности при растяжении (S_{σ} , %) и относительного удлинения при разрыве (S_{ϵ} , %) для резины без нанодобавки

составляет –46,3 и –16,7% соответственно, а для резин с УНМ1 $-47,5 \leq S_{\sigma} \leq -56,9$ и $-10,3 \leq S_{\epsilon} \leq -12,8$ (исключение составляет резина с 0,1 мас. ч., для которой $S_{\epsilon} = -22,7\%$).

Введение в эластомерные композиции функционализированных наноматериалов УНМ2 и УНМ3 обеспечивает получение резин, характеризующихся меньшими изменениями прочностных свойств при тепловом старении. Следует отметить, что все исследуемые резины с наноструктурными углеродными добавками после теплового старения имеют более высокие значения относительного удлинения при разрыве (320–380%) по сравнению с резиной без нанодобавки (300%).

Следовательно, характер изменения упругопрочностных свойств резин при нормальных условиях и в процессе теплового старения может быть обусловлен, прежде всего, структурой и природой вулканизационной сетки [5].

Результаты определения показателей пространственной сетки резин на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. и наноматериалами (табл. 3) выявили, что резины, содержащие углеродные нанодобавки, характеризуются меньшими значениями плотности шивки по сравнению с резиной без наноматериала.

Из табл. 3 видно, что для эластомерной композиции, не содержащей углеродный наноматериал, плотность поперечного сшивания ($\nu \cdot 10^{-4}$ моль/см³) до теплового старения $\nu = 1,38 \cdot 10^{-4}$ моль/см³, а для композиций с наноматериалами данный показатель находится в пределах $1,30 \leq \nu \leq 1,37$, при этом исключение составляют вулканизаты с УНМ1 и УНМ3 в дозировке 0,1 мас. ч., для которых $1,38 \leq \nu \leq 1,41$ соответственно.

Практически аналогичная зависимость показателя структуры вулканизационной сетки при использовании в составе резин наноматериалов выявлена и после теплового старения. В данном случае плотность шивки всех резин с наноструктурными добавками несколько меньше по сравнению с резиной без добавки, исключение составляет резина с УНМ3 в дозировке 0,1 мас. ч. Получение резин с меньшей плотностью шивки, вероятно, и обуславливает более высокие эластические свойства вулканизатов как до, так и после теплового старения. Незначительные различия прочностных свойств вулканизатов могут быть связаны как с равномерностью распределения поперечных связей [1], так и с особенностями протекания термоокислительной деструкции в резинах, содержащих наноматериалы, а именно некотором их участии в активировании распада поперечных связей и полимера или в процессах ингибирования радикалов, образующихся при воздействии температуры и кислорода воздуха.

Таблица 3

Показатели пространственной сетки исследуемых резин на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. и УНМ

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	M_c , кг/моль		$n \cdot 10^{-19}$, см ⁻³		$v \cdot 10^4$, моль/см ³	
		до старения	после старения	до старения	после старения	до старения	после старения
Без УНМ	–	8112,51	7619,02	7,14	7,59	1,38	1,46
УНМ1	0,1	8105,12	7743,59	7,13	7,47	1,38	1,45
	0,2	8369,20	7806,01	6,96	7,41	1,33	1,43
	0,3	8277,61	7812,59	6,98	7,41	1,33	1,42
	0,4	8294,53	7829,43	6,97	7,40	1,31	1,42
	0,5	8366,48	7856,22	6,96	7,38	1,30	1,40
УНМ2	0,1	8304,78	7849,31	6,96	7,37	1,34	1,42
	0,2	8485,34	7816,70	6,82	7,39	1,32	1,43
	0,3	8412,38	7808,54	6,80	7,40	1,30	1,44
	0,4	8400,09	7805,06	6,81	7,40	1,31	1,45
	0,5	8421,11	7811,05	6,79	7,39	1,30	1,43
УНМ3	0,1	7911,54	7460,36	7,30	7,75	1,41	1,49
	0,2	8329,42	7673,83	6,94	7,54	1,34	1,43
	0,3	8299,57	7613,28	6,96	7,56	1,36	1,45
	0,4	8309,17	7609,99	6,96	7,56	1,37	1,45
	0,5	8288,62	7618,09	6,98	7,55	1,37	1,46

Примечание. M_c – средняя молекулярная масса отрезка молекулярной цепи, заключенного между двумя поперечными связями, кг/моль; n – количество поперечных связей в 1 см³ вулканизата, см⁻³; v – плотность поперечного сшивания, моль/см³.

Важным полученным результатом является то, что введение углеродных наноматериалов в эластомерные композиции на основе полярного каучука БНКС-18 с малоактивной маркой технического углерода в дозировке 25 мас. ч. приводит к получению резин с повышенными эластическими свойствами и высокой стойкостью к тепловому старению по изменению прочностных показателей, но только при использовании функционализированных нанодобавок УНМ2 и УНМ3.

Результаты исследования упругопрочностных свойств резин на основе БНКС-18 с углеродными наноструктурными материалами и техническим углеродом марки N772 в дозировке 50 мас. ч. (табл. 4) показали, что вулканизаты с наноструктурным углеродным материалом характеризуются меньшими (до 7,2%) значениями указанного показателя, но более высокими (на 3,1–18,7%) значениями относительного удлинения при разрыве.

Следовательно, в данном случае определяющим фактором различия упругопрочностных свойств резин при растяжении оказывается длина и природа поперечных связей, а именно способность сегментов макромолекул к ориентации при воздействии деформации и густота пространственной сетки.

Результаты изменения основных показателей упругопрочностных свойств резин на основе

БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 50 мас. ч. и наноструктурными углеродными материалами после теплового старения (табл. 5) показали, что с увеличением содержания в эластомерной композиции технического углерода изменяется характер влияния наноматериалов на стойкость резин к тепловому старению.

В данном случае вулканизаты с УНМ2, на поверхность которого привиты кислородсодержащие группы, характеризуются несколько меньшей стойкостью к тепловому старению (за исключением дозировки 0,1 мас. ч.) по сравнению с резинами с УНМ1 и УНМ3. Для композиции без нанодобавки изменение условной прочности при растяжении (S_σ , %) и относительного удлинения при разрыве (S_ε , %) резин $S_\sigma = -16,4\%$ и $S_\varepsilon = -15,6\%$, в то время как для резин с УНМ2 – $17,2 \leq S_\sigma \leq -21,4$ и $-25,7 \leq S_\varepsilon \leq -29,3$. В то же время для резин с УНМ1 и УНМ3 в дозировках от 0,1 до 0,3 мас. ч. установлено наименьшее изменение прочностных свойств в условиях повышенных температур по сравнению с резиной без добавки, а также, как и в случае при дозировке 25 мас. ч. малоактивного технического углерода, равноценные или несколько более высокие значения показателей относительного удлинения при разрыве, что может быть обусловлено структурой и природой поперечных связей, формирующихся при вулканизации.

Таблица 4
Упругопрочностные свойства резин
на основе БНКС-18 с техническим углеродом
марки N772 в дозировке 50 мас. ч. и УНМ

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	Условная прочность при растяжении, МПа		Относительное удлинение при разрыве, %	
		до старения	после старения	до старения	после старения
Без УНМ	–	13,03	10,89	320	270
УНМ1	0,1	12,56	11,84	330	290
	0,2	12,09	11,50	350	280
	0,3	12,26	11,12	340	280
	0,4	12,81	11,09	340	275
	0,5	12,39	11,05	330	270
УНМ2	0,1	13,20	11,19	370	275
	0,2	12,52	10,00	380	275
	0,3	12,84	10,09	380	280
	0,4	12,50	10,11	375	265
	0,5	12,33	10,21	360	260
УНМ3	0,1	12,19	10,59	340	270
	0,2	12,37	11,72	370	290
	0,3	12,29	11,12	370	280
	0,4	12,34	10,70	350	280
	0,5	12,30	10,64	340	270

Таблица 5
Изменение упругопрочностных показателей
резин на основе БНКС-18 с 50 мас. ч.
технического углерода марки N772 и УНМ
после теплового старения

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	Изменение условной прочности при растяжении S_{σ} , %	Изменение относительного удлинения при разрыве S_{ϵ} , %
Без УНМ	–	–16,4	–15,6
УНМ1	0,1	–5,7	–9,4
	0,2	–4,4	–20,0
	0,3	–9,3	–17,6
	0,4	–13,9	–19,1
	0,5	–10,8	–18,2
УНМ2	0,1	–15,2	–25,7
	0,2	–20,1	–27,6
	0,3	–21,4	–26,3
	0,4	–19,1	–29,3
	0,5	–17,2	–27,8
УНМ3	0,1	–13,1	–20,6
	0,2	–5,3	–21,6
	0,3	–9,5	–24,3
	0,4	–13,3	–20,0
	0,5	–13,5	–20,6

Анализ показателей вулканизационной сетки резин на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 50 мас. ч. и

наноматериалами (табл. 6) выявил, что резины с исследуемыми углеродными наноматериалами характеризуются меньшей плотностью поперечного сшивания до теплового старения. В данном случае для резины без добавки значение плотности поперечного сшивания $\nu = 2,17 \cdot 10^{-4}$ моль/см³, а для резин с нанодобавками данный показатель ($\nu \cdot 10^{-4}$ моль/см³) находится в пределах $2,04 \leq \nu \leq 2,15$. Установлено, что при воздействии повышенной температуры на исследуемые вулканизаты плотность поперечного сшивания вулканизатов увеличивается, причем для резин с наноструктурными углеродными материалами процесс структурирования протекает в большей степени, чем для резины, не содержащей наноматериал. В данном случае для композиции без добавки значение $\nu = 2,67 \cdot 10^{-4}$ моль/см³, а для резин с нанодобавками ν составляет от $2,68 \cdot 10^{-4}$ до $2,81 \cdot 10^{-4}$ моль/см³.

Изменение при повышенной температуре структуры резины на основе полярного бутадиен-нитрильного каучука обусловлено процессами окисления эластомера, в результате которого образуются промежуточные продукты, являющиеся эффективными ингибиторами окисления [4], а также влиянием электрофильного заместителя у двойной связи на термоокисление каучука [1]. В связи с этим при термическом, термоокислительном и термомеханическом воздействии на резины на основе БНКС в основном протекают процессы структурирования, а не термоокислительной деструкции. Введение углеродных наноматериалов, вероятно, приводит к некоторому их участию в образовании поперечных связей не только в процессе вулканизации, но и в термоокислительных процессах, происходящих в объеме резины при тепловом старении.

Необходимо отметить, что исследования влияния наноструктурных углеродных материалов на упругопрочностные свойства резин на основе полярного каучука БНКС-18 с малоактивной маркой технического углерода N772 показали, что введение наноматериалов позволяет получать вулканизаты с более высокими эластическими показателями как до, так и после теплового старения и незначительно различающимися по прочностным свойствам, что обусловлено различиями строения пространственной сетки вулканизата.

Заключение. Таким образом, полученные результаты влияния углеродных наноструктурных материалов на упругопрочностные свойства и стойкость к тепловому старению резин показали, что в эластомерных композициях на основе полярного БНКС-18 с малоактивным техническим углеродом марки N772 в дозировке 25 мас. ч. введение УНМ3 позволяет повысить на 8,1–11,3% показатели прочностных свойств.

Таблица 6

**Показатели пространственной сетки исследуемых резин
на основе БНКС-18 с техническим углеродом марки N772 в дозировке 50 мас. ч. и УНМ**

Тип УНМ	Дозировка, мас. ч.	M_c , кг/моль		$n \cdot 10^{-19}$, см ⁻³		$v \cdot 10^4$, моль/см ³	
		до старения	после старения	до старения	после старения	до старения	после старения
Без УНМ	–	5121,11	4187,33	1,13	1,38	2,17	2,67
УНМ1	0,1	5402,41	4073,88	1,07	1,42	2,07	2,74
	0,2	5322,55	3984,63	1,09	1,44	2,10	2,81
	0,3	5378,61	3992,45	1,09	1,43	2,11	2,80
	0,4	5310,24	3990,09	1,08	1,43	2,09	2,79
	0,5	5309,78	4011,49	1,08	1,42	2,09	2,77
УНМ2	0,1	5465,34	4053,12	1,06	1,43	2,04	2,76
	0,2	5290,18	3838,98	1,09	1,49	2,10	2,81
	0,3	5308,26	3906,14	1,07	1,47	2,06	2,78
	0,4	5320,48	3941,20	1,07	1,47	2,06	2,77
	0,5	5345,60	3955,66	1,05	1,46	2,04	2,77
УНМ3	0,1	5177,31	3999,52	1,11	1,42	2,15	2,75
	0,2	5518,88	4235,94	1,05	1,38	2,04	2,68
	0,3	5463,84	4126,92	1,08	1,39	2,08	2,72
	0,4	5432,10	4177,36	1,09	1,38	2,11	2,71
	0,5	5408,91	4189,79	1,07	1,38	2,05	2,69

Примечание. M_c – средняя молекулярная масса отрезка молекулярной цепи, заключенного между двумя поперечными связями, кг/моль; n – количество поперечных связей в 1 см³ вулканизата, см⁻³; v – плотность поперечного сшивания, моль/см³.

Применение всех исследуемых наноматериалов улучшает эластические свойства на 5,6–36,1%; введение в эластомерные композиции функционализированных наноматериалов УНМ2 и УНМ3 обеспечивает получение резин, характеризующихся меньшими изменениями прочностных свойств при тепловом старении (изменение условной прочности при растяжении (S_σ , %) для резины без нанодобавки составляет –46,3%, а для резин с указанными наноструктурными материалами $-43,9 \leq S_\sigma \leq -21,5$). Установлено, что резины, содержащие углеродные нанодобавки, характеризуются меньшими значениями плотности сшивки по сравнению с резиной без наноматериала, исключение составляют УНМ1 и УНМ3 в дозировке 0,1 мас. ч.

В композициях с малоактивным техническим углеродом марки N772 в дозировке 50 мас. ч. введение наноструктурных углеродных материалов

приводит к получению резин, характеризующихся меньшими (до 7,2%) значениями условной прочности при растяжении, но более высокими (на 3,1–18,7%) значениями относительного удлинения при разрыве; для резин с УНМ1 и УНМ3 в дозировках от 0,1 до 0,3 мас. ч. установлено наименьшее изменение прочностных свойств (S_σ , %) в условиях повышенных температур по сравнению с резиной без добавки (для резины без нанодобавки $S_\sigma = -16,4\%$, а для резин с указанными наноматериалами $-13,1 \leq S_\sigma \leq -4,4$); выявлено, что при воздействии повышенной температуры для резин с наноструктурными углеродными материалами процесс структурирования протекает в большей степени (плотность поперечного сшивания увеличивается в 1,29–1,31 раза), чем для резины, не содержащей наноматериал (плотность поперечного сшивания увеличивается в 1,23 раза).

Список литературы

1. Жовнер Н. А., Чиркова Н. В., Хлебов Г. А. Структура и свойства материалов на основе эластомеров. Омск: Филиал РосЗИТЛП, 2003. 276 с.
2. Шутилин Ю. Ф. Физикохимия полимеров. Воронеж: Воронеж. обл. тип., 2012. 972 с.
3. Аверко-Антонович И. Ю. Методы исследования структуры и свойств. Казань: КГТУ, 2002. 604 с.
4. Корнев А. Е., Буканов А. М., Шевердяев О. Н. Технология эластомерных материалов. М.: Истерик, 2009. 504 с.
5. Шашок Ж. С., Прокопчук Н. Р. Применение углеродных наноматериалов в полимерных композициях. Минск: БГТУ, 2014. 232 с.

References

1. Zhovner N. A., Chirkova N. V., Khlebov G. A. *Struktura i svoystva materialov na osnove elastomerov* [Structure and properties of materials based on elastomers]. Omsk, RosZITLP Publ., 2003. 276 p.
2. Shutilin Yu. F. *Fizikokhimiya polimerov* [Physicochemistry of polymers]. Voronezh, Voronezh. obl. tip. Publ., 2012. 972 p.
3. Averko-Antonovich I. Yu. *Metody issledovaniya struktury i svoystv* [Methods of research of structure and properties]. Kazan, KGTU Publ., 2002. 604 p.
4. Kornev A. E., Bukanov A. M., Sheverdyaev O. N. *Tekhnologiya elastomernykh materialov* [Technology of elastomeric materials]. Moscow, Isterik Publ., 2009. 504 p.
5. Shashok Zh. S., Prokopchuk N. R. *Primeneniye uglerodnykh nanomaterialov v polimernykh kompozitsiyakh* [Application of carbon nanomaterials in polymer compositions]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 232 p.

Информация об авторе

Шашок Жанна Станиславовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shashok@belstu.by

Information about the author

Shashok Zhanna Stanislavovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shashok@belstu.by

Поступила 11.11.2020