

УДК 678.046.9

В. В. Мяделец, А. В. Касперович

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ВУЛКАНИЗАТА
В КАЧЕСТВЕ НАПОЛНИТЕЛЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Изучена возможность применения измельченного вулканизата в качестве наполнителя в эластомерных композициях на основе бутадиен-нитрильного каучука. Для исследований использовались измельченные вулканизаты двух типов: шинный – на основе каучуков общего назначения; из отходов производства резинотехнических изделий (РТИ) – на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНК). Измельченные вулканизаты вводились в эластомерную композицию на основе бутадиен-нитрильного каучука, не содержащую технического углерода. Размер частиц фракции измельченного вулканизата составлял 0,63–1,00 мм. Измельченный вулканизат добавлялся в дозировках 50, 100, 150 и 200 мас. ч.

Выполнен сравнительный анализ влияния типа и дозировки измельченного вулканизата на упругопрочностные характеристики исследуемых вулканизатов. Методом равновесного набухания определены основные параметры вулканизационной сетки. Проведены испытания по определению стойкости полученных композиций к действию стандартной агрессивной среды в течение 1 и 3 сут. Осуществлен золь-гель-анализ измельченных вулканизатов, определена их плотность поперечного сшивания. Выполнены испытания экспериментальных композиций на сопротивление накоплению остаточных деформаций сжатия при повышенной температуре. Для уточнения структуры вулканизационной сетки эластомерных композиций, наполненных измельченным вулканизатом, определен их условно-равновесный модуль.

Ключевые слова: измельченный вулканизат, рециклинг, бутадиен-нитрильный каучук, эластомерная композиция, набухание, остаточные деформации, релаксация.

V. V. Myadelets, A. V. Kasperovich

Belarusian State Technological University

**USE OF GROUND VULCANIZATE AS A FILLER
OF ELASTOMERIC COMPOSITION**

The possibility of using ground vulcanizate as a filler in elastomeric compositions based on butadiene-nitrile rubber has been studied. Two types of ground vulcanizate are used for research: tire – on the basis of rubbers of general purpose; from the waste products of rubber technical articles – on the basis of butadiene-nitrile rubber. The ground vulcanizates were introduced into the elastomeric composition based on butadiene-nitrile rubber, which does not contain carbon black. The particle size of the fraction of ground vulcanizate used in the work was 0.63–1.00 mm. The ground vulcanizate was introduced in dosages of 50, 100, 150 and 200 phr.

A comparative analysis of the influence of the type and dosage of crushed vulcanizate on the mechanical characteristics of the vulcanizates under study was carried out. The basic parameters of the vulcanization network are determined by the method of equilibrium swelling. Tests were conducted to determine the resistance of the resulting compositions to the action of a standard aggressive medium for 1 and 3 days. Sol-gel analysis of ground vulcanizates was carried out, their cross-link density was determined. The experimental compositions were tested for resistance to the accumulation of residual compression deformations at elevated temperature. To clarify the structure of the curing network of elastomeric compositions filled with ground vulcanizate, their conditional-equilibrium modulus is determined.

Key words: ground vulcanizate, recycling, nitrile rubber, elastomeric composition, swelling, compression set, relaxation.

Введение. Одной из важных задач, стоящих перед современным обществом, является организация эффективной утилизации отходов производства и потребления. Решение данной задачи позволит снизить уровень загрязнения окружающей среды, а также получить новые источники сырья для различных отраслей промышленности [1, 2].

Большое количество изношенных шин и других резиновых отходов образуются ежегодно. В отличие от термопластов, которые достаточно просто поддаются вторичной переработке, резины характеризуются наличием трехмерной сетки, которая значительно затрудняет их утилизацию. Существует много различных способов переработки резиновых отходов,

однако наиболее предпочтительным можно считать измельчение резиновых отходов и применение их в качестве наполнителя новых полимерных композиций, так как при этом сохраняется структура полимерной основы вторичных материалов [3, 4].

Возможность эффективного использования измельченного вулканизата (ИВ) как наполнителя в первую очередь обусловлена характером его взаимодействия с эластомерной матрицей. Основное влияние на данное взаимодействие оказывает состав и характер поверхности частиц вторичной резины и природа эластомерной матрицы, в которую вводится измельченный вулканизат [5, 6].

Большое количество публикаций посвящено применению измельченных вулканизированных отходов, подвергнутых обработке различными способами, в составе эластомерных композиций на основе натурального [7, 8], бутадиен-стирольного [9], этиленпропиленового [10] и других каучуков. Однако использование ИВ в качестве эластичного наполнителя резин на основе бутадиен-нитрильного каучука рассматривается лишь в некоторых публикациях. При этом в этих работах проводится определение лишь основных физико-механических показателей определенных производственных эластомерных композиций, наполненных измельченным вулканизатом, который получили измельчением резиновых отходов того же состава [7–12].

Основная часть. Цель данной работы – исследовать влияние измельченного вулканизата различной природы на свойства эластомерных композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука и структуру их вулканизатов.

В качестве объектов исследования использовались измельченные вулканизаты различной природы: шинный ИВ на основе неполярных ненасыщенных каучуков общего назначения – ИВ-Ш, а также ИВ из облоя, образующегося при производстве РТИ, на основе полярных бутадиен-нитрильных каучуков – ИВ-РТИ. Измельченные вулканизаты были получены на вальцах. Размер частиц фракции ИВ, применяемой в работе, составлял 0,63–1,00 мм. ИВ вводился в модельную смесь на основе БНК в дозировках 50, 100, 150 и 200 мас. ч. Эластомерные композиции изготавливались на лабораторных смесительных вальцах RC-WW 150/330 (Rubicon, Германия). Рецепт модельной эластомерной композиции представлена в табл. 1.

Вулканизацию образцов для дальнейших испытаний проводили в гидравлическом прессе при температуре 153°C в течение времени, равного оптимуму вулканизации, который определяли для каждой композиции по ГОСТ 12535.

Таблица 1

Рецептура модельной эластомерной композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука

Ингредиент	Дозировка, мас. ч.
БНК-18А	100,0
Оксид цинка	3,0
Сера	1,5
Стеариновая кислота	1,0
TBBS	0,7
<i>Итого</i>	106,2

На начальном этапе исследований были определены основные упругопрочностные характеристики вулканизатов: условная прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве.

Результаты исследования условной прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве показаны на рис. 1 и 2.

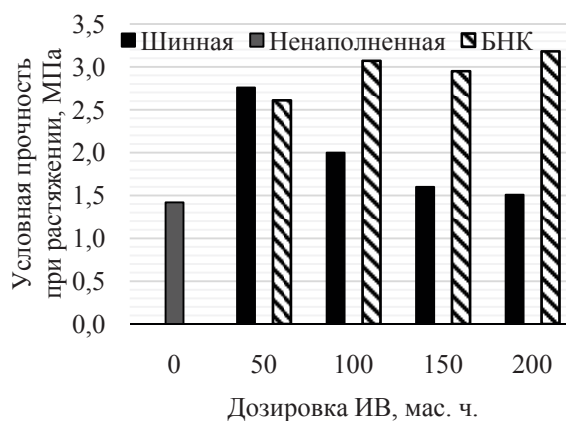


Рис. 1. Условная прочность при растяжении исследуемых эластомерных композиций

Как следует из рис. 1, вулканизаты, содержащие ИВ, во всех случаях имеют прочность большую, чем у ненаполненной модельной композиции. Так, при дозировке 50 мас. ч. ИВ обоих типов прочность экспериментальных образцов на 83,8–94,3% выше, чем у ненаполненной композиции.

С ростом дозировки природа измельченного вулканизата определяет характер изменения прочности вулканизатов. Так, при дозировке 200 мас. ч. для вулканизатов, наполненных измельченным обломом РТИ, прочность составляет 3,2 МПа, что больше на 123%, чем у ненаполненной композиции, а для наполненных шинным ИВ – 1,5 МПа (на 6%). Как видно из рис. 1, для композиций, наполненных неполярным ИВ-Ш, наблюдается уменьшение условной прочности при растяжении, а для вулканизатов, содержащих полярную крошку (ИВ-РТИ), наоборот, происходит увеличение данного показателя.

Показатель относительного удлинения (рис. 2) при разрыве снижается с увеличением дозировки измельченного вулканизата.

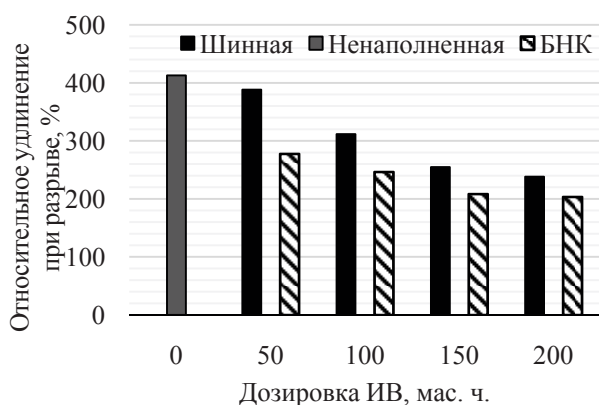


Рис. 2. Относительное удлинение при разрыве исследуемых эластомерных композиций

При этом композиции, наполненные ИВ-Ш, характеризуются более высокими значениями относительного удлинения, чем те, что наполнены ИВ-РТИ. Так, для композиции без добавок относительное удлинение составляет 412%, при дозировке ИВ-Ш 50 мас. ч. данный показатель равен 388%, а в случае ИВ-РТИ в той же дозировке – 277%, при увеличении дозировки до 200 мас. ч. относительное удлинение уменьшается до 238% в случае ИВ-Ш и до 204% для ИВ-РТИ.

Можно предположить, что увеличение прочности вулканизатов, наполненных полярным ИВ, связано с образованием физических связей, которые образуются между частицами вторичной резины и эластомерной матрицей. Перегруппировка таких «слабых» связей при деформации образца может значительно увеличить его прочность и относительное удлинение [14, 15].

На следующем этапе исследований были установлены основные параметры пространственных вулканизационных сеток, которые определялись методом равновесного набухания. Для исследования использовали прямоугольные образцы вулканизатов размером $20 \times 10 \times 2 \pm 0,2$ мм, вырезанные из центральной части резиновой пластины. Образцы взвешивали на аналитических весах и погружали в растворитель. В качестве растворителя для исследуемых резин использовали толуол. После достижения равновесного состояния образец помещали в сушильный шкаф на 24 ч при $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ для удаления растворителя.

Среднюю молекулярную массу отрезка цепи M_c , заключенного между двумя поперечными связями, определяли по уравнению Флори – Ренера [16]:

$$\frac{1}{M_c} = \frac{V_{ro} + \chi V_{ro}^2 + \ln(1 - V_{ro})}{\rho_k V_0 (V_{ro}^{1/3} - 0,5 V_{ro})}, \quad (1)$$

где V_{ro} – объемная доля каучука в эластомерной композиции; χ – константа Хаггинса, характеризующая взаимодействие полимер – растворитель; ρ_k – плотность каучука, кг/м^3 ; V_0 – молярный объем растворителя, $\text{м}^3/\text{моль}$.

Плотность поперечного сшивания ν , моль/м^3 , рассчитывали по выражению

$$\nu = \frac{\rho_k}{M_c}. \quad (2)$$

Результаты исследования структуры вулканизационной сетки методом равновесного набухания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования вулканизационной сетки эластомерных композиций

Дозировка ИВ, мас. ч.	ρ , кг/м^3	M_c , г/моль	$n \cdot 10^{-19}$, см^{-3}	$\nu \cdot 10^5$, моль/см^3
Без ИВ	952,13	16 967	3,38	5,61
Шинный ИВ				
50	1 043,62	46 536	1,351	2,24
100	1 087,72	78 210	0,838	1,39
150	1 114,19	90 953	0,738	1,23
200	1 145,79	137 014	0,504	0,84
ИВ из облоя РТИ				
50	1 047,33	36 754	1,716	2,85
100	1 094,38	50 634	1,302	2,16
150	1 131,32	64 781	1,052	1,75
200	1 148,45	80 640	0,858	1,42

Примечание. ρ – плотность; M_c – молекулярная масса среднего участка цепи между двумя соседними узлами пространственной сетки; n – число поперечных связей в единице объема; ν – плотность поперечного сшивания.

Установлено, что плотность поперечного сшивания снижается с увеличением дозировки измельченного вулканизата. Так, введение 50 мас. ч. ИВ снижает данный показатель в сравнении с ненаполненной эластомерной композицией на 60,1% при использовании шинного ИВ и на 49,2% в случае ИВ из облоя РТИ; при дозировке 200 мас. ч. – на 85,0% для ИВ-Ш, на 74,6% для ИВ-РТИ.

Таким образом, применение в качестве наполнителя ИВ на основе облоя РТИ позволяет получать пространственную сетку с более высокой плотностью сшивки в сравнении с резинами, которые наполнены ИВ-Ш. Следует отметить, что все вулканизаты с ИВ в составе имеют более низкую плотность сшивки, чем модельная композиция без добавок.

Бутадиен-нитрильные каучуки характеризуются высокой маслостойкостью и применяются при производстве изделий, работающих в неполярных средах [13]. В связи с этим были проведены исследования влияния типа и дозировки измельченного вулканизата на стойкость к действию агрессивных сред. Испытания проводились при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, в качестве агрессивной среды использовалась смесь изооктана и толуола (70 : 30).

Результаты исследования стойкости эластомерных композиций к действию агрессивных сред и накоплению остаточных деформаций приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследования стойкости эластомерных композиций к действию агрессивных сред и накоплению остаточных деформаций

Дозировка ИВ, мас. ч.	Степень набухания в смеси изооктан : толуол в соотношении 70 : 30 (по объему), %		ООДС, %
	24 ч	72 ч	
Без ИВ	108,0	108,4	59,4
Шинный ИВ			
50	85,6	83,5	64,7
100	84,9	83,0	65,5
150	79,9	78,7	65,2
200	78,5	77,0	64,3
ИВ из облоя РТИ			
50	52,8	50,7	59,4
100	50,2	50,0	43,7
150	47,4	47,3	39,3
200	43,3	43,4	38,7

Как видно из результатов эксперимента, с увеличением дозировки ИВ наблюдается снижение равновесной степени набухания исследуемых образцов смеси изооктан : толуол в соотношении 70 : 30 (по объему). Вулканизаты, содержащие полярный ИВ, имеют стойкость к набуханию почти в 2 раза выше, чем наполненные неполярным. Так, например, для дозировки 200 мас. ч. ИВ степень набухания после 24 ч выдержки при использовании ИВ на основе облоя РТИ (43,3%) в 1,8 раза меньше, чем при использовании ИВ из изношенных шин (78,5%). Это также может быть косвенно связано с плотностью поперечного сшивания вулканизатов. Так, при дозировке 200 мас. ч. данный показатель в 1,7 раза ниже у композиций, наполненных шинным ИВ, чем у вулканизатов, содержащих ИВ на основе облоя РТИ.

Для оценки степени вулканизации образцов измельченных вулканизатов был применен золь-гель-анализ.

Образцы массой около 0,5 г взвешивались с точностью до 1 мг. Затем взвешенный образец упаковывали в фильтровальную бумагу и помещали в экстракционную камеру аппарата.

В колбу-приемник добавляли объем растворителя, в 2–3 раза превышающий объем экстракционной камеры. Экстракцию ацетоном проводили 16 ч. После нагревания отключали нагреватель, охлаждали аппарат, извлекали экстракционную камеру из аппарата и доставали образец. Сушку анализируемого образца проводили в вентилируемом сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 100°C в течение 1 ч. Высушенный образец охлаждали, а затем определяли его массу (m_0) с точностью до 1 мг.

После этого образец помещали в толуол на 72 ч при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. После набухания образец подвергали сушке при температуре 80°C в течение суток и взвешивали (m_1) с точностью до 1 мг.

Массовую долю веществ, экстрагированных растворителем, вычисляли по формулам

$$\text{Золь-фракция} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\text{Гель-фракция} = 100 - \text{Золь-фракция}. \quad (4)$$

С помощью уравнений (1) и (2) определяли плотность поперечного сшивания измельченных вулканизатов, применяемых в исследованиях.

Результаты золь-гель-анализа приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты золь-гель-анализа образцов измельченных вулканизатов

Показатель	ИВ-Ш	ИВ-РТИ
Золь-фракция, %	16,3	17,4
Гель-фракция, %	83,7	82,6
Плотность поперечного сшивания, $\nu \cdot 10^5$, моль/см ³	1,35	1,79

Несмотря на то, что ИВ имеет меньшую плотность сшивания, чем эластомерная матрица (в 4,16 раза для ИВ-Ш и в 3,13 раза в случае ИВ-РТИ (табл. 4)), стойкость к набуханию (в течение 24 ч) композиций, наполненных ИВ, выше, чем у модельной в 1,26–1,35 раза при использовании ИВ-Ш и в 2,05–2,49 раза для ИВ-РТИ (табл. 3).

Можно предположить, что уменьшение набухания вулканизатов связано с тем, что ИВ получен из резин, наполненных техническим углеродом, введение которого снижает объемное содержание каучука в вулканизате и удлиняет диффузионный путь растворителя [13], а также с тем, что наличие межфазной границы

«эластомерная матрица – ИВ» затрудняет проникновение растворителя внутрь частиц ИВ. Эти факторы приводят к снижению степени набухания даже при использовании в качестве наполнителя ИВ-Ш, полимерная основа которого – неполярные каучуки общего назначения, характеризующиеся низкой маслбензостойкостью [13, 15].

Поскольку резины на основе БНК широко применяются при производстве уплотнений различной конструкции, работающих при повышенных температурах, были проведены исследования по влиянию ИВ на накопление остаточных деформаций при сжатии (ООДС). Данный показатель характеризует степень релаксации напряжений в эластомерной матрице. В ходе проведения испытаний по определению ООДС протекает как физическая релаксация, связанная с перемещением сегментов цепей, так и химическая, которая обусловлена взаимодействием с кислородом, а также механическим разрушением связей в результате действия напряжения. Испытания проводили по ГОСТ 9.029. Образцы цилиндрической формы выдерживались при температуре 100°C на протяжении 24 ч.

Из полученных данных (табл. 3) видно, что при введении шинного измельченного вулканизата наблюдается увеличение показателя ООДС на 8,3–13,5% в сравнении с ненаполненной эластомерной композицией. Причем увеличение дозировки шинного ИВ влияет на ООДС незначительно. Использование в качестве наполнителя полярного ИВ на основе облоя РТИ уменьшает ООДС. Так, при внесении в состав композиции 50 мас. ч. полярного измельченного вулканизата ООДС находится на уровне образца сравнения, при дозировке 100 мас. ч. – на 26,5% ниже, при 150 мас. ч. – на 33,8%, при 200 мас. ч. – на 35,0%. Таким образом, полярный ИВ при дозировках более 100 мас. ч. позволяет снизить накопление остаточных деформаций. Поскольку при условиях испытаний по определению ООДС одновременно протекают химическая и физическая релаксации напряжений [14, 16], можно предположить, что природа ИВ, вводимого в состав экспериментальных композиций, оказывает влияние на скорость этих процессов.

Для дополнительного исследования структуры вулканизатов был определен условный равновесный модуль E исследуемых резин, который характеризует напряжение, установившееся после выдержки растянутых на 25% образцов при 70°C в течение 1 ч (ГОСТ 11053).

Из полученных результатов (рис. 3) видно, что природа измельченного вулканизата в значительной степени определяет условный модуль исследуемых композиций. Так, введение

шинного ИВ приводит к уменьшению на 7,1–25,7% (в зависимости от дозировки) значения E в сравнении с ненаполненной эластомерной композицией (0,70 МПа). Использование в качестве наполнителя ИВ из облоя РТИ, наоборот, увеличивает условно-равновесный модуль резин от 1,18 до 1,46 МПа при дозировках 50–150 мас. ч., у модельной резины – 0,72 МПа.

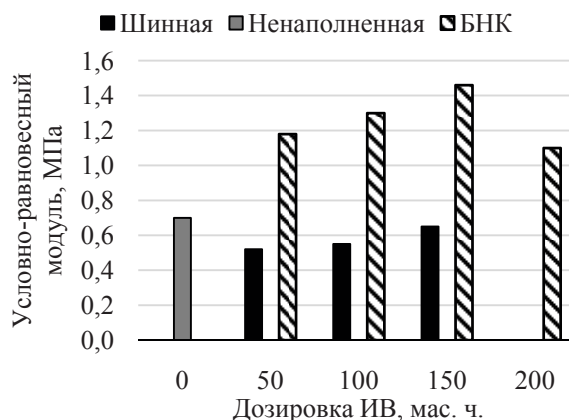


Рис. 3. Условно-равновесный модуль исследуемых эластомерных композиций

Условно-равновесный модуль зависит от структуры пространственной сетки и увеличивается с возрастанием плотности поперечного сшивания эластомера [17]. Следует отметить, что плотность поперечного сшивания у ненаполненной композиции выше в 3,6 раза, а значение условно-равновесного модуля меньше в 2,1 раза, чем у композиции, содержащей 200 мас. ч. ИВ из облоя РТИ. Можно предположить, что частицы ИВ-РТИ участвуют в протекании физической релаксации, затрудняя перегруппировку сегментов макромолекул каучука.

Следует отметить, что для композиции, содержащей 200 мас. ч. шинного ИВ, условно-равновесный модуль определить не удалось, так как в ходе испытаний образцы разрушались после выдержки в деформированном состоянии в течение 20–30 мин. Возможно, это связано с большим количеством дефектов в структуре вулканизата. В этом случае нагрузка распределяется только на малую часть цепей, в результате чего возникают перенапряжения, которые вызывают разрушение образца. Можно предположить, что по этим же причинам при дозировке 200 мас. ч. полярного ИВ условный модуль снижается на 32,7% в сравнении с композицией, содержащей 150 мас. ч. ИВ этого же типа.

Заключение. Таким образом, в результате исследований установлено, что природа вторичной резины, вводимой в эластомерную матрицу на основе БНК, оказывает влияние на все основные характеристики вулканизатов.

Упругопрочностные свойства исследуемых модельных композиций зависят от типа применяемого измельченного вулканизата. Введение неполярного шинного ИВ уменьшает прочность вулканизатов с ростом дозировки, а полярного ИВ из облоя РТИ, наоборот, повышает. Эластические свойства вулканизатов ухудшаются при включении ИВ в состав композиций. При этом композиции, содержащие шинный ИВ, характеризуются большими значениями относительного удлинения при разрыве.

Введение ИВ-РТИ приводит к значительному снижению накопления остаточных деформаций сжатия вулканизатами на основе исследуемых композиций (при дозировке поляр-

ного ИВ 200 мас. ч. данный показатель уменьшается на 35% по сравнению с ненаполненной композицией), стойкость к действию агрессивных сред увеличивается практически в 2 раза.

Следует отметить, что при дозировке 50 мас. ч. ИВ для резин, содержащих различные типы ИВ, прочность различается незначительно (на 5,7% больше в случае ИВ-Ш), а для ООДС различия составляют 8,9% (ООДС меньше в случае использования ИВ-РТИ). Таким образом, применение ИВ-Ш в качестве эластичного наполнителя композиций на основе БНК возможно в значительно меньших дозировках, чем ИВ-РТИ. Использование ИВ-Ш позволяет повысить стойкость вулканизатов к действию агрессивных сред.

Литература

1. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber // *Progress in Polymer Science*. 2000. No. 25. P. 909–948.
2. Шведов Р. Е. Теория и практика рециклинга некондиционных резинотехнических изделий: монография. Гродно: ГрГУ, 2006. 319 с.
3. Большой справочник резинщика. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. С. В. Резниченко, Ю. Л. Морозова. М.: ООО «Издательский центр “Техноформ” МАИ», 2012. 744 с.
4. Fang Y., Zhan M., Wang Y. The status of recycling of waste rubber // *Material and Design*. 2000. No. 22. P. 123–127.
5. Development and characterization of composites with ground elastomeric vulcanized scraps as filler / L. Carli [et al.] // *Material Science and Design C*. 2009. No. 29. P. 383–386.
6. Kakroodi A. R., Rodrigue D. Highly filled thermoplastic elastomers from ground tire rubber, maleated polyethylene and high density polyethylene // *Plastic, Rubber and Composites*. 2013. Vol. 42, no. 3. P. 115–122.
7. Lamminmaki J., Li S., Hanhi K. Feasible incorporation of devulcanized rubber waste in virgin natural rubber // *Journal of Material Sciences*. 2006. Vol. 41. P. 8301–8307.
8. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber Blended with Waste Rubber Powder Modified by Both Microwave and Sol-Gel Method / M. Luo [et al.] // *Acta Polymerica Sinica*. 2013. Vol. 7. P. 896–902.
9. Styrene butadiene-based blends containing waste rubber powder / M. Hassan [et al.] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2013. Vol. 19. P. 1735–1742.
10. Comparative Analysis of Ultraspecially Devulcanized Unfilled SBR, NR, and EPDM Rubbers / J. Yun [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. Vol. 88. P. 434–441.
11. Христофорова А. А., Соколова М. Д. Механохимическая активация резиновой крошки // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2009. № 6. С. 30–33.
12. Христофорова А. А., Соколова М. Д., Попов С. Н. Влияние режима механоактивации резиновой крошки на важнейшие эксплуатационные свойства уплотнительных резин // *Материалы, технологии, инструменты*. 2008. № 1. С. 73–76.
13. Шутин Ю. Ф. Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2003. 871 с.
14. Христофорова А. А., Соколова М. Д. Исследование резиновых смесей, наполненных измельченными вулканизатами // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2008. № 8. С. 100–101.
15. *Engineering with Rubber. How to Design Rubber Components* / A. N. Gent [et al.]. Carl Hanser Verlag, Munich, 2016. 447 p.
16. Аврущенко Б. Х. Резиновые уплотнители. Л.: Химия, 1978. 136 с.
17. Аверков-Антонович И. Ю., Бимкуллин Р. Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров. Казань: КНТУ, 2002. 604 с.

References

1. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 2000, no. 25, pp. 909–948.

2. Shvedov R. E. *Teoriya i praktika retsiklinga nekonditsionnykh rezinotekhnicheskikh izdeliy: monografiya* [Theory and practice of recycling substandard rubber products: monograph]. Grodno, GrGU Publ., 2006. 319 p.
3. *Bol'shoy spravochnik rezinshchika. V 2 chastyakh. Chast' 1* [Great reference book of the rubber. In 2 parts. Part 1]. Moscow, OOO «Izdatel'skiy tsentr "Tekhnoform" MAI» Publ., 2012. 744 p.
4. Fang Y., Zhan M., Wang Y. The status of recycling of waste rubber. *Material and Design*, 2000, no. 22, pp. 123–127.
5. Carli L. Development and characterization of composites with ground elastomeric vulcanized scraps as filler. *Material Science and Design C*, 2009, no. 29, pp. 383–386.
6. Kakroodi A. R., Rodrigue D. Highly filled thermoplastic elastomers from ground tire rubber, maleated polyethylene and high density polyethylene. *Plastic, Rubber and Composites*, 2013, vol. 42, no. 3, pp. 115–122.
7. Lamminmaki J., Li S., Hanhi K. Feasible incorporation of devulcanized rubber waste in virgin natural rubber. *Journal of Material Sciences*, 2006, vol. 41, pp. 8301–8307.
8. Luo M. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber Blended with Waste Rubber Powder Modified by Both Microwave and Sol-Gel Method. *Acta Polymerica Sinica*, 2013, vol. 7, pp. 896–902.
9. Hassan M. Styrene butadiene-based blends containing waste rubber powder. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, vol. 19, pp. 1735–1742.
10. Yun J. Comparative Analysis of Ultraspinically Devulcanized Unfilled SBR, NR, and EPDM Rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, vol. 88, pp. 434–441.
11. Khristoforova A. A., Sokolova M. D. Mechano-chemical activation of rubber crumb. *Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and technical sciences], 2009, no. 6, pp. 30–33 (In Russian).
12. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Popov S. N. Effect of the mode of mechanoactivation on the major properties of sealing rubbers. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials, Technology, Tools], 2008, no. 1, pp. 73–76 (In Russian).
13. Shutilin Yu. F. *Spravochnoye posobiye po svoystvam i primeneniyu elastomerov* [Reference Guide on the Properties and Applications of Elastomers]. Voronezh, Voronezhskaya gosudarstvennaya tekhnologicheskaya akademiya Publ., 2003. 871 p.
14. Khristoforova A. A., Sokolova M. D. Investigation of rubber compounds filled with fine-grained vulcanizates. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2008, no. 8, pp. 100–101 (In Russian).
15. Gent A. N. *Engineering with Rubber. How to Design Rubber Components*. Carl Hanser Verlag, Munich, 2016. 447 p.
16. Avrushchenko B. Kh. *Rezinovyye uplotniteli* [Rubber Sealing]. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 136 p.
17. Averkov-Antonovich I. Yu., Bimkullin R. T. *Metody issledovaniya struktury i svoystv polimerov* [Methods for studying the structure and properties of polymers]. Kazan, KNTU Publ., 2002. 604 p.

Информация об авторах

Мяделец Вадим Васильевич – младший научный сотрудник кафедры технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: myadelets.vadim@gmail.com

Касперович Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andkasp@mail.ru

Information about the authors

Myadelets Vadim Vasil'yevich – Junior Researcher, the Department of Technology of Petrochemical Synthesis and Polymer Materials Processing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: myadelets.vadim@gmail.com

Kasperovich Andrey Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technology of Petrochemical Synthesis and Polymer Materials Processing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andkasp@mail.ru

Поступила 29.04.2017