

УДК 541.64:539.199

**ПРОЦЕССЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ЭЛАСТОМЕРАХ,  
СШИТЫХ В ПРИСУТСТВИИ НЕНАСЫЩЕННЫХ  
ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

***Ф. А. Махлис, Ф. Ф. Хазимхаметов, Ю. В. Зеленев***

Изучена молекулярная подвижность и структура вулканизатов бутадиен-нитрильного (СКН) и этиленпропиленового (СКЭП) каучуков, содержащих полифункциональные ненасыщенные соединения (ПФНС). При рассмотрении непрерывных и дискретных спектров физической релаксации напряжения в вулканизатах СКН-18 в зависимости от структуры идентифицированы четыре-пять элементарных процессов. В вулканизатах СКЭП без ПФНС наблюдается четыре элементарных процесса, а в образцах с ПФНС наблюдается пятый процесс. Показано, что дополнительный наиболее быстрый элементарный процесс релаксации напряжения, наблюдаемый в вулканизатах, содержащих ПФНС, обусловлен подвижностью молекулярных цепей, расположенных у поверхности, наиболее крупных агрегатов ПФНС. Установлено, что относительный вклад релаксационных процессов, связанных с крупными агрегатами ПФНС, не превышает  $\sim 30\%$ . Предполагается, что микрочастицы, содержащие минимальные образования ПФНС, характеризуются наибольшими величинами времен релаксации.

Эластомеры, шитые в присутствии полифункциональных ненасыщенных соединений (ПФНС), обладают качественно новыми свойствами и структурой пространственной сетки [1–3]. При этом обеспечивается значительное уменьшение количества органических перекисей или поглощенной дозы ионизирующего излучения, необходимых для радиационного сшивания этих полимеров [4, 5]. Однако сведения о молекулярной подвижности в шитых полимерах, содержащих ПФНС, особенно в области высокоэластичности, практически отсутствуют. Наличие этих сведений позволило бы не только установить практически важные релаксационные свойства получаемых материалов, но и оценить характер образующихся пространственных структур.

Цель настоящей работы – изучение релаксационных процессов в шитых эластомерах, содержащих ПФНС, которые наиболее широко применяются при модификации эластомеров: N, N'-метафенилендималеимид (МФДМ), триаллилизоцианурат (ТАИЦ), тетраметакрилат-(бис-глицерин)фталат (ТМГФ-11).

Использовали промышленные эластомеры – сополимер бутадиена с акрилонитрилом (СКН-18) и сополимер этилена с пропиленом (СКЭП). Смешение эластомеров с ПФНС проводили на вальцах при  $\sim 40^\circ$ , пластинки 1 мм формовали в прессе при  $80^\circ$ , образцы сшивали  $\gamma$ -излучением в вакууме при  $30^\circ$ . Применили следующие образцы: А и Б – СКН-18, В – СКН-18+20 вес. % ТАИЦ, Г – СКН-18+20 вес. % ТМГФ-11, Д и Е – СКН-18+5 вес. % МФДМ, Ж – СКЭП, З – СКЭП+10 вес. % МФДМ, И – СКЭП+20 вес. % ТМГФ-11, К – СКЭП+20 вес. % ТАИЦ. Плотность пространственной сетки этих образцов  $N_{\text{н. о.}}$ , рассчитанная по уравнению Флори – Ренера [6] по результатам измерения равновесного набухания образцов в толуоле, составляла: А – 1,6; Б – 7,0; В – 6,5; Г – 21,5; Д – 6,0; Е – 20,0; Ж – 4,1; З – 4,2; И – 4,1; К –  $4,0 \cdot 10^{19}$  цепей/ $\text{см}^3$ . Физическую релаксацию напряжения измеряли в интервале температур  $20$ – $110^\circ$  при деформации растяжения 25–50%; запись напряжения проводили автоматически.

Расчет непрерывных спектров времен релаксации проводили по уравнениям второго приближения Шварцля – Ставермана [7–9], при использовании которого уравнение релаксации напряжения имеет вид

$$\sigma(t) = \varepsilon \int_{-\infty}^{\infty} H(\ln \tau) e^{-t/\tau} d \ln \tau, \quad (1)$$

где  $H(\ln \tau) = \tau E(\tau)$ ; функция  $H(\ln \tau) d \ln \tau$  определяет вклад релаксирующих элементов с временами интервала от  $\ln \tau$  до  $\ln \tau + d \ln \tau$ .

Дискретные спектры времен релаксации рассчитывали методом, описанным в работах [10, 11]. Согласно этому методу, процесс релаксации напряжения  $\sigma(t)$  можно описать суммой экспонент

$$\sigma(t) = \varepsilon \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – деформация;  $E_i$  – коэффициент, величина которого указывает на относительный вклад  $i$ -го релаксационного процесса;  $\tau_i$  – время релаксации  $i$ -го процесса.

Энергию активации  $i$ -го процесса  $U_i$ , объем  $\omega$  и линейный размер  $\alpha_i$  кинетических единиц, участвующих в  $i$ -м процессе, рассчитывали с помощью уравнений [12]

$$\begin{aligned} \tau_i &= B_i e^{U_i/kT} \\ \omega_i &= [B_i^2 (6kT/\rho)^3]^{1/5} \\ \alpha_i &= \omega_i^{1/3}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $B$  – предэкспоненциальный член  $i$ -го процесса релаксации напряжения;  $\rho$  – плотность полимера;  $k$  – константа Больцмана;  $T$  – абсолютная температура,  $^{\circ}\text{К}$ .

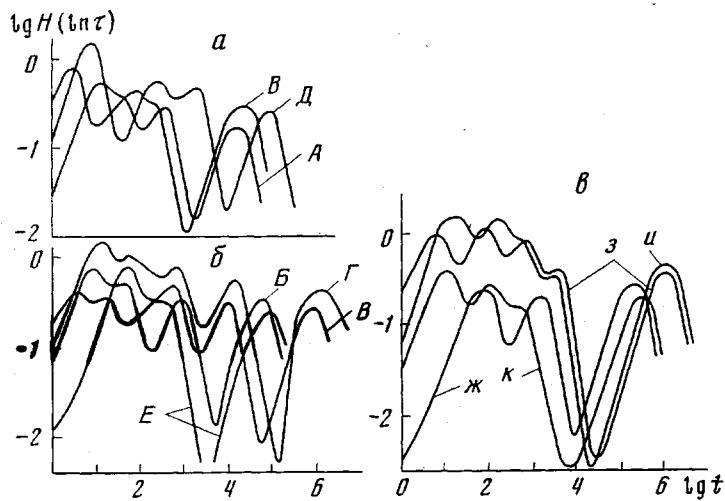
**Химическая релаксация напряжения.** С целью разделения процессов физической и химической релаксации напряжения дополнительно изучали процессы химической релаксации напряжения для цилиндрических образцов, высота и диаметр которых равны 10 мм, при длительном тепловом старении на воздухе и в вакууме в интервале температур 50–150° при сжатии от 20 до 40%. Измерения начинали после предварительной выдержки сжатых образцов в вакууме при 70° в течение 3 суток. В спичевых образцах СКН-18 при температурах менее 100° напряжение уменьшалось по экспоненциальному закону, энергия активации процесса релаксации напряжения в воздушной среде составляла 22±2 ккал/моль, время релаксации при 70° в образце Б – 6·10<sup>8</sup> сек.; время релаксации в вулканизатах с ПФНС больше в 5–10 раз. При старении вулканизатов СКН-18 в вакууме энергия активации процесса релаксации напряжения составляла 31±3 ккал/моль, а времена релаксации возрастали в тысячи раз по сравнению со старением в воздушной среде. Приведенные данные позволяют однозначно связать указанный процесс при старении в воздушной среде с термоокислительной деструкцией пространственной сетки вулканизатов СКН-18.

При старении в воздушной среде экспериментальные кривые вулканизатов СКЭП не следуют экспоненциальному закону, что указывает на наличие более чем одного элементарного процесса релаксации напряжения. Разложение на элементарные экспоненты позволило идентифицировать два процесса – быстрый с энергией активации 11±1 ккал/моль и медленный с энергией активации 20±2 ккал/моль; соответствующие времена релаксации при 50° для образца Ж составили 9·10<sup>6</sup> и 8·10<sup>8</sup> сек. При старении в вакууме наблюдается только один процесс релаксации напряжения с энергией активации 31±3 ккал/моль, что позволяет связать быстрый процесс релаксации в воздушной среде с термоокислительным распадом пространственной сетки вулканизата.

**Молекулярная релаксация в СКН-18.** Расчет непрерывных (рисунок, а, б) и дискретных (табл. 1) спектров физической релаксации напряжения показывает, что в зависимости от наличия ПФНС и типа каучука в вулка-

низатах наблюдается 3–5 элементарных процессов релаксации напряжения. Времена релаксации, полученные из непрерывных и дискретных спектров, практически совпадают. При этом величины времен релаксации и другие характеристики процесса зависят как от состава вулканизатов, так и от степени их сшивания.

В вулканизатах СКН-18 без ПФНС (образцы А и Б) наблюдается четыре процесса релаксации напряжения. Энергия активации первых трех



Непрерывные спектры вулканизатов бутадиен-нитрильных каучуков при  $\varepsilon=0,5$  (а, б) и этиленпропиленового каучука при  $\varepsilon=25$  (в); температура испытаний  $50^\circ$  (буквы у кривых соответствуют шифру образца)

процессов составляет  $8 \pm 1$  ккал/моль, а для четвертого – наиболее медленного процесса эта величина равна  $12 \pm 1$  ккал/моль. При  $70^\circ$  элементарный процесс с  $\tau_1$  не регистрируется. Увеличение степени сшивания приводит к возрастанию времен релаксации (табл. 1) и размера кинетических единиц (табл. 2), уменьшению доли исходного напряжения, расходуемого в процессах физической релаксации (табл. 3), и изменению величин относительных вкладов  $i$ -го процесса (табл. 4). Повышение температуры, помимо уменьшения величин  $\tau_i$ , приводит к уменьшению физической релаксации, причем этот эффект более значителен при высокой степени сшивания вулканизатов. По-видимому, как это показано в [9, 10] для других эластомеров, медленные стадии физической релаксации в СКН-18 обусловлены подвижностью связанных сегментов, входящих в микроблоки различных

Таблица 1

Времена релаксации  $\tau_i$  (сек.) вулканизатов СКН-18 и СКЭП при  $50^\circ$

| Шифр образца | $N_{\text{ц}}, \text{o}^{-1} \cdot 10^{10}, \text{цепей}/\text{см}^3$ | $\tau_1$ | $\tau_2 \cdot 10^{-2}$ | $\tau_3 \cdot 10^{-3}$ | $\tau_4 \cdot 10^{-4}$ | $\tau_5$ |
|--------------|---|----------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| А            | 1,6   | 3        | 0,4                    | 0,4                    | 2                      | —        |
| Б            | 7,0   | 8        | 0,5                    | 1,1                    | 7                      | —        |
| В            | 6,5   | 17       | 1,2                    | 0,5                    | 9                      | 3        |
| Г            | 21,5  | 90       | 7,3                    | 15,7                   | 140                    | 12       |
| Д            | 6,0   | 9        | 2,7                    | 2,1                    | 11                     | —        |
| Е            | 20,0  | 60       | 6,2                    | 12,1                   | 98                     | —        |
| Ж            | 4,1   | 3        | 1,0                    | 2,1                    | 4                      | —        |
| З            | 4,2   | 60       | 4,2                    | 3,1                    | 170                    | 9        |
| И            | 4,1   | 160      | 6,7                    | 4,6                    | 250                    | 25       |
| К            | 4,0   | 14       | 1,3                    | 0,8                    | 70                     | 3        |

Таблица 2

Размеры кинетических единиц физической релаксации напряжения  
 $\alpha_i \cdot 10^{-3}$  Å вулканизатов СКН-18 и СКЭП

| Шифр образца | $N_{\Pi_i} \cdot 10^{19}$ ,<br>чепей/см <sup>3</sup> | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ | $\alpha_5$ |
|--------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| А            | 1,6  | 3,7        | 11         | 27         | 11         | —          |
| Б            | 7,0  | 5,9        | 12         | 40         | 18         | —          |
| В            | 6,5  | 8,0        | 17         | 28         | 20         | 0,17       |
| Г            | 21,5   | 6,0        | 35         | 120        | 61         | 0,18       |
| Д            | 6,0  | 5,9        | 24         | 54         | 22         | —          |
| Е            | 20,0   | 13,0       | 33         | 110        | 53         | —          |
| Ж            | 4,1  | 25,0       | 100        | 140        | —          | —          |
| З            | 4,2  | 80,0       | 180        | 400        | —          | 0,70       |
| И            | 4,1  | 120,0      | 220        | 500        | —          | 9,00       |
| К            | 4,0  | 50,0       | 120        | 230        | —          | 0,60       |

Таблица 3

Доля исходного напряжения  $E_1$ , расходуемая в процессах физической релаксации  $\Delta E_{\Phi}$  вулканизатов СКН-18 и СКЭП \*

| Шифр образца | Температура испытаний, °С |      |      | Шифр образца | Температура испытаний, °С |      |      |
|--------------|---------------------------|------|------|--------------|---------------------------|------|------|
|              | 21                        | 50   | 70   |              | 21                        | 50   | 70   |
| А            | 0,87                      | 0,82 | 0,63 | Е            | 0,43                      | 0,30 | 0,25 |
| Б            | 0,50                      | 0,39 | 0,27 | Ж            | 0,28                      | 0,25 | 0,10 |
| В            | 0,46                      | 0,33 | 0,19 | З            | 0,35                      | 0,29 | 0,24 |
| Г            | 0,56                      | 0,42 | 0,37 | И            | 0,33                      | 0,29 | 0,27 |
| Д            | 0,82                      | 0,74 | 0,71 | К            | 0,25                      | 0,18 | 0,12 |

\*  $\Delta E = (E - E_x)/E$ , где  $E_x$  — часть исходного напряжения, расходуемая в процессе химической релаксации ( $E = E_{\Phi} + E_x$ ).

Таблица 4

Средний относительный вклад  $i$ -го процесса физической релаксации в суммарную величину падения напряжения при физической релаксации вулканизатов СКН-18 и СКЭП \*

| Шифр образца | $E_{1\Phi}$ | $E_{2\Phi}$ | $E_{3\Phi}$ | $E_{4\Phi}$ | $E_{5\Phi}$ | Шифр образца | $E_{1\Phi}$ | $E_{2\Phi}$ | $E_{3\Phi}$ | $E_{4\Phi}$ | $E_{5\Phi}$ |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| А            | 0,50        | 0,20        | 0,18        | 0,11        | —           | Е            | 0,37        | 0,28        | 0,20        | 0,15        | —           |
| Б            | 0,38        | 0,26        | 0,18        | 0,18        | —           | Ж            | 0,65        | 0,21        | 0,14        | —           | —           |
| В            | 0,24        | 0,10        | 0,24        | 0,15        | 0,27        | З            | 0,30        | 0,21        | 0,13        | —           | 0,36        |
| Г            | 0,26        | 0,18        | 0,13        | 0,11        | 0,32        | И            | 0,29        | 0,21        | 0,13        | —           | 0,37        |
| Д            | 0,55        | 0,49        | 0,16        | 0,10        | —           | К            | 0,30        | 0,17        | 0,19        | —           | 0,34        |

\*  $\Delta E_{i\Phi} = E_i/(E - E_x)$ , где  $E_i$  и  $E_x$  — части исходного напряжения, расходуемые в  $i$ -м процессе физической и химической релаксации соответственно.

размеров; при этом четвертый процесс, не наблюдаемый в [9, 10], можно связать с подвижностью полярных звеньев акрилонитрила в сополимере [13, 14]. Результаты измерений химической релаксации напряжения указывают на то, что этот процесс связан с распадом ковалентных связей в пространственной сетке вулканизатов.

Вулканизаты СКН-18, спитые в присутствии ТАИЦ (образец В), характеризуются пятью релаксационными процессами. Энергия активации первых четырех процессов не изменяется по сравнению с образцами А и

Б, а энергия активации пятого, наиболее быстрого процесса, не наблюдаемого в вулканизатах без добавок, составляет  $13 \pm 1$  ккал/моль. При одинаковой степени сшивания величины  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_4$  несколько возрастают, а величина  $\tau_3$  уменьшается в присутствии ТАИЦ (табл. 1); при этом размеры кинетических единиц  $\alpha_2 - \alpha_4$ , участвующих в этих процессах (табл. 2), и доля исходного напряжения, расходуемая в ходе физической релаксации, мало зависят от содержания ТАИЦ в вулканизатах.

С помощью ИК-спектроскопии установлено, что в образце В практически все двойные связи в аллильной группе израсходованы, в спиртовом и толуольном экстрактах ТАИЦ не обнаруживается. В то же время не наблюдается ускорения радиационного сшивания СКН-18 в присутствии 10 вес.% ТАИЦ. Электронно-микроскопическим методом реплик в этом образце обнаружены образования размером до 250 Å, отсутствующие в образце без ТАИЦ. Эти данные свидетельствуют о том, что происходит полимеризация ТАИЦ в матрице каучука. По-видимому, наряду с встраиванием отдельных молекул ТАИЦ в пространственную сетку вулканизата образуется некоторое количество привитого гомополимера. Действительно, увеличение значений  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_4$  в образце В при сохранении значений  $\alpha_i$  и  $U_i$  указывает на некоторое изменение характера пространственной сетки вулканизата в пределах микроблоков. Влияние узлов сетки, содержащих ТАИЦ, на процессы молекулярной подвижности возрастает с увеличением скорости этих процессов. В то же время появление пятого процесса релаксации может быть связано с образованием в вулканизате нового типа микроблоков. Приведенные в табл. 2 их размеры (170 Å) согласуются со значениями, полученными методом электронной микроскопии. Поскольку полимер ТАИЦ является стеклообразным, его влияние на молекулярную подвижность каучуковой части ограничено поверхностью отверженных частиц, и соответствующий процесс релаксации напряжения  $\tau_5$  является наиболее быстрым. Следует отметить, что относительный вклад этого процесса в общую физическую релаксацию напряжения эластомеров составляет 27%.

Сшивание каучука СКН-18 в присутствии ТМГФ-11 ускоряется в несколько раз; в образцах Г отсутствуют двойные связи в ТМГФ-11. Методом электронной микроскопии показано наличие образований размером до 250 Å, не наблюдавшихся в образцах А и Б. Ранее отмечалось [1, 2, 6], что при вулканизации происходит трехмерная привитая полимеризация ТМГФ-11 в матрице каучуков. Однако вопрос о распределении размеров отверженных структур ТМГФ-11 в вулканизатах оставался неясным. Для вулканизатов СКН-18, содержащих ТМГФ-11, проявлялось пять элементарных процессов релаксации напряжения. Наиболее интересен пятый процесс, характеризующийся энергией активации  $14 \pm 2$  ккал/моль, который не наблюдается в образцах без ТМГФ-11. Этот наиболее быстрый процесс, относительный вклад которого в общую физическую релаксацию вулканизата составляет 33%, нами связывается с релаксацией молекул каучука на поверхности отверженных агрегатов ТМГФ-11. Размер кинетической единицы  $\alpha_5$ , рассчитанный из данных по релаксации напряжения, составляет 180 Å, что согласуется с результатами электронно-микроскопических исследований. Первые четыре процесса характеризуются теми же значениями энергии активации и вклада физической релаксации напряжения, что и вулканизаты без ТМГФ-11. При увеличении плотности пространственной сетки в 3 раза (образцы В и Г) размеры кинетических единиц  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и  $\alpha_4$  возрастают также в 3 раза, значения  $\alpha_1$  не изменились; величины  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  возрастают в  $10 \pm 20$  раз. Постоянство энергии активации указывает на независимость размеров связанных сегментов от содержания ТМГФ-11. Увеличение времен происходит за счет возрастания размеров микроблоков, участвующих в процессе релаксации. Однаковое увеличение плотности пространственной сетки и размеров кинетических единиц в случае всех четырех процессов позволяет предположить, что

укрупнение микроблоков происходит за счет гомогенного спшивания каучука молекулами ТМГФ-11, а отверженные агрегаты олигоэфиракрилатов в пределах этих микроблоков отсутствуют.

Вулканизация СКН-18 в присутствии МФДМ значительно ускоряется. Методом ИК-спектроскопии установлено отсутствие двойных связей МФДМ в образце Е; электронно-микроскопические фотографии образцов А, Б, Д и Е одинаковы. В вулканизатах, содержащих МФДМ, наблюдается четыре релаксационных процесса, энергии активации которых не зависят от содержания МФДМ. Размеры кинетических единиц релаксационных процессов при одинаковой плотности сетки вулканизаторов в большинстве случаев мало зависят от содержания МФДМ, а при увеличении степени спшивания значения  $\alpha$ , возрастают пропорционально плотности пространственной сетки.

Вулканизаты, в которых весь МФДМ израсходован в процессе радиационного спшивания (образец Е), характеризуются резким увеличением времени релаксации по сравнению с недовулканизованными образцами (Д) или вулканизатами без МФДМ (Б). Совокупность рассмотренных данных позволяет утверждать, что в вулканизатах СКН-18 отсутствует гомополимер МФДМ. Эти данные подтверждают предположение об участии в каждом узле сетки радиационных вулканизаторов ненасыщенных каучуков только одной молекулы МФДМ [5].

**Молекулярная релаксация в СКЭП.** В спитом этиленпропиленовом каучуке без ПФНС проявляется четыре процесса релаксации (рисунок, в, табл. 1). Энергия активации первых трех процессов составляет  $5 \pm 0,6$  ккал/моль, а для четвертого процесса  $-10 \pm 1$  ккал/моль, т. е. она значительно меньше, чем было получено для СКН-18. Результаты исследования химической релаксации напряжения указывают на то, что четвертый процесс релаксации напряжения обусловлен термоокислительным распадом пространственной сетки вулканизата. Энергии активации этих процессов практически совпадают, а несколько меньшее значение величины  $\tau_4$  по сравнению со значением времени релаксации быстрого процесса термоокислительной деструкции можно отнести за счет меньшей толщины образца, что облегчает диффузию воздуха в образец. Размеры кинетических единиц, участвующих в релаксационных процессах СКЭП, на порядок выше, чем получено для СКН-18 (табл. 2). Доля исходного напряжения, расходуемая в процессах физической релаксации спитого СКЭП при 20–50°, значительно ниже, чем в СКН-18.

Для вулканизатов, спитых в присутствии ПФНС, наблюдали пять процессов релаксации напряжения. Четвертый процесс, как и в отсутствие ПФНС, связан с термоокислительной деструкцией пространственной сетки вулканизаторов. Энергии активации первых трех процессов не зависят от наличия ПФНС, а энергия активации пятого процесса определяется типом ПФНС, составляя для МФДМ  $12 \pm 1$ , для ТМГФ-11– $8 \pm 1$  и для ТАИЦ-11– $\pm 1$  ккал/моль. Относительный вклад наиболее быстрого пятого процесса в суммарную величину физической релаксации напряжения составляет  $<30\%$  (табл. 4). Поскольку времена  $\tau_1$  при повышении температуры измерений становятся значительно меньше времени наблюдения, этот процесс не удается наблюдать для образцов без добавок и с ТАИЦ при 70 и 90°, а в образце с ТМГФ-11 – при 90°.

С помощью ИК-спектроскопии установлено, что в образцах израсходованы все двойные связи ПФНС, в экстрактах этих образцов отсутствует ПФНС, спшивание СКЭП ускоряется в присутствии ПФНС. Электронно-микроскопически в вулканизатах СКЭП наблюдаются образования МФДМ (до 2000 Å), ТАИЦ (до 700 Å), ТМГФ-11 (до 9000 Å). Рассчитанные размеры кинетических единиц, участвующих в пятом процессе релаксации напряжения, составляют для ТМГФ-11 9000 Å, для МФДМ – 700 Å, а для ТАИЦ – 600 Å (табл. 2).

Анализ экспериментальных данных позволяет предположить, что

ПФНС встраивается в пространственную сетку вулканизата как в виде отдельных молекул или их небольших агломератов, так и в виде крупных отверженных блоков. По-видимому, наиболее крупные образования полимера ПФНС обусловливают самый быстрый пятый процесс релаксации, связанный с молекулами каучука, расположеными на поверхности этих образований. Поскольку процессы с временами релаксации  $\tau_1 - \tau_5$  проявляются независимо от наличия ПФНС, есть основание считать, что они связаны не с отдельными образованиями ПФНС, а с микроблоками каучука, внутри которых содержатся ПФНС. Очевидно, размеры этих узлов наибольшие в микроблоках, обусловливающих первый процесс релаксации напряжения. При одинаковой степени сшивания величины  $\alpha_i$  в присутствии ПФНС наиболее резко возрастают. Узлы пространственной сетки в микроблоках, определяющих остальные процессы релаксации, должны содержать минимальное число молекул ПФНС, так как соответствующие величины  $\alpha_i$  мало зависят от присутствия ПФНС.

Московский государственный  
педагогический институт  
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
24 IX 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Кузьминский, А. А. Берлин, С. Н. Аркина, Сб. Успехи химии и физики полимеров, «Химия», 1973, стр. 239.
2. Ф. А. Махлис, Л. Я. Никитин, А. С. Кузьминский, Высокомолек. соед., A17, 170, 1975.
3. Ф. А. Махлис, Л. Я. Никитин, Н. И. Пак, Т. С. Бобровская, Химия высоких энергий, 8, 456, 1974.
4. S. M. Miller, R. Roberts, R. L. Vale, J. Polymer Sci., 58, 737, 1962.
5. Т. С. Федосеева, С. В. Тихонова, З. А. Камзолова, А. С. Кузьминский, Каучук и резина, 1973, № 6, 23.
6. Ф. А. Махлис, Радиационная физика и химия полимеров, Атомиздат, 1972, стр. 139, 185.
7. F. Schwarzl, A. Stawerman, Physica, 18, 791, 1952.
8. Дж. Ферри, Вязкоупругие свойства полимеров, Изд-во иностр. лит., 1963, стр. 83.
9. Г. М. Бартенев, Н. М. Лялина, Докл. АН СССР, 201, 1130, 1971.
10. Сб. Релаксационные явления в полимерах, под ред. Г. М. Бартенева, Ю. В. Зеленева, «Химия», 1972, стр. 249.
11. А. Тобольский, Структура и свойства полимеров, «Химия», 1964, стр. 185.
12. Г. М. Бартенев, Н. В. Ермилова, Сб. Физико-химическая механика дисперсных структур, «Наука», 1966, стр. 378.
13. Г. М. Бартенев, Ю. В. Зеленев, Механика полимеров, 1975, 107.
14. Ch. K. Kardanow, R. B. Tohakacjow, Yu. W. Selenev, Plaste und Kautschuk, 20, 613, 1973.