

**МЕТОД РАВНОВЕСНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
СШИТЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ В РАВНОВЕСНЫХ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЯХ**

СОКОЛОВСКИЙ А.А.¹, КРУПКИН Е.А.²

¹ООО «Маяк-РТИ», 141703, Московская обл., г. Долгопрудный, Россия

²ИП Покатило В.В., 141703, Московская обл., г. Долгопрудный, Россия

Приведены теоретические и экспериментальные результаты, на основе которых заключено, что структура сшитых эластомеров представляет собой по термодинамическим причинам наборы клубков-глобул, состоящих из отрезков цепей одинаковых длин. Деформирование такой системы протекает неаффинно путём последовательного разрушения структурных элементов, обладающих всё более высокими модулями упругости, определяемыми растущими молекулярными массами цепей, составляющих структурные элементы. Рассматриваемый метод равновесного термомеханического анализа (РТМА) применительно для сшитых эластомеров подтверждает существование приведённых структур и позволяет количественно в зависимости от состава (рецептуры) эластомеров и их напряжённо-деформированных равновесных состояний определять ряд физико-химических и эксплуатационных свойств, не определяемых другими методами.

Ключевые слова: структурный элемент, клубки-глобулы, равновесные напряжённо-деформированные состояния, механические модели полимеров, термодинамическая совместимость.

Для цитирования: Соколовский А.А., Крупкин Е.А. Теоретические основы и возможности метода «равновесного термомеханического анализа» для количественной оценки структуры и свойств сшитых эластомеров в равновесных напряжённо-деформированных состояниях // Промышленное производство и использование эластомеров, 2025, № 1, С. 22-29. DOI: 10.24412/2071-8268-2025-1-22-29.

Поступила в редакцию 15.12.24.

Принята в печать 24.03.25.

**THEORETICAL FOUNDATIONS AND CAPABILITIES OF THE EQUILIBRIUM
THERMOMECHANICAL ANALYSIS METHOD FOR QUANTITATIVE
ASSESSMENT OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CROSS-LINKED
ELASTOMERS**

SOKOLOVSKII ALEKSANDR Al.¹, KRUPKIN EGOR A.²

¹LLC «Mayak-RTI», 141703, Moscow region, Dolgoprudny, Russia

²Sole proprietor Pokatilo V.V., 141703, Moscow region, Dolgoprudny, Russia

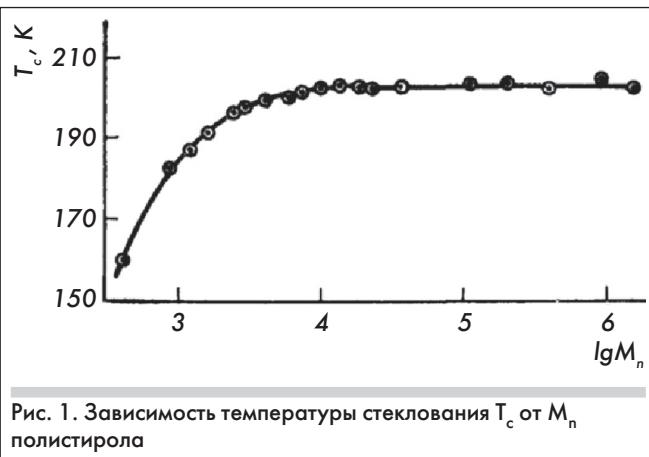
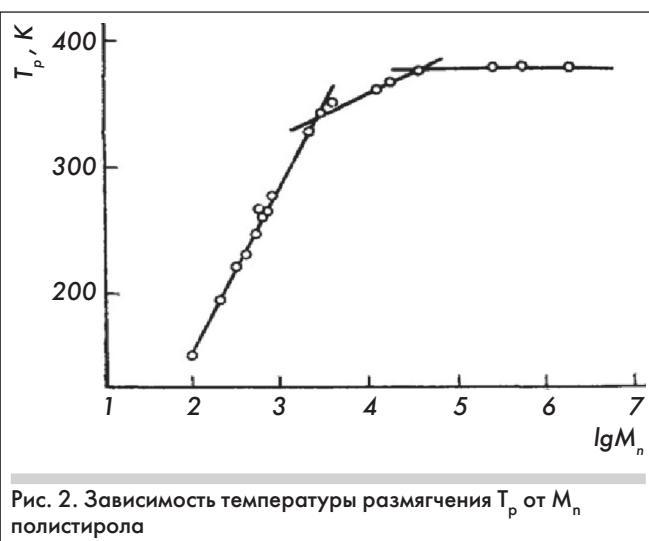
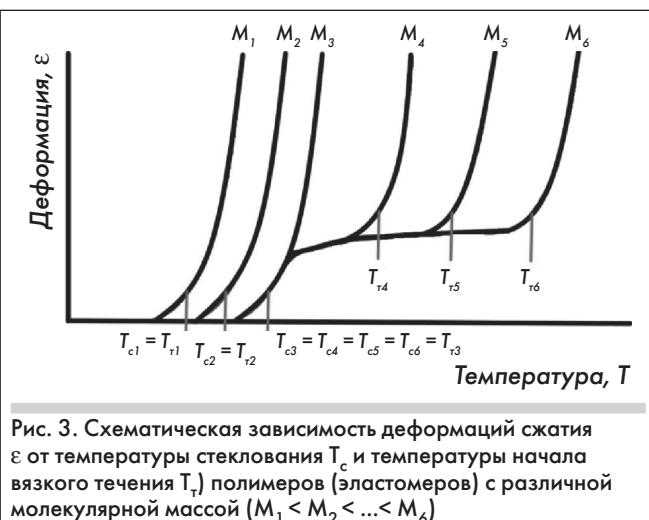
Abstract. Theoretical and experimental results are presented, on the basis of which it is concluded that the structure of cross-linked elastomers is, for thermodynamic reasons, sets of tangles-globules consisting of chain segments of the same lengths. The deformation of such a system proceeds unaffinely by successive destruction of structural elements with increasingly high elastic modules determined by the growing molecular weights of the chains that make up the structural elements. The above method of «Equilibrium Thermomechanical Analysis» (ETMA) for cross-linked elastomers confirms the existence of the above structures and allows quantifying a number of physicochemical and operational properties that are not determined by other methods depending on the compositions (formulations) of elastomers and their stress-strain equilibrium states.

Key words: structural element, tangles-globules, equilibrium stress-strain states, mechanical models of polymers, thermodynamic compatibility.

For citation: Sokolovskii A.A., Krupkin E.A. Theoretical foundations and capabilities of the equilibrium thermomechanical analysis method for quantitative assessment of the structure and properties of cross-linked elastomers. *Prom. Proizvod. Ispol'z. Elastomerov*, 2025, no. 1, pp. 22-29. DOI: 10.24412/2071-8268-2025-1-22-29. (In Russ.).

Термомеханический анализ возник как метод исследования состояний полимеров посредством наблюдения их деформации при силовом и тепловом воздействии.

Методом термомеханического анализа, предложенным академиком В.А. Каргиным и Т.И. Соголовой, найдено, что температуры стеклования T_c и начала вязкого течения полизопрена и

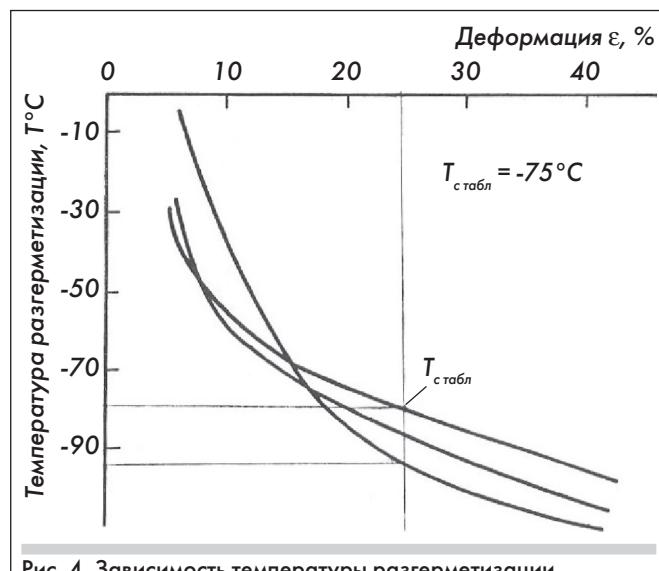
Рис. 1. Зависимость температуры стеклования T_c от M_n полистиролаРис. 2. Зависимость температуры размягчения T_p от M_n полистиролаРис. 3. Схематическая зависимость деформаций сжатия ε от температуры стеклования T_c и температуры начала вязкого течения T_r полимеров (эластомеров) с различной молекулярной массой ($M_1 < M_2 < \dots < M_6$)

полистирола растут с ростом их молекулярных масс M_n (рис. 1-3) [1, 2].

Значения температур стеклования и начала вязкого течения T_r полимеров определяют температурный интервал работоспособности полимерных изделий.

В [3] приведено, что для уплотнителей на основе бутадиен-стирольного спицового эластомера дилатометрическое значение $T_c = 198^\circ\text{K}$. При росте степеней их сжатия с 5 до 40% и соответствующих напряжений значения температуры

разгерметизации уплотнителей T_p , равной T_c [4], снижаются с 268 до $173-178^\circ\text{K}$ (рис. 4). На основе этих результатов можно полагать, что рост напряжений, прилагаемых к гибкоцепным спицовым эластомерам, имеющим широкие (и неизвестные) молекулярно-массовые распределения, сопровождается деформациями всё более коротких отрезков цепей между химическими узлами.

Рис. 4. Зависимость температуры разгерметизации уплотнителей на основе бутадиен-стирольного каучука $T_p = T_c$ от степени деформации сжатия ε , % [3]

Неприменимость к полимерам обычных уравнений упругости и вязкости привели к разработкам механических моделей полимеров. Множество моделей, начиная с моделей Максвелла, Кельвина-Фойгта и кончая моделями Образцова-Френкеля, Догадкина-Бартенева-Резниковского, Каргина-Слонимского, подробно рассмотрены в [1, 2]. Эти модели основаны на различных видах соединений элементов, состоящих из пружин с различными модулями упругости — $E_1 < E_2 < E_3 < \dots < E_n$ (закон Гука) и соответствующих им вязких элементов — $\eta_1 < \eta_2 < \eta_3 < \dots < \eta_n$ (закон Ньютона). Последовательное-параллельное соединение этих элементов может описывать механизм релаксационных процессов эластомеров (полимеров) (рис. 5) [2, 5]. На этих основаниях результаты релаксационной спектрометрии [2, 5] позволили полагать, что спицовые эластомеры состоят из неких структурных элементов надмолекулярного характера (НМО) с различными кинетическими характеристиками их разрушения во времени при $T = \text{const}$. Можно полагать, что значения E и η определяются длинами, суммами цепей и числами и энергиями физических связей между ними. Перечисленные характеристики структурных элементов неизвестны.

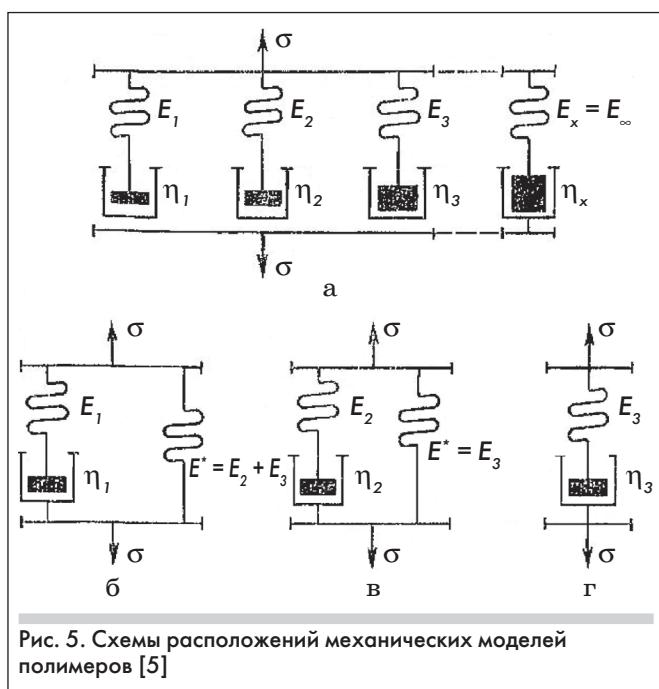


Рис. 5. Схемы расположений механических моделей полимеров [5]

В работе [6] показано, что «в блоке эластомера конформация каждой субцепи в сухом состоянии является сильно сжатой (глобулярной). В результате упругие свойства таких сеток, состоящих из взаимно сегрегированных глобул, оказываются совершенно специфическими». В работе [7] приведено, что одной из причин возникновения НМО является термодинамическая несовместимость полимергомологов, отличающихся по молекулярным массам. В работе [2] отмечено, что в процессе синтеза полимеров образование клубков начинается с длин цепей, содержащих примерно 13 мономерных звеньев. Можно полагать, что при синтезе гибкоцепных эластомеров это число может быть меньше.

Термодинамическая несовместимость цепей разных длин или клубков-глобул, образованных цепями разных длин, подтверждается термодинамическим законом, согласно которому самопроизвольные химические и физические процессы при постоянных внешних условиях протекают только тогда, когда суммы свободных энергий образования исходных продуктов больше свободных энергий образования конечных продуктов или равны [8].

На этих основаниях можно полагать, что структурные образования эластомеров представляют собой ассоциаты взаимопроникающих клубков-глобул, состоящих из цепей одинаковых длин. Согласно [9-14] эти структурные образования в эластомерах непроницаемы для пластификаторов, растворимых вулканизующих агентов, ускорителей вулканизации. Отсюда следует, что химическое сшивание эластомеров приведённой структуры происходит по периферии структурных элементов.

Полагаем что, количество клубков-глобул в структурных элементах и степени их взаимопроникновения должны быть ограничены тем, что в значения свободных энергий их образования входят величины внутренних энергий, зависящие от чисел взаимодействующих клубков и от степеней взаимопроникновения клубков.

В работах [15, 16] обоснованы представления о термодинамически равновесных состояниях полимерных (эластомерных) структур при постоянных внешних условиях. При изменениях внешних условий эти структуры переходят в течение определённого времени в новые термодинамически равновесные состояния.

С целью изучения этих переходов под действием изменений деформаций-напряжений и температур необходимо на базе имеющихся теоретических представлений описать возможные экспериментальные результаты и возможность использования их для описания структуры спищих эластомеров и влияния структуры на их свойства.

Согласно статистической теории высокоэластичности растянутая на величину h нагрузкой f изолированная свободно-сочленённая цепь, имеющая контурную длину $h_{\text{конт}} > h$, удлиняется пропорционально температурной зависимости её конформационной подвижности при охлаждении, стремясь к $h_{\text{конт}}$, а при нагревании сокращается, стремясь, очевидно, к образованию клубка:

$$h = (h_{\text{конт}} \cdot f \cdot l) / (3 \cdot k \cdot T), \quad (1)$$

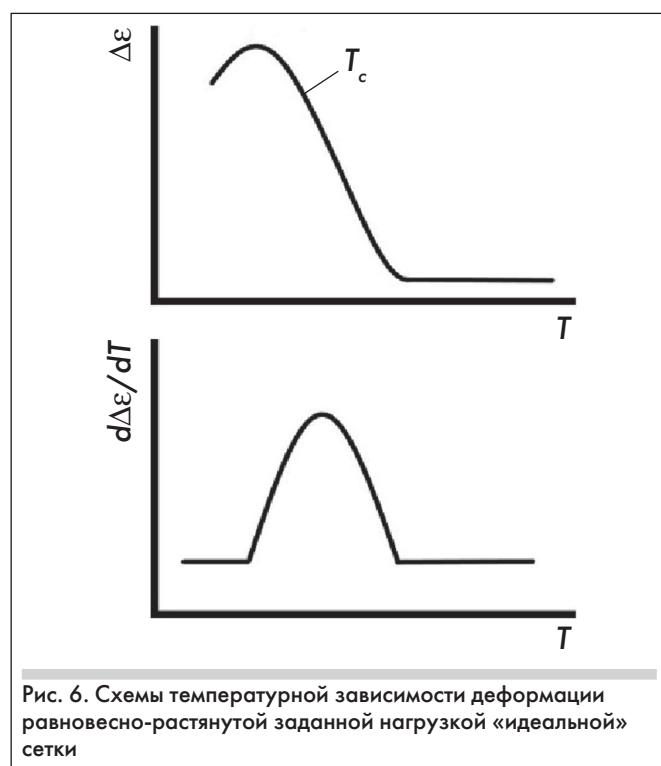
где l — длина сегмента, k — константа Больцмана.

Приведённая в уравнении (1) зависимость представляет собой гиперболу. Рост или уменьшение h , $h_{\text{конт}}$ и f приводит к сдвигу зависимости $h = f(T)$ в области более высоких или более низких температур. Эти результаты указывают на то, что температурные зависимости конформационной подвижности полимерных цепей зависят от их длин и прилагаемых к ним напряжений и, следовательно, равновесных деформаций.

Представим себе идеальный спищий эластомер, в котором все отрезки цепей между химическими узлами имеют одинаковую контурную длину — молекулярная масса отрезков цепей $M_c = \text{const}$. В ненапряжённом состоянии такой эластомер состоит из одинаковых структурных образований, имеющих одинаковые модули упругости E и вязкостные свойства η , определяемые одинаковыми количествами физических связей. Для растяжения такого эластомера при, например, $T = 293^\circ\text{K}$ до некоторой деформации ε_p потребуется нагрузка $\sigma_p > \Sigma E$, при которой за

некоторое время произойдёт разрушение структурных элементов и перестроение физических связей, изменится конформационная подвижность растянутых цепей эластомера. Новое термодинамически равновесное состояние будет достигнуто, когда конформационная подвижность растянутых цепей и числа перестроившихся межмолекулярных связей уравновесятся приложенной нагрузкой σ_p . При этом эластомер достигает при $T = 293^\circ\text{K}$ равновесной деформации ε_p .

Охлаждение равновесно растянутого эластомера будет сопровождаться его удлинением из-за уменьшения конформационной подвижности цепей, осложнённым кинетикой образования дополнительных физических связей, вплоть до перехода растянутых цепей в застеклованное состояние при T_c . При $T < T_c$ будет наблюдаться линейное уменьшение объёма эластомера. При нагреве от $T < T_c$ до T_c будет наблюдаться обратный процесс — линейный рост объёма эластомера. При $T > T_c$ начинается сокращение его длины из-за роста конформационной подвижности растянутых цепей, осложнённое кинетикой распада физических связей. При сокращении цепи в пределе стремится к образованию клубков без физических связей. Для представленной модели эластомера температурные зависимости $\varepsilon_p = f(T)$ и $d\varepsilon_p/dT = f(T)$ будут иметь вид, который приведён на рис. 6.



Реальные сшитые эластомеры обладают широкими и неизвестными молекулярно-массовыми распределениями ММР и, следовательно,

обладают наборами размеров и чисел структурных элементов. В результате можно полагать, что для них зависимости $\varepsilon_p = f(T)$ будут иметь ступенчатый характер, а зависимости $d\varepsilon_p/dT = f(T)$ будут представлять собой наборы пиков, температуры появления которых будут пропорциональны молекулярным массам цепей, составлявших разрушенные структурные элементы. Для проверки приведённых предположений использован метод равновесного термомеханического анализа (РТМА) для эластомеров [17-23]. Схема установки РТМА приведена на рис. 7, на котором показано, что образец спицового эластомера, достигший при $T = 293^\circ\text{K}$ равновесной деформации ε_p под действием груза P (σ , $\text{гс}/\text{см}^2$), помещается в установку РТМА. Среды в установке могут быть различные: вакуум не менее 10^{-3} мм Hg^* , воздух, N_2 , CO , CO_2 , H_2 и другие газы, любая паровая среда**. Заливая в «рубашку» установки жидкый азот N_2liq , можно охладить образец эластомера до $\approx 115^\circ\text{K}$, а затем нагреть его до $500\text{--}600^\circ\text{K}$. Охлаждение и нагрев образца эластомера необходимо проводить с постоянной скоростью, которая определяется размером сечения образца — необходимо, чтобы изменения температуры по всему объёму образца были равномерны и не превышали 3-4 град/мин при сечении образцов от 1×1 мм до 1×2 мм.

При изменениях температуры с интервалом от 1 до 5 градусов (макс) с помощью катетометра КМ-6*** с точностью $\pm 0,005$ мм определяется температурная зависимость изменений длины равновесно-растянутого образца эластомера $\varepsilon_p = f(T)$. Длина равновесно-растянутого при 293°K образца эластомера 90-110 мм.

Основным свойством метода РТМА является то, что при нагреве и охлаждении при любых значениях ε_p - σ_p при 293°K в температурных диапазонах от T_c до $T_t(T_d)$ (где T_t — температура начала вязкого течения, T_d — температура в пределе начала деструкции), зависимости $\varepsilon_p = f(T)$ и $d\varepsilon_p/dT = f(T)$ обратимы. При любых значениях $T = \text{const}$ внутри диапазона от T_c до T_t значения $\varepsilon_p = \text{const}$ в течение не менее 24 час. Таким образом, равновесность структуры сшитых эластомеров при приведённых выше условиях экспериментов сохраняется.

В результате использования метода РТМА для всех типов эластомеров и эластомерных материалов (рис. 8) установлено:

*Основная масса экспериментов (не менее нескольких сотен) проведена авторами с сотрудниками в вакууме.

**В случае паровой среды равновесное состояние образца эластомера должно быть достигнуто в этой среде.

***Любая автоматизированная система измерений $\varepsilon_p = f(T)$ с той же или более высокой точностью будет предпочтительной.

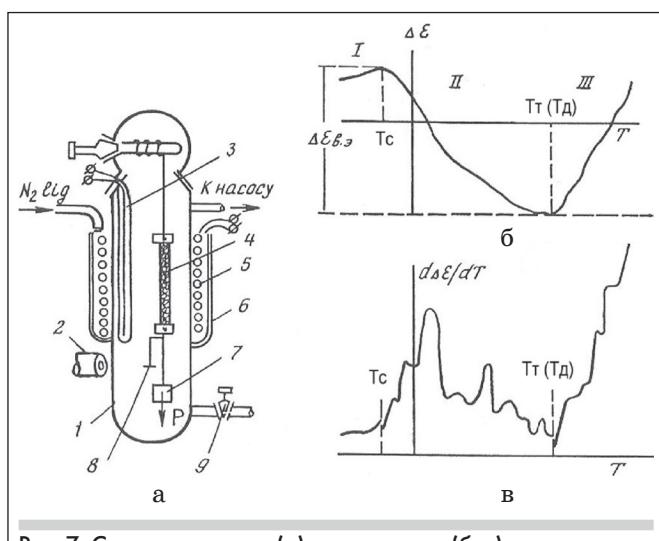


Рис. 7. Схема установки (а) и результаты (б, в), получаемые методом РТМА:

1 — стеклянная ампула; 2 — катетометр типа КМ-6; 3 — термопара; 4 — образец резины; 5 — рубашка для охлаждения и нагрева; 6 — теплоизоляция; 7 — груз Р; 8 — метка; 9 — подача жидкой или газообразной среды;
(б) температурная зависимость деформации равновесно-растянутой резины в интегральной и (в) — дифференциальной форме

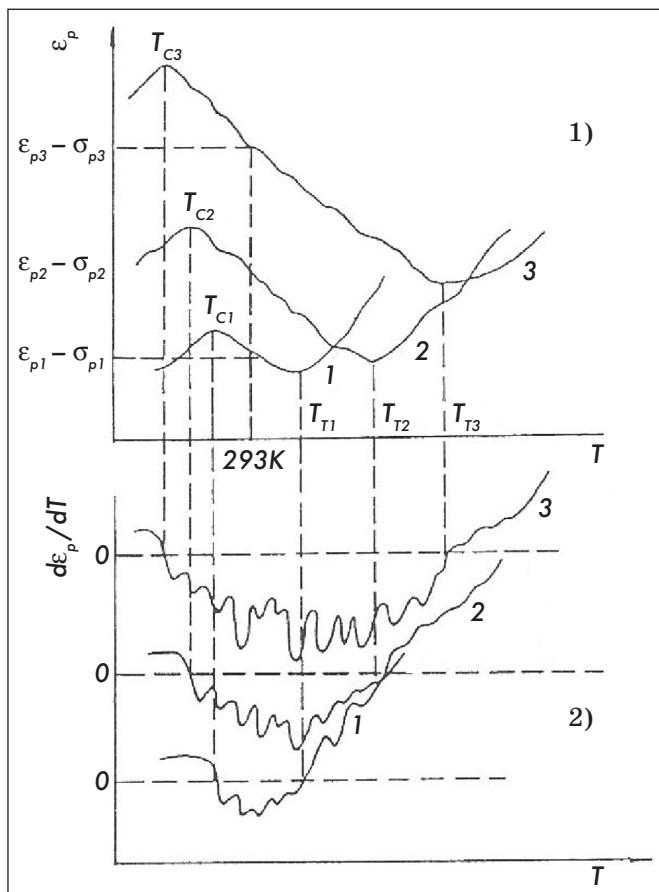


Рис. 8. Кривые РТМА эластомеров при различных нагрузках:
1) в интегральной и 2) дифференциальной формах

- зависимости $\varepsilon_p = f(T)$ негладкие — ступенчатые; в соответствии с этим зависимости $d\Delta\varepsilon_p/dT = f(T)$ представляют собой ряды частично налагающихся пиков;

- с ростом $\varepsilon_p - \sigma_p$ при 293°K числа ступеней и, соответственно, пиков растут с 1-2 до 10-20 и бо-

лее в зависимости от состава (рецептуры) эластомерных материалов;

- одновременно, но неравномерно растут интенсивности I пиков, характеризующих доли разрушенных структурных элементов;

- значения T_c изменяются экстремально — с минимумом; максимальные понижения значений T_c наблюдаются от 5-10° до нескольких десятков градусов в зависимости от типов эластомеров и их составов;

- значения T_t повышаются с $T_t = T_c + 5-10$ до $T_t = T_d$.

На основании равновесности зависимостей $\varepsilon_p = f(T)$ и $d\Delta\varepsilon_p/dT = f(T)$, полученных методом РТМА, в работе [20] показано, что процессы перехода из застеклованного равновесно-растянутого состояния спицых эластомеров в высокоэластическое и из высокоэластического в вязкотекучее (в пределе начала деструкции) представляют собой термодинамические переходы 2-го рода. Отсюда следует, что все переходы сумм равновесно-растянутых цепей одинаковых длин в клубки при нагреве также представляют собой термодинамические переходы 2-го рода из застеклованных равновесно-растянутых в равновесные высокоэластические состояния. Таким образом, в спицом эластомере существует ряд температур стеклования. Самое низкое значение T_c определяется стеклованием сумм самых «коротких» растянутых цепей. В результате спицый эластомер, имеющий широкое ММР отрезков цепей между химическими узлами, представляет собой систему структурных элементов. Каждый из них состоит из сумм отрезков цепей одинаковых длин, определяющих значение T_c , модуль упругости E и вязкостную характеристику η . Распределение напряжений и степеней деформаций сумм цепей одинаковых длин определяется соотношениями чисел различных структурных элементов в эластомере, а деформирование эластомеров происходит неаффинно.

Упомянутое в данной работе влияние физических связей на кинетику высокоэластического сокращения растянутых сумм цепей и их вязкого течения при нагреве требует оценки их энергий E_ϕ и чисел n_ϕ в этих процессах в зависимостях от длин цепей и величин $\varepsilon_p - \sigma_p$. В литературе приводятся лишь широкие диапазоны E_ϕ от 1 до 10 ккал/моль и более, зависящие от полярности мономерных звеньев. В работе [24] приведено, что энергия единичной физической связи $E_{\phi 1} = R \cdot T$, где T — температура, °К, при которой $E_{\phi 1} \rightarrow 0$. Пики на зависимостях $d\Delta\varepsilon_p/dT = f(T)$, получаемые методом РТМА, характеризуют скорости роста конформационной подвижности растянутых сумм цепей одинаковых длин,

на которые влияют скорости разрушения физических связей. Можно сказать, что при температуре пика, то есть при максимальной скорости высокоэластического сокращения, практически все физические связи разрушены. При этом температура пика равна или близка к температуре разрушения единичной физической связи — $E_{\phi 1}$. В результате диапазон энергий единичных физических связей в эластомерах E_{ϕ} колеблется от ≈ 310 кал/моль (при T_c , $\text{min} \approx 160^\circ\text{K}$ для СКИ) до ≈ 1200 кал/моль (при $T_d \approx 600^\circ\text{K}$ для СКФ-26).

Интегрирование индивидуальных зависимостей $d\Delta\epsilon_p/dT = f(T)^*$ дает возможность использования уравнения Аррениуса для расчёта суммарных энергий конформационной подвижности $E_{\text{аконф}}$ и предэкспоненциальных множителей A , характеризующих частоты колебаний сумм растянутых цепей разных длин в зависимостях от степеней их растяжения. Отношение $E_{\text{аконф}}/E_{\phi}$ может характеризовать число разрушающихся межмолекулярных физических связей пф в отдельных структурных элементах.

Таким образом, метод РТМА дает возможность определять свойства эластомеров и эластомерных материалов.

Понятие «высокоэластичность» — качественное и определяется растянутыми цепями эластомера. В связи с неаффинностью деформаций эластомеров степени высокоэластичности, определяемые методом РТМА, равны отношениям степеней суммарного сокращения равновесно-растянутых эластомеров $\Sigma(-\Delta\epsilon_p)$ в диапазонах $T_c-T_d(T_d)$ к величинам равновесных деформаций ϵ_p (при 293°K).

Определение молекулярно-массового распределения (ММР) равновесно-растянутых цепей эластомеров в зависимости от $\epsilon_p-\sigma_p$ при 293°K возможно при использовании уравнения Уолла-Трелоара:

$$M_c = 3RT(\rho/\sigma)[(\epsilon_p + 1)^2 - (1/(\epsilon_p + 1))], \quad (2)$$

где M_c — молекулярная масса отрезков цепей в атомных единицах массы; T — температура; ρ — плотность вулканизата; σ — истинное напряжение на растянутых отрезках цепей; ϵ_p — равновесная деформация растянутых отрезков цепей.

Расчёты с помощью (2) показали, что значения M_c при заданных значениях $\epsilon_p-\sigma_p$ при 293°K линейно растут с ростом T вплоть до T_d . При росте $\epsilon_p-\sigma_p$ при 293°K значения M_c также увеличиваются, что указывает на то, что значения M_c характеризуют не молекулярную массу рас-

*Их получение возможно в результате разделения частично налагающихся пиков $d\Delta\epsilon_p/dT = f(T)$ на индивидуальные с помощью компьютерной программы.

тянутых цепей, а зависят от расстояния между точками их закреплений или согласно [25] проекциями их длин. При росте $\epsilon_p-\sigma_p$ при 293°K рассчитанные значения M_c приближаются к контурным длинам цепей.

Изменения степеней высокоэластического сокращения $\Sigma(-\Delta\epsilon_p)$ и интенсивностей пиков на зависимостях $d\Delta\epsilon_p/dT = f(T)$ в результате введения в эластомер различных ингредиентов (типов и количеств сшивающих агентов, пластификаторов, наполнителей, технологических добавок и т.п.) позволяют определять изменения ММР сеток, суммарные сорбционные характеристики наполнителей и их сорбционные характеристики по отношению к цепям разных длин, взаимные влияния ингредиентов.

Метод позволяет определять эксплуатационные диапазоны $T_c-T_d(T_d)$ эластомеров в зависимости от напряжённо-деформированных состояний $\epsilon_p-\sigma_p$ эластомеров и влияния на них рецептурно-технологических факторов.

В заключение отметим, что РТМА применительно к спищим эластомерам позволяет количественно определять их физико-химические параметры в равновесных состояниях, зависящих от величин деформаций-напряжений:

- степени высокоэластичности;
- значения температур стеклования T_c , начала вязкого течения T_t и начала термодеструкции T_d и кинетические параметры этих процессов;
- энергии и количества межмолекулярных физических связей и энергии конформационной подвижности растянутых цепей;
- молекулярно-массовые распределения растянутых цепей.

Высокая чувствительность метода РТМА к изменениям напряжений-деформаций и изменениям составов (рецептур) эластомерных материалов позволяет использовать его для разработки материалов, обладающих существенно более высокой работоспособностью в изделиях с задаваемыми напряжённо-деформированными состояниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: Научный мир, 2009, 384 с.
2. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров, Л.: Химия, 1990, 432 с.
3. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф., Ухова Е.М., Кузьминский А.С. Старение резин в напряжённом состоянии. М.: ЦНИИТЭнефтехим, вып. 10, 1988, 85 с.
4. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. Под общ. ред. Голубева А.И., Кондакова Л.А. М.: Машиностроение, 1986, 464 с.
5. Бартенев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. М.: Химия, 1979, 288 с.
6. Колева М.К., Нечаев С.К., Хохлов А.Р. Масштабные соображения (теория скейлинга) в физике равновесного

набухания и упругих свойств полимерных сеток // Международная конференция по каучуку и резине, Москва, 4-8 сентября, 1984. Секция А «Физика и химия каучука и резины». Препринты 3.

7. Липатов Ю.С. Современные представления о структуре и свойствах наполненных вулканизатов // Международная конференция по каучуку и резине, Москва, 4-8 сентября, 1984. Секция А «Физика и химия каучука и резины». Препринты 2.

8. Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика. Новосибирск: Наука, 1966, 510 с.

9. Соколова Л.В. О некоторых особенностях механизма пластификации неполярных эластомеров // Каучук и резина, 1987, №2, С. 25-29.

10. Соколова Л.В., Чеснокова О.А., Шершнёв В.А. // Международная конференция по каучуку и резине, Москва, 4-8 сентября, 1984. Секция А «Физика и химия каучука и резины». Препринт А38.

11. Соколова Л.В. и др. // Каучук и резина, 1986, № 10, С. 8-11.

12. Соколова Л.В., Чеснокова О.А., Николаева О.А., Шершнёв В.А. // Высокомолекулярные соединения, 1985, сер. А, 27, №2, С. 892-897.

13. Соколова Л.В., Туторский И.А. // Каучук и резина, 1985, № 4, С. 16-19.

14. Соколова Л.В., Чеснокова О.А. // Высокомолекулярные соединения, 1987, сер. А, 29, № 1, С. 147-152.

15. Френкель С.Я., Ельяшевич Г.К. Термодинамика и морфология фазовых переходов в полимерах // Высокомолекулярные соединения, 1971, Т. XIII, № 2, С. 493-505.

16. Релаксационные явления в полимерах: Сборник статей. Под ред. Г.М. Бартенева, Ю.В. Зеленева. Л.: Химия, 1972, 376 с.

17. Френкель С.Я., Ельяшевич Г.К. Основы релаксационной термодинамики / Релаксационные явления в полимерах. Л.: Химия, 1972, С. 229-234.

18. Френкель С.Я., Ельяшевич Г.К. Термодинамическое описание взаимосвязи структуры и реологических свойств конденсированных полимерных систем / Релаксационные явления в полимерах. Л.: Химия, 1972, С. 234-240.

19. А.с. 1061048 СССР, 1983. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф., Донцов А.А. Способ термомеханического анализа.

20. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф., Донцов А.А., Пешехонова О.Б. Метод термомеханического анализа // Каучук и резина, 1987, № 8, С. 23-28.

21. Соколовский А.А., Губеладзе К.М., Вайнштейн Э.Ф., Кузьминский А.С. О взаимосвязи между молекулярной подвижностью и термоокислительной стойкостью резин в напряжённом состоянии // Высокомолекулярные соединения, Т. XXX, № 4, 1988, С. 244-248.

22. Вайнштейн Э.Ф., Соколовский А.А., Ухова Е.М., Бандурина В.А. Стеклование и ползучесть деформированных эластомеров как фазовые термодинамические переходы 2-го рода // Каучук и резина, 1994, № 4, С. 2-5.

23. Vainstein E.F., Sokolovskii A.A., Kuzminskii A.S. The Influence Stress on the Kinetics of Thermal and Thermal Oxidative Processes in Elastomers // Polymer Yearbook, 1992, № 9, pp. 79-100.

24. Vainstein E.F., Sokolovskii A.A. Thermodynamic Analysis of Cross-linked Polymer Thermoresistence // Polymer Yearbook, 1994, № 11, pp. 49-73.

25. Соколовский А.А. Структура и термомеханические свойства реальных эластомеров в состоянии условного равновесия // Каучук и резина, 2015, № 1, С. 26-29.

REFERENCES

1. Askadskiy A.A., Khokhlov A.R. *Vvedeniye v fiziko-khimiyu polimerov* [Introduction to the Physical Chemistry of Polymers]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2009, 384 p. (In Russ.).
2. Bartenev G.M., Frenkel' S.Ya. *Fizika polimerov* [Polymer Physics], Leningrad, Khimiya Publ., 1990, 432 p. (In Russ.).

3. Sokolovskiy A.A., Vaynshteyn E.F., Ukhova Ye.M., Kuz'minskiy A.S. *Starenije rezin v napryazhonnom sostoyanii* [Aging of Rubber in a Stressed State]. Moscow, TSNIITEneftekhim Publ., issue 10, 1988, 85 p. (In Russ.).

4. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika* [Seals and Sealing Technology]. Handbook. Ed. Golubev A.I., Kondakov L.A. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1986, 464 p. (In Russ.).

5. Bartenev G.M. *Struktura i relaksatsionnyye svoystva elastomerov* [Structure and relaxation properties of elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1979, 288 p. (In Russ.).

6. Koleva M.K., Nechayev S.K., Khokhlov A.R. *Masshtabnyye soobrazheniya (teoriya skeylinga) v fizike ravnovesnogo nabukhaniya i uprugikh svoystv polimernykh setok* [Scale considerations (scaling theory) in the physics of equilibrium swelling and elastic properties of polymer networks]. *International Conference of Rubber*, Moscow, September 4-8, 1984. Section A «Physics and Chemistry of Rubber». Preprints 3. (In Russ.).

7. Lipatov Yu.S. Sovremennyye predstavleniya o strukture i svoystvakh napolnennykh vulkanizatov [Modern concepts of the structure and properties of filled vulcanizates]. *International Conference of Rubber*, Moscow, September 4-8, 1984. Section A «Physics and Chemistry of Rubber». Preprints 2. (In Russ.).

8. Prigozhin I., Defey R. *Khimicheskaya termodinamika* [Chemical thermodynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1966, 510 p. (In Russ.).

9. Sokolova L.V. *O nekotorykh osobennostyakh mekhanizma plastifikatsii nepolyarnykh elastomerov* [On Some Features of the Plasticization Mechanism of Non-polar Elastomers]. *Kauchuk i rezina*, 1987, no. 2, pp. 25-29. (In Russ.).

10. Sokolova L.V., Chesnokova O.A., Shershnev V.A. *International Conference of Rubber*, Moscow, September 4-8, 1984. Section A «Physics and Chemistry of Rubber». A38. (In Russ.).

11. Sokolova L.V. et al. *Kauchuk i rezina*, 1986, no. 10, pp. 8-11. (In Russ.).

12. Sokolova L.V., Chesnokova O.A., Nikolayeva O.A., Shershnev V.A. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, 1985, ser. A, 27, no. 2, pp. 892-897. (In Russ.).

13. Sokolova L.V., Tutorskiy I.A. *Kauchuk i rezina*, 1985, no. 4, pp. 16-19. (In Russ.).

14. Sokolova L.V., Chesnokova O.A. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, 1987, ser. A, 29, no. 1, pp. 147-152. (In Russ.).

15. Frenkel' S.Ya., Yel'yashevich G.K. *Termodinamika i morfologiya fazovykh perekhodov v polimerakh* [Thermodynamics and morphology of phase transitions in polymers]. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, 1971, vol. XIII, no. 2, pp. 493-505. (In Russ.).

16. *Relaksatsionnyye yavleniya v polimerakh* [Relaxation phenomena in polymers]: Collection of articles. Ed. by G.M. Bartenev, Yu.V. Zelenev. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 376 p. (In Russ.).

17. Frenkel' S.Ya., Yel'yashevich G.K. *Osnovy relaksatsionnoy termodinamiki* [Fundamentals of Relaxation Thermodynamics] In *Relaksatsionnyye yavleniya v polimerakh* [Relaxation phenomena in polymers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, pp. 229-234. (In Russ.).

18. Frenkel' S.Ya., Yel'yashevich G.K. *Termodinamicheskoye opisaniye vzaimosvyazi struktury i reologicheskikh svoystv kondensirovannykh polimernykh sistem* [Thermodynamic Description of the Relationship between the Structure and Rheological Properties of Condensed Polymer Systems] In *Relaksatsionnyye yavleniya v polimerakh* [Relaxation phenomena in polymers]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, pp. 234-240. (In Russ.).

19. А.с. 1061048 СССР, 1983. Соколовский А.А., Вайнштейн Е.Ф., Донцов А.А. *Sposob termomekhanicheskogo analiza* [Thermomechanical Analysis Method].

20. Соколовский А.А., Вайнштейн Е.Ф., Донцов А.А., Пешехонова О.Б. *Metod termomekhanicheskogo analiza* [Method of thermomechanical analysis]. *Kauchuk i rezina*, 1987, no. 8, pp. 23-28. (In Russ.).

21. Sokolovskiy A.A., Gubeladze K.M., Vaynshteyn E.F., Kuz'minskiy A.S. O vzaimosvyazi mezhdu molekulyarnoy podvizhnost'yu i termookislitel'noy stoykost'yu rezin v napryazhonnom sostoyanii [On the relationship between molecular mobility and thermo-oxidative stability of rubbers in a stressed state]. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*, vol. XXX, no. 4, 1988, pp. 244-248. (In Russ.).
22. Vaynshteyn E.F., Sokolovskiy A.A., Ukhova Ye.M., Bandurina V.A. Steklovaniye i polzuchest' deformirovannykh elastomerov kak fazovyye termodynamicheskiye perekhody 2-go roda [Glass transition and creep of deformed elastomers as second-order thermodynamic phase transitions]. *Kauchuk i rezina*, 1994, no. 4, pp. 2-5. (In Russ.).
23. Vainstein E.F., Sokolovskii A.A., Kuzminskii A.S. The Influence Stress on the Kinetics of Thermal and Thermal Oxidative Processes in Elastomers. *Polymer Yearbook*, 1992, no. 9, pp. 79-100.
24. Vainstein E.F., Sokolovskii A.A. Thermodynamic Analysis of Cross-linked Polymer Thermoresistance. *Polymer Yearbook*, 1994, no. 11, pp. 49-73.
25. Sokolovskiy A.A. Struktura i termomekhanicheskiye svoystva real'nykh elastomerov v sostoyanii uslovnogo ravnovesiya [Structure and thermomechanical properties of real elastomers in a state of conditional equilibrium]. *Kauchuk i rezina*, 2015, no. 1, pp. 26-29 (In Russ.).

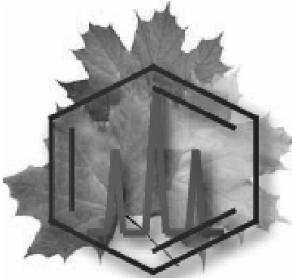
ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Соколовский Александр Александрович, к.т.н., зав. лаборатории ООО «Маяк-РТИ» (Россия, 141703, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Якова Гунина, д. 1).
 ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5756-6961>
 E-mail: sokol_1961@mail.ru

Крупкин Егор Алексеевич, инженер-технолог РТИ, ИП Покатило В.В. (Россия, 141703, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Якова Гунина, д. 1)/
 E-mail: krupkin1999@ya.ru

Sokolovskii Aleksandr Al., Candidate of Technical Sciences, Head. laboratory of LLC «Mayak-RTI», (Russia, 141703, Moscow region, Dolgoprudny)/
 ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5756-6961>
 E-mail: sokol_1961@mail.ru

Krupkin Egor A., Engineer, Sole proprietor Pokatilo V.V. (Russia, 141703, Moscow region, Dolgoprudny).
 E-mail: krupkin1999@ya.ru



VII РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ) «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НЕФТЕХИМИИ»

6-10 октября 2025 г., Пятигорск

Глубокоуважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в VII Российской конференции (с международным участием) «Актуальные проблемы нефтехимии».

Конференция состоится 6-10 октября 2025 года в г. Пятигорск, Пятигорский институт (филиал СКФУ).

Организаторы:

Отделение химии и наук о материалах Российской академии наук
 Объединенный Научный совет РАН по химии нефти, газа, угля и биомассы
 Научный совет по нефтехимии МААН
 Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН
 Пятигорский институт (филиал Северо-Кавказского федерального университета)
 Ассоциация «Российский национальный комитет Мирового нефтяного совета»
 НП «Национальное каталитическое общество»

Тематика конференции

- Нефтехимия, нефтепереработка, промышленная органическая химия
- Альтернативное и возобновляемое сырье
- Переработка угля и полимерных отходов
- Газохимия, утилизация диоксида углерода, получение и транспортировка водорода
- Химия смазочных материалов

Научная программа конференции включает пленарные лекции (45 мин), ключевые доклады (30 мин), устные доклады (15 мин) и стендовые доклады.

Подробная информация, электронная форма регистрации и загрузка тезисов доступны на сайте
<http://conference.forenewchemistry.ras.ru/>

С уважением, Ученый секретарь Объединенного Научного совета РАН по химии нефти, газа, угля и биомассы
 к.х.н., н.с. ИНХС РАН Захарян Елена Михайловна