

С.В. Словигов, Р.В. Бульбович

Пермский государственный технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ¹

Рассмотрен один из методов исследования вязкоупругих свойств материалов. В результате исследования двух разных типов полимеров получены зависимости механических свойств материалов от частотных характеристик нагружения. Проведен анализ механического поведения высоконаполненного полимерного материала и ненаполненного высокоэластичного полимера и показана возможность использования механического динамического анализа для определения динамического модуля и угла сдвига фаз.

Ключевые слова: полимер, динамический механический анализ, петля гистерезиса, вязкоупругость, угол сдвига, динамический модуль, действительная часть комплексного модуля, мнимая часть комплексного модуля.

Динамические испытания одновременно должны давать максимально достоверные результаты и выполняться по достаточно простым методикам. Одним из методов таких исследований является проведение динамического механического анализа при одноосном напряженно-деформированном состоянии. Для отработки методики динамических испытаний были выбраны два низкомодульных материала производства НИИ полимерных материалов, используемые в конструкции двигателей летательных аппаратов и обладающие ярко выраженными вязкоупругими свойствами.

Материал типа «ПДИ» является механическим аналогом (имитатором) твердого ракетного топлива и широко используется для проведения различных физико-механических исследований и представляет собой высоконаполненную полимерную композицию. Материал типа «Р» является ненаполненным высокоэластичным полимером [1]. Из исследуемых материалов НИИ полимерных материалов были подготовлены образцы со следующими характеристиками: из материала типа «ПДИ» плоские образцы с прямоугольным поперечным сечением 7,5 × 7,5 мм (рис. 1); из материала типа «ПДИ» цилиндрические образ-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 годы» (гос. контракт №02.518.11.7135).

цы с диаметром 34 мм и рабочей зоной 10 мм (рис. 2); из материала типа «Р» цилиндрические образцы с диаметром 20,0 мм и рабочей зоной 10 мм (рис. 3).



Рис. 1. Внешний вид плоского образца из материала типа «ПДИ»

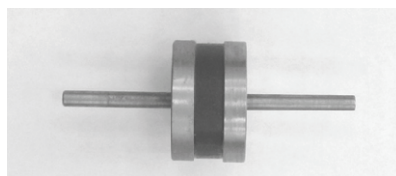


Рис. 2. Внешний вид цилиндрического образца из материала типа «ПДИ»

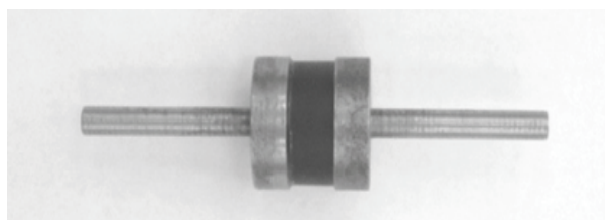


Рис. 3. Внешний вид цилиндрического образца из материала типа «Р»

Цилиндрические образцы вклеивались клеем на основе эпоксидной смолы в специальные гильзы с хвостовиком, выполненные из стали.

При проведении динамических испытаний на цилиндрических образцах из материала типа «ПДИ» исследовалось влияние частоты нагружения и амплитуды деформации на динамические механические свойства при симметричном цикле нагружения. В свою очередь, на плоских образцах из материала типа «ПДИ» исследовалось влияние частоты нагружения, уровня предварительной статической деформации и амплитуды деформации на динамические механические свойства, изучалось также влияние захватных приспособлений на получаемый результат. На цилиндрических образцах из материала типа «Р» исследовалось влияние частоты нагружения на динамические механические свойства.

Для проведения экспериментальных исследований динамических деформационных свойств низко модульных материалов на базе Центра экспериментальной механики ПГТУ была выбрана электродинамическая испытательная система Instron ElectroPuls E3000. Система Instron

ElectroPuls E3000 позволяет реализовывать различные, в том числе и синусоидальные, законы нагружения с частотой от 0,01 до 200 Гц. Реализация высокоточной системы управления испытаниями в Instron E3000 позволяют проводить испытания образцов различной формы с различными жесткостями.

Метод динамического механического анализа подразумевает нагружение образца по синусоидальному закону. В случае одноосного нагружения образца гармонической деформацией (ε) напряжение (σ) оказывается сдвинутым на некоторый угол сдвига фазы (φ_E). В результате на диаграмме «напряжение–деформация» для каждого цикла нагружения получается петля гистерезиса.

Для описания деформационных свойств полимеров в условиях стационарных гармонических колебаний используют комплексные операторы. Комплексное отношение σ к деформации ε можно описать как [2]

$$E = E' + iE'', \quad (1)$$

где $E' = E^* \cos \varphi_E$; $E'' = E^* \sin \varphi_E$; $E^* = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2}$; $\varphi_E = \arctg(E''/E')$.

В теории комплексных операторов E' является действительной частью комплексного модуля, E'' – мнимой частью комплексного модуля, φ_E – углом сдвига фазы (углом потерь).

Действительная часть комплексного модуля характеризует упругие свойства материала, прочностные свойства материала при динамическом нагружении. Мнимая часть комплексного модуля определяет вязкостные характеристики материала, диссипацию энергии в материале.

Динамический модуль (E^*) при динамическом одноосном напряженно-деформированном состоянии, Па, определяют по формуле [3]

$$E^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma$ – размах напряжения; $\Delta\varepsilon$ – размах деформации.

Для вычисления угла потерь (φ_E) в данном исследовании использовался энергетический метод. В случае синусоидальной нагрузки петля гистерезиса аппроксимируется уравнением эллипса. Площадь, ограниченная эллипсом, определяется численным интегрированием, что снижает погрешности определения угла сдвига фазы, вызванные нали-

чием шума и нелинейных искажений закона нагружения из-за нелинейных свойств материала образца. Угол сдвига фаз между напряжением и деформацией, рад, вычисляется по формуле

$$\varphi_E = \arcsin \left(\frac{a}{\pi \frac{\Delta u}{2} \frac{\Delta N}{2}} \right), \quad (3)$$

где a – энергия-площадь, ограниченная петлей гистерезиса (интеграл силы по перемещению), Дж; Δu – размах перемещения, м; ΔN – размах силы, Н.

Пример петли гистерезиса, полученной для материалов типа «ПДИ», представлен на рис. 4. Достаточно правильная форма эллипса говорит о незначительности нелинейных эффектов в записи цикла «напряжение (усилие) – деформация (перемещение)».

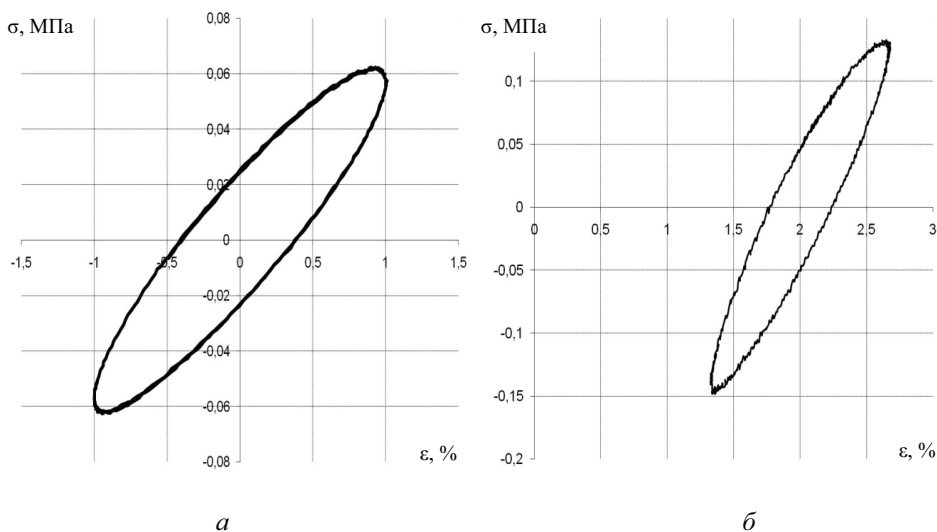


Рис. 4. Петля гистерезиса для материала типа «ПДИ»: (а) $\nu = 0,1$ Гц, $\varepsilon_{\text{ст}} = 0$, $\varepsilon_a = 1\%$; (б) $\nu = 1$ Гц, $\varepsilon_{\text{ст}} = 2\%$, $R_e = 0,5$

Характерно, что наличие предварительной деформации (или асимметрии цикла) не вносит существенных искажений в эллиптическую форму петли гистерезиса.

Сравнительный анализ петли гистерезиса материала типа «Р», представленной на рис. 5, и петли гистерезиса материала типа «ПДИ»

показывает, что ненаполненный материал имеет значительно меньшие потери энергии в цикле, т.е. характеризуется меньшей вязкостью, чем высоконаполненный полимер.

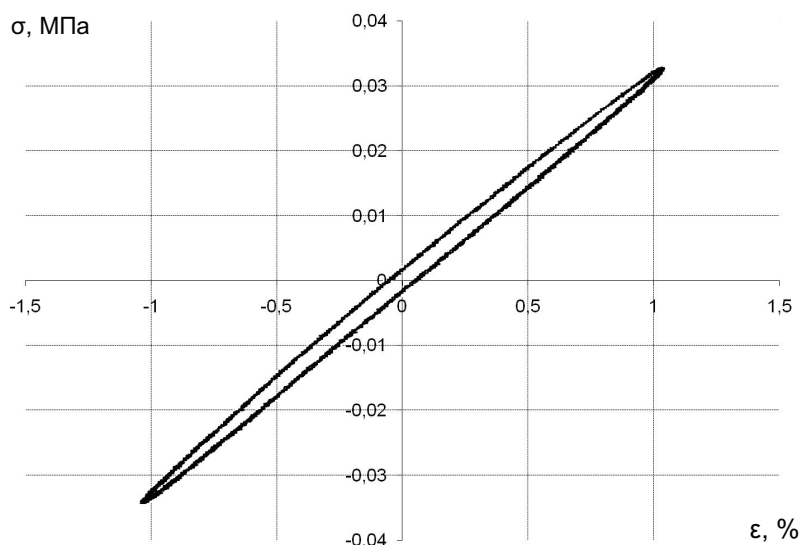


Рис. 5. Петля гистерезиса материала типа «Р»: $\nu = 0,01$ Гц, $\varepsilon_{\text{ст}} = 0$, $\varepsilon_a = 1\%$

На рис. 6–7 представлены результаты исследования влияния частоты нагружения на динамический модуль и угол сдвига фаз между напряжением и деформацией материала типа «ПДИ» (цилиндрический образец) в симметричном цикле нагружения при амплитудах деформации 0,33, 0,66 и 1,0 %.

Динамический модуль является монотонно возрастающей функцией логарифма частоты нагружения и в исследованном частотном диапазоне с увеличением частоты увеличивается более чем в 5 раз. Значения угла сдвига фазы между напряжением и деформацией уменьшаются с увеличением частоты нагружения и изменяются в пределах от 30 до 3,5 градусов. Зависимость динамических свойств от амплитуды деформации незначительна и наиболее ощутима для угла сдвига фазы на частоте 0,01 Гц. На частотных зависимостях динамического модуля и угла сдвига фаз между напряжением и деформацией тонкими линиями показаны также доверительные интервалы определения указанных величин при уровне доверительной вероятности 0,95.

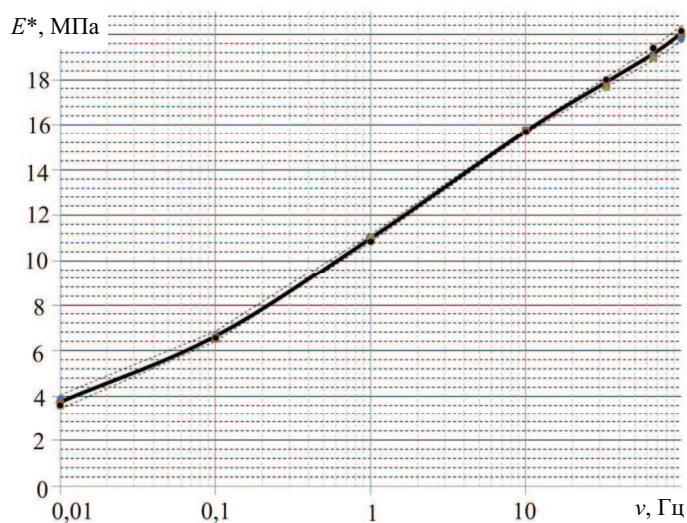


Рис. 6. Частотная зависимость динамического модуля материала типа «ПДИ» (цилиндрический образец)

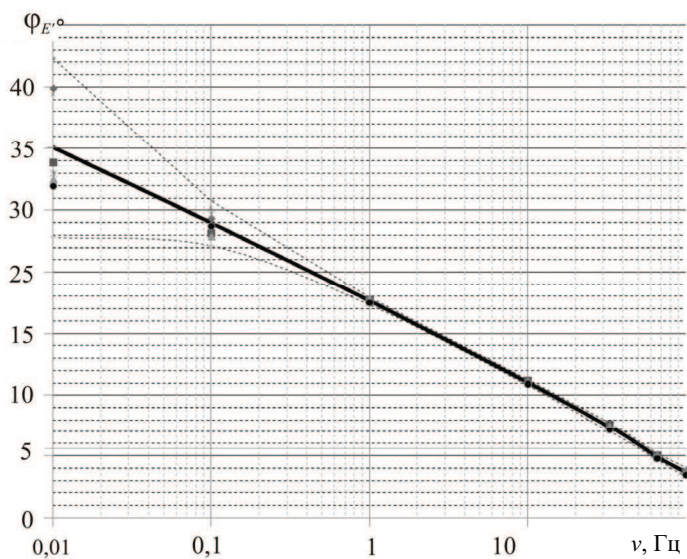


Рис. 7. Частотная зависимость угла сдвига фаз между напряжением и деформацией материала типа «ПДИ» (цилиндрический образец)

На рис. 8, 9 представлены частотные зависимости динамического модуля и угла сдвига фаз для материала типа «ПДИ» (плоский образец).

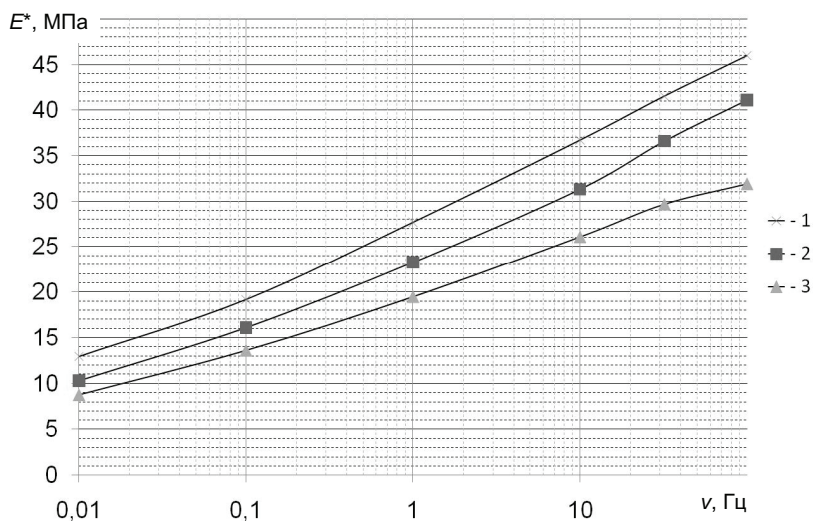


Рис. 8. Частотная зависимость динамического модуля материала типа «ПДИ» (плоский образец) при различных предварительных деформациях: 1 – 1 %; 2 – 2 %; 3 – 3 %

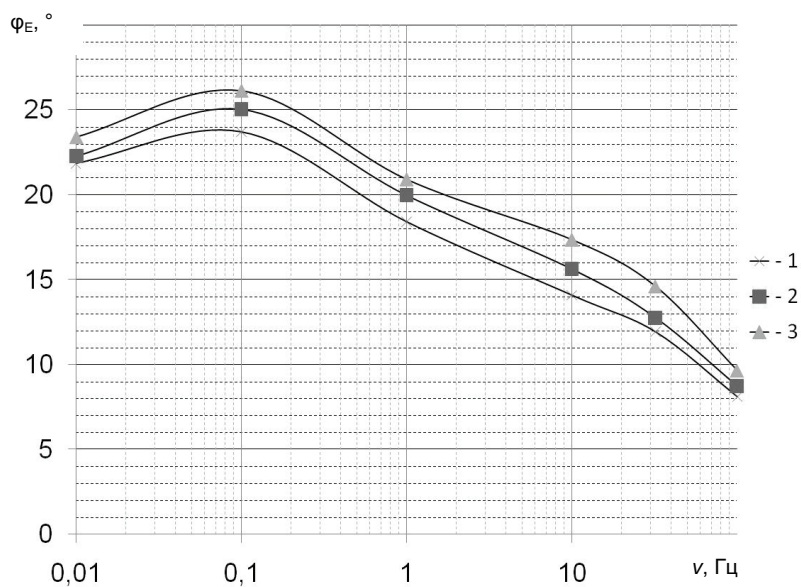


Рис. 9. Частотная зависимость угла сдвига фаз между напряжением и деформацией материала типа «ПДИ» (плоский образец) при различных предварительных деформациях: 1 – 1 %; 2 – 2 %; 3 – 3 %

Значения динамического модуля и угла сдвига фаз между напряжением и деформацией, определенные на образцах двух форм мате-

риала типа «ПДИ», имеют существенные отличия, которые объясняются прежде всего объективными разбросами механических характеристик материала, связанными с технологическими отклонениями формирования образцов и отличиями свойств разных партий. Плоские и цилиндрические образцы были изготовлены из разных партий материала.

Предварительная статическая деформация существенно влияет на динамическое поведение материала. В исследованном частотном диапазоне при увеличении предварительной статической деформации с 1 до 3 % динамический модуль уменьшается на 40 ÷ 50 %, а угол сдвига фаз между напряжением и деформацией увеличивается на 20 ÷ 25 %, характер обеих зависимостей близок к линейной.

На рис. 10, 11 представлены частотные зависимости динамического модуля и угла сдвига фаз между напряжением и деформацией высокоэластичного ненаполненного материала типа «Р» (цилиндрический образец).

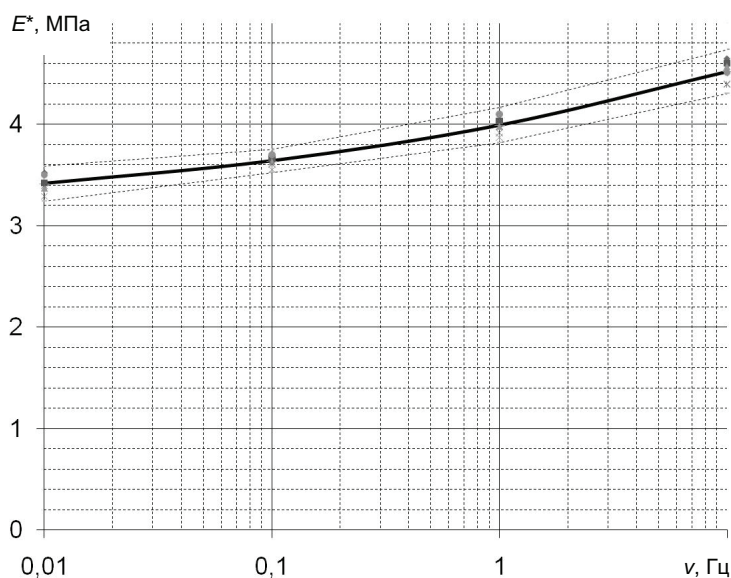


Рис. 10. Частотная зависимость динамического модуля материала типа «Р»

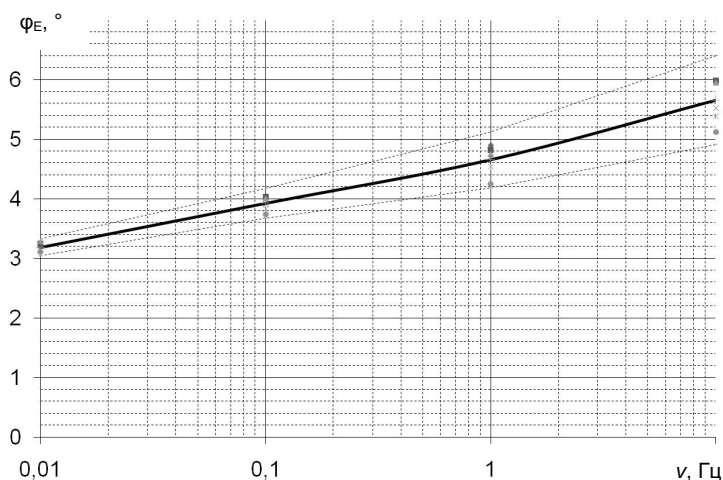


Рис. 11. Частотная зависимость угла сдвига фаз между напряжением и деформацией материала типа «Р»

Характерно, что частотная зависимость динамического модуля высокоэластичного материала типа «Р» имеет более пологий характер, а сами значения на порядок ниже значений динамического модуля материала типа «ПДИ». Значения угла сдвига фаз между напряжением и деформацией в исследованном частотном диапазоне также значительно ниже, чем для материала типа «ПДИ», и с ростом частоты наблюдается увеличение угла сдвига фаз. Известно, что характер потерь в материале в первую очередь определяется природой самого материала и для различных составов обобщенные фазовые картины имеют различный вид.

Динамические свойства материала типа «Р», как и материала типа «ПДИ», практически не зависят от амплитуды деформации в исследованном деформационном диапазоне.

Библиографический список

1. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Наука, 1972. – 328 с.
2. Лямкин Д.И. Механические свойства полимеров / Российский химико-технологический университет. – М., 2000. – 64 с.
3. Методы прикладной вязкоупругости / А.А. Адамов [и др.]; УрО РАН. – Екатеринбург, 2003. – 411 с.

Получено 5.10.2010