

Качественный анализ, аттестация и идентификация определяющих соотношений для материалов с наследственными свойствами

Хохлов Андрей Владимирович

Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Профиль в системе «ИСТИНА» МГУ: <http://istina.msu.ru/profile/AnKh/>

Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, списка обозначений и сокращений, семи приложений, содержащих иллюстрации к каждой главе. Объем текста диссертации – 650 страниц, она содержит 240 рисунков, 735 библиографических ссылок.

По теме диссертации в 2004-2020 гг. опубликованы 50 статей (без соавторов) в журналах по механике, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и RSCI WoS (без учета переводов), еще 6 статей в журналах из перечня ВАК, сделаны более 60 докладов на научных конференциях и более двух десятков докладов на научных семинарах НИИ механики и мехмата МГУ.

Аннотация

Излагаются результаты и технология качественного анализа свойств интегральных определяющих соотношений (ОС) для вязкоупругопластичных материалов с целью определения сфер влияния их материальных функций (МФ) и параметров, арсеналов возможностей ОС, границ и индикаторов их областей применимости и разработки методик идентификации и верификации ОС.

В диссертационной работе аналитически исследованы свойства четырех разных ОС для изотермических процессов деформирования изотропных материалов:

- 1) линейного интегрального ОС вязкоупругости Больцмана-Вольтерры с двумя произвольными МФ (функциями сдвиговой и объемной ползучести);
- 2) физически нелинейного ОС вязкоупругости Работнова с четырьмя произвольными МФ (функциями сдвиговой и объемной ползучести и двумя дополнительными функциями нелинейности), обобщающего, с одной стороны, линейное ОС вязкоупругости (на простых процессах нагружения или деформирования), а с другой стороны – ОС деформационной теории пластичности (при активном нагружении);
- 3) физически нелинейного ОС вязкоупругопластичности типа Максвелла с четырьмя произвольными МФ (оно охватывает классические степенные модели вязкого течения и ползучести, реологические модели Гершеля-Балкли и Шведова-Бингама и частные случаи моделей Соколовского-Малверна и VBO);
- 4) нового физически нелинейного ОС для стареющих наследственных материалов с высокой скоростной чувствительностью с четырьмя материальными функциями и 16-ю параметрами и (квази)обратного к нему.

Все эти ОС нацелены на описание комплекса основных реологических эффектов, типичных для материалов, обладающих наследственностью и высокой чувствительностью к скорости деформирования и, возможно, разносопротивляемостью (изотропных полимеров и композитов, асфальтобетонов, твёрдых топлив, пен, льдов, алюминиевых и титановых сплавов, нержавеющей сталей и керамик при высоких температурах, связок, сухожилий, стенок сосудов и других биологических тканей).

Выведены уравнения семейств всех основных квазистатических кривых, порождаемых ОС с произвольными материальными функциями (при минимальных первичных математических ограничениях на них): диаграмм деформирования при постоянных и кусочно-постоянных скоростях деформации или нагружения, кривых ползучести и

релаксации с произвольной начальной стадией нагружения до заданного уровня, кривых ползучести при ступенчатых нагружениях (в частности, обратной ползучести), кривых длительной прочности, кривых нагружения и разгрузки, циклического нагружения, скоростной чувствительности, зависимости от времени коэффициента поперечной деформации при разных программах нагружения и др. Аналитически изучены в общем виде их основные качественные свойства в зависимости от параметров программ нагружения и свойств материальных функций, получены эффективные двусторонние оценки для них, найдены сферы влияния всех материальных функций, выявлены возможности для их раздельного определения по данным испытаний. Основные результаты диссертации сформулированы (и доказаны) в форме четырех десятков теорем (с четко сформулированными предпосылками и списками доказанных свойств), опубликованных в статьях в ведущих рецензируемых журналах по МДТТ в 2004-2020 гг.

На основе сопоставления обнаруженных свойств кривых, порождаемых ОС, с типичными свойствами экспериментальных кривых широкого класса вязкоупругопластичных материалов (с целевым списком базовых механических эффектов) для каждого ОС выведены минимальные ограничения на материальные функции, обеспечивающие адекватное качественное описание комплекса базовых эффектов, характерных для реономных материалов, обладающих наследственностью и заметной чувствительностью к скорости деформирования. Выявлен арсенал возможностей каждого ОС, те эффекты, которые ОС не может описать ни при каких материальных функциях, и те, которые могут быть описаны при определённых дополнительных ограничениях, наложенных на материальные функции. Указаны характерные свойства теоретических кривых и их зависимостей от параметров программ нагружения, которые могут служить *индикаторами применимости* (или достаточными признаками неприменимости) ОС, удобными для проверки по кривым испытаний материалов. Разработаны методики идентификации каждого из исследованных ОС по нескольким разным системам базовых опытов, некоторые из них апробированы на результатах серий испытаний двух полимерных материалов по разным программам, спланированных и проведенных под руководством автора в НИИ механики МГУ и в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого.

Подобный системный анализ базовых кривых, порождаемых определяющим соотношением, – важная стадия аттестации и создания паспорта-руководства любого ОС. Он необходим для формирования перечней моделируемых видов нагружения, термомеханических эффектов и классов материалов, определения феноменологических ограничений на материальные функции и параметры, указания границ области применимости и ее маркеров, разработки процедуры выбора ОС и способов их идентификации, верификации, настройки и численной реализации, для сопоставления арсеналов возможностей разных ОС и оценки целесообразности (и способа) их включения в состав более сложных специализированных моделей.