А. М. Репин. Достижения Г. В. Треля уникальны и полезны. 28.7.2016 ему – 83¹.

Анонс. Впервые в единой подборке, электронной версии и дизайне автора этих строк приводятся обнаруженные 'бумажные' публикации Г. В. Треля. Их немного. Причина — большие трудности опубликования. Тормоз. Более того, несколько лет назад Густав Владимирович после операции был лишён возможности умственного труда. Это подобно тому, как заливистая трель жаворонка, радостно взлетающего поутру в голубизну безоблачного неба, прерывается вдруг выстрелом представителя нечисти. Убийцы. Скрытого. Или известного. Как, к примеру, инквизиторы. Кои мучили и затем на костре прилюдно сожгли великого Джордано (Филиппо) Бруно в 1600.

Статьи Треля Г. В. / Мои скан-копии с ксерокса оригиналов из фонда РГБ /"Ленинки".

1. <u>Трель</u> <u>Г. В. Трёхмерная математическая модель мягкого нагружения упруговязкопластичного материала [Текст] / Г. В. Трель // Материаловедение. - 2006. - N 5. - C. 11-15.</u>

<u>Аннотация</u>: Рассмотрена возможность компьютерного моделирования <u>механических характеристик</u> для одноосного, двухосного или трёхосного, мягкого, сложного нагружения упруговязкопластичного материала. Модель основана на учёте упругого объёмного (гидростатического) напряжения материала.

2. <u>Трель</u> <u>Г. В. Модель упруговязкого, пластичноэластичного, упрочняющегося материала [Текст] / Г. В. Трель // Материаловедение. - 2006. - N 9. - C. 21-24.</u>

<u>Аннотация</u>: Рассмотрена возможность компьютерного моделирования <u>механических характеристик</u> одноосного, мягкого нагружения упруговязкого, пластичноэластичного, упрочняющегося (разупрочняющегося) материала.

3. <u>Трель Г. В. Одномерная модель жёсткого нагружения материала с аномальными механическими свойствами [Текст] / Г. В. Трель // Материаловедение. - 2011. - N 11. - C. 46-49.</u>

Аннотация: Рассмотрена возможность компьютерного моделирования диаграмм механических характеристик одноосного, жёсткого нагружения линейноупругого, вязкого, пластичного, эластичного, упрочняющегося (разупрочняющегося) материала с разными сопротивлениями при растяжении и сжатии. Модель учитывает свойства дополнительных аномальных составляющих пластичности, эластичности и упрочнения (разупрочнения), определяющих разную сопротивляемость материалов. Приведены примеры компьютерных диаграмм напряжение-деформация, сопоставление которых с экспериментальными диаграммами подтвердило возможность применения предлагаемой одномерной модели жёсткого нагружения для воспроизведения механических характеристик достаточно широкого ряда разнородных материалов твёрдых тел с разными сопротивлениями деформированию при растяжении и сжатии.

4. <u>Трель Г. В.</u> Трёхмерная модель мягкого, одно-, двух- и трёхосного нагружения материала [Текст] / Г. В. Трель // Материаловедение. - 2011. - N 12. - C. 49-53.

Аннотация: Рассмотрена возможность создания трёхмерной математической модели мягкого одно-, двух- и трёхосного нагружения упруговязкого, пластичноэластичного, упрочняющегося (разупрочняющегося) материала со стационарной ползучестью на базе известных моделей мягкого нагружения материалов твёрдых тел. Скорость деформации стационарной ползучести принята пропорциональной упругому напряжению материала. Приведены примеры компьютерных (в безразмерных координатах) кривых ползучести материала. Сопоставление их с данными экспериментов подтвердило возможность применения предлагаемой модели для воспроизведения механических характеристик ряда разнородных материалов твёрдых тел.

===== Далее эти последние четыре статьи Г.В.Т. даны полностью. Как скан-копии с ксерокопий оригиналов, опубликованных в журнале Материаловедение в 2006 и 2011 годах. Попутно приведены (на стр. 31 и 43− ниже) дополнительно обнаруженные рисунки к изобретению № 1374256 (стр. 10-11 выше). А также полные описания изобретений №№ 483678, 554477, 968830, 987636, ..., .

¹См. стр. 1-25 по изобретениям Г.В.Т. в <u>htt</u>p://<u>econf.rae</u>.ru/<u>article/10023</u>.

NB. Издание Академии естествознания (PAE) предоставляет читателям (пользователям интернет-информацией) уникальную возможность. Выразить после знакомства с материалом своё мнение на art.-странице.

УДК 539.3:519.711.2

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЯГКОГО НАГРУЖЕНИЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Г. В. ТРЕЛЬ

Рассмотрена возможность компьютерного моделирования механических характеристик для одноосного, двухосного или трехосного мягкого сложного нагружения упруговязкопластичного материала. Модель основана на учете упругого объемного (гидростатического) напряжения материала. Приведены примеры расчетных диаграмм "напряжение—объемная деформация" и "напряжение—осевая деформация". Отмечена возможность применения модели для воспроизведения объемных и осевых механических характеристик мягкого нагружения ряда разнородных материалов.

бласть применения одномерной математической модели мягкого одноосного нагружения упруговязкопластичного (УВП) материала твердого тела, предложенной в [1], ограничена тем, что ею не воспроизводятся поперечные и объемные деформации нагружаемого материала. Рассмотрим возможность исключения этого недостатка за счет учета напряженных состояний материала еще по двум дополнительным ортогональным между собой поперечным осям и объемного напряжения материала.

Материал считаем безынерционным, сплошным, однородным, изотропным, линейноупругим, линейновязким, пластичным, стабильным, с равными сопротивлениями нагружению при

растяжении и сжатии, находящимся в условиях изотермического одноосного (линейного), двухосного (плоского) или трехосного (объемного) мягкого нагружения. Напряжения и относительные деформации считаем истинными.

Считается, что при продольном деформировании в поперечных направлениях материала, свободных от внешних напряжений, возникают внутренние (межатомные) силы, под действием которых и возникают поперечные деформации [2]. Известно и такое объяснение: "в веществе как бы действует система авторегулирования объема, у которой величина коэффициента передачи в цепи обратной связи определяется величиной коэффициента Пуассона" [3]. В тео-

11

NB. Ниже из интернета приводятся изображения, характерные для мест проживания (работы) Г.В. Они указаны, например, в А.С. СССР на изобретения. Это – Ковров(о), Дедовск, Кратов(о), Москва.



Дедовск.

рии упругости считают, что при внешнем нагружении тела в его материале возникает внутреннее всесторонне действующее объемное (гидростатическое) напряжение, пропорциональное алгебраической сумме нормальных внешних напряжений нагружения [4].

Пусть X, Y и Z — оси декартовой прямоугольной системы координат кубического с единичными размерами образца материала, проходящие через его центр тяжести и направленные перпендикулярно его граням. Например, для случая одноосного нагружения вдоль оси X зависимости поперечных деформаций $\varepsilon_{ay}(t)$ и $\varepsilon_{az}(t)$ по осям Y и Z можно представить уравнением [5]

$$\varepsilon_{ay}(t) = \varepsilon_{az}(t) = \mu_e \varepsilon_{ex}(t) + \mu_p \varepsilon_{px}(t),$$

где $\varepsilon_{ex}(t)$, $\varepsilon_{px}(t)$ — упругая и пластическая продольные деформации по оси X; μ_e , μ_p — коэффициенты упругой и пластической поперечных деформаций.

Коэффициент μ_e обычно определяют по соотношению деформаций в области упругого деформирования, когда пластические деформации существенно меньше упругих. Экспериментальные величины μ_e лежат в пределах от 0,00 для пробки [6] и 0,03—0,08 для сланцев и гнейсов [7] до 0,49972 для резины [8]. У сталей он лежит в диапазоне 0,27—0,3, а у алюминиевых сплавов — 0,3—0,33. Коэффициенты упругих поперечных деформаций у многих разнородных материалов практически равны теоретическому значению коэффициента Пуассона $\mu_e = -0,25$.

Коэффициент μ_p определяют в области пластического деформирования, когда упругие деформации существенно меньше пластических. Условию полного сохранения объема материала при его пластическом деформировании, оцениваемого в истинных относительных деформациях [5], соответствует величина $\mu_p = -0.5$.

Отрицательные знаки у коэффициентов μ_e и μ_p приняты в связи с тем, что фактически направления поперечных деформаций противоположны направлениям продольных деформаций. Например, при продольном растяжении в поперечном направлении наблюдается сжатие материала.

Указанные коэффициенты поперечных деформаций по существу являются показателями способности материала к изменению объема. Результаты экспериментальных исследований позволяют считать, что при любом виде нагру-

жения объем материала изменяется упруго [9], чистый сдвиг не изменяет объема и при равных всесторонних растяжениях-сжатиях осевые пластические деформации отсутствуют [10].

Экспериментально установлено, что у любого материала предел текучести чистого сдвига меньше предела текучести при его одноосном растяжении-сжатии. Величины отношений этих пределов для различных материалов различны и, по данным работ [11, 12], лежат в диапазоне 0,25—0,882. Общепринятое теоретическое зна-

чение этого отношения $\sqrt{3^{-1}} \simeq 0,577$ было получено в энергетической теории прочности.

Известно, что при переходе от одноосного растяжения к двухосному осевые деформации уменьшаются [13], т. е. жесткость материала возрастает.

В качестве исходных моделей для каждой из осей X, Yи Z примем следующую систему уравнений одномерной модели УВП материала [1]:

$$\sigma_v(t) = \sigma(t) - \sigma_e(t); \ \dot{\varepsilon}(t) = V^{-1}\sigma_v(t);$$
$$\varepsilon(t) = \int_{-1}^{1} \dot{\varepsilon}(t)dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_{e}(t) = \dot{\varepsilon}(t) - \dot{\varepsilon}_{p}(t); \quad \sigma_{e}(t) = E \int \dot{\varepsilon}_{e}(t) dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_{n}(t) = P\sigma_{e}(t) |\dot{\varepsilon}(t)|, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ — внешнее напряжение нагружения; $\sigma_e(t)$, $\sigma_v(t)$ — внутренние упругое и вязкое напряжения сопротивления материала деформированию; $\varepsilon(t)$, $\varepsilon_e(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$, $\dot{\varepsilon}_e(t)$ — полная и упругая деформации и их скорости; $\dot{\varepsilon}_p(t)$ — скорость пластической деформации; $|\dot{\varepsilon}(t)|$ — абсолютная величина скорости полной деформации; E, V, P — осевые модуль упругости и коэффициенты вязкости и пластичности материала, определяемые для одномерной модели непосредственно по экспериментальным диаграммам $\varepsilon(\sigma)$.

Объемную деформацию материала $\theta(t)$ представим уравнением

$$\theta(t) = \varepsilon_{x}(t) + \varepsilon_{y}(t) + \varepsilon_{z}(t), \qquad (2)$$

где $\varepsilon_\chi(t),\ \varepsilon_y(t),\ \varepsilon_z(t)$ — полные деформации по осям $X,\ Y$ и Z.

Упругий характер изменения объемных деформаций позволяет внутреннее объемное (гидростатическое) упругое напряжение сопротивления объемному деформированию $\sigma_{e\theta}(t)$ представить зависимостью

$$\sigma_{e\theta}(t) = H[\sigma_{ex}(t) + \sigma_{ey}(t) + \sigma_{ez}(t)], \quad (3)$$

где $\sigma_{ex}(t)$, $\sigma_{ey}(t)$, $\sigma_{ez}(t)$ — внутренние упругие напряжения сопротивлений деформированию по соответствующим осям; H — коэффициент упругого объемного напряжения.

Введя зависимость (3) в уравнения вязкого напряжения исходной системы уравнений (1) по каждой из осей и дополнив их уравнения скоростей продольных упругих деформаций зависимостями скоростей пластических поперечных деформаций, получим трехмерную систему определяющих уравнений рассматриваемого УВП материала:

для оси X

$$\sigma_{vx}(t) = \sigma_{x}(t) - \sigma_{ex}(t) - \sigma_{e\theta}(t);$$

$$\dot{\varepsilon}_{x}(t) = V_{3}^{-1} \sigma_{vx}(t);$$

$$\varepsilon_{x}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{x}(t) dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_{ex}(t) = \dot{\varepsilon}_{x}(t) - \dot{\varepsilon}_{px}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{py}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{pz}(t); (4)$$

$$\sigma_{ex}(t) = E_{3} \int \dot{\varepsilon}_{ex}(t) dt; \quad \dot{\varepsilon}_{px}(t) = P_{3} \sigma_{ex}(t) |\dot{\varepsilon}_{x}(t)|;$$
для оси Y

$$\sigma_{vy}(t) = \sigma_{y}(t) - \sigma_{ey}(t) - \sigma_{e\theta}(t);$$

$$\dot{\varepsilon}_{y}(t) = V_{3}^{-1} \sigma_{vy}(t);$$

$$\varepsilon_{y}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{y}(t) dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_{ey}(t) = \dot{\varepsilon}_{y}(t) - \dot{\varepsilon}_{py}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{px}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{pz}(t); (5)$$

$$\sigma_{ey}(t) = E_{3} \int \dot{\varepsilon}_{ey}(t) dt; \quad \dot{\varepsilon}_{py}(t) = P_{3} \sigma_{ey}(t) |\dot{\varepsilon}_{y}(t)|;$$
для оси Z

$$\sigma_{vz}(t) = \sigma_{z}(t) - \sigma_{ez}(t) - \sigma_{e\theta}(t);$$

$$\dot{\varepsilon}_{z}(t) = V_{3}^{-1} \sigma_{vz}(t);$$

 $\sigma_{ez}(t) = E_3$ $\int \dot{\epsilon}_{ez}(t) dt$; $\dot{\epsilon}_{pz}(t) = P_3 \sigma_{ez}(t) |\dot{\epsilon}_z(t)|$, где $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$ — напряжения внешнего нагружения; $\dot{\epsilon}_x(t)$, $\dot{\epsilon}_y(t)$, $\dot{\epsilon}_z(t)$ — скорости полных деформаций; $\dot{\epsilon}_{ex}(t)$, $\dot{\epsilon}_{ey}(t)$, $\dot{\epsilon}_{ez}(t)$ — скорости продольных упругих деформаций; $\dot{\epsilon}_{px}(t)$, $\dot{\epsilon}_{py}(t)$, $\dot{\epsilon}_{pz}(t)$ — скорости продольных пластических деформаций; E_3 , V_3 , P_3 — модули упругости, коэффициенты вязкости и пластичности материала для трехмерной модели.

 $\varepsilon_{z}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{z}(t) dt;$

 $\dot{\varepsilon}_{ez}(t) = \dot{\varepsilon}_{z}(t) - \dot{\varepsilon}_{pz}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{px}(t) - \mu_{p} \dot{\varepsilon}_{py}(t); (6)$

На примере одноосного нагружения по оси X покажем, что величина H однозначно зави-

сит от величины коэффициента упругих поперечных деформаций μ_e . При $\sigma_x(t)=$ const и $\sigma_y(t)=\sigma_z(t)=0$ после окончания процесса ретардации [1] в соответствии с (4)—(6) будем иметь $\sigma_{ey}(t)=\sigma_{ez}(t)=\mu_e\sigma_{ex}(t)$ и $\sigma_{e\theta}(t)=-\sigma_{ey}(t)=$ $=-\sigma_{ez}(t)=-\mu_e\sigma_{ex}(t)$. Подстановка этих зависимостей в (3) дает $H=-\mu_e(1+2\mu_e)^{-1}$. Заметим, что, например, значениям $\mu_e=-0.2; -0.25; -0.333$ соответствуют H=0.333; 0.5; 1.0.

Система уравнений (2)—(6) является искомой трехмерной математической моделью мягкого нагружения УВП материала. Нетрудно убедиться, что с точки зрения теории автоматического регулирования рассматриваемая модель является трехканальной системой управления с перекрестными связями по упругим напряжениям сопротивления объемному деформированию материала и по скоростям пластических поперечных деформаций с коэффициентами передачи, соответственно, H и μ_p .

Компьютерное моделирование проводилось при H=0.5 ($\mu_e=-0.25$) и $\mu_p=-0.5$ для случая симметричных внешних синусоидальных напряжений с периодом 800 с. Для обеспечения сопоставимости результатов моделирования рассматриваемой трехмерной модели с одномерной, в частности, с диаграммой $\varepsilon(\sigma)$ при E=100 ГПа, V=20 ГПа с и P=4.8 ГПа $^{-1}$, представленной в [1] на рис. 1, принято: $E_3=(1-\mu_e)^{-1}E=80$ ГПа; $V_3=(1-\mu_e)^{-1}V=16$ ГПа с; $P_3=(1-0.5\mu_e)P=5.4$ ГПа $^{-1}$.

На рис. 1 представлены расчетные диаграммы $\theta(\sigma_x)$ и $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для различных видов мягкого нагружения с амплитудами напряжений 0,2 ГПа: 1 — одноосного $\sigma_x(t) \neq 0$ при $\sigma_y(t) = \sigma_z(t) = 0$; 2 — двухосного $\sigma_x(t) = \sigma_y(t) \neq 0$ при $\sigma_z(t) = 0$ и 3 — трехосного $\sigma_x(t) = \sigma_y(t) = \sigma_z(t) \neq 0$.

На рис. 2 представлены диаграммы $\theta(\sigma_x)$, $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для одноосного нагружения с амплитудой 0,2 ГПа и диаграммы $\theta(\tau_{xy})$, $\gamma_{xy}(\tau_{xy})$ для двухосного нагружения типа чистый сдвиг $\sigma_x(t) = -\sigma_y(t) = \tau_{xy}(t) \neq 0$ при $\sigma_z(t) = 0$, где τ_{xy} — касательное напряжение сдвига в плоскости осей X, Y с амплитудой 0,12 ГПа, $\gamma_{xy}(t) = \varepsilon_x(t) - \varepsilon_y(t)$ — деформация сдвига в той же плоскости. На рис. 2 дополнительно приведена диаграмма сдвига 0,667 $\gamma_{xy}(1,667\tau_{xy})$, полученная пересчетом координат диаграммы $\gamma_{xy}(\tau_{xy})$. Коэффициенты пересчета определены из условия совпадения пересчитанной диаграммы с $\varepsilon_x(\sigma_x)$ в области упругого деформирования при мини-

θ(α')

θ(τ")

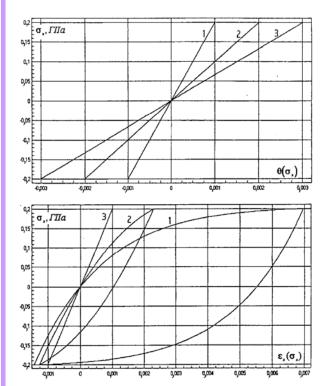


Рис. 1. Расчетные диаграммы $\theta(\sigma_x)$ и $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для различных видов мягкого нагружения: I — одноосного; 2 — двухосного с равными напряжениями; 3 — трехосного с равными напряжениями

4,001 4,0005 0 0,0005 0,001

0,1005 0,0005 0,0005 0,001

0,1005 0,0005 0,0005 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000

σ,τ,,ΓΠα

Рис. 2. Расчетные диаграммы $\theta(\sigma_x)$, $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для одноосного нагружения и $\theta(\tau_{xy})$, $\gamma_{xy}(\tau_{xy})$, $0.667\gamma_{xy}(1.667\tau_{xy})$ для двухосного нагружения типа чистый сдвиг

муме отклонений между ними в области пластического деформирования.

На рис. 3 представлены диаграмма $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для одноосного нагружения с амплитудой 0,2 ГПа и диаграмма $\varepsilon_{2x}(\sigma_{2x})$ для двухосного нагружения $\sigma_{2x}(t) = \sigma_{2y}(t) \neq 0$ с амплитудами 0,267 ГПа при $\sigma_{2z}(t) = 0$. Там же дополнительно приведена диаграмма $\varepsilon_{2x}(0,75\sigma_{2x})$, полученная пересчетом диаграммы $\varepsilon_{2x}(\sigma_{2x})$.

Диаграммы на рис. 2 и 3 показывают, что воспроизводимые моделью статические пределы текучести чистого сдвига τ_{ss} и двухосного нагружения (с равными напряжениями) σ_{2ss} соответствуют $\tau_{ss}\approx 0.6\sigma_{ss}$ и $\sigma_{2ss}\approx 1.333\sigma_{ss}$, где σ_{ss} — статический предел текучести при одноосном нагружении.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что предлагаемая математическая модель (2)—(6) по существу отражает все перечисленные выше особенности поведения УВП материала при его объемном деформировании. В частности, при любом виде нагружения объем материала изменяется упруго, при всестороннем нагружении с равными напряжениями осевые пластические деформации отсутствуют, в связи с чем линейные размеры из-

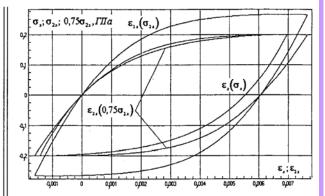


Рис. 3. Расчетные диаграммы $\varepsilon_x(\sigma_x)$ для одноосного нагружения и $\varepsilon_{2x}(\sigma_{2x})$, $\varepsilon_{2x}(0.75\sigma_{2x})$ для двухосного нагружения с равными напряжениями

меняются упруго (см. рис. 1); при двухосном нагружении осевая жесткость материала возрастает и при чистом сдвиге объем не изменяется (см. рис. 1, 2).

Сопоставление диаграммы одноосного нагружения рассматриваемой модели с соответствующей диаграммой одномерной модели ([1] и (см. рис. 1)) позволяет убедиться в их практически полном совпадении. Следовательно, рассматриваемая модель может быть применена при моделировании тех материалов, которые были отмечены в работе [1].

В математической теории пластичности считают, что пластическая деформация и соответственно пластическое течение возникают только после достижения напряжением предела упругости материала [14]. При таком подходе описание напряженного состояния материалов обычно проводится с помощью тензорного исчисления. Представленные результаты исследования подтверждают, что принятый в предлагаемой трехмерной модели подход к описанию пластичности позволяет моделировать сложное напряженное состояние УВП материалов без применения тензорного исчисления.

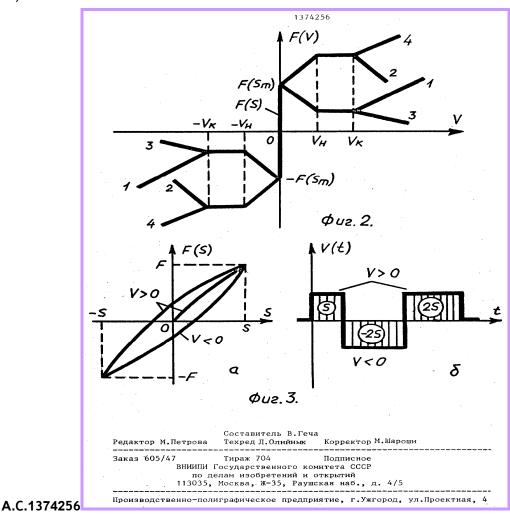
Таким образом, предлагаемая трехмерная математическая модель УВП материала может быть применена при компьютерном моделировании объемных и осевых механических характеристик одноосных, двухосных или трехосных мягких нагружений ряда разнородных материалов твердых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трель Г. В. Одномерная модель мягкого нагружения упруговязкопластичного материала // Материаловедение. 2004. № 10. С. 8-12.

- 2. Фридман Я. Б. Единая теория прочности материалов. М.: Оборонгиз. 1943. С. 28—30.
- 3. Кузьменко В. А. Развитие представлений о процессе деформирования материалов. Вып. 1. Киев: УкрНИИНТИ. 1968. C. 41-42.
- 4. **Ильюшин А. А., Ленский В. С.** Упругости теория // БСЭ. 3-е изд. Т. 27. М.: СЭ. 1977. С. 49—51.
- 5. Гаденин М. М., Романов А. Н. Взаимосвязь продольной и поперечной деформаций // Структурные факторы малоциклового разрушения металлов. М.: Наука. 1977. C. 115—129
- 6. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. 5-е изд. М.— Л.: ГТТИ. 1949. С. 40.
- 7. Ершов Л. В., Либерман Л. К., Нейман И. Б. Механика горных пород. М.: Недра. 1987. С. 4-5.
- 8. Лейканд М. А., Львов С. В., Лавендел Э. Э. Экспериментальное исследование изменения объема резины // Вопросы динамики и прочности. Вып. 38. Рига: Зинатне. 1981. С. 49-53.
- 9. Быковцев Г. И., Ивлев Д. Д. Теория пластичности. Владивосток: Дальнаука. 1998. С. 7.
- 10. Рейнер М. Деформация и течение / Пер. с англ. М.: Гостоптехиздат. 1963. С. 19-20.
- 11. Лоде В. Влияние среднего главного напряжения на текучесть металлов // Теория пластичности. М.: ИЛ. 1948. C. 168—205.
- 12. Кишкин С. Т., Ратнер С. И. Экспериментальная проверка основного закона теории пластичности // ЖТФ. 1949. Т. 19. Вып. 3. С. 412—420.
- Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 1 / Пер. с англ. М.: ИЛ. 1954. С. 281.
 Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория
- пластичности. М.: Физматлит. 2001; 2003. С. 9-11.

МВ-2006-5, с.11-15. Копия 6.5.16.



К изобретению № 1374256 (см. стр. 10-11 выше).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

УДК 539.3:519.711.2

МОДЕЛЬ УПРУГОВЯЗКОГО ПЛАСТИЧНОЭЛАСТИЧНОГО УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

Г. В. ТРЕЛЬ

Рассмотрена возможность компьютерного моделирования механических характеристик одноосного мягкого нагружения упруговязкого пластичноэластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала. Скорость эластической деформации принята пропорциональной произведению скорости полной деформации на абсолютную величину упругого напряжения, а скорость деформации линейного упрочнения (разупрочнения) — произведению полной деформации на абсолютную величину ее скорости. Приведены примеры компьютерных диаграмм напряжение—деформация, сопоставление которых с экспериментальными подтверждает возможность применения предложенной модели для широкого ряда разнородных материалов.

рименение одномерной математической модели мягкого нагружения упруговязкопластичного материала твердого тела [1] ограничено тем, что ею учитываются только основные свойства материала. Рассмотрим возможность расширения области применения этой модели за счет дополнительного учета свойств эластичности и деформационного упрочнения (разупрочнения). Материал принимаем сплошным однородным изотропным безынершионным линейноупругим линейновязким пластичным эластичным с линейным упрочнением (разупрочнением) стабильным с равными сопротивлениями при растяжении и сжатии, находящимся в условиях изотермического одноосного мягкого нагружения. Напряжения и относительные деформации считаем истинными. Поперечные деформации не учитываем.

Экспериментально установлено, что эластическая деформация подобно упругой обратима. Однако, в отличие от линейноупругой деформации, имеющей постоянный модуль упругости, у эластической с ростом деформации пропорциональность между напряжением и деформацией нарушается [2], т. е. эластичность по существу характеризует нелинейную упругость материала. По внешнему виду диаграмм напряжение-деформация различают материалы с жесткой и мягкой характеристиками [3]. С ростом напряжения у первых жесткость повышается, что характерно для эластомеров, материалов подобных резинам и каучукам, а у вторых понижается, что совпадает с кривыми нагружения пластичных материалов и, в частности, кристаллических металлов. Нелинейная упругость последних физически объясняется упругим двойникованием кристаллов. Это свойство иногда называют несовершенной упругостью [4] или даже обратимой пластичностью [5]. Показателем нелинейной упругости или пластичности материала является форма их кривых разгрузки [6]. В теории пластичности разгрузку описывают линейным законом Гука [7]. Известные описания процессов нагружения с разгрузкой нельзя считать удовлетворительными [8]. Свойство эластичности (нелинейной упругости) опишем зависимостью

$$\dot{\varepsilon}_I(t) = L \dot{\varepsilon}(t) |\sigma_{\rho}(t)|, \tag{1}$$

где $\dot{\varepsilon}_l(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ — скорости эластической и полной деформаций; $|\sigma_e(t)|$ — абсолютная величина упругого напряжения; L — коэффициент эластичности.

Моделирование упруговязкоэластичного материала показало, что L>0 соответствует мягкой нелинейной упругости материала, а L<0 — жесткой.

Под упрочнением понимают увеличение сопротивления материала деформированию с ростом деформации [9], поэтому это явление часто называют деформационным упрочнением. При разупрочнении после достижения максимального значения сопротивление материала с ростом деформации снижается. Считается, что при циклическом нагружении в металле возникают одновременно протекающие процессы упрочнения и разупрочнения [10]. Процессы взаимосвязаны, обусловливают друг друга [9] и определяются степенью деформации [11]. Для большинства материалов характерно преобладание упрочнения. У сверхпластичных материалов преобладает разупрочнение [12].

Упрочнение наблюдается и у монокристаллов [13]. В зависимости от вида ветвей нагружения в области больших пластических деформаций различают линейные и нелинейные, в частности степенные, виды упрочнения [14]. Полагают, что до сих пор еще не найдено приемлемое описание деформационного упрочнения [15].

Линейное упрочнение (разупрочнение) представим зависимостью

$$\dot{\varepsilon}_{\rm s}(t) = S\varepsilon(t)|\dot{\varepsilon}(t)|, \qquad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_s(t)$ — скорость деформации упрочнения (разупрочнения); $\varepsilon(t)$ — полная деформация; S — коэффициент линейного упрочнения (разупрочнения).

Моделирование показало, что S < 0 отражает процесс упрочнения, а S > 0 соответствует процессу разупрочнения моделируемого материала.

В качестве исходной примем следующую модель [1]:

$$\begin{split} \sigma_{v}(t) &= \sigma(t) - \sigma_{e}(t); & \dot{\varepsilon}(t) = V^{-1} \sigma_{v}(t); \\ \dot{\varepsilon}_{e}(t) &= \dot{\varepsilon}(t) - \dot{\varepsilon}_{p}(t); \end{split}$$

$$\begin{split} \sigma_e(t) &= E \int \dot{\varepsilon}_e(t) dt; \quad \dot{\varepsilon}_p(t) = P \sigma_e(t) |\dot{\varepsilon}(t)|; \\ \varepsilon(t) &= \int \dot{\varepsilon}(t) dt, \end{split}$$

где $\sigma_{v}(t)$ — вязкое напряжение; $\sigma(t)$ — внешнее напряжение нагружения; $\dot{\epsilon}_{e}(t)$, $\dot{\epsilon}_{p}(t)$ — скорости упругой и пластической деформаций; $E,\ V,\ P$ — модуль упругости и коэффициенты вязкости и пластичности материала.

Дополним эту систему уравнениями механических свойств эластичности (1) и деформационного упрочнения (разупрочнения) (2) материала. После ввода в уравнение скорости упругой деформации $\dot{\varepsilon}_e(t)$ скоростей эластической деформации $\dot{\varepsilon}_l(t)$ и деформации упрочнения (разупрочнения) $\dot{\varepsilon}_s(t)$ получим искомую одномерную модель рассматриваемого материала:

$$\sigma_{v}(t) = \sigma(t) - \sigma_{e}(t); \quad \dot{\varepsilon}(t) = V^{-1}\sigma_{v}(t);$$

$$\varepsilon(t) = \int \dot{\varepsilon}(t) dt;$$

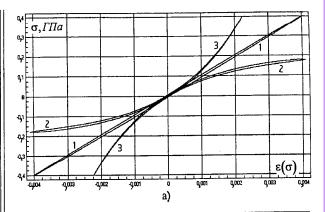
$$\dot{\varepsilon}_{e}(t) = \dot{\varepsilon}(t) - \dot{\varepsilon}_{p}(t) - \dot{\varepsilon}_{l}(t) - \dot{\varepsilon}_{s}(t);$$

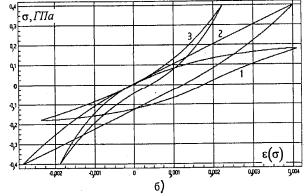
$$\sigma_{e}(t) = E \int \dot{\varepsilon}_{e}(t) dt; \qquad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_{p}(t) = P\sigma_{e}(t) |\dot{\varepsilon}(t)|; \quad \dot{\varepsilon}_{l}(t) = L\dot{\varepsilon}(t) |\sigma_{e}(t)|;$$

$$\dot{\varepsilon}_{s}(t) = S\varepsilon(t) |\dot{\varepsilon}(t)|.$$

С помощью системы определяющих уравнений (3) для упруговязкого пластичноэластичного (S=0) материала найдем уравнение статической диаграммы $\varepsilon(\sigma_e)$ одностороннего нагружения при $\sigma_e(t)>0$, $\dot{\varepsilon}(t)>0$ и $\varepsilon(t)>0$. По аналогии с [1] $\dot{\sigma}_e(t)=E[1-(P+L)\sigma_e(t)]\dot{\varepsilon}(t)$. Интегрирование при $\sigma_e(0)=0$ и $\varepsilon(0)=0$ дает $\sigma_e(t)=(P+L)^{-1}\{1-\exp[-(P+L)E\varepsilon(t)]\}$. Из этого следует, что при P+L>0 с ростом полной деформации упругое напряжение экспо-





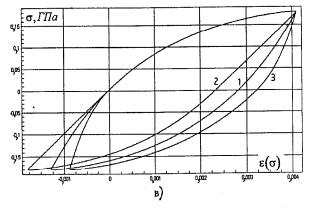
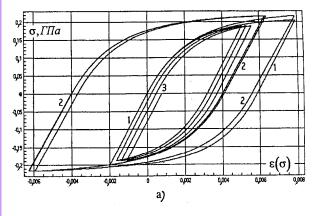
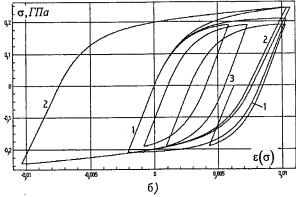


Рис. 1. Расчетные диаграммы $\varepsilon(\sigma)$ мягкого нагружения материала с S=0: a-P=0; L=0 (I), 4,8 (2) и -4,8 (3) $\Gamma\Pi a^{-1}$; $\delta-P=1$,2 $\Gamma\Pi a^{-1}$; L=3,6 (I), -1,2 (L=3) и -6,0 (L=3) L=3,6 (L=3) L=30 (L=30) L=31, L=31, L=32,4 (L=31) L=33 (L=33) L=34 (L=33) L=34 (L=34) L=35 (L=35) L=35 (L=35) L=36 (L=35) L=36 (L=36) L=37 (L=37) L=38 (L=37) L=39 (L=38) L=39 (L=38) L=39 (L=39) L=31 (L=39) L=39 (L=39)

ненциально приближается к статическому пределу текучести материала $(P+L)^{-1}=\sigma_{ss}$. Откуда, сумма коэффициентов пластичности и эластичности $P+L=\sigma_{ss}^{-1}$. Из $\dot{\sigma}_e(t)=E\dot{\epsilon}(t)$ следует, что при L=-P ветвь начального нагружения диаграммы будет линейной.

Искомая модель (3) была проверена при моделировании циклической диаграммы напряжение—деформация мягкого нагружения алюминия [16].





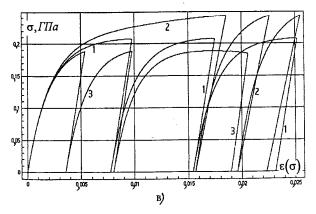


Рис. 2. Расчетные диаграммы $\varepsilon(\sigma)$ мягкого нагружения материала с P=2,4 ГПа $^{-1}$ и L=2,4 ГПа $^{-1}$: a-S=0 (I), -10,0 (2) и 3,0 (3); $\delta-S=0$ (I), -20,0 (2) и 8,0 (3); $\delta-S=0$ (I), -10,0 (2) и 6,3 (3)

Примеры компьютерных диаграмм $\varepsilon(\sigma)$ представлены на рис. 1 и 2. Моделировалось по три цикла симметричных (см. рис. 1, 2, a и 2, б) и асимметричных (см. рис. 2, θ) синусоидальных мягких нагружений с периодами 800 с. Амплитуды внешних напряжений, величины модуля упругости, коэффициентов вязкости, пластичности, эластичности и линейного упрочнения (разупрочнения) выбирались произвольно из условий наглядного представления влияния указанных параметров моделируемого материала на качественные характеристики (внешний вид) диаграмм $\varepsilon(\sigma)$. Расчеты проводились при E = 100 ГПа, V = 200 (см. рис. 1) и 20 ГПа · с (см. рис. 2). Величины остальных коэффициентов указаны под рисунками.

Диаграммы рис. 1, a по существу являются разновидностями упругих гистерезисов: I — линейных упруговязких материалов; 2 — нелинейных мягких (L > 0) и 3 — нелинейных жестких (L < 0) упруговязкоэластичных материалов. Эти диаграммы показывают, что предлагаемая модель отражает обратимость эластической деформации. Экспериментальные диаграммы ряда полимеров подобны кривым 2, в частности у гетинакса [17] и капрона [18], а у эластомеров кривым 3, как например, у вулканизаторов каучуков [19].

На рис. 1, δ приведены диаграммы мягкого нагружения упруговязких пластичноэластичных материалов: 1-P+L=4,8 ГПа $^{-1}$; 2-P+L=0 и 3-P+L=-4,8 ГПа $^{-1}$. У всех этих диаграмм ветви разгрузки нелинейны. Особенностью кривой 2 является линейная ветвь нагружения, что наблюдается у ряда горных пород, в частности у известняков [20]. Кривым 3 соответствуют экспериментальные диаграммы полиуретана [21].

Расчет диаграмм рис. 1, в проводился при P + L = 4,8 ГПа $^{-1}$ для: I -упруговязкопластичных (L = 0); 2 -при L = P и 3 -при L < 0 упруговязких пластичноэластичных материалов. Характерной особенностью кривых 2 является линейная разгрузка. Подобные диаграммы наблюдаются у металлов, например у алюминиевых сплавов [22, 23], и у пластиков, в частности у текстолита [17]. У кривых 3 ветви разгрузки существенно нелинейны. Такие диаграммы наблюдались у сталей [23] и замороженной супеси [24].

Диаграммы рис. 2 рассчитаны для упруговязких пластичноэластичных материалов с линейной разгрузкой (L=P): I — без упрочнения

(S=0); 2- с линейным упрочнением (S<0) и 3- с линейным разупрочнением (S>0). Первоначальные ветви нагружения кривых 2 соответствуют диаграммам, в частности замороженной глины [24], жаропрочных [14], алюминиевых [22] и магниевых [25] сплавов. Сопоставление линий разгрузки кривых 2 и 3 с кривыми 1 показывает, что с ростом деформации наклон этих линий у материалов с упрочнением уменьшается, а с разупрочнением увеличивается. Подобное наблюдалось у алюминиевого сплава [23]. Процесс стабилизации петель диаграмм циклического нагружения, аналогичный кривой 2 на рис. 2, 6, имеет место у легированного алюминиевого сплава B95 [26].

Отмеченное соответствие расчетных диаграмм экспериментальным имеет качественный характер. Количественные оценки возможной точности моделирования диаграмм алюминия можно провести по данным работы [16].

Таким образом, рассмотренная одномерная модель упруговязкого пластичноэластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала может быть применена при компьютерном моделировании механических характеристик мягкого нагружения широкого ряда разнородных материалов.

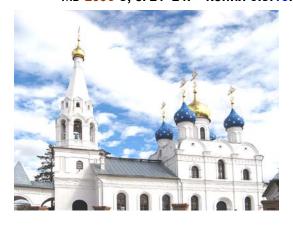
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

24

- 1. **Трель Г. В.** Одномерная модель мягкого нагружения упруговязкопластичного материала // Материаловедение. 2004. № 10. С. 8—12.
- 2. **Малкин А. Я.** Модуль высокоэластический // БСЭ. Т. 16. 3-е изд. М.: СЭ. 1974. С. 407.
- Цурпал И. А. Расчет элементов конструкций из нелинейноупругих материалов. Киев: Техника. 1976. С. 5—13.
- 4. **Классен-Неклюдова М. В.** Механическое двойникование кристаллов. М: АН СССР. 1960. С. 9.
- 5. Бойко В. С., Гарбер Р. И., Косевич А. М. Обратимая пластичность кристаллов. М: Наука. 1991. С. 6.
- 6. **Работнов Ю. Н.** Введение в механику разрушения. М.: Наука. 1987. С. 13.
- 7. **Кочин О. М.** О разгрузке упругопластических тел // Упругость и неупругость. Вып. 2. М.: МГУ. 1971. С. 129—137.

- Работнов Ю. Н., Суворова Ю. В. Наследственные эффекты при деформировании металлов // Успехи механики деформируемых сред. М.: Наука. 1975. С. 470—477.
- 9. **Булыгин И. П., Лашко Н. Ф.** К теории разупрочнения металлов // ЖТФ. 1954. Т. 26. Вып. 2. С. 231—249.
- Одинг И. А. Усталость металлов и задачи машиностроения. Л.: ЛПИ. 1941. С. 68—70.
- 11. Макогон М. Б., Легкова М. Л., Табатарович А. К. К вопросу о соответствии скоростных коэффициентов кривых течения // Исследования по физике твердого тела. М.: АН СССР. 1957. С. 159—169.
- 12. Пресняков А. А., Ажибаева С. М., Соймин Н. Я. Некоторые особенности перехода металлов и сплавов к истинной сверхпластичности // ФММ. 1971. Т. 32. Вып. 3. С. 654—657.
- Регель В. Р. К вопросу о зависимости предела текучести монокристаллов // Исследования по жаропрочным сплавам. Т. 2. М.: АН СССР. 1957. С. 275—280.
- 14. **Голуб В. П., Мироненко Л. В., Ящук Н. В.** Особенности деформационного упрочнения // Проблемы прочности. 1990. № 9. С. 21—25.
- 15. **Кучер Н. К., Бородий М. В.** К описанию одноосного знакопеременного деформирования металлов // Проблемы прочности. 1989. № 11. С. 65—69.
- 16. Трель Г. В. О некоторых законах механики деформируемого твердого тела. // Прочность и пластичность. Труды 9 конф. Т. 2. М.: ИПМех РАН. 1996. С. 166—171.
- 17. **Архангельский Б. А.** Пластические массы: Спр. пособ. Л.: Судпромгиз. 1961. С. 473.
- Тамуж В. П., Куксенко В. С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне. 1978. С. 83.
- Гуль В. У. Прочность полимеров. М.-Л.: Химия. 1964. С. 143.
- Миндели Э. О., Мохначев М. П., Громова Н. В. Исследование прочностных и деформационных свойств горных пород. М.: ИГД им. А. А. Скочинского. 1970. С. 21.
- Долгих Н. Я., Желтков В. И., Орлов А. Р. Некоторые свойства полиуретана // Исследования по механике деформируемых сред. Тула: ТПИ. 1972. С. 42—46.
- Надаи А. Пластичность / Пер. с англ. М.-Л.: ОНТИ. 1936. С. 173.
- Жуков А. М. Разгрузка пластически деформированных металлов // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 2. С. 179—183.
- 24. Вялов С. С., Зарецкий Ю. К., Городецкий С. Э. Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов. Л.: Стройиздат. 1981. С. 71.
- 25. Зелин М. Г., Валиев Р. З., Шварцман М. В. Исследование сверхпластического поведения магниевого сплава // Металлофизика. 1987. Т. 9. № 1. С. 84—90.
- 26. Гусенков А. П., Паршинцева Т. С., Шнейдерович Р. М. Некоторые свойства кривых повторного деформирования // Изв. АН СССР ОТН. Механика и машиностроение. 1960. № 5. С. 108—112.

МВ-2006-5, с. 21- 24. Копия 6.5.16.





УДК 539.3:519.711.2

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ЖЕСТКОГО НАГРУЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА С АНОМАЛЬНЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Г.В. ТРЕЛЬ, канд. техн. наук

Рассмотрена возможность компьютерного моделирования диаграмм механических характеристик одноосного жесткого нагружения линейноупругого вязкого пластичного эластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала с разными сопротивлениями при растяжении и сжатии. Модель учитывает свойства дополнительных аномальных составляющих пластичности, эластичности и упрочнения (разупрочнения), определяющих разную сопротивляемость материалов.

Приведены примеры компьютерных диаграмм напряжение — деформация, сопоставление которых с экспериментальными диаграммами подтвердило возможность применения предлагаемой одномерной модели жесткого нагружения для воспроизведения механических характеристик достаточно широкого ряда разнородных материалов твердых тел с разными сопротивлениями деформированию при растяжении и сжатии.

Ключевые слова: одномерная модель, жесткое нагружение, аномальный материал, математическая модель.

кспериментально было установлено, что многие конструкционные материалы имеют различные диаграммы нагружения при растяжении и сжатии [1]. Математическая модель [2] предназначена для воспроизведения диаграмм мягкого нагружения материалов, имеющих равные сопротивления при растяжении и сжатии. Рассмотрим возможность исключения этого недостатка путем ввода в эту модель дополнительных уравнений, соответствующих ряду аномальных свойств материала, определяющих его разную сопротивляемость при растяжении и сжатии и принятому режиму жесткого нагружения. Материал принят сплошным, однородным, изотропным, стабильным, безынерционным, линейноупругим, вязким с аномальными пластичностью, упрочнением и эластичностью, находящимся в условиях изотермического одноосного жесткого нагружения. Напряжения и относительные деформации считаем истинными. Результаты расчетов представим в безразмерных координатах (*).

Ряд исследователей считает, что в частности, графиты [3], бетоны, некоторые сплавы, армированные и неармированные полимеры [1]

имеют различные модули упругости при растяжении и сжатии. Более глубокие исследования показали, что различные по пределам текучести диаграммы растяжения и сжатия, в частности, армированных пластиков [4], фторопласта, полистирола, серого чугуна, латуни и титанового сплава [5] при малых напряжениях в зоне перехода между растяжением и сжатием имеют одинаковые модули упругости. В связи с этим аномальность упругости в настоящей работе не рассматривается.

Мягкое железо, углеродистые и никелевые стали, медь, алюминий и железо-армко, снег [6] и некоторые сверхпластичные материалы [7] имеют пределы текучести при сжатии выше, чем при растяжении. У магниевых сплавов [8] и дерева [9] наблюдается превышение пределов текучести растяжения над сжатием.

Сплав титана с никелем [10] при сжатии имеет большее упрочнение, чем при растяжении. Стеклообразный полимер [11] в процессе сжатия несколько упрочняется, а при растяжении существенно разупрочняется.

Участки диаграмм нагружения фанеры высокой плотности, резинотканевых материалов [12] и эластомерного пенопласта [13] при растяжении имеют вид кривых с возрастающей

жесткостью с ростом деформации, а при сжатии вид кривых со снижающейся жесткостью. У гранита [14] при растяжении жесткость снижается, в то время как при сжатии возрастает.

Считается, что разную сопротивляемость при сжатии и растяжении «обуславливают разные свойства материала из-за разного механизма пластической деформации» [8]. Однако «полностью физические причины различного поведения материала при сжатии и растяжении не установлены» [3], и «корректные уравнения состояния таких материалов» не описаны [1].

В качестве базовой примем одномерную модель мягкого нагружения материала с равными сопротивлениями при растяжении и сжатии [2].

В режиме мягкого нагружения система регулирования напряжения нагружения обычно программируется по величине этого напряжения. В режиме жесткого нагружения регули-

руется напряжение нагружения в зависимости от разности заданной и фактической полных деформаций. Система регулирования программируется по заданной полной деформации. Для случая линейного безынерционного регулятора зависимость напряжения нагружения представим уравнением:

$$\sigma(t) = K \left[\varepsilon_t(t) - \varepsilon(t) \right], \tag{1}$$

где $\sigma(t)$ — внешнее напряжение нагружения, вызванное сопротивлением материала жесткому деформированию; $\varepsilon_t(t)$, $\varepsilon(t)$ — заданная и фактическая полные деформации; K — коэффициент жесткости регулятора.

Полагаем, что разные сопротивления материалов при растяжении и сжатии, в частности, обусловлены влиянием аномальных составляющих пластической и эластической деформаций и деформации упрочнения (разупрочнения), скорости которых описываются следующими зависимостями:

$$\dot{\varepsilon}_{ap}(t) = P_a |\sigma_e(t)| |\dot{\varepsilon}(t)|;
\dot{\varepsilon}_{al}(t) = L_a \sigma_e(t) \dot{\varepsilon}(t); \dot{\varepsilon}_{as} = S_a \dot{\varepsilon}(t) \varepsilon(t),$$
(2)

где $\sigma_e(t)$ — внутреннее упругое напряжение материала; $\dot{\epsilon}(t)$ — скорость фактической полной деформации материала; $\dot{\epsilon}_{ap}(t)$, $\dot{\epsilon}_{al}(t)$, $\dot{\epsilon}_{as}(t)$ — скорости аномальных составляющих пластической и эластической деформаций и деформации упрочнения

(разупрочнения); P_a , L_a , S_a — коэффициенты аномальных пластичности, эластичности и упрочнения (разупрочнения) материала.

Введя в систему уравнений базовой модели [2] зависимости (2) и дополнив ее уравнение скорости упругой деформации $\dot{\varepsilon}_e(t)$ уравнениями скоростей указанных аномальных составляющих деформаций (2), получим:

$$\begin{split} &\sigma_{\nu}(t) = \sigma(t) - \sigma_{e}(t); \, \dot{\epsilon}(t) = V^{-1}\sigma_{\nu}(t); \\ &\epsilon(t) = \int \dot{\epsilon}(t) \mathrm{d}t; \, \sigma_{e}(t) = E \int \dot{\epsilon}_{e}(t) \mathrm{d}t; \\ &\dot{\epsilon}_{e}(t) = \dot{\epsilon}(t) - \dot{\epsilon}_{p}(t) - \dot{\epsilon}_{l}(t) - \dot{\epsilon}_{s}(t) - \\ &- \dot{\epsilon}_{ap}(t) - \dot{\epsilon}_{al}(t) - \dot{\epsilon}_{as}(t); \\ &\dot{\epsilon}_{p}(t) = P\sigma_{e}(t) |\dot{\epsilon}(t)|; \dot{\epsilon}_{l}(t) = \\ &= L\dot{\epsilon}(t) |\sigma_{e}(t)|; \, \dot{\epsilon}_{s}(t) = S\epsilon(t) |\dot{\epsilon}(t)|; \\ &\dot{\epsilon}_{ap}(t) = P_{a} |\sigma_{e}(t)| |\dot{\epsilon}(t)|; \\ &\dot{\epsilon}_{al}(t) = L_{a}\sigma_{e}(t) \dot{\epsilon}(t); \, \dot{\epsilon}_{as} = S_{a}\dot{\epsilon}(t) \epsilon(t), \end{split}$$

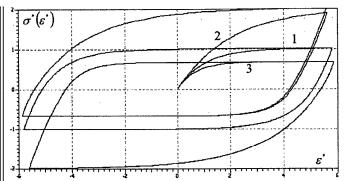


Рис. 1. Расчетные диаграммы $\sigma^*(\varepsilon^*)$ жесткого нагружения материала с нормальной пластичностью $P^*=1,0$ с равными сопротивлениями растяжения и сжатия при $P_a^*=0,0$ (1) и с дополнительной аномальной пластичностью при $P_a^*=-0.5$ (2); 0.5 (3) с разными сопротивлениями растяжения и сжатия

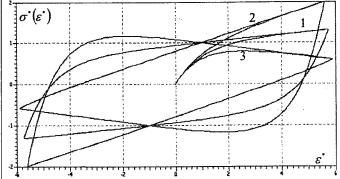


Рис. 2. Расчетные диаграммы $\sigma^*(\epsilon^*)$ жесткого нагружения материала с нормальными пластичностью $P^*=1,0$ и упрочнением $S^*=-0,065$ с равными сопротивлениями растяжения и сжатия при $S_a^*=0,0$ (1) и с дополнительным аномальным упрочнением при $S_a^*=-0,15$ (2); 0,15 (3) с разными сопротивлениями растяжения и сжатия

где $\sigma_v(t)$ — внутренне вязкое напряжение; $\dot{\varepsilon}_e(t)$, $\dot{\varepsilon}_p(t)$, $\dot{\varepsilon}_l(t)$,, $\dot{\varepsilon}_s(t)$ — скорости упругой деформации, нормальных составляющих пластической и эластической деформаций упрочнения (разупрочнения); E, V, P, L, S — модуль упругости и коэффициенты вязкости, нормальных пластичности, эластичности и упрочнения материала.

Совокупность уравнений (1) и (3) является искомой одномерной математической моделью жесткого нагружения линейноупру-

 $\sigma^{\bullet}(\varepsilon^{\bullet})$ ε $\sigma^{\boldsymbol{\cdot}}(\varepsilon^{\boldsymbol{\cdot}})$ $\sigma'(\varepsilon')$

Рис. 3. Расчетные диаграммы $\sigma^*(\epsilon^*)$ жесткого нагружения материала с нормальными пластичностью $P^*=0,15$, упрочнением $S^*=-0,085$ и эластичностью $L^*=-0,1$ с равными сопротивлениями растяжения и сжатия при $L_a^*=0,0$ (a) и с дополнительной аномальной эластичностью при $L_a^*=-0,3$ (б); 0,3 (в) с разными сопротивлениями растяжения и сжатия

гого вязкого пластичного эластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала с разными сопротивлениями при растяжении и сжатии.

В качестве примера на рис. 1—3 представлены компьютерные диаграммы σ*(ε*) зависимостей (в безразмерных координатах) внешнего напряжения нагружения, соответствующего сопротивлению материала при его жестком деформировании, от фактической полной деформации материала. Значения параметров моделируемого материала выбирались произвольно

из условий наглядного качественного отражения влияния этих параметров на вид диаграммы. Внешнее напряжение нагружения материала $\sigma^*(t)$ модель регулятора формирует в соответствии с зависимостью (1) при коэффициенте жесткости регулятора $K^*=5,0$. Заданная полная деформация $\varepsilon^*_t(t)$ поступает на вход этой модели в виде двух циклов треугольных симметричных колебаний с амплитудой $\varepsilon^*_{tmax}=6,0$ и периодом 200 с. Все представленные диаграммы рассчитывались для случая $E^*=1,0$ и $V^*=0,05$ ($V^{-1*}=20,0$).

Диаграммы были рассчитаны для материалов с нормальными и аномальными механическими свойствами, в частности, с аномальными пластичностью (см. рис. 1), упрочнением (см. рис. 2) и эластичностью (см. рис. 3). Величины коэффициентов этих свойств моделируемых материалов, принятых при расчете указанных диаграмм, приведены под соответствующими рисунками.

Сопоставление этих компьютерных диаграмм с экспериментальными, представленными в перечисленных литературных источниках, позволяет убедиться в их вполне приемлемом для инженерной практики качественном соответствии. Ранее подобное качественное соответствие было получено при сравнении компьютерной диаграммы для 24 циклов растяжения—сжатия, полученной на одномерной модели мягкого нагружения, учитывающей аномальные составляющие эластической деформации и деформа-

ции упрочнения, с экспериментальной диаграммой алюминия А-5Т [18].

Таким образом, рассмотренная одномерная модель жесткого нагружения линейноупругого вязкого пластичного эластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала может быть применена при компьютерном моделировании механических характеристик достаточно широкого ряда разнородных материалов с нормальными и аномальными пластичностью, эластичностью и упрочнением (разупрочнением), имеющих разные сопротивления при растяжении и сжатии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982.
- Трель Г.В. Модель упруговязкого пластичноэластичного упрочняющегося материала // Материаловедение. 2006. № 9. С. 21—24.
- 3. Джонс (Jones R.M.) Соотношения, связывающие напряжения и деформации в материалах // Ракетная техника и космонавтика. 1977. Т. 15. № 1. С. 16—25.

- 4. **Работнов Ю.Н.** Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука. 1977.
- Жуков А.М. Модули упругости материалов при растяжении и сжатии // ПМТФ. 1985. № 4. С. 128 — 131.
- Lawrence W.F. St., Lang T.E. A constitutive relation for the deformation of snow // Cold Regions Science and Technology. 1981. V. 4. No 1. P. 3—14.
- 7. **Кунеев В.И., Рудаев Я.И., Попов А.Г. и др.** Сверхпластичность некоторых материалов при сжатии // ПМТФ. 1976. № 3. С. 140—143.
- Ратнер С.И. К вопросу о задачах теории пластичности // Изв. АН СССР. ОТН. 1950. № 3. С. 435—450.
- Hearmon R.F. S. Wood Building materials their elasticity and inelasticity. Amsterdam: North-Holland Pub. Comp, 1954.
- 10. Василевский Р.Дж. Эффект запоминания формы в сплаве системы Ті—Nі. Эффект памяти формы в сплавах / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979.
- Регель В.Р., Бережкова Г.В. Влияние вида напряженного состояния. Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.-Л.: АН СССР, 1959.
- 12. Золотухина Л.И., Лепетов В.А. Модули упругости плоских резино-тканевых конструкций при растяжении и сжатии // Каучук и резина. 1968. № 10. С. 40—43.
- 13. Медри (Medri G.) Нелинейно-упругая модель изотропных материалов с различными свойствами // ТОИР. 1982. Т. 104. № 1. С. 30—32.
- Haimson B.C. Mechanical behavior of rock under cyclic load // Advances in Rock Mechanics. 1974. V. 2. Part A.P. 373—378.
- 15. Трель Г.В. О некоторых законах механики деформируемого твердого тела. Прочность и пластичность // Труды 9 конф. Т. 2. М.: ИПМех РАН, 1996. С. 166—171.

МВ-2011. № 11, с. 46-49. Копия 6.5.16.

Материаловедение. 2011. № 12. С. 49–52 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССОВ

УДК 539.376:519.711.2

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МЯГКОГО ОДНО-, ДВУХ- И ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Г.В. ТРЕЛЬ, канд. техн. наук

Рассмотрена возможность создания трехмерной математической модели мягкого одно-, двухи трехосного нагружения упруговязкого пластичноэластичного упрочняющегося (разупрочняющегося) материала со стационарной ползучестью на базе известных моделей мягкого нагружения материалов твердых тел. Скорость деформации стационарной ползучести принята пропорциональной упругому напряжению материала. Приведены примеры компьютерных (в безразмерных координатах) кривых ползучести материала. Сопоставление их с данными экспериментов подтвердило возможность применения предлагаемой модели для воспроизведения механических характеристик ряда разнородных материалов твердых тел.

Ключевые слова: трехмерная модель, мягкое нагружение, многомерная модель, математическая модель.

В сем материалам твердых тел, независимо от их природы, в той или иной мере присущи не только такие механические свойства как упругость, вязкость и пластич-

ность, но и ползучесть. Свойства ползучести материалов обычно характеризуют двумя видами экспериментальных кривых: кривыми ползучести полной деформации в режиме мягкого

нагружения, т.е. зависимостями полной деформации от времени до и после достижения полным напряжением нагружения заданного постоянного значения, и кривыми релаксации полного напряжения в режиме жесткого нагружения, т.е. зависимостями полного напряжения от времени до и после достижения полной деформацией заданного постоянного значения.

На кривых процесса развития полной деформации при нагружении материала обычно выделяют четыре стадии: мгновенной деформации, упругого последействия (кратковременной ползучести), стационарной (установившейся) и неустановившейся ползучести. Последняя может быть ускоренной (прогрессирующей) или затухающей (замедленной). Подобные стадии наблюдаются и на кривых ползучести в процессе разгрузки материала. Наиболее наглядно ползучесть материала проявляется на стадии стационарной ползучести при достаточно длительном действии постоянного внешнего напряжения.

Материал принимаем сплошным, однородным, изотропным, стабильным, безынерционным, линейноупругим, линейновязким, пластичным; эластичным, стационарно ползучим с линейным упрочнением (разупрочнением), находящимся в условиях изотермического режима мягкого нагружения. Напряжения и деформации считаем истинными.

В качестве базовых выберем трехмерную [1] и одномерную [2] модели мягких нагружений материала. В их основе лежит модель [3], которая учитывает только кратковременную ползучесть. Свойство стационарной ползучести опишем пропорциональной зависимостью скоростей деформаций стационарной ползучести от соответствующих упругих напряжений:

$$\dot{\varepsilon}_{cx}(t) = C\sigma_{ex}(t), \ \dot{\varepsilon}_{cy}(t) = C\sigma_{ey}(t),
\dot{\varepsilon}_{cz}(t) = C\sigma_{ez}(t),$$
(1)

где $\dot{\varepsilon}_c(t)$ — скорости деформаций стационарной ползучести; $\sigma_e(t)$ — упругие напряжения, соответственно по осям X, Y и Z декартовой прямоугольной системы координат; C — коэффициент стационарной ползучести материала.

Зависимости скоростей эластических деформаций и деформаций линейного упрочнения (разупрочнения) представим уравнениями (2):

$$\dot{\varepsilon}_{lx}(t) = L\dot{\varepsilon}_{x}(t) |\sigma_{ex}(t)|, \, \dot{\varepsilon}_{ly}(t) = L\dot{\varepsilon}_{y}(t) |\sigma_{ey}(t)|, \\
\dot{\varepsilon}_{lz}(t) = L\dot{\varepsilon}_{z}(t) |\sigma_{ez}(t)|, \, \dot{\varepsilon}_{sx}(t) = S\varepsilon_{x}(t) |\dot{\varepsilon}_{x}(t)|, \quad (2) \\
\dot{\varepsilon}_{sy}(t) = S\varepsilon_{y}(t) |\dot{\varepsilon}_{y}(t)|, \, \dot{\varepsilon}_{sy}(t) = S\varepsilon_{z}(t) |\dot{\varepsilon}_{z}(t)|,$$

где $\varepsilon(t)$, $\dot{\varepsilon}(t)$ — полные деформации и их скорости; $\dot{\varepsilon}_l(t)$, $\dot{\varepsilon}_s(t)$ — скорости эластических деформаций и деформаций линейного упрочнения (разупрочнения), соответственно по осям X, Y и Z; L, S — коэффициенты эластичности и линейного упрочнения при S < 0 (разупрочнения при S > 0).

Зависимость объемной деформации материала представим в виде [1]:

$$\theta(t) = \varepsilon_{x}(t) + \varepsilon_{y}(t) + \varepsilon_{z}(t), \tag{3}$$

где $\theta(t)$ — объемная деформация; $\varepsilon_x(t)$, $\varepsilon_y(t)$, $\varepsilon_z(t)$ — полные деформации, соответственно по осям X, Y и Z.

В уравнении внутреннего (гидростатического) напряжения упругого сопротивления объемному деформированию материала [1] коэффициент упругого объемного напряжения принимаем равным H=1, чему однозначно будет соответствовать величина коэффициента упругих поперечных деформаций $\mu_e=-0.333$. В результате это уравнение принимает вид:

$$\sigma_{e\theta}(t) = \sigma_{ex}(t) + \sigma_{ey}(t) + \sigma_{ez}(t), \qquad (4)$$

где $\sigma_{e\theta}(t)$ — упругое объемное (гидростатическое) напряжение.

Рост учитываемых моделью видов деформаций существенно увеличивает число членов в уравнениях скоростей деформаций. Для упрощения этих уравнений скорости упругих деформаций представим, например, для оси X, зависимостями в виде:

$$\dot{\varepsilon}_{ex}(t) = \dot{\varepsilon}_{x}(t) - \dot{\varepsilon}_{ux}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uy}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uz}(t),
\dot{\varepsilon}_{ux}(t) = \dot{\varepsilon}_{nx}(t) + \dot{\varepsilon}_{lx}(t) + \dot{\varepsilon}_{sx}(t) + \dot{\varepsilon}_{sx}(t),$$
(5)

где $\dot{\epsilon}_u(t)$ — скорости неупругих деформаций, соответственно по осям X, Y, и Z; μ_u — коэффициент неупругих поперечных деформаций.

Возможность подобного представления зависимости неупругой деформации от деформаций других видов была отмечена в работе [4].

Экспериментально установлено, что в области больших пластических деформаций, при представлении результатов испытаний в истинных координатах, коэффициент пластических поперечных деформаций имеет постоянную величину $\mu_p = -0.5$ [9]. Считаем, что, $\mu_u = \mu_p$.

Преобразования трехмерной системы уравнений базовой модели [1] в соответствии с зависимостями (1)—(5) позволяют получить: пля оси X

$$\sigma_{vx}(t) = \sigma_{x}(t) - \sigma_{ex}(t) - \sigma_{e\theta}(t), \dot{\varepsilon}_{x}(t) = V^{-1}\sigma_{vx}(t),$$

$$\varepsilon_{x}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{x}(t)dt, \dot{\varepsilon}_{ex}(t) =$$

$$= \dot{\varepsilon}_{x}(t) - \dot{\varepsilon}_{ux}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uy}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uz}(t),$$

$$\dot{\varepsilon}_{ux}(t) = \dot{\varepsilon}_{px}(t) + \dot{\varepsilon}_{lx}(t) + \dot{\varepsilon}_{ex}(t) + \dot{\varepsilon}_{ex}(t),$$

$$\sigma_{ex}(t) = E \int \dot{\varepsilon}_{ex}(t)dt,$$

$$\dot{\varepsilon}_{px}(t) = P\sigma_{ex}(t)|\dot{\varepsilon}_{x}(t)|, \dot{\varepsilon}_{lx}(t) = L\dot{\varepsilon}_{x}(t)|\sigma_{ex}(t)|,$$

$$\dot{\varepsilon}_{xx}(t) = S\varepsilon_{x}(t)|\dot{\varepsilon}_{x}(t)|, \dot{\varepsilon}_{ex}(t) = C\sigma_{ex}(t);$$
(6)

$$\mathbf{c}_{\mathbf{x}}(t) = S \mathbf{e}_{\mathbf{x}}(t) |\dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{x}}(t)|, \, \dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{cx}}(t) = C \sigma_{\mathbf{ex}}(t);$$
 пля оси Y

$$\sigma_{vy}(t) = \sigma_{y}(t) - \sigma_{ey}(t) - \sigma_{e\theta}(t), \, \dot{\varepsilon}_{y}(t) = V^{-1}\sigma_{vy}(t), \\
\varepsilon_{y}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{y}(t) dt, \, \dot{\varepsilon}_{ey}(t) = \\
= \dot{\varepsilon}_{y}(t) - \dot{\varepsilon}_{uy}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{ux}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uz}(t), \\
\dot{\varepsilon}_{uy}(t) = \dot{\varepsilon}_{py}(t) + \dot{\varepsilon}_{ty}(t) + \dot{\varepsilon}_{sy}(t) + \dot{\varepsilon}_{cy}(t), \tag{7}$$

$$\sigma_{ey}(t) = E \int \dot{\varepsilon}_{ey}(t) dt,$$

$$\dot{\varepsilon}_{py}(t) = P \sigma_{ey}(t) |\dot{\varepsilon}_{y}(t)|, \ \dot{\varepsilon}_{ly}(t) = L \dot{\varepsilon}_{y}(t) |\sigma_{ey}(t)|,$$

$$\dot{\varepsilon}_{sy}(t) = S \varepsilon_{y}(t) |\dot{\varepsilon}_{y}(t)|, \ \dot{\varepsilon}_{cy}(t) = C \sigma_{ey}(t);$$

для оси Z

$$\sigma_{vz}(t) = \sigma_{z}(t) - \sigma_{ez}(t) - \sigma_{e\theta}(t), \, \dot{\varepsilon}_{z}(t) = V^{-1}\sigma_{vz}(t), \\
\varepsilon_{z}(t) = \int \dot{\varepsilon}_{z}(t) dt, \, \dot{\varepsilon}_{ez}(t) = \\
= \dot{\varepsilon}_{z}(t) - \dot{\varepsilon}_{uz}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{ux}(t) - \mu_{u}\dot{\varepsilon}_{uy}(t), \\
\dot{\varepsilon}_{uz}(t) = \dot{\varepsilon}_{pz}(t) + \dot{\varepsilon}_{lz}(t) + \dot{\varepsilon}_{sz}(t) + \dot{\varepsilon}_{cz}(t), \\
\sigma_{ez}(t) = E \int \dot{\varepsilon}_{ez}(t) dt, \\
\dot{\varepsilon}_{pz}(t) = P\sigma_{ez}(t) |\dot{\varepsilon}_{z}(t)|, \, \dot{\varepsilon}_{lz}(t) = L\dot{\varepsilon}_{z}(t) |\sigma_{ez}(t)|, \\
\dot{\varepsilon}_{sz}(t) = S\varepsilon_{z}(t) |\dot{\varepsilon}_{z}(t)|, \, \dot{\varepsilon}_{cz}(t) = C\sigma_{ez}(t),$$
(8)

где $\sigma_{\nu}(t)$, $\sigma(t)$, — вязкие и полные напряжения; $\dot{\varepsilon}_{e}(t)$, $\dot{\varepsilon}_{P}(t)$ — скорости упругих и пластических деформаций, соответственно по осям X, Y и Z; E, V, P — модуль упругости и коэффициенты вязкости и пластичности материала.

Система уравнений (3) — (8) по существу является искомой трехмерной моделью рассматриваемого материала со стационарной ползучестью.

Полезность любой модели, описывающей механические характеристики поведения материала в процессе его нагружения, в конечном итоге определяется возможностью ее при-

менения при оценках прочности твердых тел. Известно, что началу процесса разрушения твердого тела предшествует процесс развития пластической деформации его материала. Установлено, что в процессе ползучести материал разрушается при «весьма малых удлинениях, значительно меньших, чем удлинение при статическом разрыве» [5], и не только на ускоренной стадии, но и на стационарной [6], В связи с этим, модель должна с максимально возможной полнотой отражать характерные особенности процессов ползучести моделируемых материалов.

Установлено, что у монокристаллов олова ползучесть имеет место при сколь угодно малых напряжениях и на начальной стадии нагружения зависимость скорости ползучести от напряжения практически линейная. Принято считать, что в изотермических условиях «скорости ползучести зависят только от напряжения». Общепринято неупругие деформации делить на мгновенные (склерономные), не зависящие от длительности нагружения при постоянном напряжении, и развивающиеся во времени (реономные), зависящие от этой длительности [4]. Деформация ползучести относится к реономным деформациям. Считается, что «накопленная со временем деформация ползучести может быть обратимой и необратимой». Обратимость наблюдается в процессе разгрузки, когда накопленная полная деформация частично уменьшается. После прекращения разгрузки и окончания упругого последействия наблюдается остаточная необратимая полная деформация. Принудительная обратимость [3] наблюдается при изменении направления нагружения.

Экспериментальные кривые ти, в частности, алюминиевого сплава Д16Т при 200 °C, нержавеющей стали и бетона при растяжении и сжатии образцов практически совпадают. У фторопласта-4 [8] участки упругого последействия в начале процессов нагружения и разгрузки, практически подобны. Свинец при 328 К имеет явно выраженные участки стационарной и ускоренной ползучести [9]. Кривая ползучести при растяжении аморфного стекловидного углерода при 2500-3000 °C имеет вид затухающей ползучести без явно выраженной стационарной стадии. При этом процесс ползучести проходит без изменения объема [10]. Ползучесть без изменения объема наблюдается и у полиэтилена низкой плотности [11].

Установлено, что при одной и той же величине растягивающего и сжимающего напряжения кривые ползучести значительно различаются только на стадии ускоренной ползучести. У алюминиевого сплава Д16 при таком циклическом нагружении на стадии затухающей ползучести после 12—13 циклов кривая ползучести стабилизируется [12].

Часть из отмеченных особенностей поведения деформации ползучести соответствует предложенной закономерности скорости ползучести (1). Остальные подтверждены представленными результатами моделирования.

Работоспособность указанной трехмерной математической модели материала со стацио-

нарной ползучестью была проверена методами компьютерного моделирования. Параметры режимов нагружения и значения коэффициентов модели выбирали так, чтобы обеспечить качественное сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Результаты моделирования для одноосного нагружения по оси X представлены в безразмерных координатах (отмечены *). На рис. 1 для одного цикла симметричных трапециидальных нагружений «растяжение—сжатие», а на рис. 2 — для трех таких циклов. Длительность каждого полуцикла нагружений t = 100. При растяжении нагружение до $\sigma_{\text{max}}^* = 1,0$ за t = 2, постоянное напряжение t = 76,

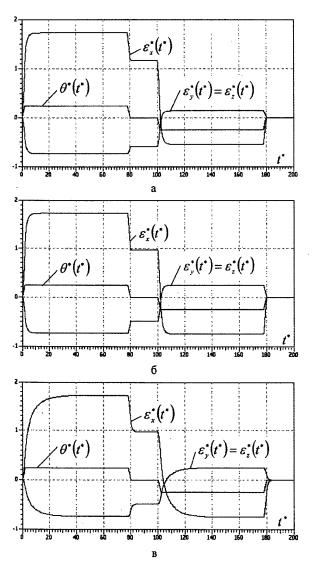
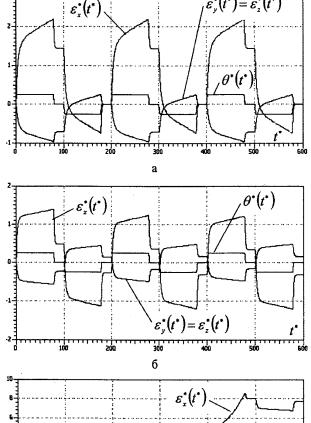


Рис. 1. Кривые изменения продольных $\varepsilon_x^*(t^*)$ и поперечных $\varepsilon_y^*(t^*) = \varepsilon_z^*(t^*)$ полных деформаций и зависимостей объемных деформаций $\theta^*(t^*)$ при модуле упругости $E^* = 1,0$ и коэффициентах вязкости $V^* = 0,2$ (a,δ) и 1,0 (a), пластичности $P^* = 1,0$ (a) и 0,5 (δ,a) и эластичности $L^* = 0,0$ (a) и 0,5 (δ,a)



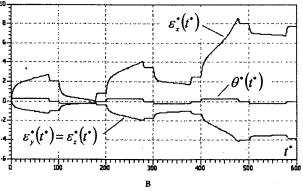


Рис. 2. Кривые ползучести и зависимости тех же деформаций при коэффициентах принятых для рис. 1, s, стационарной ползучести $C^*=0.001$ и упрочнения (разупрочнения): $a-S^*=0.0$; $\delta-S^*=-0.17$; $s-S^*=0.025$

полная разгрузка за $t^* = 2$ и выдержка без нагрузки $t^* = 20$. Аналогично для сжатия.

В качестве исходного принят материал с упругостью $E^*=1,0$, вязкостью $V^*=0,2$ и пластичностью $P^*=1,0$ (см. рис. 1,a). Для оценки влияния эластичности на кривые полных деформаций введем коэффициент $L^*=0,5$ с изменением пластичности на $P^*=0,5$ (см. рис. $1,\delta$). Это, по существу, изменило только величину остаточной пластической деформации после полуцикла растяжения. С повышением вязкости до $V^*=1,0$ (см. рис. $1,\epsilon$) явно проявляется упругое последействие (кратковременная ползучесть) не только в процессе нагружения, но и при разгрузке. Для этих трех рисунков характерно то, что после полных циклов нагружения остаточные деформации отсутствуют.

Ввод только одной стационарной ползучести $C^* = 0,001$ (см. рис. 2, a) увеличивает деформацию в процессе ползучести и не влияет на нулевую остаточную деформацию после полного цикла нагружения. Упрочнение, в частности с коэффициентом $S^* = -0,17$ (см. рис. $2, \delta$), снижает деформацию ползучести и на третьем цикле нагружения симметрирует кривую ползучести относительно временной оси, т.е. формирует стадию затухающей ползучести. При $S^* = 0,025$ (см. рис. $2, \delta$) на третьем цикле нагружения формируется стадия ускоренной ползучести.

Воспроизводимая объемная деформация $\theta^*(t^*)$ имеет упругий характер изменения и не зависит от других учитываемых свойств материала. Во всех случаях поперечные полные деформации $\varepsilon_y^*(t^*) = \varepsilon_z^*(t^*)$ по осям Y и Z полностью совпадают и имеют знак противоположный

продольной полной деформации $\varepsilon_x(t)$ по оси X, в полном соответствии со знаками коэффициентов поперечных деформаций.

Качественное соответствие расчетных кривых ползучести экспериментальным подтверждает, что представленная трехмерная математическая модель может быть применена при моделировании механических характеристик ряда разнородных упруговязких пластичноэластичных упрочняющихся (разупрочняющихся) материалов со стационарной ползучестью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Трель Г.В.** Трехмерная математическая модель мягкого нагружения упруговязкопластичного материала // Материаловедение. 2006. № 5. С. 11—15.
- 2. **Трель Г.В.** Модель упруговязкого пластичноэластичного упрочняющегося материала // Материаловедение. 2006. № 9. С. 21—24.
- 3. **Трель Г.В.** Одномерная модель мягкого нагружения упруговязкопластичного материала // Материаловедение. 2004. № 10. С. 8 12.
- 4. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Машиностроение. 1984. С. 122—124.
- Работнов Ю.Н. Некоторые вопросы теории пластичности // Вестник Московского ун-та. 1948. № 10. С. 81—91.
- 6. **Мышляев М.М.** О дислокационной структуре алюминия в процессе ползучести // ФТТ. 1965. Т. 7. Вып. 2. С. 591—599.
- 7. Gittus J. H. Dislocation creep under cyclic straining: physical model and equation // Acta Metallurgica. 1978. V. 26. № 2. P. 305—317.
- 8. **Павлов П.А., Андреев А.В.** Исследование ползучести фторопласта-4 в условиях плоского циклического напряженного состояния // Механика полимеров. 1976. № 6. С. 1099—1103.
- 9. **Елсукова Т.Ф., Новоселова Е.М.** и др. Стадии высокотемпературной ползучести поликристаллов свинца... // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 5. С. 91—99.
- Fischbah. D.B. Tensile creep behavior of glassy carbon // Carbon. 1971. V. 9. P. 193—203.
- 11. Наймарк Н.И., Зацепин А.Г., Шамов И.В. Объемные деформации при линейном растяжении некоторых твердых тел // Механика полимеров. 1973. № 2. С. 352—354.
- 12. Наместников В.С. О периодической ползучести. Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций. М.: Московский институт приборостроения, 1989. С. 62—70.

МВ-2011. № 12, с. 49-53. Копия 6.5.16.

53

Далее даны дополнительно обнаруженные <u>изобретения</u> Г. В. Треля.

1. Авторское свидетельство СССР <u>SU 483678</u>. 28.11.<u>1972</u>–5.9.<u>1975</u>. (31.5.16)*. Устройство для моделирования муфт трения. FindPatent.ru>patent/48/483678.html. Заявитель: Предприятие п/я 1658. Авторы: Горохов Ю.С., Трель Г. В., Волкова Н.А. Заявка: 1850948, 28.11.<u>1972</u>. Опубликовано: БИ № 33 – Описание: 5.9. – 23.12.1975.

Союз Советских Социалистических Республик



Государственный комитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий

ОПИСАНИЕ | (11) 483678 ИЗОБРЕТЕНИЯ

к авторскому свидетельству

(61) Дополнительное к авт. свид-ву -

(22) Заявлено 28.11.72 (21) 1850948/18-24

с присоединением заявки № —

(23) Приоритет —

Опубликовано 05.09.75. Бюллетень № 33

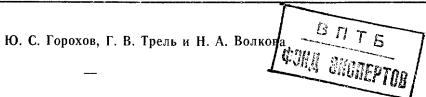
Дата опубликования описания 23.12.75

(51) М. Кл. G 06g 7/48

(53) УДК 681.333(088.8)

(72) Авторы изобретения

(71) Заявитель



(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУФТ **ТРЕНИЯ**

1

Изобретение относится к средствам вычислительной техники и может быть применено при моделировании механических систем, например, с механическими передачами, содержащими муфты трения типа предохранительных (сдающих) муфт.

Известны устройства для моделирования муфт трения, содержащие интегратор, инверторы и источник постоянного напряжения.

Однако такие устройства не учитывают за- 10 висимости коэффициента трения муфты от скорости скольжения, что снижает точность моделирования.

Целью изобретения является увеличение точности моделирования.

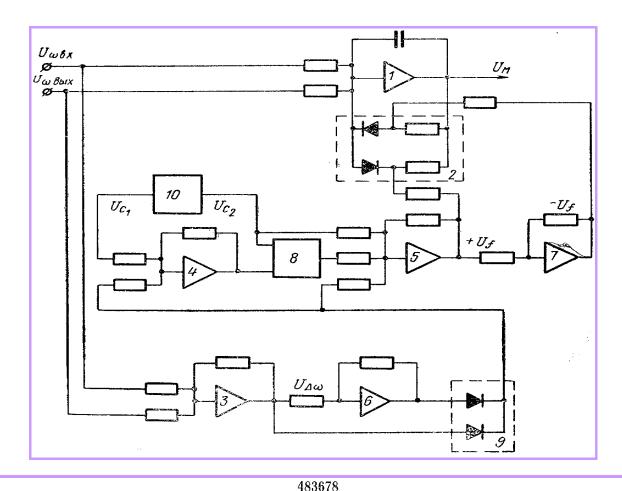
Эта цель достигается тем, что предложенное устройство содержит блок ограничения, включенный параллельно обратной связи интегратора и соединенный со входом и выходом первого инвертора, первый сумматор, выход кото- 20 рого соединен со входом второго инвертора, двухполупериодный выпрямитель, ко входу и третий сумматор. Первый вход второго сумматора и другой вход блока деления соединены с источником постоянного напряжения.

На чертеже представлена блок-схема устройства.

Устройство содержит интегрирующий усилитель 1 с блоком ограничения 2, входы которого непосредственно подключены ко входам устройства по скорости входного $U_{\infty \, \mathrm{BX}}$ и вы-5 ходного $U_{\omega \text{ вых}}$ валов муфты. Управляющие входы блока ограничения подключены к источнику опорных напряжений, содержащему сумматоры 3, 4, 5 инверторы 6, 7, блок деления 8 и двухполупериодный выпрямитель 9. Выход интегратора 1 служит выходом U_{M} устройства по передаваемому муфтой моменту.

Напряжения $U_{\scriptscriptstyle \odot\,\, {\tt BX}}$ и $U_{\scriptscriptstyle \odot\,\, {\tt BMX}}$, пропорциональные скоростям входного и выходного валов, подаются на входы интегрирующего усилителя 1 и сумматора 3. С выхода сумматора 3 напряжение $U_{\Delta\omega}$, пропорциональное скорости относительно скольжения муфты $\Delta \omega$, подается непосредственно и через инвертор 6 на двухполупериодный выпрямитель 9, собранный на диодах. С выхода выпрямителя напряжение после сложения с постоянным напряжением U_{c_1} на сумматоре 4 поступает на блок делекоторого подключены выходы первого сумматора и второго инвертора, и соединенные последовательно второй сумматор, блок деления $U_{\rm c_2}$. Одновременно напряжение $U_{\rm c_2}$. Одновременно напряжение с выхода выпрямителя $U_{\rm c_2}$ подается на вход сумматора 5, соединенного с выходом блока деления 8 и источником постоянного напряжения 10.

> После суммирования входных напряжений 30 на выходе сумматора 5 получаем напряжение



ć

 U_f , пропорциональное коэффициенту трения, которое непосредственно и через инвертор 7 в виде напряжения — U_f подается в качестве опорного напряжения на управляющие входы блока ограничения 2.

На выходе интегратора 1 получаем напряжение $U_{\rm M}$, пропорциональное передаваемому моменту муфты.

Напряжение $U_{\rm M}$ не может превосходить величин опорных напряжений $+U_f$ и $-U_f$ потому, что при достижении $+U_f$ или $-U_f$ соответствующие диоды открываются, вводя в действие обратную связь, уменьшая коэффициент усиления интегратора практически до нуля.

При $\Delta \omega = \omega_{\rm Bx} - \omega_{\rm Bux} \neq 0$ величина напряжения $U_{\rm M}$ полностью определяется величиной напряжения $U_{\rm f}$, а при $\Delta \omega = 0$, соответствующем случаю отсутствия относительно скольжения валов муфты, напряжение $U_{\rm M}$ определяется 20 упругой деформацией между валами муфты, зависящей от коэффициента жесткости муфты

Для обеспечения этого коэффициента усиление интегратора 1 выбирается пропорциональным коэффициенту жесткости моделируемой муфты трения.

4

Предмет изобретения

Устройство для моделирования муфт трения, содержащее интегратор, инверторы и источник постоянного напряжения, отличающееся тем, что, с целью увеличения точности моделирования, оно содержит блок ограничения, включенный параллельно обратной связи интегратора и соединенный со входом и выходом первого инвертора, первый сумма-15 тор, выход которого соединен со входом второго инвертора, двухполупериодный выпрямитель, ко входу которого подключены выходы первого сумматора и второго инвертора, и соединенные последовательно второй сумматор, блок деления и третий сумматор, причем первый вход второго сумматора и другой вход блока деления соединены с источником постоянного напряжения.

	Составит	ель С. Белан		
Редактор Л. Утехина	Техред Е.	Подурушина	Корректоры: и О .	В. Петрова . Данишева
Заказ 3066/16 ЦНИИПИ	Государственного к по делам изобр	Тираж сомитета Совета М ретений и открыти аушская наб., д.	Линистров СССР й	Подписно
	Типография,	пр. Сапунова, 2		

2. И. И. Коптев, Г. В. Трель, В. И. Сухомлинов. Стенд для испытания регулятора скорости транспортного средства. // Авторское свидетельство СССР. № SU 554477. МКИ: G01M17/00. Заявка: 1930557/00. 14.6.1973. Опубл.: БИ № 14 – Описание: 15.–27.4.1977. (3.6.2016)*.

CAGA.

Союз Советских Социалистических Республик



Государственный комитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий

библиотека МБА ИЗОБРЕТЕНИ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

- (61) Дополнительное к авт. свид-ву -
- (22) Заявлено 14.06.73 (21) 1930557/06 с присоединением заявки № --
- (23) Приоритет —

Опубликовано 15.04.77. Бюллетень № 14

Дата опубликования описания 27.04.77

(11) 554477

(51) M. Kл.² G 01M 17/00

(53) УДК **621.436-545** (8.880)

(72) Авторы изобретения

И. И. Коптев, Г. В. Трель и В. И. Сухомлинов

(71) Заявитель

(54) СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

1

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано в регуляторостроении.

Известны стенды для испытания регулятора скорости транспортного средства, содержащие основной и вспомогательный двигатели, соединенные при помощи дифференциального редуктора с входным валом регулятора, и задающее устройство, связанное через усилитель с вспомогательным двигателем. Из- 10 вестные стенды не позволяют воспроизводить с заданной точностью условия работы регулятора, так как вследствие больших передаваемых мощностей приводы имеют большие моменты инерции.

Для повышения точности задания оборотов в описываемом стенде на валу установлен датчик скорости, подключенный к усилителю.

На чертеже показана блок-схема описываемого стенда.

Приводной электродвигатель 1 (основной двигатель) через дифференциальный редуктор 2, а также при помощи гидронасоса 3 и гидромотора 4, образующих вспомогательный двигатель, соединен с регулятором 5. С вход- 25 ным (ведомым) валом (на чертеже не показан) дифференциального редуктора 2 кинематически связан датчик скорости (тахогенератор) 6, выход которого связан с входом усилителя 7, причем вход усилителя соединен с 30 транспортного средства, содержащий основ-

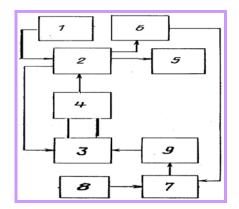
выходом задающего устройства 8, а выход усилителя 7 соединен с входом механизма управления 9.

Приводной электродвигатель 1 вращает с постоянной скоростью регулятор 5 и регулируемый гидромотор 4. Задающее устройство 8 вырабатывает управляющий сигнал, который поступает на усилитель 7. Преобразованусиленный сигнал ный управления на механизм лалее где преобразуется в перемещение регулирующего органа. Регулирующий орган механизма управления 9 изменяет производительность гидронасоса 3, что вызывает изменение скорости вала гидромотора 4. Гидромотор 4 через дифференциальный редуктор 2 воздействует на входной вал так, что колебания оборотов вала соответствуют управляющему сигналу задающего устройства 8. Для поддержания точности отработки управляющего сигнала используется обратная связь по скорости, сигнал которой вырабатывается датчиком 6, кинематически связанным с входным валом и с входом усилителя.

Применение обратной связи повышает точность задания оборотов.

Формула изобретения

Стенд для испытания регулятора скорости



554477

ной и вспомогательный двигатели, соединенные при помощи дифференциального редуктора с входным валом регулятора, и задающее устройство, связанное через усилитель с вспо-

могательным двигателем, отличающийся тем, что, с целью повышения точности задания оборотов, на валу установлен датчик скорости, подключенный к усилителю.

Составитель В. Моренко Корректор А. Степанова Редактор Л. Тюрина Техред М. Семенов Заказ 785/5 Изд. № 355 Тираж 1106 Подписное ЦНИИПИ Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5 Типография, пр. Сапунова, 2 ===========

3. A.C. CCCP SU 987636. 13.7.1981-5.9.19853. (3.6.16)*.

Устройство для моделирования муфт трения. FindPatent.ru>patent/48/483678.html.

Заявитель: Предприятие п/я 1658. Авторы: Трель Г. В., Косорукова О.В.

Заявка: 3314626/18-24. 13.7.1981. Опубликовано: БИ № 1 и Описание: 7.1.1983.



и открытий

ОПИСАНИЕ [пр 987636 ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(61) Дополнительное к авт. свид-ву

(22) Заявлено 13.07.81 3314626/18-24

с присоединением заявки Ж

(23) Приоритет

Опубликовано 07.01.83. Бюллетень № 1

Дата опубликования описания 07.01.83

(51)М. Кл³

G 06 G 7/48

(53) УДК 681.333 (8.880)

(72) Авторы

изобретения

Г. В. Трель и О. В. Косорукова

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для моделирования механических систем с парами трения, силы трения которых зависят от направления и величины относительной скорости скольжения элементов пары трения.

Известно устройство для моделирования сухого трения, содержащее резисторы и диоды в качестве нелинейных и ключевых элементов и операционный усилитель, воспроизводящее нелинейную зависимость, подобную "падающей" характеристике зависимости силы трения от скорости относительного скольжения элементов пары трения [1].

Недостатком устройства является то, что для его работы требуется два разнополярных источника входного напряжения и нелинейные характеристики используемых диодов воспроизводят только достаточно узкий класс нелинейных зависимостей, имеющих место при трении. Это отрицательно сказывается на точности моделирования из-за малой точности аппроксимации нелинейных зависимостей сил трения от скорости скольжения.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является устройство для моделирования сил трения, содержащее усилители с цепями ограничения, релейные элементы и сумматоры [2].

Недостатком этого устройства является низкая точность его работы из-за большого числа элементов и связей между ними.

Цель изобретения - повышение точности моделирования, упрощение устройства и расширение функциональных возможностей его применения.

Указанная цель достигается тем, что в устройство для моделирования силы трения, содержащее релейный усилитель, выход которого подключен к первому входу сумматора, введен двухполярный многоступенчатый блок ограничения, выход которого соединен с входом релейного усилителя и с вторым входом сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого подключен к входу двухполярного многоступенчатого блока ограничения и к третьему входу сумматора.

На чертеже схематически изображено предлагаемое устройство.

Устройство содержит двухполярный многоступенчатый блок 1 ограничения, релейный усилитель 2, сумматор 3, стабилитроны 4, резисторы 5 5 и операционные усилители 6.

Число ступеней ограничения в блоке 1 зависит от принятой точности аппроксимации характеристики трения. На чертеже в качестве примера цепи ограничения представлены выполнен- • 10 ными на резисторах со стабилитронами, что не исключает применения цепей ограничения на резисторах с диодами с дополнительными опорными напряжениями.

Устройство работает следующим образом. Напряжение со входа устройства, пропорциональное скорости относительного скольжения элементов моделируемой пары трения, непосредственно поступает на третий вход сумматора 3, одновременно входное напряжение после усиления и соответствующего ограничения в блоке 1 с выхода его поступает на второй вход сумматора 3 и на вход релейного усилителя 2, с выхода которого напряжение подается на первый вход сумматора 3. В результате алгебраического суммирования поступивших напряжений на выходе сумматора 3, т. е. на выходе устройства, вырабатывается напряжение, пропорциональное силе трения и воспроизводящее "падающий" характер зависи- 30 мости силы трения от скорости скольжения в режимах полусухого, граничного и полужилкостного трения. Переход от д"падающей" характеристики трения к "горбатой" обеспечивается простым переключением входа релейного усилителя 2 с выхода блока 1 на вход устройства по скорости относительного скольжения,

Указанное выполнение устройства, сокращая число используемых элементов и связей, всегда имеющих определенные погрешности, по сравнению с прототилом, принятым за базовый

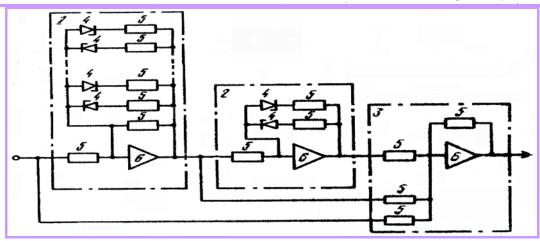
образец, дает возможность с более высокой точностью получить нелинейные зависимости силы трения от скорости относительного скольжения. Кроме того, настройкой резисторов можно отразить зависимости в режимах сухого или жидкостного трения, а также при их совокупности, т. е. устройство отражает большинство известных зависимостей силы трения от скорости относительного скольжения элементов моделируемой пары трения, что дополнительно повышает точность моделирования механических систем с парами трения, силы трения которых являются функциями скорости скольжения, и расширяет функциональные возможности применения устройства. Это позволяет моделировать механические системы с парами трения на наиболее простых и, следовательно, на наиболее дешевых аналоговых вычислительных машинах.

Формула изобретения

Устройство для моделирования силы трения, содержание релейный усиянтель, выход которого подключен к нервому входу сумматора, о тли чаю щееся тем, что, с целью повышения тослости моделирования, в него введен двухиолярный многоступенчатый блок ограничения, выход которого соединен с входом релейного усилителя и с вторым входом сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого подключен к входу двухнолярного многоступенчатого блока ограничения и третьему входу сумматора.

Источники информации принятые во внимание при экспертизе 1. Авторское свидетельство СССР № 211885, кл. G 06 G 7/48, 1967.

2. Авторское свидетельство СССР № 324636, кл. G 06 G 7/68, 1970 (прототии).



987636

Составитель В. Рыбин
Редактор Е. Кинив Техред С. Мигуиова Корректор Н. Король
Заказ 10306/38 Тираж 704 Подписное
ВНИИПИ Государственного комитета СССР
по делам изобретений и открытий
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5
Филиал ПИП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4

4. Трель Г.В. Устройство для моделирования силового канала механической передачи. //A.C. SU 968830.

COIO3 COBETCHIX Социалистических Республик



Государственный комитет CCCP по делам изобретений и открытий

ОПИСАНИЕ **ИЗОБРЕТЕНИЯ**

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(61) Дополнительное к авт. свид-ву-

(22) Заявлено 04,05,81 (21)3281290/18-24

с присоединением заявки № -

(23) Приоритет _

Опубликовано 231082. Бюллетень №39

Дата опубликования описания 23.10.82

41968830

[51] M. Kn. 3

G 06 G 7/64

(53) YAK 681.333 (8.880)

(72) Автор изобретения

Г.В. Трель

BCECO103HA9 HATEHTHO.

(71) Заявитель

Филиал Владимирского политехнического института ТЕХНИЧЕСКАЯ в г. Коврове

БИБЛИОТЕКА

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОГО КАНАЛА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для использования при моделировании систем с обратимыми и необратимыми механическими передачами.

Известено устройство для моделирования КПД механических передач, содержащее два триггера Шмидта, логическую схему сравнения знаков напряжений, клапанную диодную схему, операционные усилители, блоки переменных коэффициентов, учитывающее КПД прямого и обратного ходов обратимых и необратимых передач [1].

Недостатком этого устройства является сложность из-за применения большого числа элементов и связей между ними, что отрицательно сказывается на точности его работы.

Наиболее близким по техническому решению является устройство, содержащее два сумматора, инвертор, двухполупериодный двухполярный выпрямитель с инвертером в диагонали его диодного моста и релейный элемент с изменяемым опорным напряжением, отражающее соотношение моментов обратимых и необратимых механических передач в движении валов через КПД прямого и обратного ходов [2].

2

Недостатком известного устройства является то, что оно не отражает соотношений между моментами моделируемой передачи в покое ее валов при поворстах их в пределах переменной зоны предварительного смещения.

Цель изобретения - повышение точ-10 ности моделирования.

Для достижения цели в устройство для моделирования силового канала механической передачи, содержащее два сумматора, первый инвертор, выпрямительный мост, один вывод первой диагонали которого через второй инвертор соединен с другим ее выводом, и операционный усилитель, вход которого соединен с анодом первого и катодом • второго ограничительных диодов, а катод первого и анод второго ограничительных диодов через соответствующие резисторы соединены с выходом операционного усилителя, первый вход первого сумматора является первым входом устройства и через первый

инвертор соединен с первым входом второго сумматора, выход которого соединен с входом второго инвертора, один вывод второй диагонали выпря25

35

мительного моста черэз первый согласующий резистор соединен с катодом первого ограничительного диода, а анод второго ограничительного диода через второй согласующий резистор подключен к другому выводу выпрямительного моста, вход операционного усилителя является вторым входом устройства, а выход операционного усилителя соединен с вторым входом первого сумматора, выход которого являет- 10 ся выходом устройства и соединен с вторым входом второго сумматора, введен накопительный конденсатор, обкладки которого подключены соответственно к входу и выходу операцион-15 ного усилителя.

На чертеже представлена схема предлагаемого устройства при моделировании силового канала механических передач с одинаковыми знаками коэффициентов потерь.

Устройство содержит первый 1 и второй 2 сумматоры, первый инвертор 3, диодный мост 4, второй инвертор 5, операционный усилитель 6 с ограничительными диодными цепями 7 и 8, конденсатор 9, первый и второй согласующие резисторы 10 и 11.

Устройство имеет два входа и один выход. Входом м подключен к источнику напряжения, пропорционального или моменту на входном валу передачи или приведенному (к выходному валу без учета потерь) моменту на входном валу. Вход и подключен к источнику напряжения, пропорционального частоте вращения валов передачи.

Напряжение со входа М, пропорциональное выходному (или приведенному входному) моменту моделируемой передачи, через первый сумматор 1 и через 40 инвертор 3 поступает на вход второго сумматора 2. Коэффициенты передачи второго сумматора выбираются в соответствии с величинами коэффициентов потерь $k_{BbN}($ или $k_{BX})$ и k_{BX} (или k_{BbiX}). В результате алгебраического суммирования поступивших напряжений на выходе второго сумматора 2 вырабатывается напряжение, пропорциональное суммарному моменту переменных потерь передачи, поступающее на вход диодного моста 4 с инвертором 5. Напряжения с моста 4 в виде двух разнополярных напряжений, пропорциональных модулю суммарного момента перемен ных потерь, подаются в качестве опор-55 ных напряжений на ограничительные диодные цепи 7 и 8 операционного усилителя 6 с конденсатором 9 и обратной связи.

Напряжение со входа w , пропорцио- 60 нальное частоте вращения валов моделируемой передачи, подается на вход усилителя 6. С выхода последнего напряжение, пропорциональное в покое моменту трения покоя, соответствующего углам поворотов валов в пределах переменной зоны предварительного смещения, а в движении суммарному моменту переменных потерь передачи, подается на второй вход первого сумматора 1. В результате на выходе первого сумматора 1, т.е. на выходе устройства вырабатывается напряжение, пропорциональное приведенному входному (или выходному) моменту передачи

При моделировании передач с различными знаками коэффициентов потерь в отличии от схемы (чертеж) первый вход второго сумматора 2 непосредственно подключен к входу устройства по моменту.

Соотношение напряжений на входе и выходе устройства в зависимости от режима работы силового канала моделируемой передачи отражает соотношение моментов обратимых и необратимых передач в покое при поворотах валов в пределах переменной зоны предварительного смещения и в движении через КПД прямого и обратного ходов

$$\eta_{nx} = \frac{1 - k_{\beta X}}{1 + k_{\beta \delta JX}} \quad \text{if } \eta_{\beta X} = \frac{1 - k_{\beta \delta JX}}{1 + k_{\beta X}},$$

где k_{BX} , k_{BbIX} - коэффициенты потерь по приведенному входному и выходному моментам моделируемой передачи, для большинства передач, имеющие одинаковые знаки и только для некоторых, например, из планетарных, различны.

Таким образом, выполнение устройства в соответствии с изобретением повышая точность моделирования, позволяет моделировать системы с обратимыми и необратимыми механическими передачами с учетом режимов покоя и движения валов на достаточно простых и, следовательно, на дешевых аналоговых вычислительных машинах.

Формула изобретения

Устройство для моделирования силового канала механической передачи, содержащее два сумматора, первый инвертор, выпрямительный мост, один вывод первой диагонали которого через второй инвертор соединен с другим ее выводом, и операционный усилитель, вход которого соединен с анодом первого и катодом второго ограничительных диодов, а катод первого и анод второго ограничительных диодов через соответствующие резисторы соединены с выходом операционного усилителя, первый вход первого сумматора является первым входом устройства и через первый инвертор соединен с первым входом второго сумматора, выход которого соединен с входом второго инвертора, один вывод второй диагонали выпрямительного моста через первый согласующий резистор соединен с катодом первого ограничительного диода, а анод второго ограничительного диода через

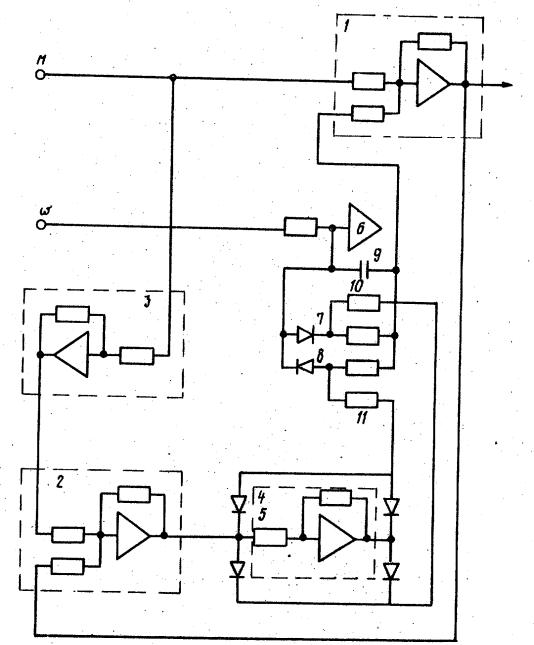
второй согласующий резистор подключен к другому выводу выпрямительного моста, вход операционного усилителя является вторым входом устройства, а выход операционного усилителя соединен с вторым входом первого сумматора, выход которого является выходом устройства и соединен с вторым входом второго сумматора, отличающее с я тем, что, с целью повышения точности моделирования, в него допол-10 тотип).

нительно введен накопительный кондейсатор, обкладки которого подключены соответственно к входу и выходу операционного усилителя.

Источники информации,

принятые во внимание при экспертизе

- 1. Авторское свидетельство СССР № 222755, кл. G 06 G 7/48, 1966.
- 2. Авторское свидетельство СССР № 205384, кл. G 06 G 7/64, 1966 (про-



Составитель И. Лебедев

Редактор Н. Рогулич Техред Т.Маточка

Корректор Л. Бокшан

Заказ 8177/78

Тираж 731

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР . по делам изобретений и открытий

113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4