

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ ДЛЯ СРЕД С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ СВОЙСТВ

М. МАНУН, Л. Н. РАБИНСКИЙ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Предлагается для моделирования роста поврежденности и эффектов деградации свойств материала использовать вариант вариационной континуальной модели накопления поврежденности. Идея предлагаемой модели изложена в работе [1] и основана на предположении о том, что плотность потенциальной энергии рассматриваемой среды зависит не только от кинематических аргументов (деформаций, градиентов деформаций и пр., но и от скалярного параметра, характеризующего накопленную поврежденность. Эффект деградации механических свойств учитывается путем введения зависимости характеристик материала от параметра поврежденности. В общем случае полагается, что поврежденность исследуемого материала может быть связана и с полями микродефектов, для которых характерна эволюция в процессе нагружения, например, с микродилатационной дефектностью – пористостью. Модель учитывает, в принципе, и эти эффекты путем введения соответствующей плотности потенциальной энергии. Предлагаемый алгоритм учета поврежденности в процессе нагружения сводится к тому, что расширенный функционал Лагранжа позволяет получить связную систему разрешающих уравнений в перемещениях и краевые условия, включающие кинетическое уравнение на параметр поврежденности. В общем случае проблема является физически нелинейной и решается методом последовательных приближений после задания закона деградации физических свойств. В случае введения линейного закона деградации параметр поврежденности определяется через плотность потенциальной энергии, что указывает на физический смысл накопленной поврежденности и зависимость ее от степени сложности используемой модели. На каждом шаге итерационного процесса используется принцип локального равновесия, а процедура построения решения аналогична методу упругих решений.

Рассматривается тестовая задача моделирования процесса поврежденности и эффектов деградации свойств на примере одномерной задачи для стержня длиной L , находящегося под действием одноосной квазистатической нагрузки (рисунок 1).

Рассмотрим плотность потенциальной энергии градиентной поврежденной модели сред, в которой вводится скалярный параметр Ω , характеризующий поврежденность. Положим, что плотность потенциальной энергии W в объеме рассматриваемой среды V (с поверхностью ∂V) определяется равенством

$$W = W_{\Omega} + k_{\Omega} \Omega^n = \frac{1}{2} E_c \varepsilon_x^2 + k_{\Omega} \Omega^n = \frac{1}{2} E_c (u')^2 + k_{\Omega} \Omega^n. \quad (1)$$

Здесь W_{Ω} – плотность потенциальной энергии среды с поврежденным модулем E_c , $\varepsilon_x = u' = \frac{du}{dx}$ – деформация; u – перемещение в направлении оси x ; k_{Ω} – физический параметр закона поврежденности, требующий экспериментального определения. Обобщенное напряжение σ_x определяется линейным соотношением Гука:

$$\sigma_x = E_c \varepsilon_x, \quad (2)$$

E_c считается зависимым от параметра поврежденности Ω . Будем говорить, что зависимость E_c характеризует модель деградации свойств рассматриваемой среды. Постулируем, что имеет место линейная аппроксимация для закона деградации:

$$E_c = [1 - k_E \Omega(\varepsilon_x)] E_o = [1 - k_E \Omega(u')] E_o. \quad (3)$$

Здесь E_o – модуль упругости идеального неповрежденного материала, для которой $\Omega = 0$.

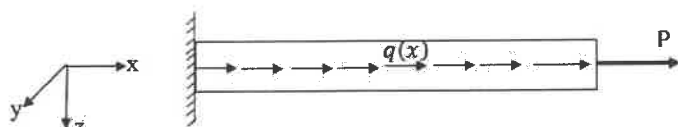


Рисунок 2 – Стержень при одноосном нагружении

Параметр поврежденности зависит от условий нагружения, граничных условий, микропараметров поврежденности, в качестве которых могут быть характеристики полей дефектов, а также, вообще говоря, от иных характеристик, ответственных за эффекты деградации [2, 3]. Следовательно, при реализации итерационного процесса на каждом шаге процесса имеет место изменение модулей упругости вследствие роста поврежденности.

Используя представление (1), сформулируем замкнутую математическую модель, включающую полную систему уравнений деформируемого тела и кинетические уравнения для параметра поврежденности.

Запишем разрешающие уравнения и краевые условия для среды с поврежденностью. Уравнения равновесия и краевые условия в результате получаются на основе вариационного принципа Лагранжа, который имеет вид [4, 5]

$$\delta \mathcal{E} = 0 \rightarrow \delta U - \delta A = 0. \quad (4)$$

Здесь $\mathcal{E}$ – расширенный Лагранжиан; $U = \int_V W dV$ – потенциальная энергия системы; A – работа внешних сил.

Связанная задача определения напряженно-деформированного состояния с учетом поврежденности, которая, в свою очередь, зависит от уровня напряжений, является нелинейной. Для решения проблемы определения поврежденности и учета ее при оценке напряженно-деформированного состояния предлагается использовать процедуру последовательного приближения.

Расчеты, проведенные для тестовых примеров, показывают, что параметр поврежденности устойчиво определяется в процессе итерационных вычислений, оставаясь в интервале от 0 до 1.

Список литературы

- 1 Лурье, С. А. Моделирование поврежденности механических свойств материалов в обобщенной градиентной теории упругости / С. А. Лурье, П. А. Белов, Д. А. Ожерелков // Материалы международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел (Москва, 20–21 января 2021 г.). – М., 2021. – С. 270–276.
- 2 Дудченко, А. А. Моделирование процессов роста поврежденности и деградации механических свойств слоистых композитов / А. А. Дудченко, С. А. Лурье. – М.: МАИ, 2019. – 160 с.
- 3 Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – М.: Московский университет, 1971. – 248 с.
- 4 Петров, В. В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / В. В. Петров. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с.
- 5 Краснов, М. Л. Вариационное исчисление / М. Л. Краснов, Г. И. Макаренко, А. И. Киселев. – М.: Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1973. – 190 с.

УДК 539.422.52

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ПОВРЕЖДЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ ПРИ УДАРЕ ФРАГМЕНТАМИ ПНЕВМАТИКА АВИАЦИОННОЙ ШИНЫ

М. И. МАРТИРОСОВ, А. В. ХОМЧЕНКО

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

ПАО «Яковлев», г. Москва, Российская Федерация

Э. А. ЗАНИНА

ПАО «Яковлев», г. Москва, Российская Федерация

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в современной авиационной технике (АТ), в том числе и для изготовления основных силовых элементов (ОСЭ). Однако данный тип материалов наряду с множеством достоинств, таких как высокая удельная прочность и жёсткость в сочетании с малым весом, высокая износостойкость, возможность создания конструкций, свойства материала которых заданы в соответствии со схемой нагружения и т. д., имеет ряд недостатков. Среди них чувствительность к нагружению из плоскости, особенно к ударам. Ударное воздействие в процессе эксплуатации может быть вызвано дискретными источниками, которые можно разделить на две группы: *твёрдые* – слабо деформируемые при ударе; *мягкие* – сильно де-