УДК 629.7.054

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

А. М. Мильцын
Кандидат технических наук, профессор, начальник отдела*
Контактный тел.: (056) 780-22-08
E-mail: miltsin@bk.ru

Д. Г. Зеленцов
Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, заведующий кафедрой**
Контактный тел.: (0562) 47-24-64
E-mail: dmyt_zel@mail.ru

В. И. Олевский
Кандидат технических наук, доцент**
**Кафедра компьютерных технологий и высшей математики
Контактный тел.: (056) 780-22-07
E-mail: volevnew@gmail.com
Украинский государственный химико-технологический университет
пр. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49000

В. В. Плетин
Инженер-математик, научный сотрудник*
Контактный тел.: (056) 780-22-08
*ТД Днепропетровский завод сварочных материалов
ул. Мониторная, 2а, г. Днепропетровск, 49130

Запропоновано концепцію прогнозування несучої здатності реальних великогабаритних оболонок з комплексом недосконалостей виходячи з випробувань зразків в умовах єдиної технології їх виготовлення. Розглянуто можливі варіанти прогнозуючої моделі та способи їх розрахунку

Ключові слова: модель, недосконалості, масштаб, прогнозування

Предложена концепция прогнозирования несущей способности реальных крупногабаритных оболочек с комплексом несовершенств по испытаниям образцов в условиях единой технологии их изготовления. Рассмотрены возможные варианты прогнозирующей модели и способы их расчета

Ключевые слова: модель, несовершенства, масштаб, прогнозирование

A concept of the prediction of bearing capacity of real large shells with imperfections based on the testing of samples of a single manufacturing methods is proposed. Possible options for predictive models and methods of their calculation are discussed

Keywords: model, imperfections, scale, prediction

1. Введение

Определение свойств реальных крупногабаритных конструкций на основе исследования моделей и построения соответствующих масштабных зависимостей является одной из главных задач теории искусственного интеллекта в механике, в частности, методов моделирования, прогнозирования, идентификации и принятия решений. В идеализированной механической схеме оно должно решаться в условиях геометрического и механического подобия конструкций, а также тождественности (подобия) материалов. Установление условий механического подобия модельных и натурных конструкций должно проводиться для двух групп параметров, характеризующих состояние объектов: первичных и вторичных. Подобие первичных факторов устанавливается на основе соотношений теорий оболочек приведением их к критериальному виду. Задача же установления подобия по вторичным факторам к настоящему времени не исследовалась из-за трудностей учета и отсутствия описания технологических несовершенств оболочек. Оценка критериев, характеризующих вторичные факторы, не определена в связи с тем, что вторичные факторы представляют собой технологические отклонения первичных и для различных технологических условий составляют различные ансамбли. В общем случае задача прогнозирования параметра несущей способности тонкостенных оболочек с учетом вторичных факторов может решаться в рамках двух технологических концепций, рассмотренных ниже.

2. Предварительный анализ задачи

Первая концепция предполагает, что технология изготовления различных по масштабу и параметру тонкостенности R/δ оболочек различна. При этом можно допустить, что механизм влияния вторичных факторов на параметр несущей способности существенно зависит от величины и соотношения первичных факторов и механизм взаимодействия вторичных факторов изменяется в зависимости от размеров оболочки. В этом случае прогнозирование осуществляется с учетом дрейфа параметра несущей способности, обусловленного масштабным эффектом в оценках коэффициентов влияния вторичных факторов. Рассмотренная концепция обладает некоторой неопределенностью относительно технологических условий изготовления тонкостенных оболочек.

Вторая концепция предполагает, что технология изготовления различных по масштабу и параметру тонкостенности оболочек идентична. При этом можно ввести следующие допущения: механизм воздействия вторичных факторов на параметр несущей способности не зависит от величины и соотношения первичных факторов и механизм взаимодействия вторичных факторов не зависит от размеров оболочек. Рассмотрим в рамках этой концепции различные случаи.

В случае, когда обеспечивается полнота представления факторов, несущая способность прогнозируется на основе стандартизированного уравнения. При этом в области прогноза величины вычисляются в тех же соотношениях к первичным параметрам, что и на модели. Геометрические параметры для оболочек различного масштаба подобны с коэффициентом подобия M. В этом случае все коэффициенты $\{b_i\}$ натурального уравнения вида $\widehat{T}=\widehat{T}(\Delta e_i)$, $i=\overline{1,N}$ являются точными (не стохастическими) функциями от вторичных параметров и при $R/\delta_i=\mathrm{const}, L_i/R=\mathrm{const}$ являются зависимыми только от масштаба M.

В случае, когда возможен разброс несущей способности S_T^2 за счет неучтенных факторов, использование полученной модели возможно при постулировании неизменности качественной взаимосвязи несовершенств с параметром несущей способности $\widehat{T}=\widehat{T}(\Delta e_i)$, $i=\overline{1,N}$. Тогда возможно два варианта учета масштаба:

- Используется полученное на одном из масштабов стандартизированное уравнение $\widehat{T}^{\circ}=\widehat{T}^{\circ}(\Delta e_i^{\circ})$ с учетом дрейфа дисперсий и средних каждого из факторов и функций отклика. При этом необходимо искать коэффициенты подобия α_i функции дрейфа вида $\widehat{T}\big|_{\Delta e_i}=\widehat{T}(M)\big|_{\Delta e_i}$ для каждого из параметров Δe_i. Тогда в натуральной модели коэффициенты $\{b_i\}$ также являются функциями масштаба $b_i=f(M)$;

- Используются полустандартизированные уравнения $\widehat{T}^{\circ}=\widehat{T}^{\circ}(\Delta e_i^{\circ})$, при этом накопление масштабного эффекта происходит за счет построения дрейфа параметра несущей способности. Предполагается, что на различных масштабах параметры несовершенств либо подобны с коэффициентом подобия M, либо имеет место разномасштабное моделирование.

3. Анализ существующих подходов к задаче прогнозирования

Исследование устойчивости тонкостенных оболочек на основе теоретических детерминированных моделей в большинстве случаев не приводит к приемлемым результатам, как по точности, так и по качественному описанию процесса, что объясняется технологическими особенностями. Поэтому изучение механических свойств натурных тонкостенных конструкций может быть эффективно лишь с учетом случайного характера изучаемого явления.

Рассмотрим некоторые важнейшие работы по прогнозированию, представляющие принципиально различные подходы. Можно выделить два подхода к решению задачи о переносе результатов лабораторных исследований на натурные объекты [1, 2, 3]: моделирование и прогнозирование. Моделирование осуществляется на основе детерминистической либо статистической теорий подобия и устанавливает гарантированную взаимосвязь параметров состояния двух сопоставляемых объектов. Прогнозирование же не требует какого-либо конкретного соотношения между исходными данными объектов и базируется на отыскании реальной связи между параметрами их состояния. В задачах прогнозирования на основе регрессионной модели, как правило, используется предположение, что относительные значения переменных прогнозирования, относящихся к исходному ряду, промежуточному интервалу и области прогноза, совместно составляют генеральную совокупность. При этом предполагается, что для оценки переменной прогноза на основе регрессионного анализа строится выборочная модель, которая может использоваться во всей области наблюдения переменной прогнозирования.

Для реализации подобия натурного и модельного объектов на основе принципов статистического подобия, изложенных в [4, 5], применительно к задаче прогнозирования несущей способности, необходимо обеспечить постоянство отношения их выборочных относительных характеристик, т.е. одновременного выполнения условий:

$$M(P)\left[M(E)\right]^{-1}\left[M(L)\right]^{-2}=\mathrm{idem};\left[M(P)\right]^{-2}\mu_2(P)=\mathrm{idem};$$

$$\left[M(P)\right]^{-3}\mu_3(P)=\mathrm{idem};\left[M(P)\right]^{-4}\mu_4(P)=\mathrm{idem};$$

$$M(E)\left[\mu_2(E)\right]^{-\frac{1}{2}}=$$

$$=\mathrm{idem};\mu_2(E)\left[\mu_3(E)\right]^{-\frac{2}{3}}=\mathrm{idem};\left[\mu_4(E)\right]^{-\frac{3}{4}}=\mathrm{idem};$$

$$\mu_3(E)M(L)\left[\mu_2(L)\right]^{-\frac{1}{2}}=\mathrm{idem};\mu_3(L)\left[\mu_4(L)\right]^{-\frac{3}{4}}=\mathrm{idem}$$

где $M(x)$ – математическое ожидание случайной величины x; $\mu_S(x)$ – S-й центральный момент величины x; P, E, L, ν – соответственно нагрузка, модуль упругости, характерный линейный размер, коэффициент Пуассона.

Однако, как указано в работе [5], требования статистического подобия являются весьма жесткими и трудновыполнимыми даже в рамках единой технологии изготовления натурных и лабораторных конструкций. Наряду с этим в работе [6] прогнозирование критического значения параметра несущей способности неидеальных тонкостенных оболочек при действии осевого сжатия основано на построении статистической регрессии. При этом в качестве определяющих параметров выбираются коэффициенты двойного ряда Фурье, описывающего начальные отклонения срединной поверхности оболочки. По результатам испытаний лабораторных образцов строится линейный предиктор, который применяется для прогнозирования в условиях геометрического подобия оболочек по первичным факторам $R'/R = L'/L = \delta'/\delta = \alpha$, тождественности материала $E' = E;\ \nu' = \nu$ и единой технологии изготовления образцов. Однако эти условия не эквивалентны условиям статистического подобия и, следовательно, не являются достаточными для обоснованного прогноза несущей способности.

Выбор регрессионного анализа для синтеза модели обеспечивает оптимальность статистических свойств полученного предиктора. Однако, выбранная линейная форма модели не соответствует характеру процесса потери устойчивости и влиянию неидеальностей тонкостенной оболочки и, поэтому, не может претендовать на полноту и корректность описания процесса взаимодействия параметров технологических несовершенств с несущей способностью конструкций. Здесь также не определены условия технологической идентичности, следовательно, условия формирования несовершенств и переноса результатов на крупногабаритные конструкции.

Среди работ, исследующих общие принципы прогнозирования, следует выделить [7, 8, 9]. При этом используется широкое трактование задачи прогнозирования, рассмотренное в [9] и учитывается возможность замены параметра времени на любой другой измеримый и значимый фактор. Тогда задача прогнозирования может рассматриваться как смешанная (статико-динамическая) задача экстраполяции. В этом случае процесс прогнозирования содержит задачу синтеза эффективной статистической модели вида

$$T = f(\Delta e_1, \Delta e_2, ..., \Delta e_n, M),$$

где $\Delta e_i (i = \overline{1,n})$ – факторы; M – переменная прогнозирования.

В [7] рассматривается ряд эффективных способов построения зависимости на основе регрессионного анализа общего вида. В частности, исследуется возможность включения переменной прогнозирования в модель как фактора. Здесь также рассматривается метод Кабашева и Керова, заключающийся в том, что для фиксированного уровня всех факторов $\{\Delta e_i\}_{i=1, i\neq k}^{n}$ строится зависимость $\Delta e_k = \Delta e_k(M)$. При этом она полагается линейной. В дальнейшем строится линейная аппроксимирующая многомерная модель, приближающая указанные зависимости. Согласно [7], предположение о линейности процесса не всегда соответствует экспериментальным данным.

В работах [7, 10] рассматривается общий алгоритм получения смешанных моделей, основанный на построении трендов для коэффициентов регрессионной статистической модели на различных уровнях прогнозирующей переменной M вида $a_i = a_{0i} + a_{1i}M + a_{2i}M^2 + ... + a_{li}M^l, \quad (i = \overline{1,n})$. Представление прогнозирующей зависимости в такой форме позволяет вести главный фактор в качестве параметра, что очень удобно при построении масштабной зависимости по данным экспериментов на нескольких фиксированных уровнях переменной M. В то же время, остается открытым вопрос о выборе области факторного пространства, в которой осуществляется построение трендов индивидуальных коэффициентов регрессии. Очевидно, в данном случае форма модели допускает обобщение на нелинейную модель путем замены $\{\Delta e_i\}_{i=1}^{n}$ на некоторую систему линейно независимых функций $\{\varphi_i(\Delta e_1, ..., \Delta e_n)\}_{i=1}^{n}$ и тем самым может быть удовлетворено требование.

Работа [12] посвящена вопросу синтезирования прогнозирующей модели методом группового учета аргументов (МГУА). Процесс прогнозирования сводится к выбору наилучшей модели, удовлетворяющей статистическим критериям и критерию селекции, который выбирается в качестве дополнительного условия для отсева моделей. При этом область исходных данных и прогнозов не разделяются, а предполагается, что экспериментальные данные для построения модели принадлежат обеим областям. Переменная прогнозирования входит как равноправная переменная в модель в вида $T = \sum_{i=1}^{l} a_i \varphi_i$ от системы линейно независимых функций $\left\{\varphi_i\left(\left(\Delta e_j\right)_{j=1}^{n}, M\right)\right\}_{i=1}^{l}$. Селекция моделей осуществляется на основе методов перебора путем многоуровневого представления исходной модели высокого порядка с большим числом членов набором более простых моделей. Важным является рассматриваемая в [12] возможность установления истинных физических взаимосвязей на базе наилучшей регрессионной модели.

Различные статистические методы прогнозирования, классификация процессов прогнозирования и подбор вида зависимости представлены в [3]. Здесь даны оценки эффективности различных структур предсказывающей модели, рассматривается возможность включения переменной прогнозирования в уравнение регрессии либо наряду с другими факторами в виде $T = f(\Delta e_1, \Delta e_2, ..., \Delta e_m; M, M^2, ...)$, либо самостоятельно. Предлагается в некоторых случаях включать прогнозирующую переменную в коэффициенты регрессии в линейном однородном виде $a_j = a_j^* M;\ \ a_j \Delta e_j = a_j^* M \Delta e_j$.

Наиболее полное трактование процесса математического прогнозирования дано в [1], где большое внимание уделяется задаче пространственной, а не временной, экстраполяции. При этом многомерная линейная экстраполяция (МЛЭ) используется как метод прогнозирования, основанный на предположении о линейности связи факторов с функцией отклика: $\vec{T} = F(\overrightarrow{\Delta e})$. Предсказанное значение $\vec{T}^*$ в новой ситуации $\overrightarrow{\Delta e}^*$ вычисляется как значение линейной модели $F(\overrightarrow{\Delta e})$ в некоторой близкой к $\overrightarrow{\Delta e}^*$ точке линейного параметризированного пространства $\{\Delta e_i\}$, определяемого матрицей результатов испытаний. Предложенный метод, однако, не позволяет построить стабильную модель и не всегда применим для реального процесса.

Таким образом, среди многообразия подходов к вопросу построения прогноза наиболее полно позволяет удовлетворить условиям, изложенным в п. 2, подход, связанный с формированием модели по экспериментальным данным.

4. Прогнозирование параметров оболочек с несовершенствами

Отметим многозначность задачи прогнозирования параметров, характеризующих механические свойства тонкостенных оболочек. Способность их сопротивляться действию внешних сил определяется первичными $\{\varepsilon\}$. вторичными $\{\Delta\varepsilon\}$ факторами и неконтролируемыми переменными $\{Q\}$. Привлечение полного ансамбля названных факторов определяет качество прогнозирования и требует комбинированного детерминистического и статистического подхода, основанного на регрессионном анализе в интерполяционной и экстраполяционной областях изменения факторов. Эта задача может быть отнесена к смешанным статико-динамическим задачам при условии формулирования подобия в технологическом смысле. В условиях комбинированного подхода задача прогнозирования решается комплексно с учетом различных иерархических уровней, соответствующих первичным $\{\varepsilon\}$ и вторичным $\{\Delta\varepsilon\}$ факторам, а достоверность прогноза по параметру несущей способности требует привлечения строгой математической основы – теории подобия. Оптимально задача прогнозирования может быть решена в условиях полного или неполного подобия, что в совокупности с условием устойчивости прогнозирующей модели приводит к принципам технологического подобия. Комбинированный подход реализуется следующим образом.

1. Устанавливаются критерии подобия по группе первичных факторов $\{\varepsilon\} = (R, \delta, L, E, \nu, ...)$ путем приведения основных соотношений и уравнений равновесия к критериальному виду на основе детерминистического подхода. Для параметров $R/\delta, L/R$ др. реализуется геометрическое подобие, а для E, ν, G – на основе теорем о простом и расширенном подобии, включающих механическую тождественность или подобие материалов [4].

2. Из группы вторичных факторов выделяются важнейшие в смысле их влияния на параметр несущей способности, при этом должна обеспечиваться достаточная полнота представления технологических несовершенств.

3. Для выбранного ансамбля вторичных факторов строится наилучшая статическая интерполяционная зависимость, выявляющая характер и степень влияния технологических факторов на несущую способность

$$T = F(\varepsilon, \Delta\varepsilon) = F(e_i, \Delta e_i) \quad (i = \overline{1,N}) \text{ или}$$

$$T = F'(\varepsilon) = F'(e_i) \ .$$

В стандартизованном (нормированном) виде имеем параметрическую многомерную зависимость вида

$$T^\circ = F^\circ(\frac{R}{\delta}, \frac{L}{R}, ..., \Delta e_i) \quad (i = \overline{1,N}),$$

где R, δ, L – значения соответственно радиуса, толщины и длины оболочки.

4. Возможно решение задачи о построении интерполяционной зависимости с учетом неоднородности по масштабу M (в случае невозможности сбора исходных данных, однородных по масштабу) $T^\circ = F^\circ\left(R/\delta, L/R, M, \{\Delta e_i\}_{i=1}^{N}\right)$ (рис. 1). Для построения зависимости несущей способности от управляемых переменных влияние неоднородности по масштабу исключается поворотом факторного пространства ортогонально к дрейфу $T^\circ = F_1^\circ(R/\delta, L/R, ..., \Delta e_i^\circ)$. В случае же неуправляемых переменных влияние дрейфа по масштабу оценивается также, как и для остальных переменных введением переменной дрейфа в число факторов матрицы наблюдений.

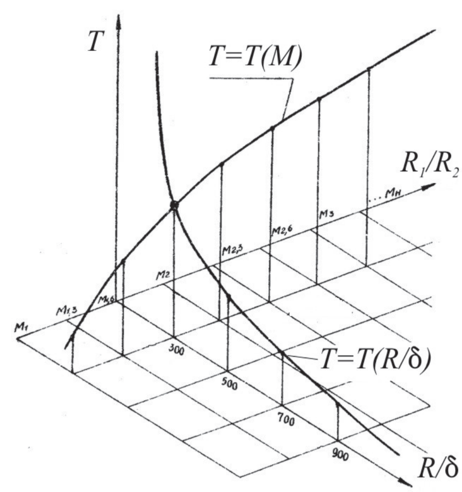

Рис. 1. Геометрическая интерпретация области исследования

5. На основе анализа действия системы силовых технологических возмущений на тонкостенные оболочки различных размеров устанавливается физическая картина формирования технологических несовершенств на оболочках различных размеров. При этом возможны два результата в зависимости от того, изменяются ли относительные размеры вторичных факторов с изменением первичных (аддитивность). Формулируются условия подобия в технологическом смысле, устанавливающие необходимые и достаточные условия существования решения о достоверном прогнозе. Для тонкостенных оболочек такими условиями являются идентичность (подобие или тождественность) материала, единство технологии изготовления, а также единообразие нагружения.

6. Проводится проверка исходных данных, характеризующих влияние неоднородности на соответствие условиям достоверности прогнозирующей модели. Для этого строится ряд моделей на неполном наборе экспериментальных данных (в частном случае, не содержащем образцов некоторого масштаба). Модели сравниваются по близости численных значений индивидуальных коэффициентов и основных статистических характеристик. В случае близости этих оценок модель признается устойчивой по исходным данным. Физический смысл устойчивости математической модели к различным наборам исходных данных, например, по параметру неоднородности М состоит в том, что этой математической моделью устанавливаются условия подобия или уровень близости технологических свойств объектов различных размеров, изготовленных в условиях единой или различной технологии. Условия статистического подобия (1) являются весьма жесткими и, следовательно, трудновыполнимыми. Исследования в [12] представляют результаты обширных экспериментов и анализа масштабных зависимостей параметра несущей способности для различных простых и комбинированных видов нагружения тонкостенных оболочек при различных технологических свойствах между сериями, а также единой технологии внутри серий. При этом оказалось, что в условиях единой технологии для ряда нагрузок, например, осевого сжатия и его комбинаций с другими нагрузками, условия статистического подобия не выполняются. Поэтому достоверность статистического прогнозирования параметра несущей способности в соответствии с [6] является недостаточной для практического использования, а задача прогнозирования требует нового комбинированного подхода.Отсюда следует необходимость исследования масштабных зависимостей параметров механических свойств однотипных геометрически подобных оболочек в условиях единой технологии изготовления.

7. Для прогнозируемого параметра несущей способности исследуется масштабная зависимость в случае аддитивного процесса. Для неаддитивного процесса исследуются масштабные зависимости по всем важнейшим технологическим факторам. При этом используется аппарат построения модели в условиях дрейфа по масштабу для оценки параметров масштабной зависимости.

8. Проводится экстраполяция масштабной зависимости по параметру масштаба и расчет свойств крупногабаритных конструкций.

5. Выводы

Приведена концепция, позволяющая получить прогнозирующую модель для расчета механических параметров реальных крупногабаритных тонкостенных оболочечных конструкций по данным модельных экспериментов в условиях единой технологии изготовления объекта и образцов. Рассмотрены возможные варианты прогнозирующей модели и способы их построения, которые дают возможность произвести корректный анализ крупногабаритной конструкции.

Литература

1. Растригин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. - М.: Машиностроение, 1986.- 116 с.
2. Мастаченко В.Н. О статистическом моделировании в строительной механике // Проблемы надежности в строительной механике. - Вильнюс, 1968. - С. 65-70.
3. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. - М.: Статистика, 1977. - 200 с.
4. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. - Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1965. - 218 с.
5. Мастаченко В.Н. О теоретических основах моделирования случайных явлений в строительной механике // Строит. механика и расчет сооружений. - 1969. - № 5. - С. 4-10.
6. Ильин В.А., Овчаров Н.П., Сукалло А.А. Статистическое прогнозирование критических нагрузок при исследовании устойчивости несовершенных цилиндрических оболочек // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. - 1975. - № 5. - С. 191-194.
7. Гончаров В.Л. Теория интерполирования и приближения функций. - М.: Гоетехиздат, 1954. - 328 с.
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. - М.: Статистика, 1973. - 392 с.
9. Растригин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. - М.: Машиностроение, 1986.- 116 с.
10. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей. - М.: Наука, 1973. - 219 с.
11. Ивахненко А.Г., Лапа В.Г. Предсказание случайных процессов. - Киев: Наук, думка; 1971. - 416 с.
12. Моссаковский В.И., Маневич Л.И., Мильцын А.М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. - Киев: Наук, думка. - 1977. - 138 с.