

С.И.Ткаченко, О.А.Комарова

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ЖЕСТКОСТНОГО МЕТОДА С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ

Совершенствование конструкций летательных аппаратов неразрывно связано не только с развитием методов их расчета на прочность и устойчивость, но в неменьшей степени и с совершенствованием экспериментальной обработки. Характерной особенностью конструкций летательных аппаратов является их тонкостенность, вследствие чего несущая способность нередко определяется местной или общей потерей устойчивости силовых элементов. Такие конструкции в связи с известными трудностями аналитического расчета особенно нуждаются в экспериментальной проверке. Однако потеря устойчивости дорогостоящего испытуемого объекта, как правило, сопровождается его разрушением, и поэтому особое значение приобретают неразрушающие методы испытаний на устойчивость.

В настоящей работе предлагается методика прогноза устойчивости, основанная на анализе определенных параметров, характеризующих эффективную жесткость конструкции. Кроме того, в процессе испытаний в ней возбуждаются ультразвуковые колебания малой мощности. Анализ изменения амплитуды этих колебаний позволяет дополнить результаты прогноза.

В основу методики положен жесткостной F/S -метод, предложенный Джоунсом и Грином /1/ и представляющий собой дальнейшее развитие метода Саусвелла /2/. Метод заключается в построении в ходе нагружения конструкции по данным тензометрии зависимости F/S от F . Под S понимается любая величина, характеризующая деформацию испытуемого объекта и определяемая в эксперименте на основании показаний тензорезисторов, F - параметр нагрузки. Зависимость F/S от F представляет собой кривую, пересекающую ось F в точке $F_{кр}$. Типичный пример F/S -кривой показан на рис.1, где $F_{кр}$ - параметр критической нагрузки. Такой вид F/S -кривая имеет в случае, когда предполагается, что вплоть до исчерпания несущей способности материал остается идеально упругим. Если же в процессе продольно-поперечного изгиба появляются пластические деформации, то критическая точка на F/S -кривой будет опреде-

даться пересечением ее не с осью F , а с некоторой прямой (предельной линией), проходящей через начало координат и составляющей с осью F угол α , тангенс которого равен $1/S_{np}$ (рис.2).

Здесь S_{np} - предельное значение деформации, при котором наступает истощение несущей способности конструкции. Оно может быть определено с помощью вспомогательных экспериментов, а при отсутствии надежных экспериментальных данных можно в качестве S_{np} брать величину, соответствующую условному пределу текучести материала.

Применение F/S -метода к сложным конструктивным элементам, где возможны как общая, так и местная потеря устойчивости, приводит к

большому разнообразию F/S -кривых, построенных по показаниям тензорезисторов. Некоторые типичные формы этих кривых приведены на рис.3.

Прямая линия, параллельная оси F (рис.3а), свидетельствует о линейной зависимости между деформациями и внешними нагрузками и может наблюдаться, например, если тензорезистор наклеен на утолщенном подкрепляющем элементе, не теряющем устойчивость в диапазоне действующих нагрузок. Искривление F/S -кривой, показанной на рис.3в, происходит за счет вовлечения этого элемента в изгиб при общей потере устойчивости. Кривая, представленная на рис.3б, получится в том случае, когда классический продольный изгиб в зоне наклейки датчика наблюдается на ранних стадиях нагружения, а далее происходит переход в нелинейную зону деформирования. Если при этом несущая способность конструкции в целом не исчерпана, то данный конструктивный элемент

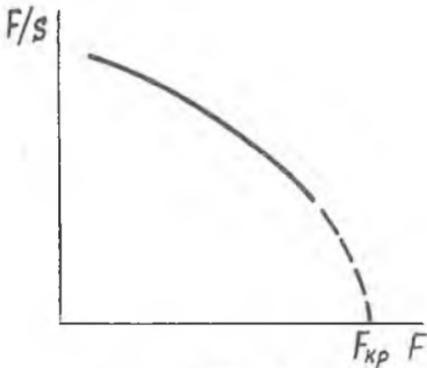


Рис. 1

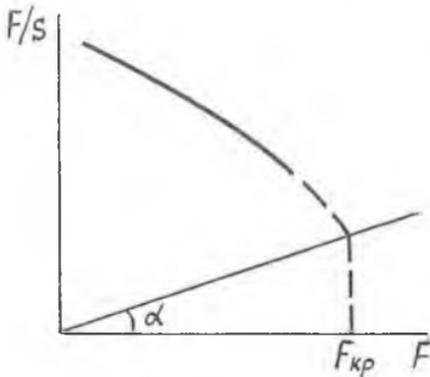


Рис. 2

да классический продольный изгиб в зоне наклейки датчика наблюдается на ранних стадиях нагружения, а далее происходит переход в нелинейную зону деформирования. Если при этом несущая способность конструкции в целом не исчерпана, то данный конструктивный элемент

будет поддерживаться в выпученном состоянии. С ростом внешней нагрузки в нем будут интенсивно возрастать деформации, что объясняет уменьшение наклона F/S -кривой. Кривая продолжается до пересечения с предельной прямой, соответствующей общей потере устойчивости.

Если конструктивный элемент имеет начальные неправильности, соответствующие формам выпучивания для высших критических нагрузок, то в процессе нагружения будет происходить перестройка волнообразования. При этом возможна смена знака деформации, измеряемой тензорезистором. В случае оболочек такая смена происходит скачкообразно, и F/S -кривые могут иметь вид, показанный на рис.3г.

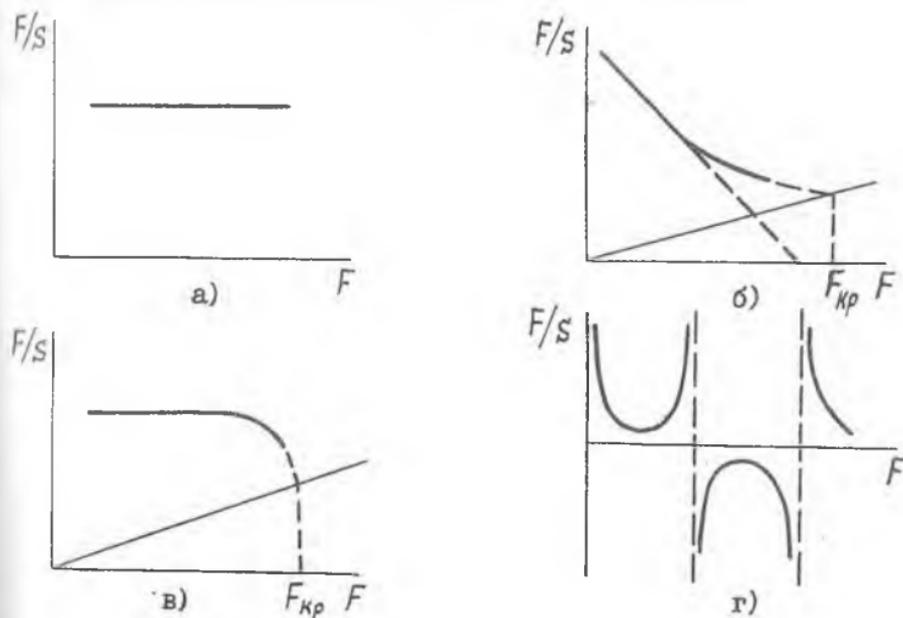


Рис. 3

При испытании сложных конструкций обычно используются показания большого числа тензорезисторов, наклеенных на различные конструктивные элементы. F/S -кривые, построенные по данным записей, могут служить для определения моментов как местной ($\bar{F}_{кр}$) потери устойчивости отдельных элементов, так и общей потери устойчивости, сопровождающейся исчерпанием несущей способности в целом. При местной потере устойчивости за счет резкого снижения эффективной жесткости конструкции все F/S -кривые претерпевают

излом (рис.4), и для правильного прогнозирования несущей способности должны экстраполироваться только последние участки кривых после излома.

Методика прогнозирования устойчивости заключается в следующем. Перед началом испытаний в ЭВМ вводят данные о количестве

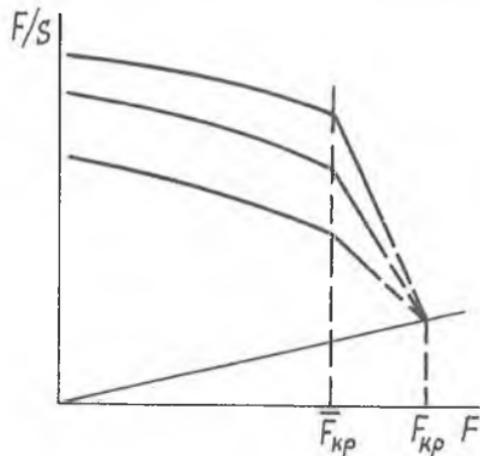


Рис. 4

тензорезисторов, величина тангенса угла наклона предельной прямой $1/\varepsilon_{пр}$, расчетное значение параметра критической нагрузки $F_{расч}$. Величина $F_{расч}$ необходима для исключения ошибочных показаний, которые могут возникнуть, например, при некачественном приклеивании тензорезисторов. Если отсутствуют надежные теоретические данные, то в качестве $F_{расч}$ могут быть использованы самые грубые оценки.

После очередного этапа нагружения с помощью информационно-измерительной системы К-732/1 - СМ-3 вычисляются значения параметра $R_{i,n} = F_n/\varepsilon_i$ по всем тензорезисторам (n - номер этапа, i - номер тензорезистора). Дополнительно с пульта в ЭВМ вводятся данные ультразвуковой системы контроля. После обработки этой информации по специальной программе ЭВМ выдает прогноз критической нагрузки на данном этапе нагружения. Далее принимается решение о продолжении испытаний, снижении этапности нагружения либо о прекращении эксперимента.

Структурная схема алгоритма прогноза устойчивости представлена на рис.5. Программа, реализующая этот алгоритм, работает в двух различных режимах. Первый предназначен для прогнозирования критических нагрузок конструкций, у которых заведомо отсутствуют явления типа местной потери устойчивости и для которых поэтому нет необходимости в использовании ультразвуковой диагностики. Во втором режиме обработка F/s -кривых ведется с учетом данных ультразвукового контроля.

Алгоритм прогноза устойчивости построен следующим образом. На каждом этапе нагружения осуществляется ввод массива значений

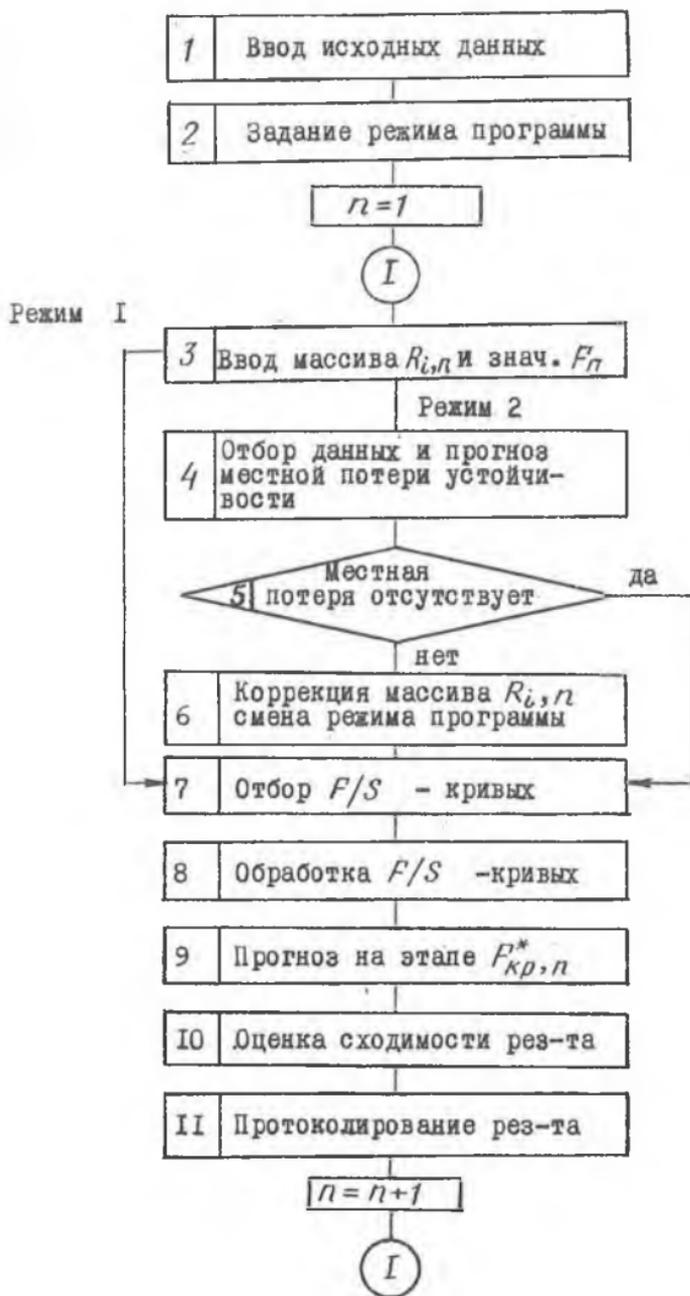


Рис. 5

параметров $R_{i,n} = F_n / \epsilon_i$ и величины достигнутой нагрузки F_n (блок 3). При работе программы в первом режиме управление передается в блок 7, где производится отбор тех F/S -кривых, которые стремятся к оси F . В блоке 8 они экстраполируются до пересечения с предельной прямой (или осью F , если $\alpha = 0$), в результате чего определяются значения $F_{i,n}^*$, дающие на данном этапе прогноз критической нагрузки по каждому тензорезистору. Далее проводится статистическая обработка полученных результатов. После осреднения (блок 9) значений $F_{i,n}^*$ производится сравнение полученной величины $F_{кр,n}^*$ с прогнозом на преддущем этапе (блок 10). В случае расхождения этих величин не более чем на 5 % выдается информация о достоверности прогноза. Затем эти результаты протоколируются (блок 11), после чего программа готова к вводу следующего массива параметров $R_{i,n}$ и значения F_n /3/. При работе программы по второму режиму дополнительно осуществляется анализ местной потери устойчивости. При этом прежде всего выполняется отбор заданного заранее количества ниспадающих кривых с минимальными значениями $R_{i,n}$ (блок 4). Эти кривые, как правило, соответствуют показаниям тензорезисторов, расположенных на элементах конструкции, обладающих малой жесткостью. По отобраным кривым выполняется прогноз местной потери устойчивости, и сообщение о величине $F_{кр}^*$ выдается на печать. Для регистрации самого момента местной потери устойчивости служит блок 5. Этот момент определяется на основании анализа F/S -кривых и по данным ультразвуковой диагностики. Считается, что произошла местная потеря устойчивости, если одновременно выполнены два условия. Во-первых, отмечено срабатывание экстрематора ультразвуковой установки /4/; во-вторых, по крайней мере одним из тензорезисторов зафиксирована смена знака деформации, либо не менее половины F/S -кривых претерпело на данном этапе нагружения излом. Если хотя бы одно из этих двух условий не выполняется, то считается, что местная потеря устойчивости отсутствует, и управление передается в блок 7. В противном случае предварительно осуществляется коррекция массива $R_{i,n}$, изменение режима работы программы со второго на первый и выдача сообщения о местной потере устойчивости. Коррекция заключается в том, что все полученные ранее значения $R_{i,n}$ при последующей обработке F/S -кривых игнорируются, и во внимание принимаются лишь данные, полученные после наступления местной потери устойчивости. В дальнейшем работа программы осуществляется по первому режиму.

Рассмотренная программа опробована при испытаниях на действие внешнего давления крупногабаритной конической оболочки, выполненной из композиционного материала. Многослойная оболочка из угле-стеклосотопласта имела ряд жестких включений, вырезов, внутренних подкрепляющих элементов. Прогнозирование устойчивости этой установки велось по второму режиму описанной программы. Рассматривались показания тензорезисторов, наклеенных по поверхности оболочки в кольцевом направлении (максимальные напряжения). Погрешность прогноза при 80 % разрушающей нагрузки составила 5,4 %. Для оценки правильности прогноза оболочка доведена до разрушения. Необходимо отметить, что в результате испытаний получено существенное (почти в два раза) уточнение критической нагрузки, найденной для данной конструкции расчетным путем.

Л и т е р а т у р а

1. Jones R.E and Greene B.E. *The force/stiffness technique for nondestructive Buckling testing.* - AIAA Paper, 1974, 351.
2. Саусвелл Р.В. Введение в теорию упругости. - М.: Государственное изд. иностранной литературы, 1948. - 674 с.
3. Ткаченко С.И., Комарова О.А. Алгоритм прогнозирования потери устойчивости элементов конструкций в ходе испытаний. - ЦНТИ "Поиск", реф. Производственно-технический опыт, 1981.
4. Ткаченко С.И. Некоторые результаты использования ультразвука при неразрушающих испытаниях на устойчивость. - ЦНТИ "Поиск"; реф. Производственно-технический опыт, 1980, № 12, с.55.