ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
Межвузовский сборник, вып. I, 1974

М.Б.Вахитов, М.С.Сафариев, А.С.Сафонов

К РАСЧЕТУ ПРОЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ РЕДУЦИРОВАНИЯ ОБШИВКИ ПО УРОВНЮ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В [2] разработан алгоритм расчета на общую прочность тонкостенной авиационной конструкции типа крыла и корпуса летательных аппаратов. В его основу положена теория тонкостенных каркасированных конструкций Ю.Г.Одинокова [4], которая построена на общепринятой идеализации работы элементов (обшивка работает только на сдвиг, а ее участие в восприятии нормальных напряжений учитывается включением присоединенной площади в площадь ребра). Для численного решения системы дифференциальных уравнений задачи использован аппарат интегрирующих матриц [I].

В [3] этот алгоритм обобщен на случай нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями. Для крыльев малого удлинения рассмотрено решение этой нелинейной задачи последовательными приближениями по способам редукционных коэффициентов В.Н.Беляева и упругих решений А.А.Ильюшина. При этом, как обычно делается во всех расчетах, было принято, что присоединенная площадь обшивки является известной и при изменении уровня напряжений остается постоянной. Однако эта площадь зависит от уровня напряжений, действующих в конструкции, т.е. заранее неизвестна.

В настоящей работе представлено обобщение результатов [3] на случай, когда присоединенная площадь обшивки в ходе расчета уточняется по уровню действующих напряжений. Предполагается, что известна зависимость присоединенной ширины пластины $b_{пр}$ от нормальных напряжений в ребрах и касательных напряжений в обшивке. Такая зависимость может быть получена из рассмотрения закритического поведения пластины, окантованной ребрами, при сложном напряженном состоянии.

Присоединенная площадь обшивки составляет обычно небольшую часть площади продольных ребер. Вследствие этого для исследования влияния ее изменения в процессе последовательных приближений (что является целью данной работы) особой точности в определении присоединенной площади обшивки, очевидно, не требуется. Поэтому здесь и принята наиболее простая методика [5].

Можно представить несколько алгоритмов расчета с учетом изменения $b_{пр}$. Ниже они рассмотрены отдельно для способа редукционных коэффициентов и метода решений.

I. Варианты алгоритма для способа редукционных коэффициентов

Задача расчета способом редукционных коэффициентов сведена в [3] к уравнению, которое в обобщенном виде можно представить так:

$$A\varphi = S, \qquad (I)$$

где A - матрица жесткостных характеристик конструкции,
φ, S - столбцы деформаций и нагрузок.

Элементы матрицы A изменяются в процессе последовательных приближений за счет редуцирования площадей (или секущих модулей).

Наиболее простое обобщение обычной процедуры расчета на случай $b_{пр}=var$ будет состоять в следующем. Вначале последовательные приближения проводятся полностью с величиной $b_{пр}$, принятой по справочной литературе, до достижения требуемой точности. Далее величина $b_{пр}$ корректируется по уровню напряжений, полученных в первом этапе, и расчет полностью повторяется с этой новой величиной $b_{пр}$. Подобная процедура повторяется до тех пор, пока разница между окончательными напряжениями в двух соседних этапах расчета не станет меньше заданной величины. Реализация этого варианта для крыла малого удлинения [ж)] показала, что требуется проводить 4-5 таких этапов расчета. Суммарное количество

ж) Расчеты проводились для одного из крыльев, исследованных в [3] (фиг. I). Точность сходимости процесса последовательных приближений принималась в 3%.

приближений m и отношение t трудоемкости расчета к трудоемкости "упругого" решения приведены в строке а таблицы I.

Таблица I

Нагрузка (в % от $P_{разр}$)		70	80	90	I00
а	m	28	43	76	I4I
	t	I3,2	I9,6	33,9	62,2
б	m	I5	2I	35	7I
	t	7,5	I0,I	I6,2	3I,8
в	m	6	II	20	40
	t	3,6	5,8	9,7	I8,3
г	m	5	I2	I6	34
	t	3,2	6,2	8,0	I5,7

Можно несколько видоизменить схему расчета и тем самым уменьшить число приближений, если в первом варианте для каждого этапа расчета в качестве исходного значения модуля принимать не модуль упругости материала E, а значения секущих модулей, полученных в предыдущем этапе расчета. Этот вариант приводит уже к меньшему числу приближений (строка б таблицы I).

Наконец, можно проводить коррекцию $b_{пр}$ на каждом шаге последовательных приближений. При этом от шага к шагу будет меняться не только секущий модуль элемента, но и его площадь за счет изменений $b_{пр}$. В этом варианте число приближений получается наименьшим (строка в таблицы I). При этом время расчета незначительно отличается от результатов расчета при фиксированной $b_{пр}$ (строка г таблицы I).

2. Варианты алгоритма для способа упругих решений

Здесь разрешающая система уравнений [3] может быть представлена в виде

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{S} + \tilde{\mathbf{S}}, \qquad (2)$$

где, в отличие от (I) появляется дополнительный член $\tilde{S}$, определяемый нелинейными составляющими деформаций, который может рассматриваться как некоторая дополнительная нагрузка.

Следует отметить, что главным достоинством способа упругих решений при фиксированной ширине $b_{пр}$ является неизменность разрешающей матрицы A в процессе итераций. В ходе расчета меняется лишь матрица $\tilde{S}$. Поэтому после определений матрицы A^{-1} приближения будут состоять в ее умножении на изменяющуюся по шагам правую часть. Следовательно, приближение по этому способу занимает очень мало времени, и в конечном счете этот способ оказывается, как показано в [3], выгоднее способа редукционных коэффициентов.

При изменяемой ширине $b_{пр}$ здесь, так же, как и в предыдущем способе, можно использовать три варианта.

В первом варианте вначале $b_{пр}$ считается постоянной, а уточняется $\tilde{S}$. Затем по уровню напряжений, полученных в первом этапе, находятся новые значения $b_{пр}$, изменяется матрица A , и расчет повторяется.

Отличие второго варианта от первого состоит лишь в том, что на каждом новом этапе в правой части (2) используется столбец $\tilde{S}$, полученный в конце предыдущего этапа.

Аналогично способу редукционных коэффициентов эти два варианта учета изменения $b_{пр}$ требуют также проведения 3-5 этапов расчета, а общая трудоемкость расчета (строки а и б таблицы 2) значительно увеличивается по сравнению с расчетом

Таблица 2

Нагрузка (в % от $P_{разр}$)		70	80	90	I00
а	m	34	8I	I68	550
	t	4,I	5,4	7,8	I7,9
б	m	I7	30	60	243
	t	3,5	3,6	4,3	9,4
в	m	7	I6	36	I74
	t	2,8	5,I	I0,3	46,0
г	m	7	I5	29	I89
	t	I,2	I,4	I,8	6,3

с фиксированной величиной $\beta_{пр}$ (строка г таблицы 2), поскольку помимо общего увеличения числа приближений в начале каждого этапа расчета приходится вновь обращать меняющуюся (за счет $\beta_{пр}$) матрицу A

Это обстоятельство еще более усугубляется в третьем варианте расчета, когда $\beta_{пр}$ корректируется на каждом шаге итераций. Тогда матрица A должна обращаться каждый раз. Чтобы избежать этого, матрица A разбивалась на две части - постоянную и переменную, а решение (2) отыскивалось на каждом шаге приближенно. Тем не менее, расчет по третьему варианту потребовал наибольшего времени (строка в таблицы 2).

Таким образом, для способа упругих решение наиболее выгодным по трудоемкости оказался второй вариант расчета.

3. Заключение

Сравнение наиболее выгодных вариантов учета изменения $\beta_{пр}$ по способам редукционных коэффициентов и упругих решений (строки в таблицы I и строка б таблицы 2) показывает, что способ упругих решений, проигрывая способу редукционных коэффициентов в числе приближений, требует вместе с тем меньших затрат машинного времени. Однако соотношение трудоемкости по сравнению с расчетами с фиксированной величиной $\beta_{пр}$ несколько изменяется в пользу способа редукционных коэффициентов (см. таблицу 3, где дано отношение времени расчета по способу редукционных коэффициентов ко времени расчета по способу упругих решений).

Таблица 3

Нагрузка (в % от $P_{разр}$)	70	80	90	100
Фиксированное значение $\beta_{пр}$	2,66	4,42	4,43	2,50
Изменяющееся значение $\beta_{пр}$	1,00	1,66	2,25	1,95

Все приведенные здесь соотношения получены в случае использования стандартных программ решения систем алгебраических уравнений и обращения матриц, имеющих порядок не более 58 ÷ 60. При расчетах сложных конструкций могут потребоваться программы, оперирующие с более высокими порядками матриц. Тогда, естественно, может измениться и соотношение трудоемкости расчета по этим способам. Это обстоятельство следует учитывать при выборе того или иного способа расчета.

В заключение необходимо отметить, что расчеты показывают заметное изменение $b_{пр}$ (до 20 ÷ 25%) по сравнению со значениями, рекомендуемыми справочной литературой. Это, естественно, вызывает изменение как картины распределения напряжений в элементах конструкции, так и разрушающей нагрузки. На рис. I представлено,

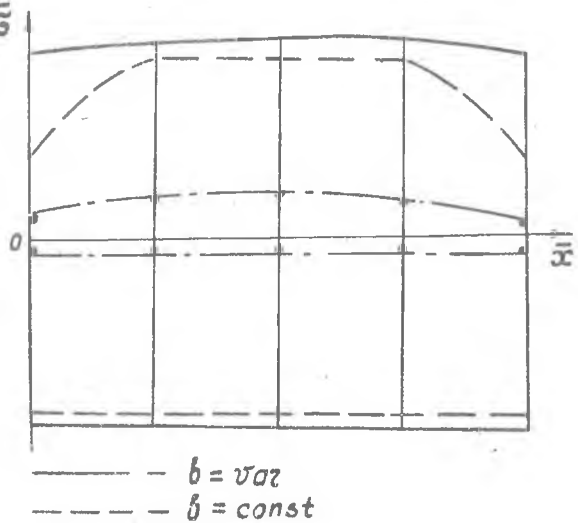

Рис. I.

например, изменение картины распределения нормальных напряжений в сечении заделки одного из крыльев малого удлинения для нагрузки, близкой к предельной, за счет учета изменения $b_{пр}$ по уровню напряжений.

Литература

I. Вахитов М.Б. ИВУЗ "Авиационная техника", № 3, I966.
2. Вахитов М.Б., Сафонов А.С. Труды КАИ, вып. II8, I970.

3. Вахитов М.Б., Сафонов А.С. ИВУЗ "Авиационная техника", № 2, I972.
4. Одиноков Ю.Г. Труды КАИ, вып. I8, I946.
5. Стригунов В.М. Труды ЦАГИ, вып. 435, I939.