

составлена программа для машины «Урал-2», реализующая указанный метод расчета сложных упругих систем с числом неизвестных перемещений порядка 300. Разработанные принципы кодирования матриц и выполнения операций с ними могут быть использованы на других машинах.

Выполнен расчет типичной конструкции части крыла с изменяемой стреловидностью вблизи шарнира, которая состоит из собственно шарнира, клиновидного кессона, проушин и переходного участка в виде пространственной системы пластинок, соединяющей клиновидный кессон и проушины с обычной коробчатой конструкцией крыла. Исследование распределения напряжений от единичных моментов и перерезывающей силы, приложенных в шарнире, позволило выяснить интересные и несколько неожиданные особенности работы этой конструкции. Исследование влияния изменения жесткости элементов шарнира на распределение усилий в конструкции показало, что можно вести расчеты значительно проще без большого снижения точности, если считать шарнир абсолютно жестким.

При расчете мест типа стыка кия со стабилизатором усилия в лишних связях в стыке довольно легко могут быть найдены по методу сил с определением необходимых податливостей через матрицы жесткости частей кия и стабилизатора около стыка, вычисляемых по указанному методу.

Приближенный расчет стенок с учетом наклона панелей обшивки к срединной плоскости показал, что потоки касательных сил в стенках сильно зависят от этих наклонов, и для более точных расчетов необходимо панели обшивки аппроксимировать пространственно расположенными элементами.

В. А. Комаров

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ БЕЗМОМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются композиции из высокопрочных волокон и связующего. Считается, что все усилия воспринимает волокно и справедлива гипотеза монолитности.

В работе автора «О рациональном распределении материала в конструкциях» (Изв. АН СССР, «Механика», № 5, 1965) для одного случая нагружения получен алгоритм отыскания наиболее жесткого распределения заданного объема волокна по известным возможным направлениям укладки. Доказано, что это распределение армирующего материала обеспечивает минимальный уровень максимальных напряжений в волокнах, т. е. дает конструкцию минимального веса при заданной величине допускаемого напряжения. Указан способ применения алгоритма для приближенного решения задачи об оптимальном ориентировании волокна путем задания большого числа возможных направлений укладки волокна в каждой точке конструкции. Расчеты, выполненные по этому алгоритму, показали удовлетворительную его сходимость — для инженерных целей достаточно 5—10 итераций. В примерах с возможными направлениями укладки волокна, два из которых отличаются не более, чем на 10° от оптимальных на данную нагрузку, наблюдается увеличение потребного объема волокна на величину порядка 30%.

Для отыскания равнопрочных конструкций на несколько случаев нагружения предложен следующий алгоритм.

1. Конструкция разбивается на достаточно малые элементы, в пределах которых изменением усилий и ориентации волокон можно пренебречь.

2. Задаются возможные направления укладки волокна в каждом элементе и начальное распределение армирующего материала в виде суммарных толщин слоев однонаправленных волокон — δ_{oij} (i — номер элемента; j — номер направления укладки в панели i).

3. Определяются потоки усилий в каждом однонаправленном слое волокна элементов конструкции от всех случаев нагружения и выбираются максимальные — X_{oij}^{\max} .

4. Определяются новые толщины слоев через допускаемые напряжения и максимальные усилия в них

$$\delta_{oij} = \frac{X_{oij}^{\max}}{[\sigma]}$$

5. Новые толщины слоев принимаются вместо начального распределения материала, и расчет повторяется несколько раз до получения достаточно малых отклонений максимальных напряжений в невырождающихся слоях от допускаемых.

В пробных расчетах рассматривался прямоугольный элемент, нагружаемый по краям различными комбинациями равномерных потоков усилий N_x , N_y , N_{xy} . Через деформации элемента ϵ_x , ϵ_y , γ выражались деформации волокон, расположенных в плоскости элемента, и напряжения в них. Из условия равенства усилий в волокнах и внешней нагрузки на границах элемента определялись величины деформации и усилия в однонаправленных слоях волокна.

По описанному алгоритму и схеме расчета усилий в прямоугольном элементе инженером Вильчеком М. И. и студентом Данилиным А. И. составлена программа для ЭВМ «Урал-2», которая позволяет учитывать до 36 любых возможных направлений укладки волокна и до 8 случаев нагружения. Вычислительные эксперименты по изучению влияния укладки волокна на прочность и деформации элемента в различных случаях нагружения, проведенные с использованием этой программы, показали следующее:

а) при нескольких случаях нагружения алгоритм приводит с заданной точностью к распределению волокна, при котором в однонаправленных невырождающихся слоях максимальные напряжения равны допускаемым, а в вырождающихся слоях — меньше допускаемых;

б) инженерная точность решения достигается также за 5—10 итераций;

в) потребный объем армирующего материала, который определялся после каждой итерации из условия равенства наибольшего напряжения в волокнах допускаемому, во всех примерах оказывался наименьшим в равнопрочном (по п. а) решении;

г) обнаружен ряд примеров, где при некоторых возможных направлениях укладки волокна равнопрочная конструкция оказывается легче, чем равнопрочная конструкция с такими же нагрузками, но дополнительными возможными направлениями. Причем, если бы в первую равнопрочную конструкцию заложить бесконечно малые количества волокна по дополнительным направлениям, то максимальные напряжения в них оказались бы выше допускаемых. Эти примеры имеют важное значение для правильной постановки задачи об оптимальном армировании и показывают, что в отличие от одного случая нагружения, при нескольких случаях нагружения задачу определения оптимальных направлений укладки нельзя решить за счет вырождения некоторых слоев при отыскании равнопрочного распределения волокна в конструкции с большим числом возможных направлений укладки.

Для расчета напряженного состояния тонкостенных безмоментных конструкций может быть применен метод конечного элемента. Наиболее простым является треугольный элемент с линейным распределением перемещений. Каждый треугольный элемент пластины можно представить как сумму подэлементов из одинаково направленных волокон, а матрицу жесткости подэлемента вычислить по такой схеме: через перемещения узлов выразить компоненты деформаций элемента ϵ_x , ϵ_y , γ , далее через них выразить деформации волокон и вычислить матрицу жесткости путем применения принципа виртуальной работы Лагранжа. Подобный прием использован в работе автора «Расчет крыла малого удлинения как пластины переменной жесткости» (Тр. КуАИ, вып. 32, 1968) при учете произвольно ориентированных стрингеров.

О. А. Горячев

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ТОНКОЙ УПРУГОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

В инженерной практике приходится иметь дело с оболочками, отдельные участки которых нагружены различно и могут отличаться механическими свойствами материала. Различие механических свойств может возникнуть как в процессе изготовления (ослабление прочностных свойств в процессе сварки), так и в процессе эксплуатации (ослабление прочностных свойств в результате нагрева отдельных участков оболочки).

Все возрастающие требования к весовому совершенству конструкций приводят к необходимости проектировать оболочки переменной толщины, тем более, что возможности современного производства позволяют изготавливать такие оболочки, например, методом химического фрезерования. Поэтому не вызывает сомнений актуальность задачи по созданию метода расчета, позволяющего находить оптимальное распределение материала в цилиндрической оболочке, при произвольном виде нагружения и переменных механических свойствах материала.

Под оптимальной оболочкой в настоящей задаче понимается оболочка, отвечающая условию прочности и обладающая наименьшим весом.

В оболочке в общем случае имеет место сложное напряженное состояние, поэтому для составления условия прочности необходимо воспользоваться одной из теорий прочности.

В настоящей задаче за основу принята четвертая (энергетическая) теория прочности, которая для пластических материалов хорошо согласуется с опытными данными.

Для случая моментного напряженного состояния приведенные напряжения по толщине оболочки распределяются неравномерно и определяющими будут наибольшие по величине приведенные напряжения, т. е. условие прочности запишется в виде

$$\sigma_{\text{пр}}^{\text{наиб}} \leq [\sigma].$$

Можно показать, что для оболочки, обладающей наименьшим весом, наибольшие по величине приведенные напряжения по всей оболочке должны быть равны допускаемым напряжениям, т. е. оптимальная оболочка есть оболочка равных наибольших приведенных напряжений.

Расчет оптимальной оболочки сведен к итеративному процессу по специальному алгоритму и предполагает применение быстродействующих электронных вычислительных машин.