Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

К. А. Кубышкин, Методика подготовки данных о геометрии слоёв лопатки ГТД, изготовленной из композиционных материалов, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 1998, выпуск 6, 142–146

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu21>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.85.7.115

26 апреля 2023 г., 17:58:33

положив $\dot{\delta} = \dot{\delta}_0$.

3. По формуле (17) вычисляется распределение плотности $\dot{\delta}_v^{(1)}$ вихревого тока.
4. Вновь рассчитывается поле $\dot{\mathbf{B}}$, полагая в (18) $\dot{\delta}(\mathbf{M}) = \dot{\delta}_0(\mathbf{M}) + \dot{\delta}_v^{(1)}(\mathbf{M})$ и так далее.

Распределение плотности
вихревых токов по объёму диска

Приведённый алгоритм реализован в виде программы. С помощью программы осуществлялось численное моделирование распределения вихревых токов по объёму диска для определения оптимальной формы индуктора, при которой достигалось бы равномерное распределение по радиусу диска. Результаты расчёта программы представлены на рисунке. В данном случае индуктор имеет форму «сердечка» и параллелен поверхности диска. Более тёмные участки на рисунке соответствуют более высокой плотности вихревых токов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975.
2. Данилушкин А.И., Еленевский Д.Е., Котенёв В.И. и др. АСУ процессами многофакторных испытаний на специализированном стенде для прочностной доводки элементов конструкций // Проблемы прочности. №5. 1990.
3. А.с. 1362240 СССР, МКИ G 01 M 15/00, 13/00. Стенд для термоциклических и разгонных испытаний дисков турбоагрегатов / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Л.С. Зимин и др. – №4079517/25–06.
4. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967.
5. Г. Корн, Т. Корн Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968.

УДК 678.5

К.А. Кубышкин

МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ О ГЕОМЕТРИИ СЛОЕВ ЛОПАТКИ ГТД ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлен алгоритм расчета геометрии слоев лопаток газотурбинных двигателей, изготовленных из слоистых композиционных материалов. Достигнута высокая точность построения наружных и внутренних слоев, составляющих лопатку.

Перо лопатки ГТД представляет собой лопасть переменного поперечного сечения, формируемую по спинке и корытцу поверхностями двойной кривизны сложного очертания и точно ориентированную в пространстве по отношению к замку. Требуемая точность изготовления этих поверхностей лопатки составляет десятые и даже сотые доли миллиметра.

Лопатки ГТД из слоистых композиционных материалов изготавливаются методом навивки из цельнокроеной заготовки или наложением отдельных слоев с последующей пропиткой и прессованием в пресс-форме.

Высокая требуемая точность изготовления внешних поверхностей лопатки требует и высокой точности изготовления разверток слоев лопатки в процессе их производства.

Обводы внешних поверхностей лопатки и профили ее поперечных сечений получают в процессе газодинамического проектирования тракта ГТД. Результаты этих расчетов приводятся в конструкторской документации в виде таблиц, описывающих (принятым в аэрогазодинамике способом) координаты точек теоретических профилей десяти-пятнадцати поперечных сечений лопатки по ее длине.

Для подготовки процесса производства лопаток и проведения прочностных расчетов необходимо разбить поперечные сечения лопатки на слои заданной толщины по спинке и по корытцу. Толщина слоя

должна быть равна толщине материала препрега в отформованном состоянии и в принципе может быть различной для разных слоев лопатки.

Получение геометрии слоев лопатки из данных приводимых в конструкторской документации вручную без применения ЭВМ практически неосуществимо.

В доступной научно-технической литературе мало сведений о методах, алгоритмах или программах ЭВМ, позволяющих выполнить эту работу.

Р и с. 1. Поперечное сечение лопатки, задаваемое в конструкторской документации

Это обстоятельство обусловило необходимость разработки методики, алгоритма и программы для ЭВМ, позволяющих получить геометрию слоев лопатки из информации, приводимой в конструкторской документации.

В типовой чертежной конструкторской документации точки теоретических профилей спинки и корытца лопатки задаются в виде таблицы.

На рис.1 изображен вид типового поперечного сечения лопатки с расшифровкой геометрических параметров, приводимых в таблице. На этом рисунке X-X – ось двигателя, плоскость K – ось замка лопатки.

Задание точек профилей спинки и корытца в чертежной документации

Сечение	A1 - A1			...			A15 - A15		
Z	-12			...			340		
J	1			...			15		
N точки	X _{ij}	Y _{ij1}	Y _{ij2}	X _{ij}	Y _{ij1}	Y _{ij2}	X _{ij}	Y _{ij1}	Y _{ij2}
1	-92,966	-24,228	-26,005	...	...	...	-79,751	-14,802	-15,995
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
16	73,207	-17,061	-18,356	...	...	...	67,799	-15,484	-16,762
R1 _j	0,803			...			0,588		
R2 _j	0,589			...			0,593		
X1 _j	-92,163			...			-79,745		
X2 _j	72,618			...			75,840		
Y1 _j	-24,586			...			-30,746		
Y2 _j	-17,384			...			-23,746		
UF _j	-2°21'36"			...			10°23'45"		
C MAX _j	6,735			...			2,432		
B1 _j	92,966			...			90,756		
B2 _j	73,207			...			65,847		
B _j	166,330			...			140,345		

В таблице использованы обозначения:

X_{ij}, Y_{ij1}, Y_{ij2} - координаты профиля поперечного сечения для спинки и корытца соответственно;

j - номер сечения по длине лопатки;
 Z - расстояния по оси Z , соответствующие номеру сечения j ;
 $R1_j, R2_j$ - радиусы кромок входного и выходного сечений;
 $(X1_j, Y1_j), (X2_j, Y2_j)$ - координаты центров окружностей радиусов $R1_j$ и $R2_j$;
 UF_j - угол поворота сечения;
 $C_{\max j}$ - максимальная толщина лопатки в сечении;
 $B1_j, B2_j$ - расстояния от кромок до оси OY ;
 B_j - хорда.

На чертеже лопатки указаны координаты точек теоретического профиля спинки и корытца только внешних поверхностей лопатки. Для определения геометрии слоев лопатки строится сетка эквидистант к поверхностям спинки и корытца, распространяющаяся внутрь (в тело) лопатки.

Каждая эквидистанта отстоит от соседней на величину отпрессованной толщины слоя материала. Линии внешних поверхностей лопатки и каждая эквидистанта слоя аппроксимируются полиномом n -ой степени методом Ньютона [1].

Степень полинома n задается количеством заданных в программу с чертежа точек. Точки выбираются плотно в начале и в конце кривой, так как в этих местах кривизна линии максимальная. Этих точек, как правило, 4-6 с каждой стороны и их приходится брать все без исключения. Для описания средней части выбираются недостающие точки из середины профиля. Выбор точек из середины профиля осуществляется равномерно. Результаты проведенных расчетов показали, что для описания применяемых в практике теоретических профилей лопаток необходимо задавать от 8 до 13 точек. Меньшее количество точек приводит к большим погрешностям описания профиля, а большее приводит к негладкости аппроксимирующего полинома.

При построении эквидистант полином аппроксимируется непрерывной ломаной линией с шагом между соседними получаемыми точками от 0,2 до 0,3 мм. Дальнейшее уменьшение шага незначительно повышает точность, но существенно увеличивает время расчета.

Задача сводится к построению линий, ограничивающих внутренние слои спинок и корытца, т.е. к построению эквидистант, отстоящих друг от друга на расстояние, равное толщине отпрессованного слоя материала, начиная от уже известных внешних слоев. Построение ведется поочередно, чередуя нахождение кривых спинки или корытца. Построение можно начинать как со спинки, так и с корытца. Например, найдя слой спинки (корытца), следующим надо искать слой корытца (спинки).

Р и с. 2. Построение точки эквидистанты

Аппроксимирующая полиномом непрерывная ломаная линия состоит из отрезков прямых, соединяющих две соседние точки. Рассмотрим первую пару точек $A(X_1, Y_1)$ и $B(X_2, Y_2)$ (рис. 2). Необходимо найти точку эквидистанты $C(X, Y)$. Методика нахождения этой точки заключается в том, что через точку (X_1, Y_1) проводится прямая a , перпендикулярно прямой, проведенной через точки (X_1, Y_1) и (X_2, Y_2) . Искомая точка находится на прямой a на расстоянии H от точки (X_1, Y_1) . Найдем величины Δx и Δy . Прибавив эти величины к координатам точки, получим координаты новой точки. По рис. 2 определяем

$$\cos \alpha = \frac{\Delta y}{h}, \quad \sin \alpha = \frac{\Delta x}{h}, \quad (1)$$

где α - угол наклона прямой $(X_1, Y_1)-(X_2, Y_2)$ к оси ОХ.

Угол наклона α можно рассчитать исходя из координат двух известных точек

$$\alpha = \arctg \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и выражая Δx и Δy , получим

$$\Delta x = h \sin \left(\arctg \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right) \right), \quad \Delta y = h \cos \left(\arctg \left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \right) \right).$$

Перебирая поочередно пары точек известной ломаной линии, получаем массив новых точек, описывающих искомую эквидистанту.

Для нахождения последней точки эквидистанты используется вышеописанный алгоритм, но расстояния находятся не от одной, а от обеих точек последнего отрезка.

В процессе нахождения новых точек важным становится выбор направления, так как вновь рассчитанная точка может лежать в двух полуплоскостях относительно отрезка АВ. Направление определяется знаками величин Δx и Δy и зависит от того, какая кривая строится (спинка или корытце). В случае, если строится линия спинки:

- знак при Δy отрицательный, если X_1 меньше X_2 и положительный, если X_1 больше или равно X_2 ;
- знак при Δx положительный, если Y_2 больше или равно Y_1 и отрицательный, если Y_2 меньше Y_1 .

В случае, если строится линия корытца:

- знак при Δy отрицательный, если X_1 больше или равно X_2 и положительный, если X_1 меньше X_2 ;
- знак при Δx отрицательный, если Y_2 больше или равно Y_1 и положительный, если Y_2 меньше Y_1 ;

Нахождение касательных в точке нерационально из-за больших временных затрат, требуемых на нахождение производных в точке.

Расчет останавливается, когда максимальное расстояние между последними найденными кривыми спинки и корытца меньше толщины отпрессованного слоя материала.

В результате применения алгоритма генерируется массив точек, описывающих все слои, составляющие лопатку.

Профиль в сечении лопатки является замкнутой линией и образуется кривыми спинки, корытца, входной и выходной кромками. Последние являются дугами окружностей. На рис. 3 показана входная кромка и ее основные геометрические параметры: внешний радиус R_1 ; точки C_1 и K_1 сопряжения кромки с профилем; точки Б, разделяющие профиль на спинку и корытце; h - толщина отпрессованного слоя материала. Аналогично представляется и выходная кромка. Точки C_1 и K_1 заданы в чертежной документации.

Для построения радиусов кромок слоев необходимо найти точки сопряжения спинок и корытца Б. Радиус R_i уменьшается на величину h в процессе перехода от слоя к слою в глубь лопатки.

Проведем прямую a_c , проходящую через точки C_1 , О и прямую a_k , проходящую через точки K_1 , О. Прямая a_c пересечет линии, ограничивающие слои спинок в точках C_i , C_i . Прямая a_k пересечет линии, ограничивающие слои корытца в точках K_i , K_i . Кромки будут строиться по дугам окружностей, проходящих через точки C_1 , B_1 , K_1 ; C_i , B_i , K_i и т.д.. Точки B_1 , B_i находятся на прямой b , которая проходит через точку О и является биссектрисой угла C_1 , О, K_1 . Необходимо найти координаты точек C_i , B_i , K_i .

Координаты точки C_i находятся по следующим формулам:

$$X_i^C = X_0 - \frac{(X_0 - X_1)}{R_1}, \quad Y_i^C = Y_0 - \frac{(Y_0 - Y_1)R_1}{R_i}.$$

Аналогично находятся координаты точки K_i .

Обозначим через l расстояние $B_i C_i$, а через k - расстояние $B_i O'$.

Координаты точек B_i определяются исходя из решения системы уравнений:

$$l^2 = (X_i^B - X')^2 + (Y_i^B - Y')^2;$$

$$k^2 = (X_i^B - X_i^C)^2 + (Y_i^B - Y_i^C)^2.$$

Для определения длин отрезков l и k необходимо найти координаты точки $O'(X', Y')$. Она является серединой отрезка C_iK_i . Следовательно,

$$X' = \frac{X_i^C + X_i^K}{2}; \quad Y' = \frac{Y_i^C + Y_i^K}{2}.$$

Длина отрезка k будет равна R_i без расстояния OO' (координаты точек O и O' известны).

Длина отрезка l определяется следующим образом:

$$l = \sqrt{k^2 + (X_i^C - X')^2 + (Y_i^C - Y')}$$

Р и с. 3. Входная (выходная) кромка лопатки

По описанному алгоритму составлена программа для ЭВМ на языке Паскаль в среде Delphi 2.0. Рассчитаны слои лопаток для некоторых конкретных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1986.

УДК 621.365.5

Л.С. Зимин

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассматриваются вопросы возникновения вибрации и шума мощных индукционных нагревателей, предназначенных для нагрева прямоугольных заготовок большого поперечного сечения, например, слябов.

Электромагнитные процессы в индукционной нагревательной установке (ИНУ) характеризуются не только выделением тепловой энергии, но и объёмной плотностью электромагнитного поля (ЭМП) и связанными с ней электродинамическими усилиями, приводящими к появлению вибраций и шума. Таким