

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАНТОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОНФИГУРАЦИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ширинкин В.В.¹, Макаров В.Ф.², Мешкас А.Е.³, Койнов И.И.⁴

(ПНИПУ, ^{1,3}АО «ПЗ «Маши», г. Пермь, Российская Федерация)

¹89091002247, (342)262-65-30, v-shirinkin@mail.ru, ²89124915014, (342)219-82-36, makarovv@pstu.ru, ³89638777227, (342)262-64-13 a-meshkas@mail.ru, ⁴89223757723, i-koinov@mail.ru)

Abstract: The paper discusses methods of mathematical modeling for the design of the cutting tool. The authors describe the analytical model, which contribute to the process of designing a cutting tool and the creation processing. The article describes the results of using the software to build mathematical models of the finite element method. The authors show the problem of application software and the finite element method in the investigation of the process of cutting composite materials.

Keywords: finite element method, composite materials, ANSYS, DEFORM, ABAQUS, LS-DYNA, mathematical models, composite laminate.

Математическое моделирование процессов обработки является эффективным методом теоретических исследований, которые позволяют минимизировать затраты на проведение экспериментов. Данные методы позволяют расширить изначальную область исследования и при минимальных затратах получить проектные модели оптимальных конфигураций режущего инструмента и режимов резанья учитывая исходную постановку задачи. Применение программных продуктов для построения математических моделей позволяет произвести сложные многопараметрические расчеты в сжатые сроки с достаточной точностью. Для построения подобных моделей и получения выходных данных проводится анализ напряженно-деформированного состояния режущего инструмента с учетом термических процессов. Проблема прочности режущей части инструмента в первую очередь связана с определением её напряжённно-деформированного состояния под действием нагрузок, возникающих в процессе резания. Если говорить об условиях обильного охлаждения зоны резания, то можно рассматривать лишь силовую составляющую формирования напряжённно-деформированного состояния.

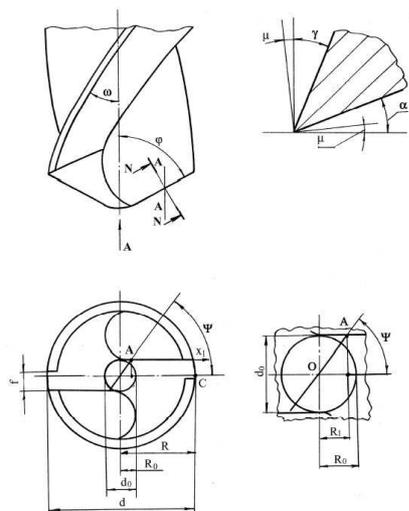


Рис. 1. Основные геометрические параметры типичного спирального сверла

В процессе резания сверло находится под действием осевой силы P_o и крутящего момента M_k , поэтому расчетом на прочность должны учитываться напряжения, возникающие от них. Используя выражения теории резанья можно утверждать, что должно выполняться следующее условие (по третьей теории прочности):

$$\sigma_{расчетное} = \left[\left(\frac{P_o}{S_{св}} \right)^2 + 4 \left(\frac{M_k}{W_k} \right)^2 \right]^{0.5} \leq \sigma_{допустимое} \quad (1)$$

где P_o – осевая сила, $S_{св}$ – площадь поперечного сечения сверла, m^2 (рис. 1), M_k – крутящий момент, W_k – момент сопротивления при кручении, m^3 , $\sigma_{допустимое}$ – допустимое напряжение, Па.

Средние действительные передний и задний углы зуба в плоскости NN могут быть рассчитаны из следующих соображений (рис. 1). Передний угол γ в главной секущей плоскости N-N является переменным и увеличивается по мере перемещения от центра к периферийной точке С. Угол γ при этом определяется по формуле:

$$\tan \gamma = \frac{R_k * \tan \omega}{R \sin \varphi} \quad (2)$$

где R_x – текущий радиус ($R_1 \leq R_x \leq R$), м; ω – угол наклона винтовых канавок к оси, рад; φ – главный угол в плане зуба, рад. Используя теорему о среднем, определим среднее значение $\tan \varphi$ на участке $(R - R_1)$:

$$\overline{\tan \varphi} = \frac{\tan \omega}{R * \sin \mu} * \frac{1}{R - R_1} \int_{R_1}^R R_x dR_x = \frac{0,5 \tan \omega}{\sin \mu} * \left(1 + \frac{R_1}{R}\right)$$

отсюда получим:

$$\overline{\tan \varphi} = \frac{0,5 \tan \omega}{\sin \mu} * \left(1 + \frac{R_1}{R}\right). \quad (3)$$

Действительный средний передний угол γ_d в процессе резания будет больше на величину кинематического угла μ :

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{S_0}{\pi d} \right),$$

где s_0 – подача сверла, мм/об.

Имеем: $\gamma_d = \bar{\gamma} + \mu$

С учетом формулы (3) окончательно получим выражение для среднего действительного переднего угла в плоскости N-N

$$\gamma_d = \tan^{-1} \left(\tan \omega * \frac{R+R_1}{2R * \sin \varphi} \right) + \tan^{-1} \frac{S_0}{\pi d}. \quad (4)$$

Задний угол заточки определяется в плоскости А-А (рис. 1) и обычно изменяется в обратном направлении по сравнению с передним углом, т. е. уменьшается при перемещении от R_1 к R . Это делается с целью сохранения постоянства угла заострения β ($\beta = \pi/2 - \alpha - \gamma$) вдоль режущих кромок. Пусть α_3 – задний угол заточки зуба сверла при $R_x = R$, т. е. на периферии. С учетом величины подачи на оборот s_0 этот угол уменьшается на величину μ и становится равным:

$$\alpha_d = \alpha_3 - \tan^{-1} \frac{S_0}{\pi d}$$

Переходя от плоскости А-А к главной секущей плоскости N-N, имеем:

$$\tan \alpha = \tan \left[\alpha_3 - \tan^{-1} \left(\frac{S_0}{\pi d} \right) \right] * \sin \varphi$$

Переменность $\tan \alpha$ вдоль режущих кромок можно учесть выражением:

$$\tan \alpha_x = \tan \left[\alpha_3 - \tan^{-1} \left(\frac{S_0}{\pi d} \right) \right] * \sin \varphi * \left(4 - 3 \frac{R_x}{R} \right).$$

Определим среднеинтегральное значение $\tan \alpha$:

$$\overline{\tan \alpha} = \frac{1}{R - R_1} \int_{R_1}^R \tan \alpha * dR_x$$

В итоге выражение можно записать следующим образом:

$$\overline{\tan \alpha} = \tan \left[\alpha_3 - \tan^{-1} \left(\frac{S_0}{\pi d} \right) \right] * \sin \varphi * \left(2,5 - 1,5 * \frac{R_1}{R} \right),$$

или для угла α :

$$\bar{\alpha} = \tan^{-1} \left\{ \tan \left[\alpha_3 - \tan^{-1} \left(\frac{S_0}{\pi d} \right) \right] * \sin \varphi * \left(2,5 - 1,5 * \frac{R_1}{R} \right) \right\}. \quad (5)$$

По уравнениям (4) и (5) можно определять расчетные значения средних углов γ и α на участке $(R - R_1)$ (рис. 1). Угол наклона главной режущей кромки λ является существенным для процесса образования и схода стружки. Кинематический угол наклона главной режущей кромки у сверл также зависит от подачи инструмента. Суммарный крутящий момент при сверлении определится выражением:

$$M_k = 0,25 * P_z * d * \left[\left(1 - \frac{d_0}{d} * \cot \psi \right) * z + \frac{P_{zn}}{P_z} * \frac{d_0}{d} * z_n * \cot \psi \right], \quad (6)$$

где z и z_n – соответственно, число режущих лезвий и число полуперемычек сверла; P_z и P_{zn} – тангенциальные составляющие силы резания, соответственно, на режущем лезвии и на полуперемычке сверла с учётом специфики их геометрий, Н; Ψ – угол наклона

проекции поперечной кромки сверла, рад; d – диаметр инструмента, м; d_0 – диаметр сердцевины инструмента в зоне резания, м.

Полная осевая сила P_0 для сверла может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$P_0 = z * P_x + z_n * P_{xn}, \quad (7)$$

где P_x и P_{xn} – осевые составляющие силы резания, соответственно, на одном режущем лезвии и на полуперемычке сверла с учётом специфики их геометрий, Н.

Данные модели позволяют учитывать различную геометрию сверл (с учетом оптимизации модели под новую конфигурацию режущего инструмента) при разработке технологий и способствуют процессу проектирования инструмента.

Учитывая, что композиционный материал имеет анизотропную структуру, и его прочностные свойства в разных точках структуры различны, аналитическое моделирование процессов обработки таких материалов представляет большую сложность. Также необходимо отметить, что лидирующие организации по проектированию и изготовлению режущего инструмента представляют большой выбор инструмента для обработки композиционных материалов. У данного типа инструмента сложная конфигурацию режущих кромок (спиральные ступенчатые сверла, коронковые сверла, роутеры, борфрезы и т.п.), что еще больше усложняет процесс моделирования. Прогрессивные режимы обработки с возникновением высоких температур в зоне резания также является дополнительными переменными для моделирования которые усложняют исходную систему. Все вышеперечисленные доводы указывают на необходимость и целесообразность применения программных продуктов для математического моделирования процесса резания и получения оптимальных параметров для проектирования идеальной конфигурации режущих кромок инструмента. Проведен анализ возможностей программных продуктов по математическому моделированию процессов резания, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Возможности наиболее распространенного программного обеспечения для проведения математического моделирования процессов обработки композиционных материалов

	ANSYS Workbench	DEFORM	ABAQUS	LS-DYNA
Создание геометрии	**	***	***	***
Формирование сетки	***	**	**	*
Задание граничных условий	***	***	**	*
Задание материалов	***	***	**	*
Детализация и контроль параметров вычислений	*	**	**	***
Результаты	**	**	**	***
Работа с композиционными материалами	Присутствует модуль ACP	Возможно с введением предпосылок упрощающих модель	Да, имеется три типа элементов	Да, имеется библиотека типов материалов.

Условные обозначения к таблице 1:

Создание геометрии:

*** – эскизное моделирование, экспорт и импорт геометрии, изменение геометрических параметров объектов и положения в пространстве;

** – эскизное моделирование, экспорт и импорт геометрии, изменение геометрических параметров объектов, перемещение в пространстве невозможно.

Формирование сетки:

*** – гибкая настройка параметров сетки (размер элементов, интенсивность, сгущение, тип элементов и т.д.), автоматическое наложение сетки с оптимизацией под формы и размеры объекта;

** – изменение размера элементов сетки, выбор типа элементов, автоматическое наложение сетки с ручной настройкой формы и размеров объекта;

* – изменение размеров элементов сетки, бессеточный лагранжевый численный метод (Smoothed Particles Hydrodynamics, SPH). Бессеточные методы позволяют проводить расчеты течений с сильными деформациями границ расчетной области, которые допускают изменение связности области расчета и перехлест границ области расчета. Для реализации указанных методов не требуется информация о связях между узлами, что позволяет избежать проблем, связанных с построением сетки, а также с необходимостью отслеживать межузловые связи.

Задание материалов:

*** – библиотека материалов, добавление новых параметров в готовые материалы из библиотеки, создание нового материала и занесение в библиотеку;

** – библиотека материалов отсутствует, возможность добавления нового материала;

* – Библиотека материалов отсутствует, включена библиотека типов материалов с настройкой из свойств. Возможность добавления новых материалов или типов отсутствует.

Задание граничных условий:

*** – введение внешних факторов (гравитация, температура окружающей среды и т.д.), простой интерфейс, автоматическое установление связей между объектами;

** – установка внешних факторов, полуавтоматическая установление связей между объектами с настройкой свойств контакта (сила трения, температура в зоне соприкосновения и другие);

* – ручная настройка граничных условий, выбор типа контакта между объектами, с заполнением нужных для расчёта свойств.

Вычисление:

*** – широкая вариативность параметров расчёта (время всего процесса, шаг расчёта, кинетическая энергия в выбранных узлах и другие);

** – автоматический процесс вычисления с указанием шага расчёта, остановка и продолжение расчёта, визуальное отображение о ходе вычисления.

* – анимация, сохранение видео, визуальные показания о ходе процесса без графического спектра величин расчета.

Авторы международных публикаций для обработки результатов экспериментов, как правило применяют линейно регрессионный анализ, однофакторный и многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA).

Так например, Davim и др. в своей работе [1] описали эмпирическую модель влияния входных параметров сверления ($V_c=30-50$ м/мин, $f=0.05-0.20$ мм/об), при использовании спирального сверла из твердого сплава, на величину расслоения углепластикового ламината толщиной 3мм. Данная модель имеет вид:

$$F_d = 0,966 + 0,001085V_c + 0,134f \quad (8)$$

Tsao и др. в своей работе [2] описали эмпирическую модель влияния входных параметров сверления ($S=800-1200$ об/мин, $f=0.01-0.03$ мм/об) (при использовании спирального сверла из быстрорежущей стали), на величину расслоения углепластикового ламината толщиной 3мм. Данная модель имеет вид:

$$F_d = 1,961 - 10,955f - 0,000181S - 0,0177d \quad (9)$$

Nocheng и Tsao в своей работе [3] описали модель влияния входных параметров сверления (при использовании спирального сверла), на величину критического осевого усилия. Данная модель имеет вид:

$$F_{CT} = \pi \left(\frac{8G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right)^{1/2},$$

где E -модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона, G_{IC} - критическая скорость высвобождения энергии деформации (в момент излома), h -толщина деформированного слоя.

Полученные модели возможно использовать при проектировании режущего инструмента и подбору режимов резанья. ANSYS Workbench обладает гибкой настройкой параметров сетки. Программный продукт LS_DYNA включает бессеточный метод позволяющий построить ориентировочную модель имеющую множество предпосылок ее упрощающих. ANSYS Workbench, DEFORM обладают способностью наложения граничных условий в автоматическом режиме, изменяя параметры условий под процесс моделирования. Особенность полного контроля над процессом расчёта имеет программное средство LS_DYNA. Также, в LS_DYNA есть возможность, в ручном режиме, до начала вычисления, настраивать параметры вывода результатов. В продуктах ANSYS Workbench, ABAQUS и DEFORM присутствует визуальный вывод результатов. В ANSYS Workbench для работы с композитами существуют модуль ACP (AnsysComposite PrePost). Модуль позволяет рассматривать композиционный ламинат послойно и учитывать связь между ламелями. В LS_DYNA присутствует библиотека типов материалов, предназначенная для моделирования композитных материалов. DEFORM в своём составе имеет специальный шаблон для механообработки, позволяющий создавать модель поэтапно в режиме помощника (мастер режим). Пользователю достаточно выбрать только тип операции, задать режимы обработки, инструмент и заготовку. В DEFORM есть несколько специальных компонентов, позволяющих генерировать твердотельные модели некоторых типов заготовок и инструментов (например, свёрл) на основе их геометрических размеров. После выполнения расчёта можно просмотреть результаты, представленные в виде графических полей и графиков. ANSYS автоматически подберёт все параметры вычислений по полученным от пользователя входным данным. По окончании вычислений можно вывести результат в графическом формате и текстовый вариант всех входных данных и конечных результатов в виде таблиц. В LS_DYNA для получения подобного результата пользователю придётся настраивать все вручную, начиная от внесения времени перемещения объекта и нагрузки, которая должна быть распределена от начала движения до конца пути, кончая контролем за выходными параметрами. Выводы основаны на результатах опытной эксплуатации вышеперечисленных программных продуктов. Авторы международных публикаций в своих работах применяют метод конечных элементов и метод конечных разностей для моделирования процесса обработки композиционных материалов. Необходимо отметить, что практически все конечно элементные модели не могут решать сопряженные задачи, учитывающие различные явления на границах раздела сред (температурные задачи, задачи фазовых переходов, задачи гидро и газодинамики для слоистых сред и, конечно задачи, где все перечисленное контактирует друг с другом). Поэтому в рассматриваемых системах водятся предпосылки, упрощающие задачу расчета. Введение предпосылок требует эмпирического подтверждения достоверности модели, либо наличие модели-аналога. Несмотря на введение предпосылок в модели их точность достаточна для выдвижения гипотез и проектирования режущего инструмента с оптимальной конфигурацией. Необходимо также отметить отсутствие программных продуктов, которые позволяют моделировать процесс обработки композиционных материалов с учетом схем армирования и взаимодействия слоев, с достаточной долей детализации. Важно и то, что среди рассматриваемых программных продуктов нет российских разработок, которые прошли верификацию при моделировании сложных процессов.

Список литературы: 1. Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study. *Mater Des* 2003;24:315–24. 2. Tsao vCC, Hocheng H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *Int J Mach Tools Manuf* 2004;44:1085–90. 3. Hocheng H, Tsao CC. The path towards delamination-free drilling of composite materials. *J Mater Process Technol* 2005;167:251–64.