

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.А. Щуров, И.С. Болдырев

FINITE ELEMENT METHOD CALCULATION OF FREE ORTHOGONAL CUTTING OF COMPOSITE MATERIALS

I.A. Shchurov, I.S. Boldyrev

Приведены результаты расчета процесса свободного резания заготовки из композитного материала методом конечных элементов. В результате расчета определено напряженно-деформированное состояние фрагмента заготовки, описаны начальные и граничные условия. Результаты расчета имеют качественную сходимость с экспериментальными данными.

Ключевые слова: резание, композитный материал, метод конечных элементов.

The paper describes finite elements method calculation of free orthogonal cutting of composite materials. As a result, stress-deformed state was defined and initial and boundary conditions stated. Calculation results are similar to those of experimental data.

Keywords: cutting, composites, finite elements method.

Введение. Композитные материалы все шире используются в производстве различных изделий. Как правило, такие материалы представляют собой связующую массу, в которой распределены усиливающие элементы: волокна или порошки. В большинстве случаев получение самого материала одновременно сопровождается формированием и заготовки изделия. Однако, как и в общем случае, например, при производстве заготовок из однородных материалов избежать механической обработки не удастся. Существующая практика и проведенные исследования показывают, что процесс резания заготовок из композитов существенно отличается от обработки тех же металлов. В частности, установлено, что специфика строения композитных материалов обуславливает следующие особенности при их механической обработке:

1. Невозможность получения высокого качества обработанной поверхности: наблюдаются сколы, расслоения, ворсистость.
2. Снижение стойкости инструмента, связанное с интенсивным абразивным воздействием более твердого наполнителя.
3. Плохой отвод тепла из зоны резания, связанный с низкой теплопроводностью материала матрицы значительной части композитов.
4. Пониженная производительность процесса: в ряде случаев повышенное влагопоглощение композитов исключает применение смазочно-охлаждающих жидкостей на водной основе.

В настоящее время физика процесса резания композитных материалов изучена еще недостаточно и представляет интерес для улучшения технологии их обработки и качества получаемых поверхностей.

В последнее время в связи с совершенствованием метода конечных элементов (МКЭ) получила развитие схема непосредственного анализа контактного взаимодействия заготовки и инструмента [1]. Она позволяет учесть совместно три важнейшие особенности процесса резания, а именно пластические деформации и отделение стружки, тепловые явления и трение на поверхности инструмента. Такие расчеты отличаются универсальностью и достаточной адекватностью, поэтому предлагается рассмотреть именно этот подход.

Среди расчетов резания заготовок из композитов встречаются расчеты, в которых вся заготовка описывается конечными элементами одного типа и свойств, но свойства эти анизотропны [2, 3]. В других работах заготовка представляется разными элементами, однако полноценного описания волокон, пограничных слоев и матрицы не дано [4]. Наконец, имеются работы с описанием волокон и матрицы отдельными группами элементов, но не описано влияние пограничных слоев [5].

Описание задачи. В данной работе предлагается конечно-элементная модель заготовки из волоконно-армированного композитного материала с описанием отдельными группами элементов как самих волокон и матрицы, так и пограничных (волокно – матрица) слоев. Как известно, именно в этих местах начинается разрушение композита, поэтому учет этой части композитной структуры представляется наиболее интересным. В данной работе рассматривается трехмерная постановка для случая свободного ортогонального резания. В качестве примера рассмотрен металлокомпозит с матрицей из алюминия и стальными волокнами. Свойства составляющих материалов следующие. Матрица: модуль упругости $E = 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 2700$ кг/м³. Волокно: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7850$ кг/м³. Пограничный слой: модуль упругости $E = 0,8 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 2500$ кг/м³. Размеры фрагмента заготовки: длина – 1 мм, диаметр волокон – 0,2 мм, расстояние между центрами волокон – 0,4 мм, ширина фрагмента заготовки – 1,2 мм, высота фрагмента заготовки – 1 мм. Фрагмент инструмента имеет размеры: длина – 0,15 мм, высота – 0,2 мм, ширина – 1,2 мм. Передний угол варьировался в пределах 5–20°, задний – 0–15°. Радиус при вершине – 0,02 мм. Расчеты производились для глубин резания от 0,1 до 1 мм. Резец в расчетах принимался абсолютно жестким. Скорость резания – 0,1 м/с.

Поскольку процесс резания представляет собой динамическое деформирование, при котором сила резания изменяется во времени, то в расчетах был использован явный динамический анализ, основой которого является численное решение системы дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Такое решение, как известно, реализовано в пакете ANSYS-LS-DYNA. Такая программа позволяет решать контактные задачи с физической и геометрической нелинейностями.

Кинематические граничные условия. Для расчетной схемы вдоль поверхностей закрепления заготовки установлено условие неподвижности узлов; инструменту задается перемещение в направлении главного движения резания. Начальные условия в перемещениях u для заготовки и инструмента в момент времени $t = 0$ имеют вид: $u = 0$.

Смешанные граничные условия. Взаимодействие заготовки и резца было реализовано посредством существующих элементов контакта программы ANSYS, при этом векторы нагрузки внешних сил и перемещений вычисляются на каждой итерации как результат контактного взаимодействия заготовки и резца. В этих расчетах учитывалось трение скольжения в контактирующих элементах; обрабатываемый материал каждой из указанных частей считался изотропным, подчинялся закону Гука в упругом состоянии и условию текучести Мизеса в пластическом состоянии. Для описания трения на передней поверхности резца задавалось максимальное касательное напряжение, равное касательному пределу текучести для данного материала: $\tau = \mu\sigma$ при $\tau < \tau_S$ и $\tau = \tau_S$ при $\tau \geq \tau_S$. Здесь τ – касательное напряжение на передней поверхности; τ_S – касательный предел текучести металла заготовки; μ – коэффициент трения.

Критерий стружкоотделения. В качестве критерия стружкоотделения использовался критерий предельной деформации. Согласно этому критерию при сложном напряженном состоянии разрушение (пластическое течение) материала происходит в том случае, если наибольшая деформация в точке превысит предельно допустимое значение. Поскольку резание можно считать процессом деформации сжатия, то примем, что сдвиг элемента стружки (стружкоотделение) произойдет, когда максимальная по модулю деформация превысит определенное критическое значение.

Расчетная схема и принятые допущения. Как было отмечено выше, резание – это достаточно сложный процесс и полное аналитическое описание его в настоящее время практически невозможно. Поэтому расчет напряженно-деформированного состояния заготовки был произведен с использованием ряда приведенных ниже допущений:

1. В расчете не учитывалось выделение тепла в зоне резания.
2. Коэффициент трения по передней поверхности принимался постоянным по всей ее длине и не зависящим от касательных напряжений.
3. Коэффициент трения по задней поверхности принимался постоянным и равным коэффициенту на передней поверхности.
4. Режущей кромка принималась очерченной по дуге окружности, радиус округления которой во время обработки не изменяется. Износ резца во время обработки не учитывался.

Конечно-элементная модель заготовки и резца приведена на рис. 1.

Выводы. В ходе моделирования наблюдались всплески напряжений в волокнах и особенно деформаций в прилегающих слоях (рис. 2). Моделирование снятия стружки в различные моменты времени с картинками распределения эквивалентных напряжений приведено на рис. 3. Полученные картины распределения напряжений в зоне резания соответствуют ожидаемой картине распределения напряжений, типичной для процесса стружкообразования. В промежуточные моменты времени зафиксированы отрыв волокон от матрицы, увеличенное смещение слоев матрицы вдоль волокон, что и ожидалось в соответствии с известными данными из практики и публикаций [6].

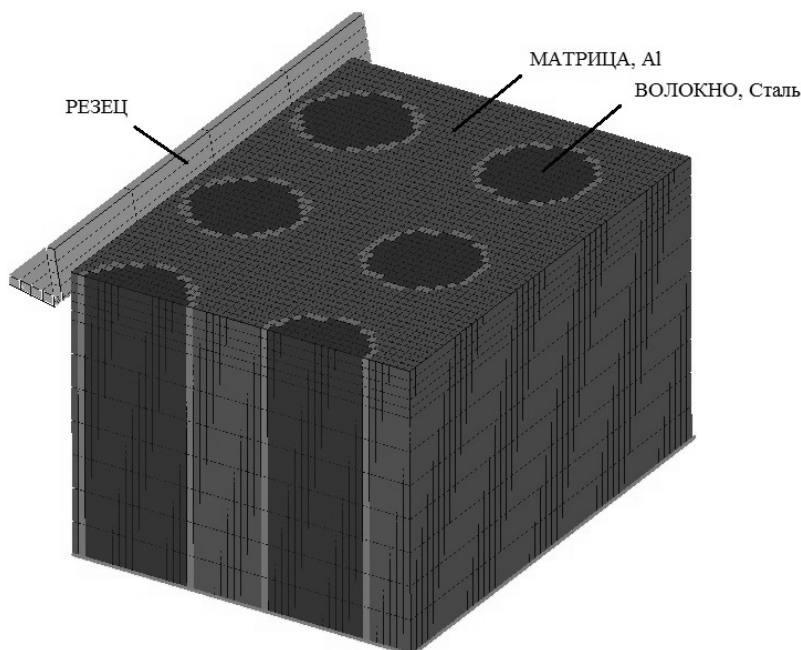


Рис. 1. Исходная конечно-элементная модель заготовки из композита

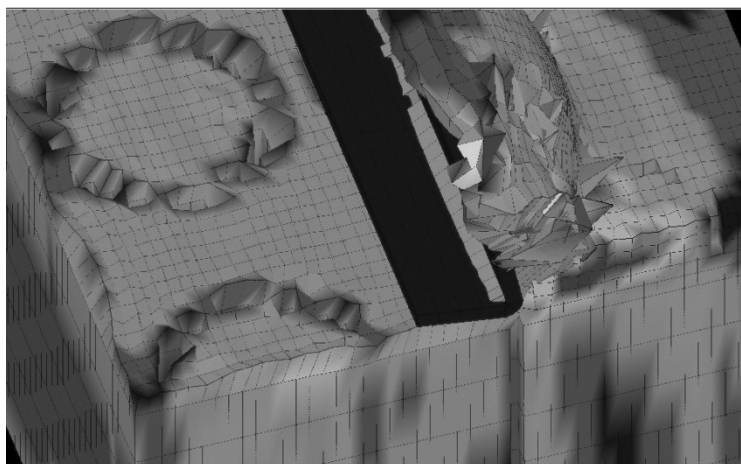
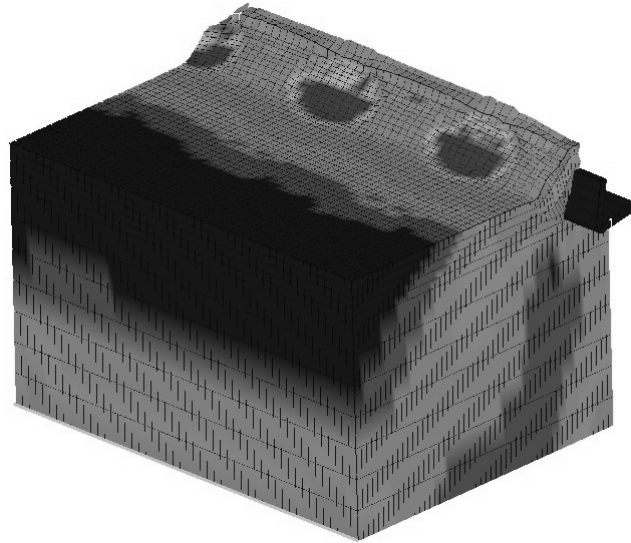
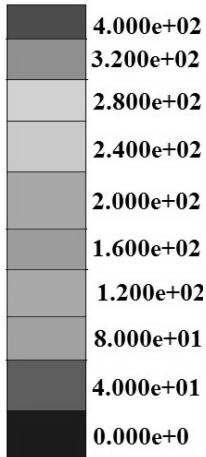


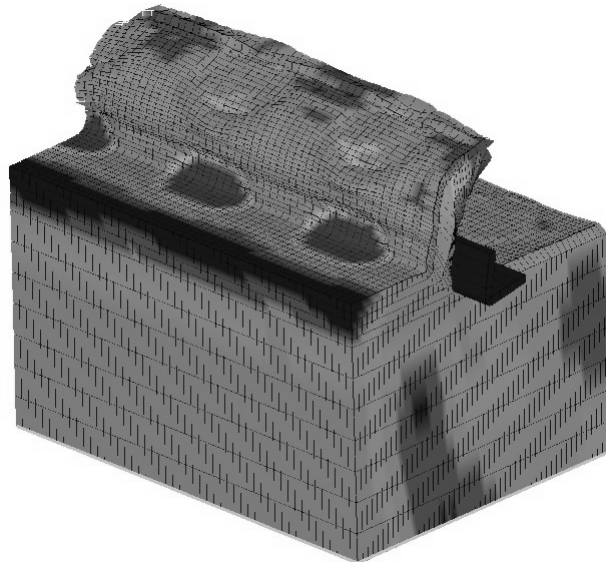
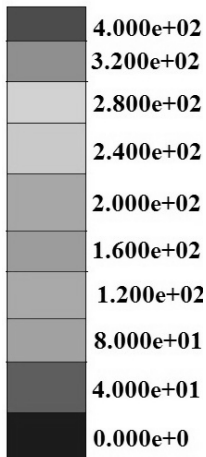
Рис. 2. Фрагмент деформированной заготовки,
на котором наблюдается отслаивание волокна от матрицы по пограничному слою

Эквивалентные напряжения, 10^8 Па



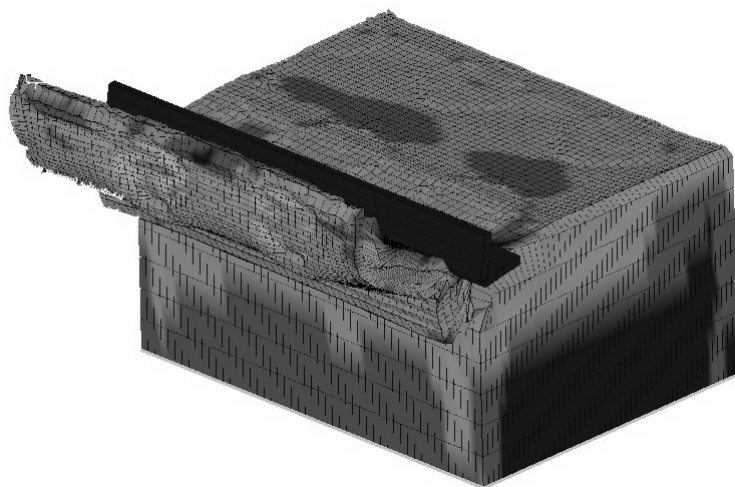
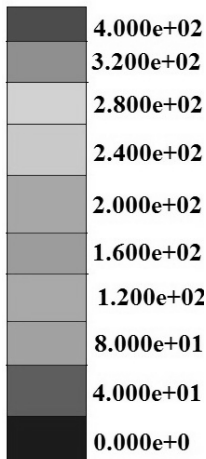
$t = 0,001$ с

Эквивалентные напряжения, 10^8 Па



$t = 0,005$ с

Эквивалентные напряжения, 10^8 Па



$t = 0,01$ с

Рис. 3. Распределения эквивалентных напряжений Мизеса в зоне резания заготовки из композита

Литература

1. Щуров, И.А. Расчет сил резания методом конечных элементов / И.А. Щуров, И.С. Болдырев // СТИН. – 2004. – № 1. – С. 14–16.
2. Mkaddem, A. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis / A. Mkaddem, I. Demirci, M.E. Mansori // Composites Science and Technology. – 2008. – № 68. – P. 3123–3127.
3. Santiuste, C. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components / C. Santiuste, X. Soldani, M.H. Miguelez // Composite Structures. – 2010. – № 92. – P. 691–698.
4. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting / D. Iliescu, D. Gehin, I. Iordanoff et al. // Composites Science and Technology. – 2010. – № 70. – P. 73–80.
5. Rao, G.V.G. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnaga // Composites Science and Technology. – 2007. – № 67. – P. 2271–2281.
6. Rao, G.V.G. Three-dimensional macro-mechanical finite element unidirectional-fiber reinforced polymer composites / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Materials Science and Engineering. – 2008. – № A 498. – P. 142–149.

Поступила в редакцию 20 февраля 2012 г.

Щуров Игорь Алексеевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станки и инструмент», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – математическое моделирование резьбообработки, обработки композитных материалов и обработки на станках с ЧПУ. Тел.: (351) 267-91-11; e-mail: shia@susu.ac.ru

Igor A. Shchurov. Doctor of engineering science, professor, head of Machine and cutting tools department, South Ural state university. The area of scientific interests – mathematical modeling of threadcutting, composites and CNC machining. Tel.: (351) 267-91-11; e-mail: shia@susu.ac.ru

Болдырев Игорь Станиславович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструмент», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – математическое моделирование резьбообработки и резания композиционных материалов. Тел.: (351) 267-93-43; e-mail: bis74@inbox.ru

Igor S. Boldyrev. Candidate of engineering science, associate professor of Machine and cutting tools department, South Ural state university. The area of scientific interests – mathematical modeling of threadcutting and composites machining. Tel.: (351) 267-93-43; e-mail: bis74@inbox.ru