

УДК 53.001.57

## О КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ПЛАСТИНЫ

© 2014 В.Л. Леонтьев

Ульяновский государственный университет

Поступила в редакцию 05.09.2014

Изучена дискретная модель динамического контакта тела и сверла с использованием пакета программ, связанного с методом конечных элементов. Приводятся примеры моделирования и результаты расчетов, выполненных с использованием многопроцессорного сервера. Некоторые особенности конечно-элементного моделирования процесса сверления связаны с возникающим разрушением материала пластины вблизи части границы пластины, вызванным кратковременными значительными возрастаниями там уровня интенсивности напряжений. Установлено, что возникающие вблизи части границы разрушения материала постепенно распространяются на значительную часть пластины. Такие микродефекты в приводимых примерах моделируются нерегулярно расположенными конечными элементами, при прохождении выступающих углов которых режущими кромками сверла возникают значительные скачки напряжений.

Ключевые слова: *деформируемое твердое тело, напряженно-деформированное состояние, сверление, разрушение материала, интенсивность напряжений, метод конечных элементов*

**1. Рассматривается первая модель** процесса сверления круглой пластины диаметра  $D=25$  мм постоянной толщины  $h=1$  мм с начальной ямкой под сверло, имеющей круглый контур и глубину 0,2 мм. В пластине была сформирована сетка 7386 трехмерных конечных элементов (КЭ), выбрана величина шага по времени  $\Delta t=1,899 \times 10^{-5}$  с, необходимая методу решения эволюционной задачи после этапа дискретизации эволюционно-краевой задачи с помощью метода КЭ. Материал пластины AL7075T351, сверло 17Cr13Ni2Mo Stainless-Steel диаметра 10 мм со стандартными для DEFORM геометрическими параметрами. Заданы подача сверла 0,07 мм/оборот, ход сверла 4,2 мм (60 оборотов), скорость вращения сверла 3300 мм/с. Задача была в основном решена на четырехпроцессорной ЭВМ за 28 часов, сверло совершило 32 оборота, полностью просверлило пластину толщиной 1 мм и прошло дальше, продвинувшись от начального положения на 2,24 мм. Текущий контроль, во-первых, величины соотношения времени  $t_{Rem}$ , затрачиваемого на перестройку сетки конечных элементов (Remeshing), периодически необходимую алгоритму метода вследствие недопустимой деформации КЭ в процессе моделирования сверления, и, во-вторых, времени  $t_{Clc}$ , затрачиваемого непосредственного на выполнение операций метода решения эволюционной задачи с шагами по времени, показал, что расчет первого оборота сверла прошел за 10 мин, двух оборотов – за 45 мин, 5 оборотов – за 3,3 часа. Начиная с 6-го оборота соотношение

$t_{Rem} / t_{Clc}$  достигло значения 2,2, т.е. затраты времени на перестройку сетки более, чем в 2 раза стали превышать затраты времени на выполнение операций основного метода решения задачи, что было вызвано возрастанием деформаций КЭ в области контакта сверла и пластины и увеличением числа значительно деформируемых КЭ по мере продвижения сверла вглубь материала пластины. Перестройка сетки является по отношению к операциям метода решения эволюционной задачей вспомогательной операцией, улучшающей качественные и количественные характеристики этапа дискретизации краевой задачи. Поэтому такая величина дроби  $t_{Rem} / t_{Clc} = 2,2$  отражает неоптимальность дискретной модели эволюционно-краевой задачи. Вторым признаком неоптимальности этой дискретной модели является прекращение расчета на 33-м обороте сверла. Другой особенностью данной модели явилось то, что после того, как острие сверла прошло нижнюю поверхность пластины и в пластине начало формироваться отверстие с постепенным увеличением радиусов нижнего и верхнего оснований конуса (отверстие вначале имеет в основном коническую форму, затем цилиндрическую), на внешней боковой цилиндрической поверхности пластины, на которой заданы краевые условия – равные нулю скорости движения точек этой поверхности, стали появляться локальные концентраторы напряжений, и вследствие этого началось разрушение материала пластины внутри отдельных КЭ, выходящих на эту поверхность.

Еще одной особенностью процесса деформирования пластины в процессе ее сверления явилось образование после 21-го оборота сверла, соответствующего ходу сверла 1,47 мм, локальных выпуклостей поверхности пластины вблизи контура формирующегося отверстия. Вначале

*Леонтьев Виктор Леонтьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического моделирования технических систем.  
E-mail: LeontievVL@ulsu.ru*

образовалось 3 такие локализованные выпуклости, распределенные почти равномерно вокруг круглого контура отверстия, затем их число возросло до 6 и равномерность их расположения стала нарушаться.

2. Во второй модели рассматривается процесс сверления круглой пластины диаметра  $D=35$  мм постоянной толщины  $h=0,7$  мм с начальной ямкой под сверло, имеющей круглый контур и глубину  $0,2$  мм. В пластине была сформирована сетка 7611 трехмерных КЭ, выбран шаг по времени  $\Delta t=2,1 \times 10^{-5}$  с. Сетка существенно неравномерная и в области кон-такта сверла с пластиной значительно более гус-тая, чем вне этой области. Материал пластины, сверла и параметры сверла те же, что и в первой модели. Заданы подача сверла  $0,07$  мм/оборот, ход сверла  $4,2$  мм (60 оборотов), скорость вращения сверла  $3300$  мм/с. Увеличение диаметра пластины и уменьшение ее толщины привели к снижению изгибной жесткости пластины, что повлияло на характеристики дискретной модели и привело к уменьшению величины  $t_{Rem}/t_{Clc}$ , несмотря на то, что число КЭ по сравнению с первой моделью возросло. Задача была полностью решена за 36 часов на много-процессорном сервере, сверло совершило 60 оборотов (28547 шагов по времени), просверлило пластину толщиной  $0,7$  мм и прошло дальше, продвинувшись от своего начального положения на  $4,2$  мм. Отношение  $t_{Rem}/t_{Clc} = 0,85$  после 2-го оборота, после 5-го оборота  $t_{Rem}/t_{Clc} = 1,3$ , после 7-го оборота  $t_{Rem}/t_{Clc} = 1,6$ , после 27-го  $t_{Rem}/t_{Clc} = 1,8$ . Таким образом, по сравнению с расчетом в рамках первой модели это отношение имеет существенно меньшую величину.

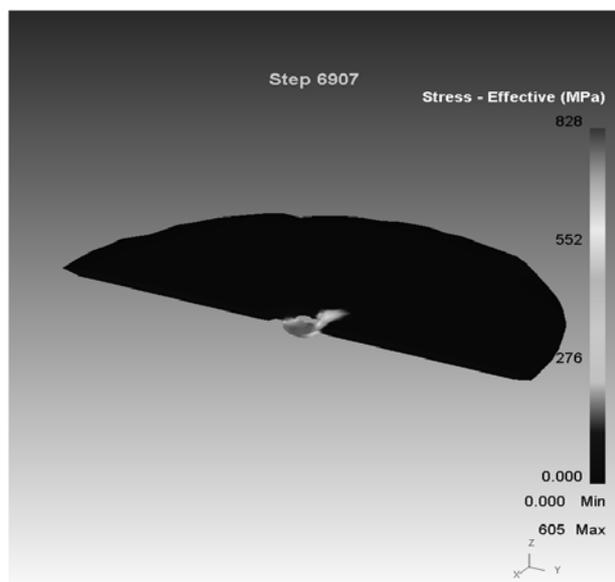


Рис. 1. Интенсивность напряжений и форма пластины на 6907-м шаге

На рис.1 показана интенсивность напряжений, а также форма половины пластины, в том числе в окрестности формирующегося отверстия и

рядом с боковой поверхностью, где заметны уже образовавшиеся дефекты. Изображение сверла не дается.

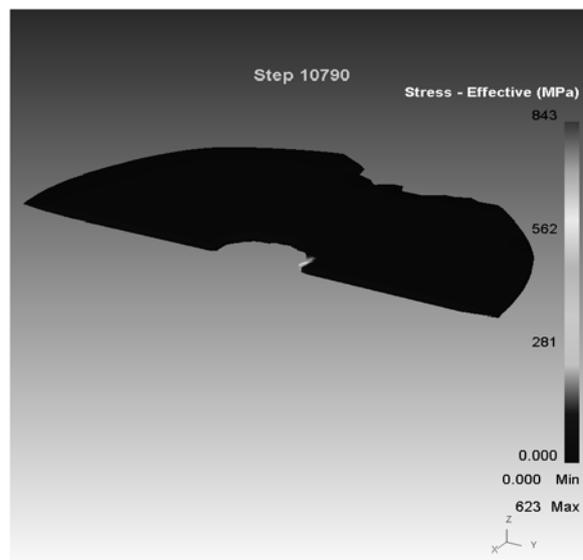


Рис. 2. Интенсивность напряжений и форма пластины на 10790-м шаге

Рис. 2 характеризует активизацию процесса образования дефектов вблизи боковой границы пластины на этапе завершения прорезания нижней поверхности пластины, вызванную кратковременными повышениями на этом этапе уровня напряжений вблизи боковой границы. На рис. 3 показаны форма всей пластины и интенсивность напряжений в ней на 12000 шаге по времени, после которого наступила относительная стабилизация формы пластины и значительное снижение интенсивности и скорости процесса разрушения материала пластины. Обращает на себя внимание несимметрия пластины после совершившихся разрушений.

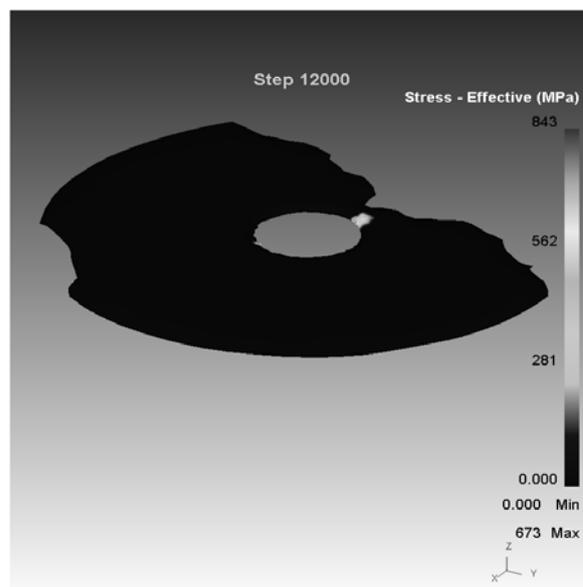
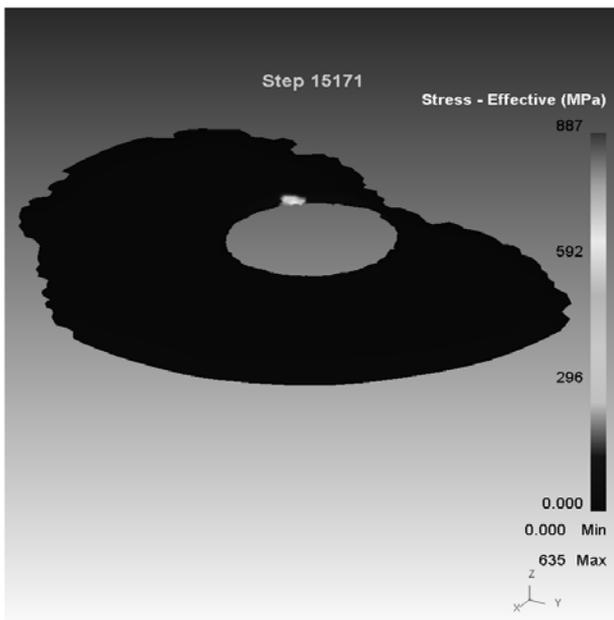


Рис. 3. Интенсивность напряжений и форма пластины на 12000-м шаге



**Рис. 4.** Интенсивность напряжений и форма пластины на 15171-м шаге

На рис. 4 показаны результаты активизации процесса разрушения материала после некоторого периода замедления этого процесса. В конце всего расчета область разрушения подошла с одной стороны близко к границе отверстия, но на границе отверстия материал не разрушился даже на конечном 28547 шаге расчета. Характер возникновения и развития разрушений материала пластины дополняется следующими данными. Разрушение материала первого КЭ произошло после 2-го оборота сверла, после 7-го оборота разрушились уже 5 КЭ. Разрушение материала происходит из-за кратковременных средних повышений уровня интенсивности напряжений по всей пластине и пиковых повышений на разрушающемся краю пластины. Основной причиной кратковременных повышений уровня напряжений является, по-видимому, искусственная анизотропия материала пластины, вызванная дискретизацией пластины на основе ее представления совокупностью различных по форме и размерам КЭ, то есть материальных частиц, взаимодействующих друг с другом при механической обработке. КЭ неравномерно выступают внутрь формирующегося отверстия и создают для сверла препятствия различных уровней. Такая дискретизация нарушает симметрию пластины и приводит к несимметричному процессу разрушения. Начальная несимметрия усиливается и развивается уже возникшими дефектами, которые являются дополнительными причинами появления концентраторов напряжений. С одной стороны, искусственная анизотропия является недостатком метода, вносящим дополнительные погрешности в исходную непрерывную математическую модель. Но, с другой стороны, дискретная модель является более адекватной в описании свойств реального материала пластины, который имеет микродефекты, вызывающие появление динамических концентраторов напряжений в процессе механической обработки. Зернистость материала, связанная с

появлением в дискретной модели КЭ, отражает наличие таких локальных дефектов, результаты расчетов показывают их значительное влияние на напряженно-деформированное состояние, на прочность и на разрушение материала.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе сверления показали особую роль неоднородностей материала заготовки в локальных областях, непосредственно прилегающих к формирующимся отверстиям. Установлено, что динамические скачки напряжений, вызываемые неоднородностью материала, возникают не только в области резания материала сверлом, но и на значительном удалении от нее, что приводит к разрушению значительной части заготовки даже вдали от формирующегося отверстия. Это означает, что технология сверления авиационных материалов должна быть направлена на максимальную однородность материала в области каждого формирующегося отверстия. Особую остроту этот вопрос приобретает в случае композиционных многослойных материалов, характеризующихся значительной неоднородностью и анизотропностью. Рекомендуется обеспечивать максимальную однородность и изотропность исходного материала за счет специального расположения волокон композиционного материала в областях планируемых отверстий или за счет отсутствия волокон в этих локальных областях.

Расчет первого оборота сверла прошел за 6 мин, двух оборотов – за 35 мин, 5 оборотов – за 2,5 часа, 28 оборотов – за 28 часов, 60 оборотов – за 36 часов. В начальной и на завершающей стадиях сверления расчет проходил существенно быстрее, чем на промежуточных стадиях, на которых идет активная механическая обработка материала пластины в глубинных областях. На промежуточных стадиях КЭ сетки значительно деформируются после нескольких шагов по времени и поэтому перестройка сетки должна проводиться чаще, а затраты времени на одну перестройку сетки многократно больше, чем затраты времени на выполнение вычислительных операций метода решения основной эволюционной задачи.

**3. В третьей модели** рассматривается процесс сверления круглой пластины диаметра  $D=25$  мм постоянной толщины  $h=0,7$  мм с начальной ямкой под сверло, имеющей круглый контур и глубину 0,2 мм. В пластине была сформирована сетка 11806 трехмерных КЭ, выбран шаг по времени  $\Delta t=1,136 \times 10^{-5}$  с. Сетка существенно неравномерная и в области контакта сверла с пластиной значительно более густая, чем вне этой области. Материал пластины, сверла и параметры сверла те же, что и в предыдущих моделях. Заданы подача сверла 0,07 мм/оборот, скорость вращения сверла 3300 мм/с. Выполнен расчет 11 оборотов, сверло просверлило пластину толщиной 0,7 мм и прошло дальше, продвинувшись от своего начального положения в ямке на 0,72 мм. Отношение  $t_{Rem} / t_{Clc} = 1 / 90 \ll 1$  после 3-го оборота,  $t_{Rem} / t_{Clc} = 1 / 25 \ll 1$  после 6-го оборота,

$t_{Rem}/t_{Cle} = 1/7$  после 9-го оборота. Таким образом, по сравнению с расчетами в рамках первой и второй моделей это отношение имеет намного меньшую величину. Одной из причин снижения величины этого отношения является переход от модели состояния материала Plastic, использованной в первых двух моделях, к модели Elasto-Plastic в данной модели. Другим преимуществом модели Elasto-Plastic является повышение адекватности математической модели процесса сверления материала, который при малых значениях напряжений находится в состоянии упругости, а при высоких значениях напряжений, возникающих в зоне контакта сверла с пластиной, переходит в пластическое состояние. Недостатком этой модели является необходимость перехода от прямого метода (Direct) решения эволюционной задачи к итерационному методу Ньютона-Рафсона, условия сходимости которого существенно определяются величиной шага по времени. При необходимости программа, реализующая алгоритм метода Ньютона-Рафсона, уменьшает начальное значение шага по времени, но не более, чем в 100 раз. Если для выполнения условий сходимости метода требуется дальнейшее уменьшение величины шага по времени, выполнение программы прекращается. В имеющемся лицензионном комплексе программ DEFORM отсутствуют возможности изменения оператором первоначального значения шага по времени на достигнутое алгоритмом значение и продолжения расчета с дальнейшим автоматическим уменьшением этого шага в процессе расчета до 100 раз. Задание величины шага в самом начале расчета в 100 раз меньше исходного значения приводит к многократному увеличению времени расчета.

**Выводы:** снижение затрат машинного времени на исследование динамического напряженно-деформированного состояния деформируемого

твердого тела в процессе его механической обработки может быть достигнуто при использовании алгоритмов численных методов [1-7], в частности, метода конечных элементов, в которых применяются последовательности наборов сеточных финитных функций [1-7], взаимно ортогональных на каждой конкретной сетке.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Леонтьев, В.Л. Ортогональные сплайны и вариационно-сеточный метод // Математическое моделирование. 2002. Т.14, № 3. С. 117-127.
2. Леонтьев, В.Л. Сеточные методы расчета криволинейных стержней / В.Л. Леонтьев, А.Ю. Мелентьев // Математическое моделирование. 2003. Т.15, № 10. С. 95-104.
3. Красильников, А.Р. О вариационно-сеточном методе теории пластин / А.Р. Красильников, В.Л. Леонтьев // Математическое моделирование. 2005. Т.17, № 3. С. 23-34.
4. Леонтьев, В.Л. Сеточные базисы ортогональных финитных функций / В.Л. Леонтьев, Н.Ч. Лукашанец // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1999. Т.39, №7. С. 1158-1168.
5. Леонтьев, В.Л. Об ортогональных финитных функциях и о численных методах, связанных с их применением // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2002. Т.9, № 3. С. 497-504.
6. Leontev, V.L. Orthogonal compactly supported functions in eigenvalue problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2001. V.41, № 6. P. 825-831.
7. Леонтьев, В.Л. Вариационно-сеточный метод решения задач о собственных колебаниях упругих трехмерных тел, связанный с использованием ортогональных финитных функций // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2002. № 3. С. 117-126.

## ABOUT FINITE ELEMENT MODELING THE PROCESS OF PLATE DRILLING

© 2014 V.L. Leontyev

Ulyanovsk State University

The discrete model of dynamic contact of a body and drill with use of software packet, connected with finite elements method is studied. Examples of modeling and results of the calculations executed with use of multiprocessor server are given. Some features of finite element modeling the process of drilling are connected with arising destruction of plate material near part of plate border, caused by short-term considerable increases there the level of stress intensity. It is established that borders of material destruction arising near part gradually extend on considerable part of a plate. Such microdefects in given examples are modeled by irregularly located finite elements, when passing which acting corners by cutting edges of a drill there are considerable jumps of tension.

Key words: *deformable solid body, stress-strain state, drilling, material destruction, stress intensity, finite elements method*

Viktor Leontyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Technical Systems Mathematical Modeling. E-mail: LeontievVL@ulsu.ru