УДК 53.001.57: 53.072

В. Л. Леонтьев (г. Ульяновск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

Комплекс программ DEFORM является инструментом компьютерного моделирования процессов механообработки, в частности, сверления твердых деформируемых материалов. Использование этого комплекса при решении соответствующих эволюционно-краевых задач требует учета ряда условий дискретного моделирования, позволяющих выполнить запланированный расчет с минимальными затратами времени и с необходимой точностью. В статье приводятся примеры моделирования и результаты расчетов, выполненных с использованием многопроцессорного сервера.

1. Рассматривается **первая модель** процесса сверления круглой пластины диаметра $D = 25мм$, постоянной толщины $h = 1мм$ 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 $\Delta t = 1{,}899 \bullet 10^{-5} c$, необходимая методу решения эволюционной задачи после этапа дискретизации эволюционно-краевой задачи с помощью метода конечных элементов. Материал пластины *AL7075T351*, сверло *17Cr13Ni2Mo Stainless-Steel* диаметра *10мм* 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 за *28 часов*, сверло совершило *32 оборота*, полностью просверлило пластину толщиной *1 мм* и прошло дальше, продвинувшись от начального положения на *2,24 мм*. Заданный ход *4,2 мм* не был достигнут, поскольку на *33-м* обороте возникла проблема со сходимостью приближенного решения для температурного поля в одном из конечных элементов и потому произошла остановка выполнения программы. Текущий контроль, во-первых, величины соотношения времени t_{Rem}, затрачиваемого на перестройку сетки конечных элементов (Remeshing), периодически необходимую алгоритму метода вследствие недопустимой деформации конечных элементов 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*, то есть 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 конечных элементов (КЭ) в области контакта сверла и пластины и увеличением числа значительно деформируемых конечных элементов 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 конечных элементов, 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 образовалось три такие локализованные выпуклости, распределенные почти равномерно вокруг круглого контура отверстия, затем их число возросло до шести и равномерность их расположения стала нарушаться.

2. Во **второй модели** рассматривается процесс сверления круглой пластины диаметра $D=35мм$, постоянной толщины $h=0,7мм$ с начальной ямкой под сверло, имеющей круглый контур и глубину *0,2 мм*. В пластине была сформирована сетка *7611* трехмерных конечных элементов, выбран шаг по времени $\Delta t=2,1\bullet 10^{-5}c$. 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 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 многопроцессорном 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.

На рис. 1, 2 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.

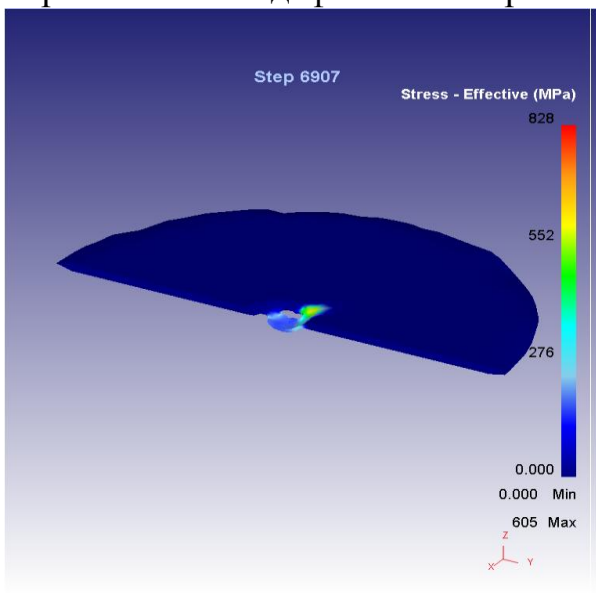

Рис. 1

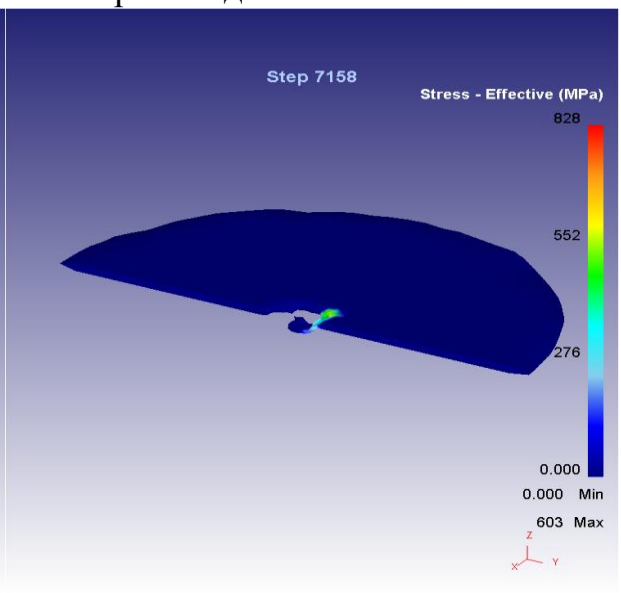

Рис.2

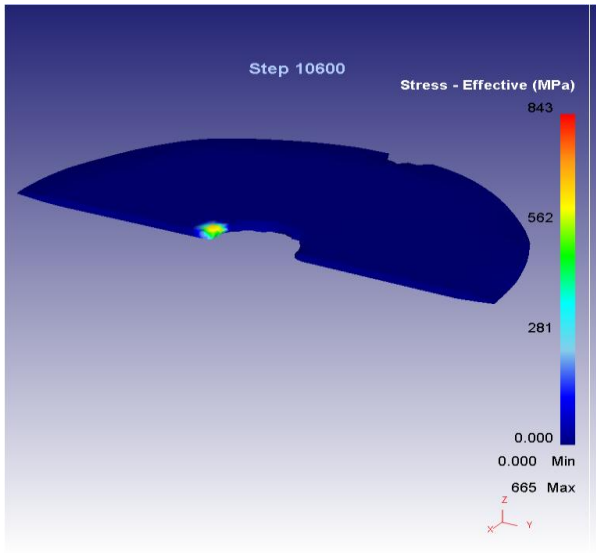

Рис.3

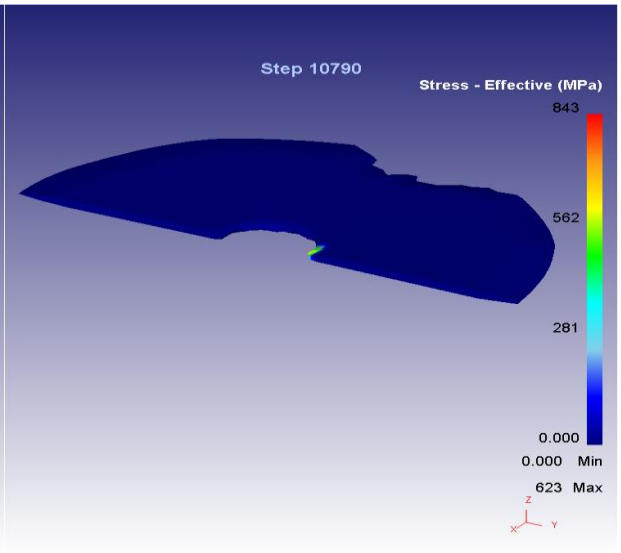

Рис.4

Рис. 3, 4 характеризуют 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. 5 показаны форма половины пластины и интенсивность напряжений в ней на *11700* шаге по времени, а на рис. 6 – то же для полной пластины на *12000* шаге, после этих шагов наступила относительная стабилизация формы пластины и значительное снижение интенсивности и скорости процесса разрушения материала пластины. Обращает на себя внимание несимметрия пластины после совершившихся разрушений.

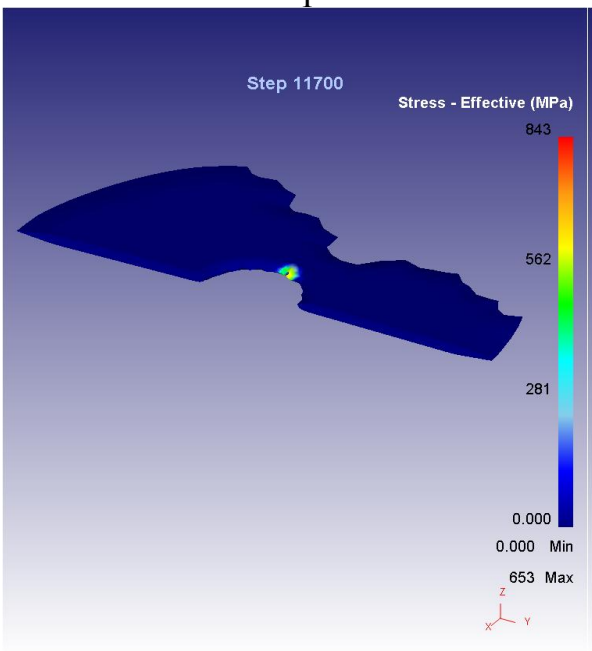

Рис. 5

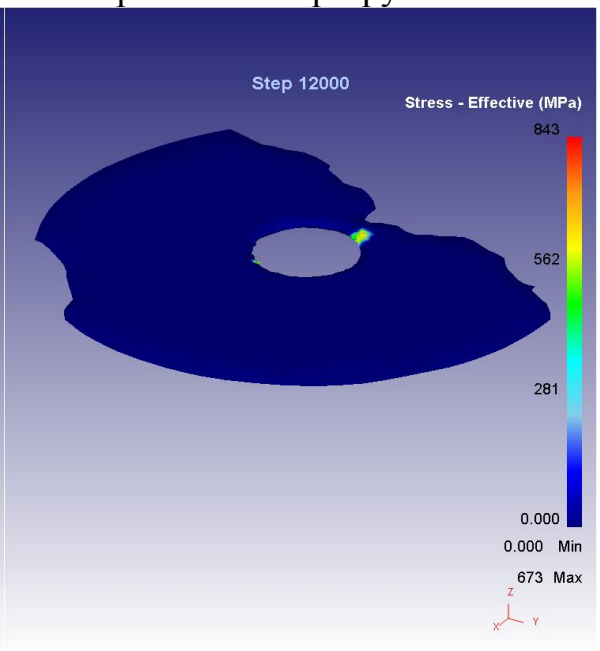

Рис. 6

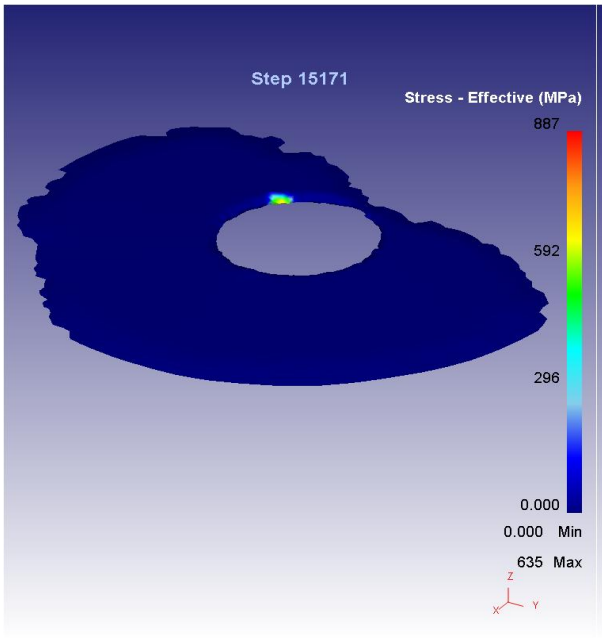

Рис. 7

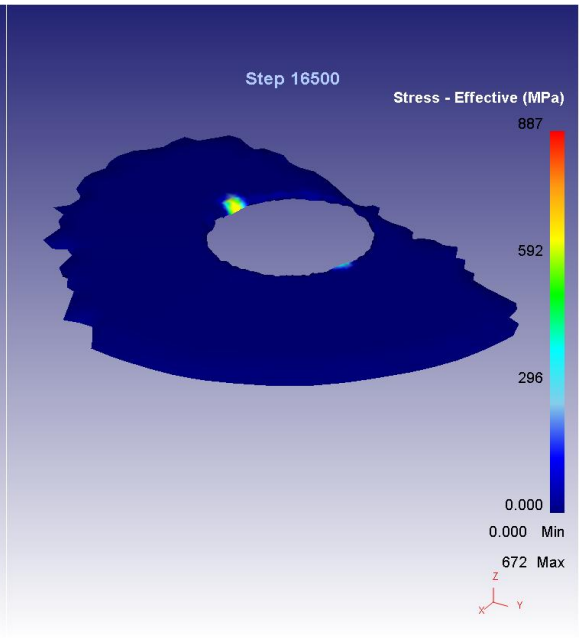

Рис. 8

На рис. 7, 8 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 материал на границе отверстия не разрушился даже на конечном *28547* шаге расчета.

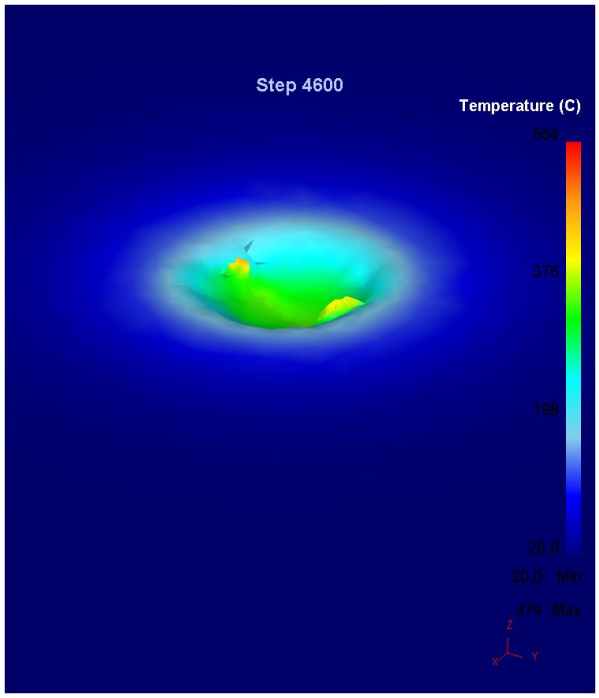

Рис. 9

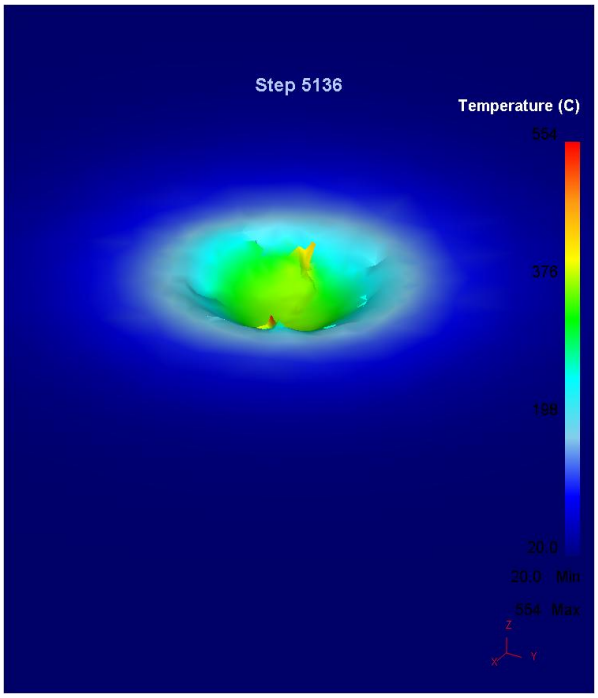

Рис. 10

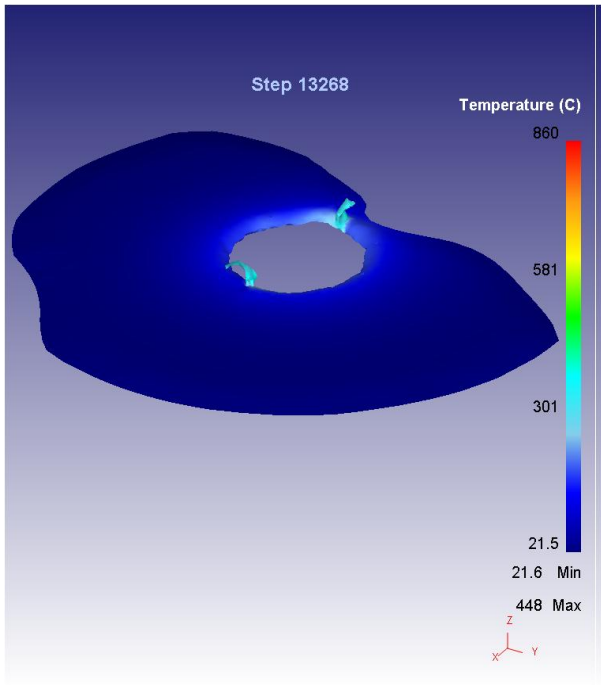

Рис. 11

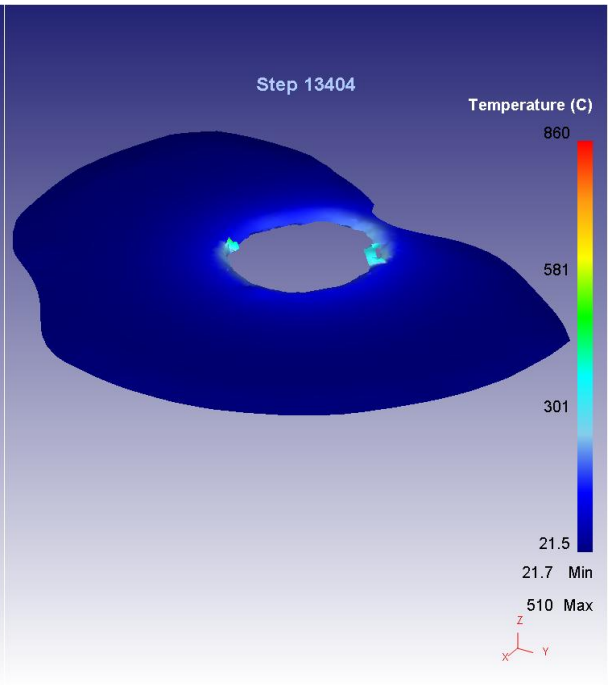

Рис. 12

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 пластины 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 конечных элементов, 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 континуальную 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.

На рис. 9, 10 показаны температурные поля и образование стружки в начале второго десятка оборотов сверла, когда сквозное отверстие еще не образовалось. На рис. 11, 12 показаны температурные поля и образование стружки на *28-м* обороте сверла, когда сквозное отверстие уже образовалось. 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 конечные элементы 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 $D = 25мм$, постоянной толщины $h = 0{,}7мм$ с начальной ямкой под сверло, имеющей круглый контур и глубину *0,2 мм*. В пластине была сформирована сетка *11806* трехмерных конечных элементов, выбран шаг по времени $\Delta t = 1{,}136 \bullet 10^{-5} c$. 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 0,7*2 мм*.

Отношение $t_{Rem} / t_{Clc} = 1/90 << 1$ после *3-го* оборота, $t_{Rem} / t_{Clc} = 1/25 << 1$ после *6-го* оборота, $t_{Rem} / t_{Clc} = 1/7$ 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 отношение 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.

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 [1-9], в частности метода конечных элементов, в которых применяются последовательности наборов сеточных финитных функций [1-9], взаимно ортогональных на каждой конкретной сетке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев В. Л. Ортогональные финитные функции и численные методы // В. Л. Леонтьев. – Ульяновск: УлГУ, 2003. – 178 с.
2. Леонтьев В.Л. Ортогональные финитные функции в задачах на собственные колебания упругих оболочек // Математическое моделирование. Т. 12, N3, 2000. С. 31-32.
3. Леонтьев В.Л., Мелентьев А.Ю. Ортогональные финитные функции в вариационно-сеточных методах теории криволинейных стержней // Математическое моделирование. Т. 14, N2, 2002. С. 39-50.
4. Леонтьев В.Л. Ортогональные сплайны и вариационно-сеточный метод // Математическое моделирование. Т. 14, N3, 2002. С. 117-127.
5. Леонтьев В.Л., Мелентьев А.Ю. Сеточные методы расчета криволинейных стержней // Математическое моделирование. Т. 15, N10, 2003. С. 95-104.
6. Леонтьев В.Л., Красильников А.Р. О вариационно-сеточном методе теории пластин // Математическое моделирование. Т. 17, N3, 2005. С. 23-34.
7. Леонтьев В.Л., Риков Е.А. Интегральные преобразования, связанные с ортогональными финитными функциями, в задачах спектрального анализа математических моделей сигналов // Математическое моделирование. Т. 18, N7, 2006. С. 90-100.
8. Леонтьев В.Л. Ортогональные финитные функции в задачах на собственные значения // Журнал вычислительной математики и математической физики. Т. 41, N 6, 2001. С. 874-880.
9. Леонтьев В.Л. Метод конечных элементов теории упругости. Смешанные вариационные формулировки // Ульяновск: Изд-во Средневолжского научного центра. 1998. – 168 с.