

Название статьи в научно-технический журнал «Научоёмкие технологии в машиностроении»

«Исследования процессов резания заготовок из труднообрабатываемых материалов с использованием для математического моделирования цифровых двойников» Авторы д.т.н., проф. Киселев Е.С, к.т.н. Илюшкин М.В. и аспирант Савельев К.С.

Объем статьи - 10-12 стр., 12 кегель, 1,5 интервал.  
материал прислать до 17 апреля 2021 г.

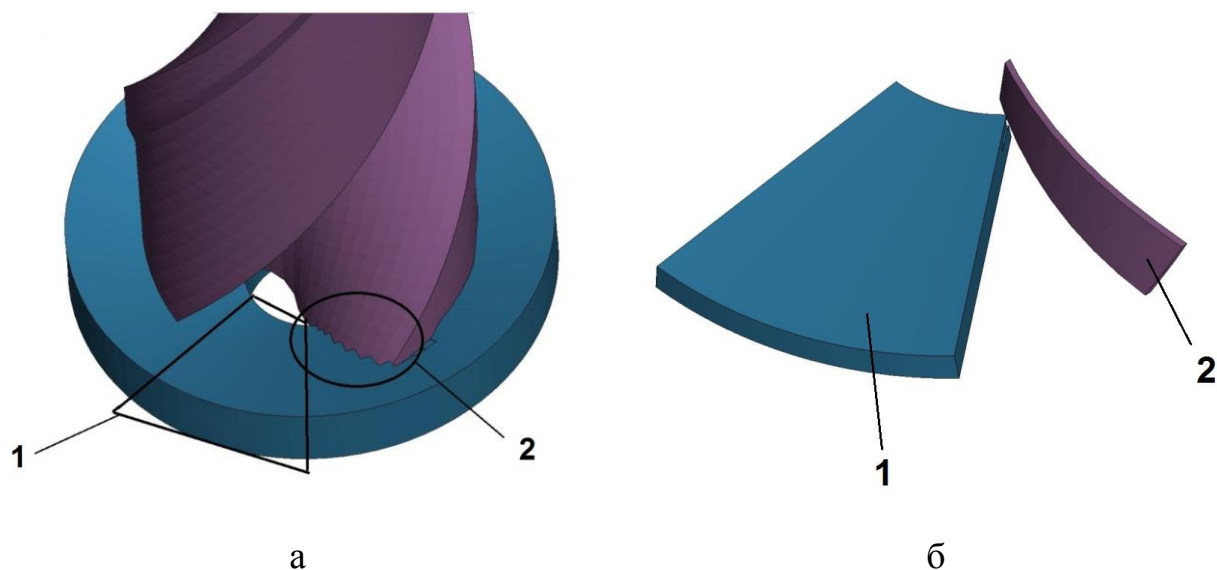


Рис. 1. Исходная модель сверления (а) и принятая модель сверления одним лезвием (б): 1 – исследуемый сектор заготовки, 2 – лезвие сверла

Модель состояла из 2 частей: сектора заготовки 1 и лезвия сверла 2 (рис.1). Фиксация заготовки осуществлялась по нижней части заготовки. Угол сверла при вершине составлял 140 град. Скорость вращения сверла 38 об/сек; подача 0,1 и 0,2 мм/оборот.

Сектор заготовки вырезался из конической модели с отверстием (наружный диаметр модели составлял 5,4 мм, диаметр отверстия 2 мм), величина конуса исходной модели соответствовала углу сверла (140 град). Размеры сектора заготовки составляли 1,7x1,4x0,15 мм. Исходное сверло имело диаметр 4,7 мм. Размеры лезвия сверла 1,7x0,4 мм. Размеры элементов заготовки 0,05x0,05x0,015 мм. Размеры элементов у сверла

составляли 0,03 мм. Сама модель заготовки содержала 17020 элементов и 1440 элементов лезвия сверла.

Для моделирования исследуемых процессов использовалась программа динамического анализа LS-DYNA.

В качестве материала исходной заготовки применялся титан BT6, задаваемый моделью \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY с определением критерия разрушения Gissmo в карте MAT\_ADD\_EROSION. Данные модели материала позволили задавать кривые упрочения в зависимости от скорости деформации, используя табличные данные в карте DEFINE\_TABLE, а критерий разрушения от напряженного состояния с помощью параметров триаксилити и Lode. Тепловые свойства материала задавались в карте MAT\_THERMAL\_ISOTROPIC где определялась его теплопроводность и теплоемкость.

Для заготовки определялся тип элемента \*SECTION\_SOLID с полноинтегрированной элементной формулировкой (-2) применяемая при плохом соотношении сторон.

Лезвие сверла задавалось как недеформируемый материал с помощью модели материала \*MAT\_RIGID с параметрами стали. Для инструмента определялся тип элемента \*SECTION\_SOLID с пониженным интегрированием.

Контакт между сверлом и заготовкой определялся картой \*ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE, этот контакт позволял учесть разрушения элементов в процессе резания и обеспечил контакт с последующими внутренними элементами заготовки. Величина коэффициента трения составляла 0,05. Для отсутствия проникновения отхода в заготовку определялся самоконтакт с помощью карты CONTACT\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE.

Для обеспечения вращения лезвия сверла задавалась карта BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID, определение графика вращения осуществлялось с помощью карты DEFINE\_CURVE. Подача

завалась непосредственно в модели смещением сверла относительно верхней плоскости заготовки на 0,1 мм (для подачи 0,2 мм/об) и 0,05 мм (для подачи 0,1 мм/об). Данные значения связаны с тем, что при сверлении в процессе участвует 2 лезвия сверла.

Для проведения прочностного расчета совместно с тепловым определялась карта \*CONTROL\_SOLUTION и использовались тепловые карты CONTROL\_THERMAL\_ для определения настроечных параметров теплового расчета. На все элементы модели определялась начальная температура 20<sup>0</sup> С с помощью карты INITIAL\_TEMPERATURE\_SET.

Для вывода параметров тензора деформации на заготовке определялась карта DATABASE\_EXTENT\_BINARY с заданием параметра STRFLG=1.

В начале исследования для подтверждения адекватности используемой модели материала, а также для установления сеточной зависимости моделировали процесс одноосного растяжения образца из сплава ВТ6 с характеристиками используемыми в основной модели сверления. Для этого была создана модель образца для растяжения один из торцов модели был зафиксирован, а на второй прикладывалось перемещение вдоль оси образца в направлении растяжения (рис. 2).



Рис. 2. Исходный образец из материала ВТ6, моделирование одноосного растяжения

По результатам моделирования рис. 3-4 сравнивали соответствие усилия при моделировании с усилием при эксперименте и кривую

упрочнения с исходной кривой. Кривая упрочнения строилась для разрушаемого элемента образца по графику stress-strain. Форма образца после разрушения, а также графики показали хорошее соответствие с реальным экспериментом. Такие же размеры сеточных элементов заготовки применяли и в основном моделировании сверления. Лезвия сверла прорезаемого заготовку по ранее выставленной толщине соответствовала величине подачи. Результаты моделирования содержали выходные данные по НДС, температуре, энергосиловым параметрам процесса.

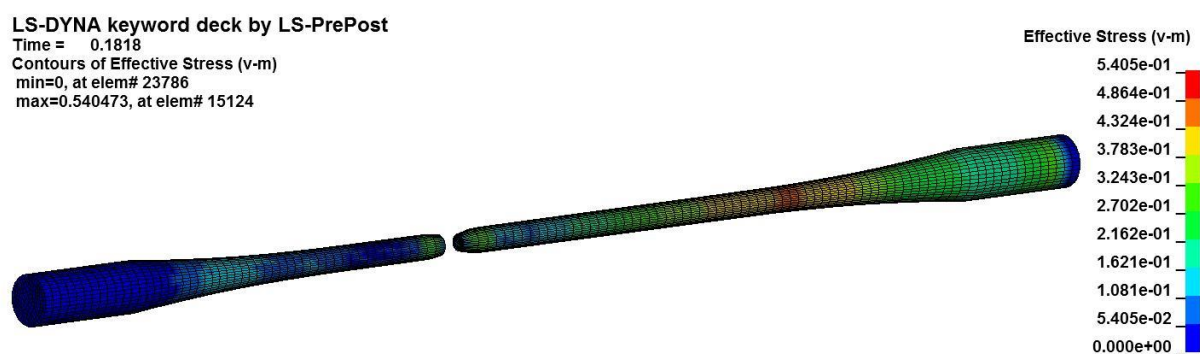


Рис. 3. Разрыв образца из сплава ВТ6 при моделировании на одноосное растяжение

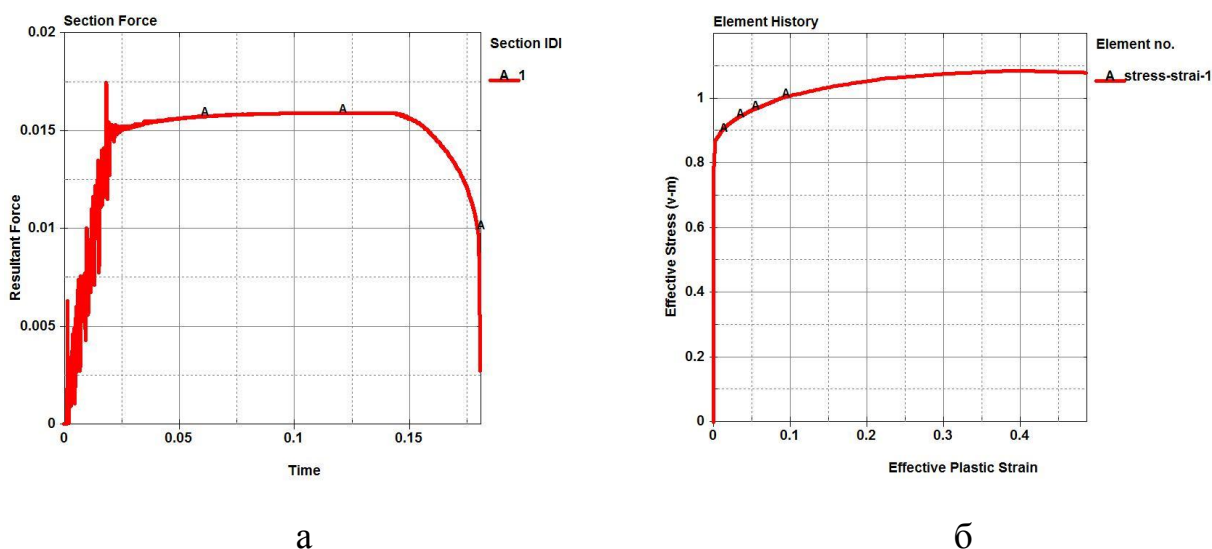


Рис. 4. Результаты моделирования на одноосное растяжение: а – кривая усилия, кН, б - кривая упрочнения

Исследовали этапы отделения отхода при сверлении. Как видно из рис. 5 наибольшей пластической деформации подвергается внутренняя часть отхода, при этом на основной заготовке после отделения отхода пластические деформации значительной меньше. Распределение напряжения von mises на заготовке сходно с распределением пластической деформации.

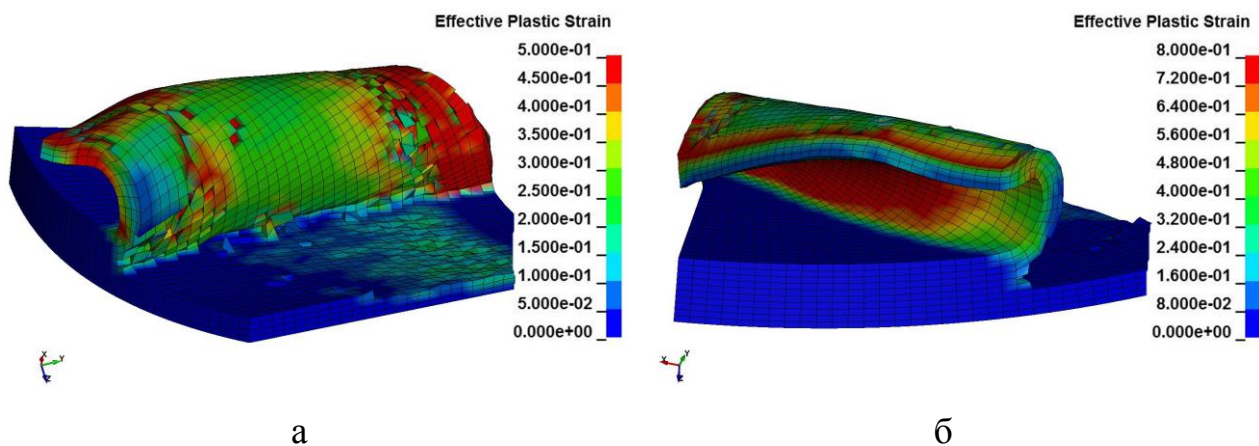


Рис. 5. Пластические деформации в зоне реза (а) и с обратной стороны (б) в процессе сверления

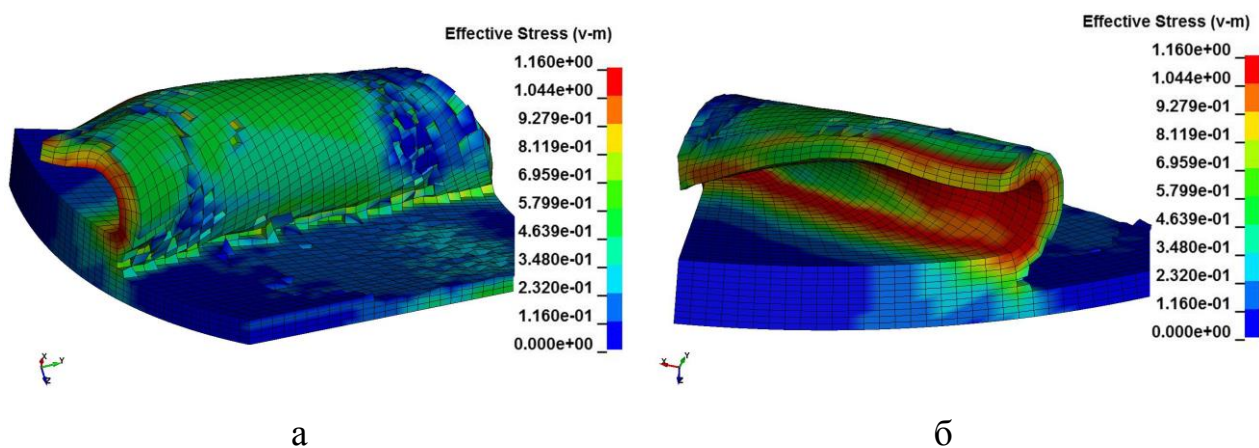


Рис. 6. Напряжение von Mises зоне реза (а) и с обратной стороны (б) в процессе сверления

Этапы сверления и результаты в виде палитры цвета по пластической деформации, напряжению von mises и температуре для подачи 0,1 мм/об и 0,2 мм/об приведены на рис. 7-10.

При подаче 0,1 мм/об отход сильнее закручен по сравнению с подачей 0,2 мм/об, что связано с меньшим количеством срезаемого материала.

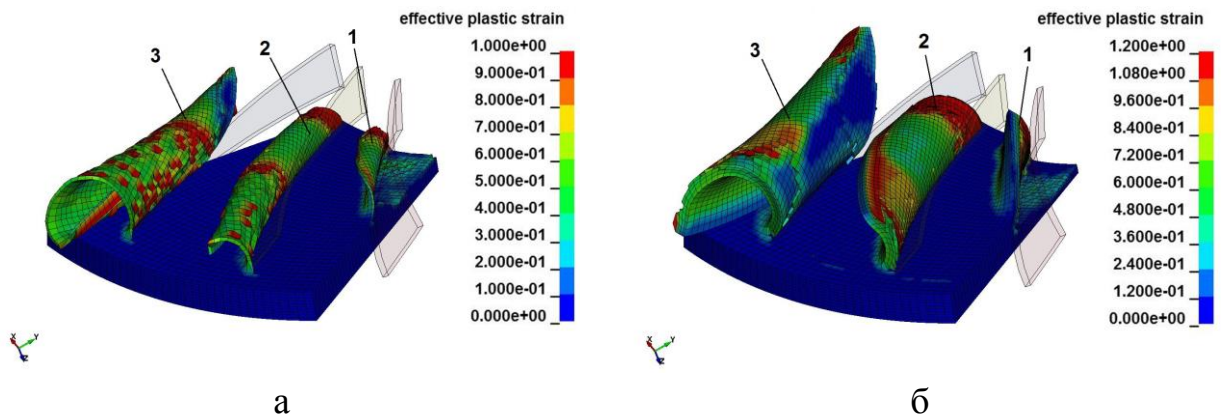


Рис. 7. Вывод по пластической деформации при подаче 0,1 мм/об (а) и 0,2 мм/об (б) для разных этапов сверления: 1 – 0,34 мсек, 2 – 2,17 мсек, 3 – 3,3 мсек

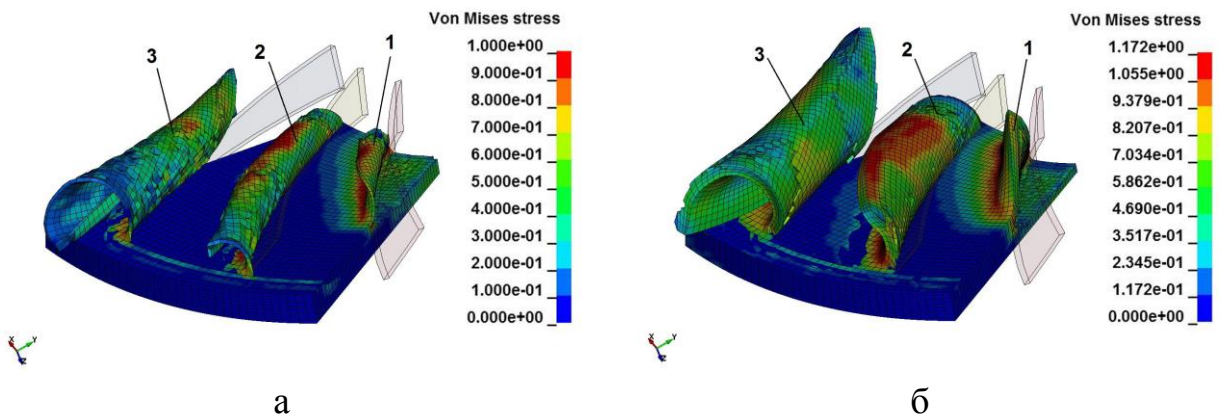


Рис. 8. Вывод по напряжению von mises при подаче 0,1 мм/об (а) и 0,2 мм/об (б) для разных этапов сверления: 1 – 0,34 мсек, 2 – 2,17 мсек, 3 – 3,3 мсек

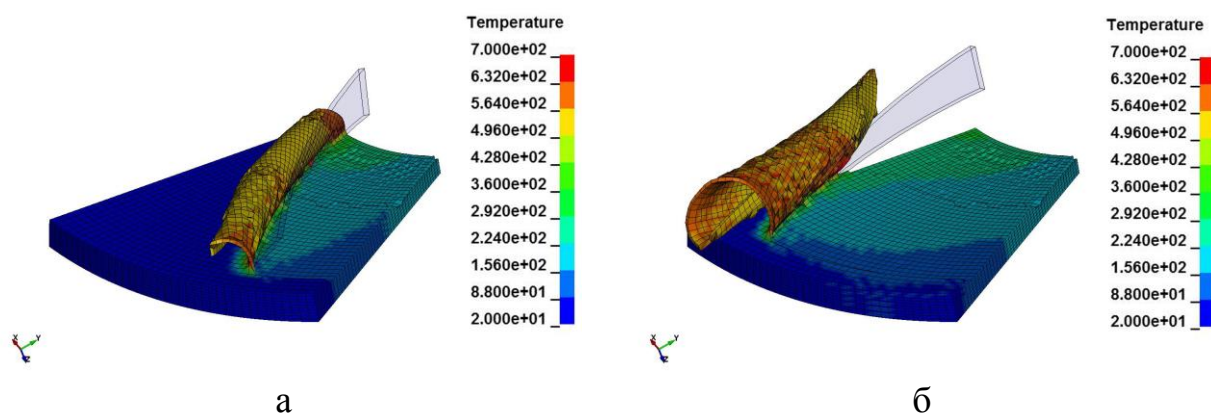


Рис. 9. Этапы сверления, вывод по температуре, подача 0,1 мм/об для времени 2,17 мсек ( а) и 3,3 мсек (б)

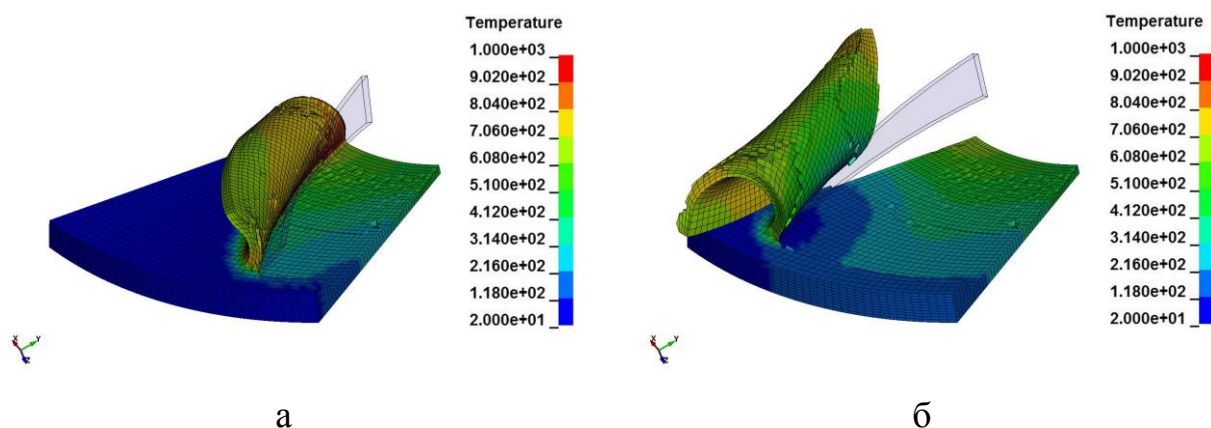


Рис. 10. Этапы сверления, вывод по температуре, подача 0,2 мм/об для времени 2,17 мсек ( а) и 3,3 мсек (б)

Результаты вывода информации по усилию в зоне сверления и моменту на сверле показаны на рис. 11. Графики представляют собой трапецию, где в начале происходит увеличение усилия реза (момента), в этот период происходит врезания лезвия сверла в металл, далее идет установившейся процесс, когда все лезвие действует на металле и далее усилие (момент подает) происходит выход лезвия из металла. Для оценки данных параметров использовали значения на установившемся режиме. Момент на лезвии сверла составлял 0,09 кН\*мм при подаче 0,1 мм/об и 0,18 кН\*мм при подаче 0,2 мм/об. Усилие на лезвии сверла составляет 0,055 кН при подаче 0,1 мм/об и 0,11 кН при подаче 0,2 мм/об. При увеличении подачи соответственно увеличивались усилие сверления и момент.

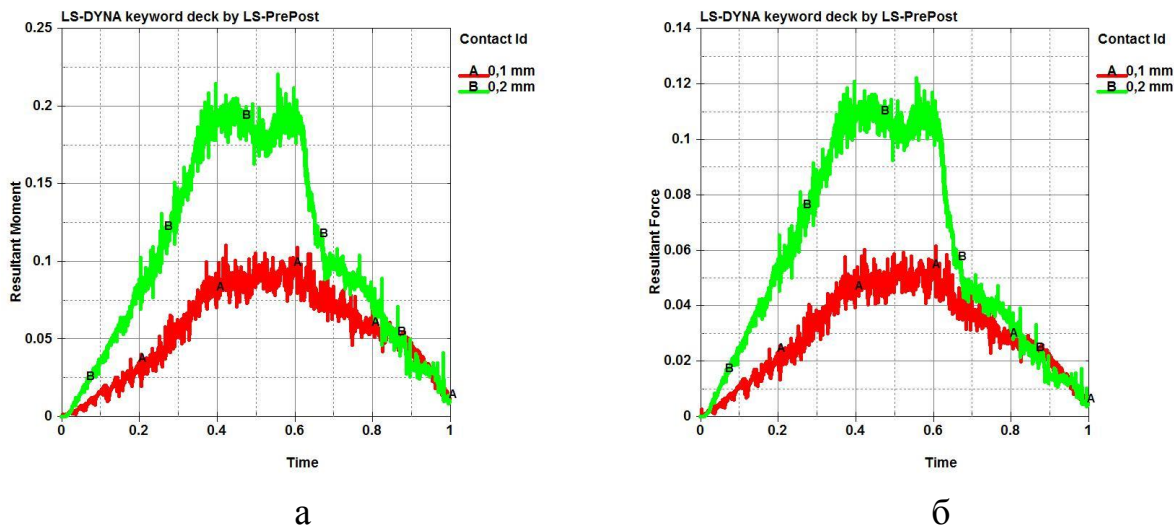


Рис. 11. Результаты моделирования. Вывод по моменту, кН\*мм (а) и усилию на лезвии сверла, кН (б)

Были проведены исследования по определению НДС и температуры по различным элементам заготовки и отхода (рис. 12).

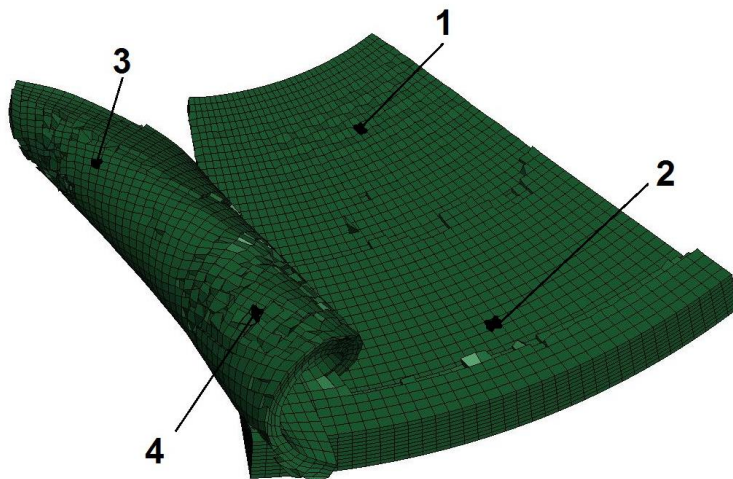


Рис. 12. Контрольные элементы на заготовке в процессе сверления: 1,2 – на части заготовке после сверления; 3,4 – на отходе

Как показали исследования, пластическая деформация на отходе превышает деформацию на поверхности заготовке после сверления. Кроме этого увеличение величины подачи приводит к увеличению значения



пластической деформации на отходе, при этом величина на поверхности заготовки после сверления меняется на значительно.

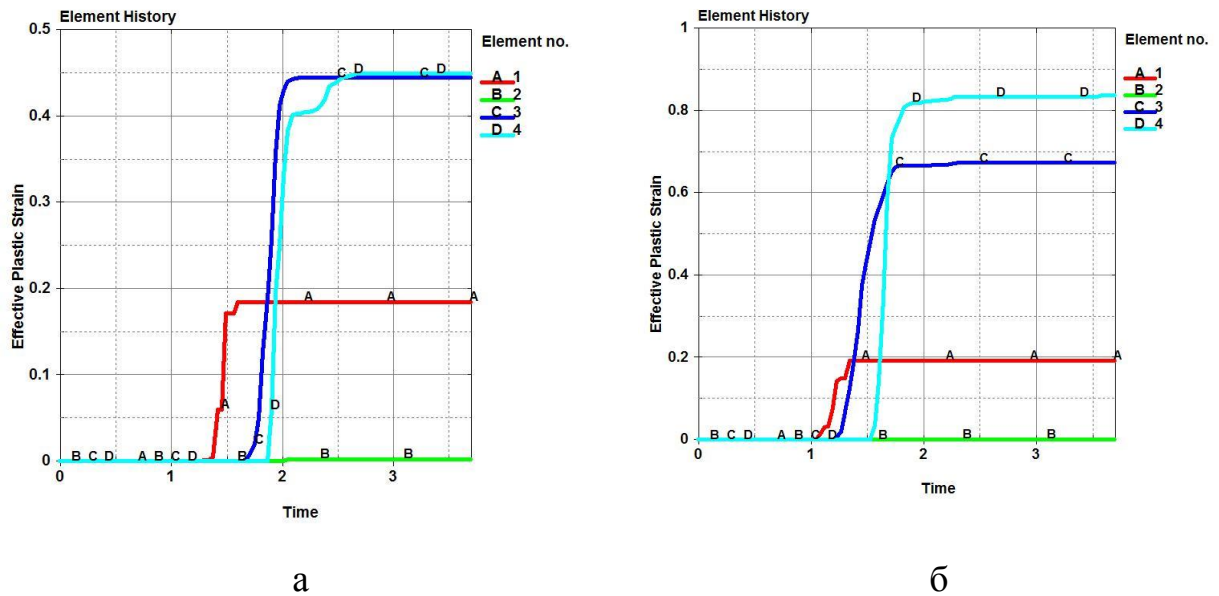
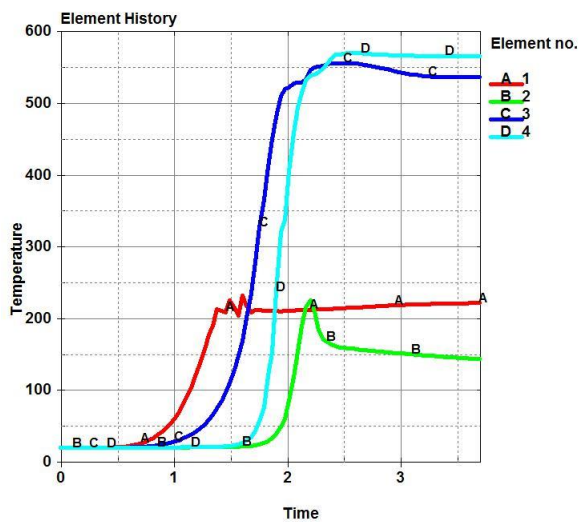
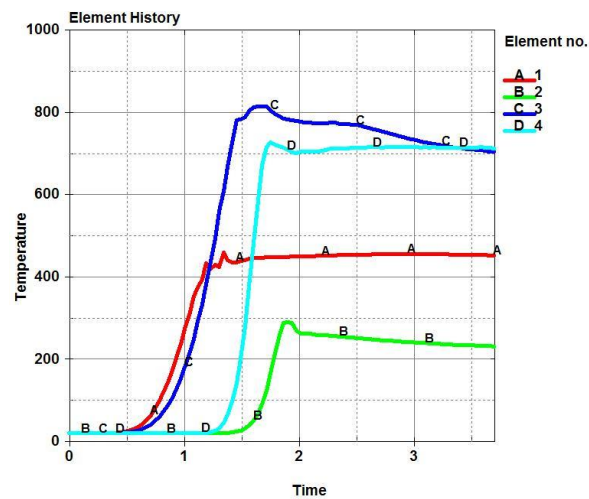


Рис. 13. Вывод по пластической деформации на контрольных элементах в зависимости от величины подачи: а – 0,1 мм/об, б – 0,2 мм/об

Увеличение величины подачи также приводит и к увеличению тепловых эффектов. Температура на отходе повышается с  $550\text{ C}^0$  при подаче 0,1 мм/об до  $750\text{ C}^0$  при подаче 0,2 мм/об. На поверхности заготовки после сверления повышается с 150-220  $\text{C}^0$  при подаче 0,1 мм/об до 220-440  $\text{C}^0$  при подаче 0,2 мм/об.



а



б

Рис. 14. Вывод по температуре на контрольных элементах в зависимости от величины подачи: а – 0,1 мм/об, б – 0,2 мм/об

Также были изучены величины эффективных пластических и главных деформаций вдоль траектории зоны реза (рис. 15). Как показали графики (рис. 16) максимальная пластическая деформация достигает 35% и расположена ближе к центру оси заготовки и примерно одинаковой для обеих подач. Интересно, что пластически и главные деформации в основном сосредоточены в части заготовки ближе к оси заготовки, что может быть связано с началом реза. Значения главных деформаций (минимальной и максимальной) лежит в пределах 8-10% для подачи 0,1 мм/об и 9-14% для подачи 0,2 мм/об.

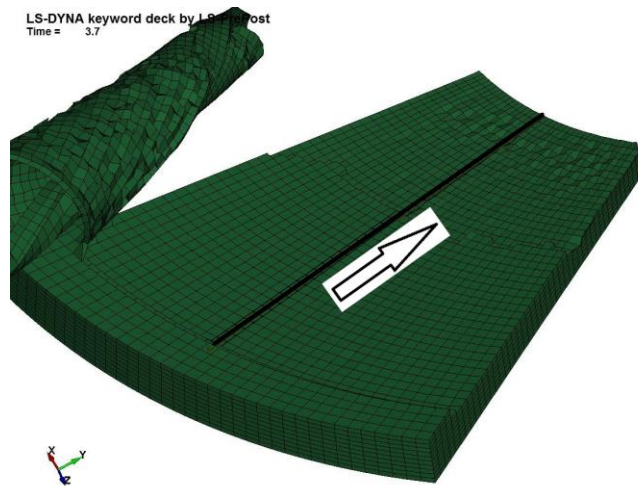


Рис. 15. Исследуемая траектория на заготовке после сверления

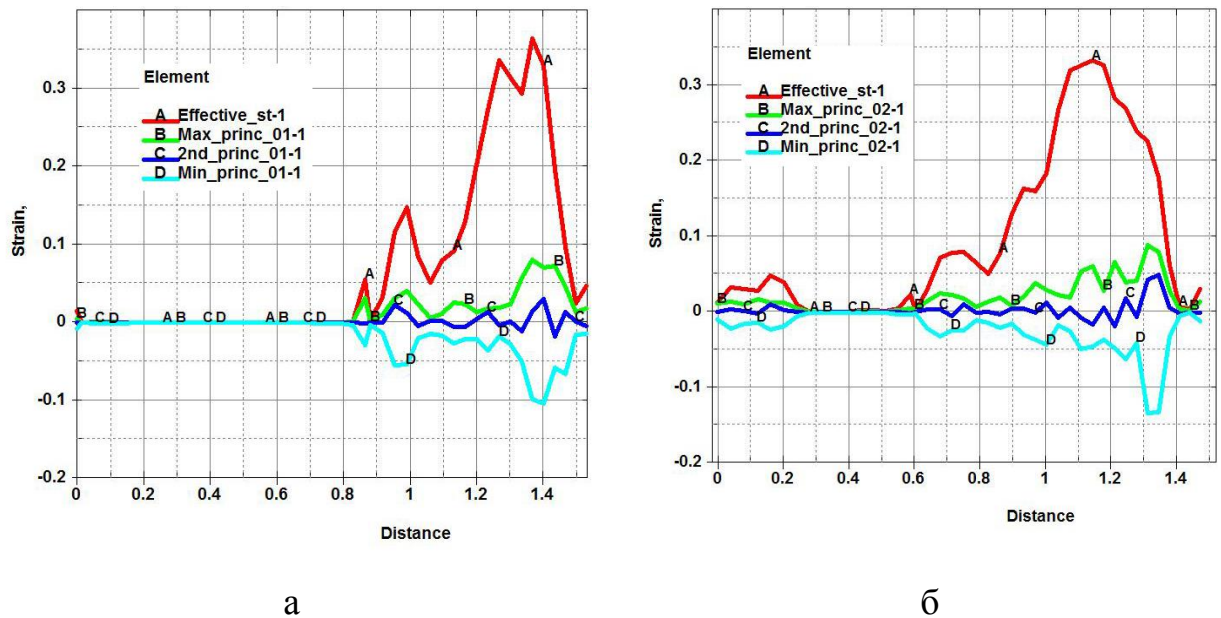


Рис. 16. Эффективные пластические деформации (А) и главные деформации (В, С, D) вдоль траектории на заготовке после сверления в зависимости от величины подачи 0,1 мм/об (а) и 0,2 мм/об (б)

Были проведены экспериментальные исследования по усилию сверления рис 17. Диаметр сверла также составлял 4,7 мм, материал заготовки ВТ6.

При увеличении подачи увеличивается осевая сила резания.

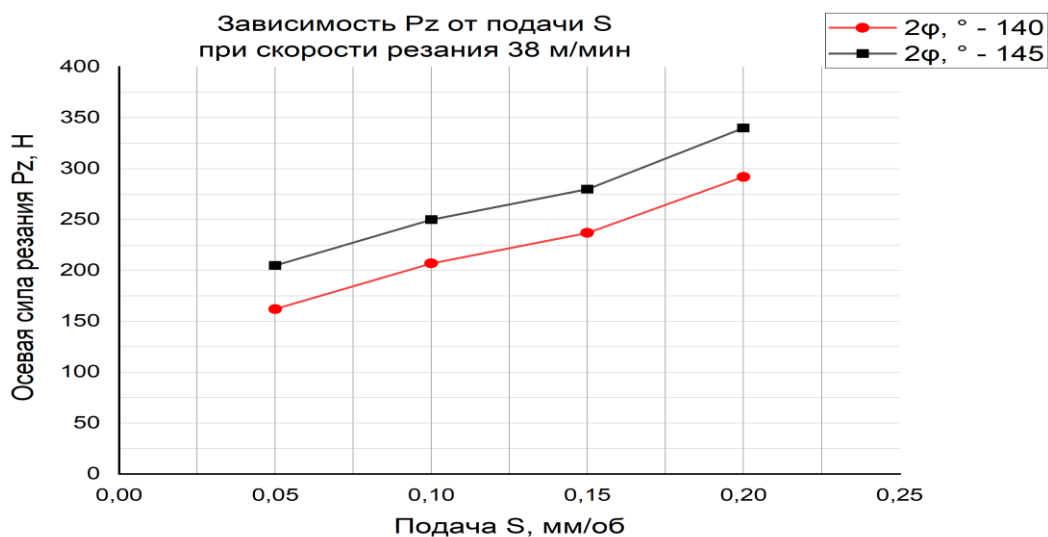


Рис. 17. Результаты экспериментов

Проведен сравнительный анализ результатов эксперимента и моделирования. Поскольку исходная модель для моделирования содержала внутреннее отверстие, то значения получено при экспериментальном исследовании коррелировали с результатами моделирования. Полагали, что отношения усилия сверления при наличии отверстия и без него составляет величину 0,6, тогда усилие составляло при угле сверления  $140^\circ$  для подачи 0,2 мм/об -  $295 \cdot 0,6 = 177$  Н, для подачи 0,1 мм/об -  $200 \cdot 0,6 = 120$  Н.

Поскольку при моделировании исследовали только одно лезвие, то для получения полного усилия данное значение умножали на 2, тогда для подачи 0,2 мм/об усилие при моделировании составляло -  $110 \cdot 2 = 220$  Н, для подачи 0,1 мм/об -  $55 \cdot 2 = 110$  Н.

Сравнительная диаграмма приведена на рис. 18. Сравнение полученных усилий позволило определить отклонение эксперимента от моделирования. Для подачи 0,2 мм/об отклонение составило 24%, для подачи 0,1 мм/об – 9%.

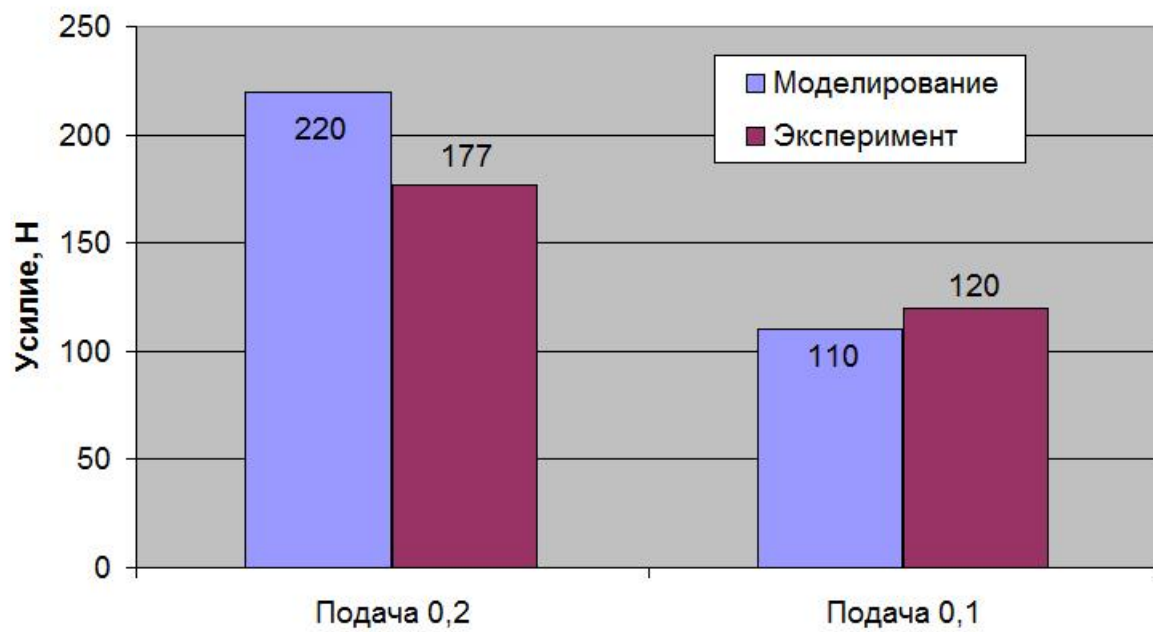


Рис. 18. Сравнение результатов эксперимента и моделирования