

Использование цифровых двойников для математического моделирования УЗ резания титановых заготовок

Илюшкин Максим Валерьевич, Савельев Кирилл Сергеевич,
Крупенников Олег Геннадьевич, Киселев Евгений Степанович

1-ООО «Ульяновский НИАТ», г.Ульяновск, Российская Федерация, e-mail:fzbm@mail.ru.

2-ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск, Российская Федерация, e-mail:kirillsavelev@gmail.com.

3-ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск, Российская Федерация, e-mail:krupennikov_oleg@mail.ru

4-ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г.Ульяновск, Российская Федерация, e-mail:kec.ulstu@mail.ru

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, резание, ультразвук, титан, сверление, напряжения, энергия деформирования

Аннотация.

Представлены результаты численных экспериментальных исследований резания титановых заготовок с использованием программ математического моделирования, позволяющие полностью повторить технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). В качестве программы, для моделирования процесса съема припуска с титановой заготовки использовали продукт Ls-dyna. Установлено, что применение данного метода адекватно описывает процессы резания, в том числе с введением в зону обработки энергии ультразвукового поля, позволяет существенно сократить длительность проведения экспериментальных исследований и оценивать влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на теплосиловые аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин.

Процессы механической обработки со съемом с заготовок припусков отличаются многообразием, всегда были и будут актуальны, отличаются сложностью описания и непредсказуемостью получения окончательных результатов геометрических размеров и погрешностей формы в условиях единичного производства. Особенно сложно обеспечить заданные чертежом и техническими условиями параметры при изготовлении нежестких и тонкостенных деталей из труднообрабатываемых и композиционных материалов.

Детальное исследование напряженного состояния в процессе резания позволяет лучше узнать процесс.

В последнее время широкое распространение получили программы математического моделирования, позволяющий полностью повторить технологические процессы в компьютере (цифровой двойник).

Ls-dyna является одной из программ позволяющей смоделировать процессы резания.

Упростим многообразие процессов резания до обработки материала заготовки режущим клином.

Схема рассматриваемого процесса приведена на рис. 1.

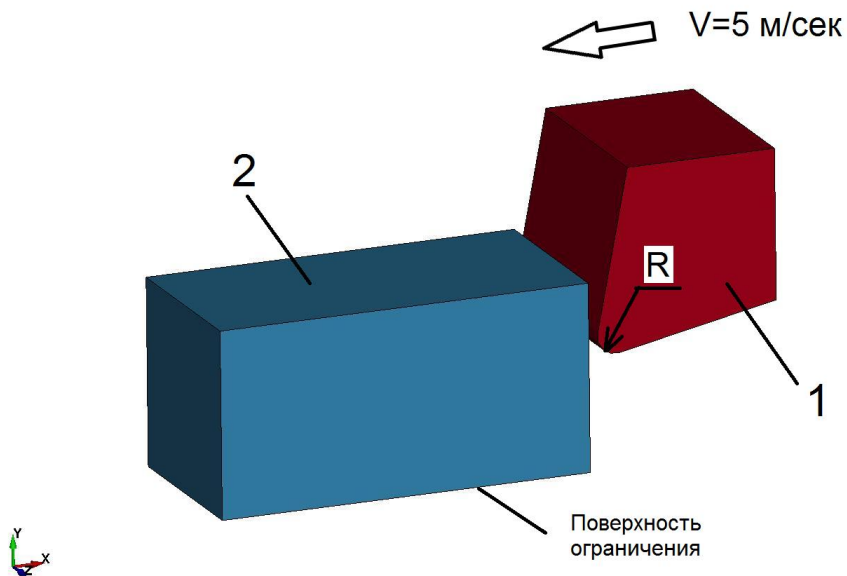


Рис.1. Схема процесса резания клином заготовки Лагранжевого типа: 1 – режущий клин с радиусом закругления при вершине R, 2 – заготовка

Модель процесса резания состоит из 2 частей: режущего клина 1 и заготовки 2. Фиксация заготовки осуществлялась по нижней поверхности. Режущий клин 1 движется в направлении $-X$ со скоростью 5 м/с.

Размеры заготовки 10x5x5 мм. Размеры клина 5x5x5 мм (без скосов). Величина радиуса закругления реза составляла 0,5 мм. Клин относительно заготовки располагался таким образом, чтобы осуществлять деформацию верхней части заготовки. Величина съема (глубина резания) в исходной модели составляла 1,4 мм.

Моделирование процесса резания клином выполняли с использованием программы динамического анализа LS-Dyna. Одной из целей моделирования является выявление влияния ультразвука (УЗК) на процесс резания, а также установление зависимости выходных параметров (НДС по von mises, энергосиловые параметры) от величины коэффициентов трения, радиуса закругления режущей кромки реза и величины съема.

На первом этапе исследования за основу был принят лагранжевый метод. Модель заготовки была представлена конечными элементами (кубиками), в процессе резания при достижении в элементе предельной деформации данный элемент удалялся из расчета.

В качестве исходного материала заготовки был выбран один из широко распространенных в современном машиностроении труднообрабатываемых конструкционных материалов - титановый сплав ВТ6, задаваемый моделью материала *MAT_JOHNSON_COOK [1]. В данной модели также был задан и критерий разрушения материала на основе величины предельной пластической деформации.

Режущий клин задавался как недеформируемый материал с помощью модели материала *MAT_RIGID. В программе для обеих частей модели определяли тип элемента SOLID с пониженным интегрированием.

Контакт между режущим клином и заготовкой описывался картой *ERODING_NODES_TO_SURFACE. Этот контакт позволял учесть разрушения элементов в процессе резания и обеспечил взаимодействие с последующими (нижележащими) внутренними элементами заготовки. Величина коэффициента трения составляла 0,3 [1].

Конечно-элементная модель в нашем случае состояла из 35.000 элементов.

Для реализации движения режущего клина в процессе съема припуска с заготовки использовали карту BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID.

Поскольку в модели заготовки задано разрушение, то при достижении максимальной пластической деформации разрушение приходило с самых нагруженных элементов,

которые находятся на плоскости среза в зоне воздействия режущего инструмента с радиусом R . В процессе деформации возникало стружкообразование.

Результаты моделирования по НДС в период начала образования стружки приведены на рис. 2. Можно отметить что наиболее эффективное напряжение находится в зоне образования стружки от радиуса режущего клина до верхнего (поверхностного) слоя заготовки (рис. 2,а). Результаты моделирования хорошо сходятся с прямыми экспериментальными данными.

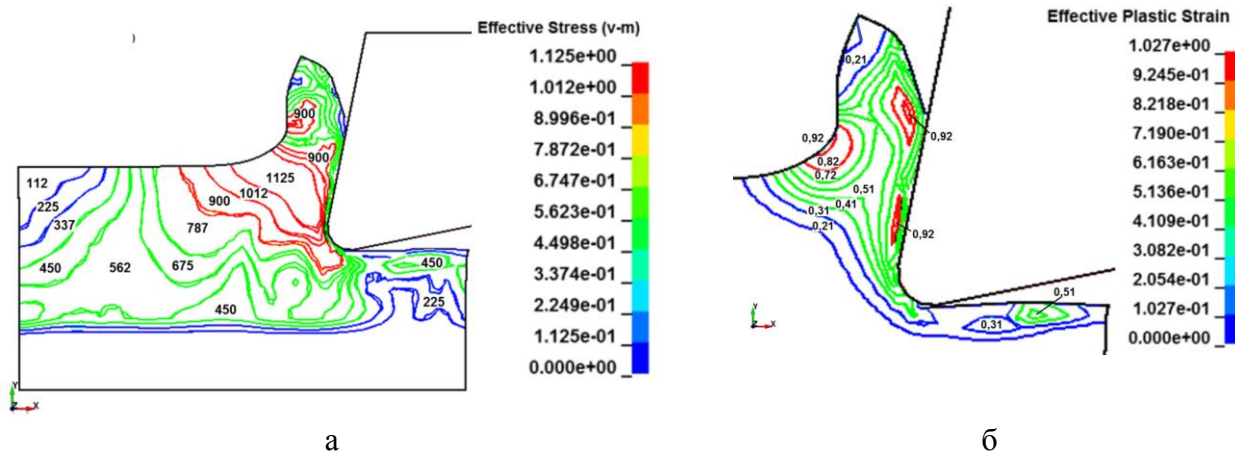


Рис.2. Контуры значений эффективных напряжений по von mises (а) и пластические деформации (б) в процессе резания титановой заготовки из сплава BT-6

Одним из недостатков метода Лагранжа является потеря энергии при удалении элемента, что сказывается на точности расчета. Если геометрия инструмента имеет более сложную форму (например, при сверлении), то количество удаленных элементов может быть значительным (до 50-70%), что значительно снижает точность расчетов.

Другим недостатком лагранжевого метода – является сложность учета воздействия высокочастотных колебаний, например УЗК.

Нивелировать эти недостатки позволяет применение бессеточных методов расчета, например, на основе методов Галеркина (SPG, EFG) (рис.3).

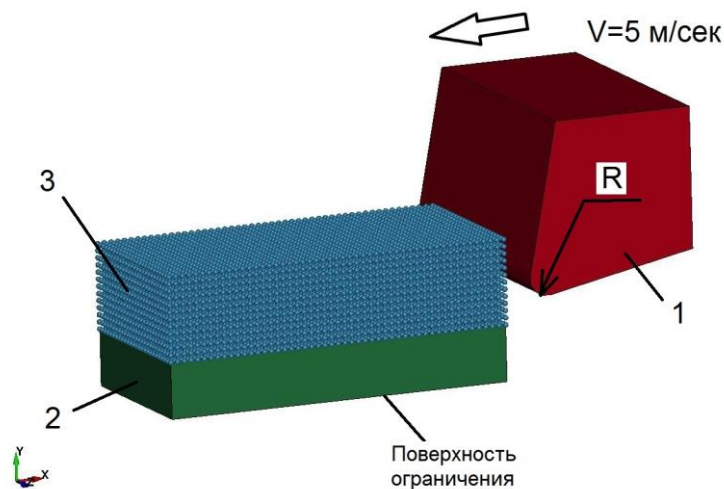


Рис.3. Схема процесса резания клином заготовки по Галеркину: 1 – режущий клин с радиусом скругления R , 2 – нижняя часть заготовки представлена лагранжевым методом, 3 – верхняя заготовка представлена методом Галеркина (SPG)

В данной работе был применен бессеточный метод SPG. Основное отличие от метода Лагранжа состоит в том, что в методе SPG отсутствуют конечные элементы и в процессе деформирования не происходит их удаление, а фиксируется только разделение металла. Это позволяет сохранить исходную энергию и не уменьшает точность расчета. Данная расчетная модель представлена на рис.3.

В данной модели деформируемая часть заготовки заменяется с конечных элементов на бессеточные элементы.

Кроме данных исследований, в работе был рассмотрен вариант наложения ультразвука на резец с амплитудой 10 мкм и частотой 20 кГц.

Результаты моделирования (рис. 4) показывают, что при использовании УЗ-энергии титановая стружка может образовывать наросты металла. Усилие взаимодействия имеет синусоидальный вид (рис. 5, а). При этом пиковые значения усилия при воздействии УЗК и без УЗК совпадают. Однако, из расчетов следует, что при сравнении средних значений, величина усилий с использованием УЗК меньше на 40%. Оценка по энергии деформирования на рис. 5,б также показывает уменьшении величины на 20% при введении в зону формообразования энергии УЗ-поля. Все это говорит о явном влиянии и преимуществе воздействия УЗ на энергосиловые параметры процесса.

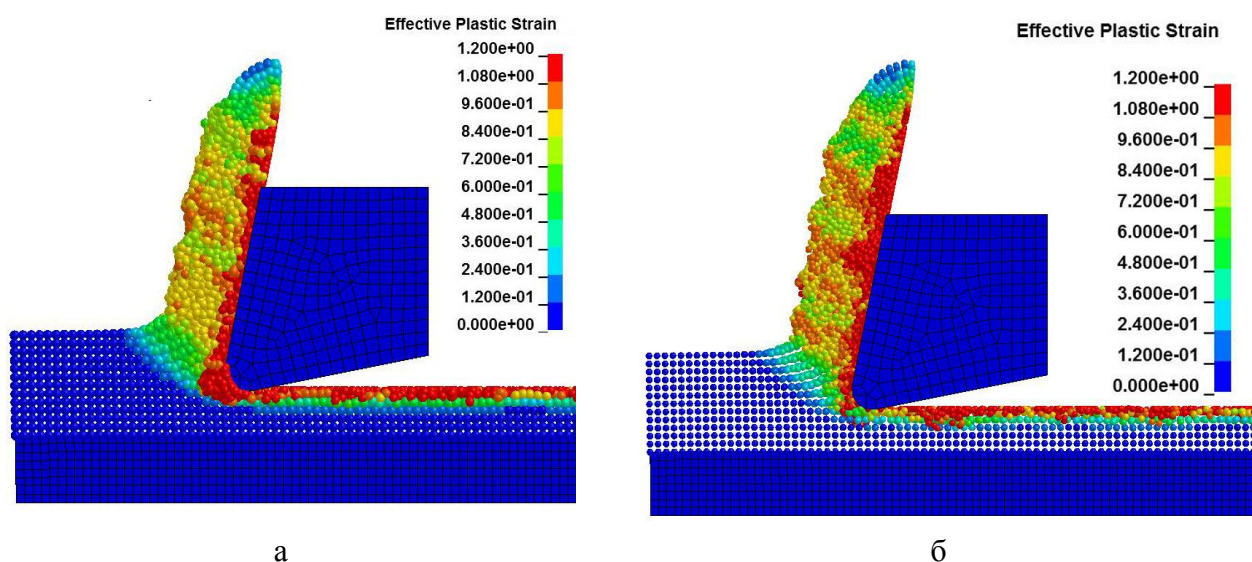
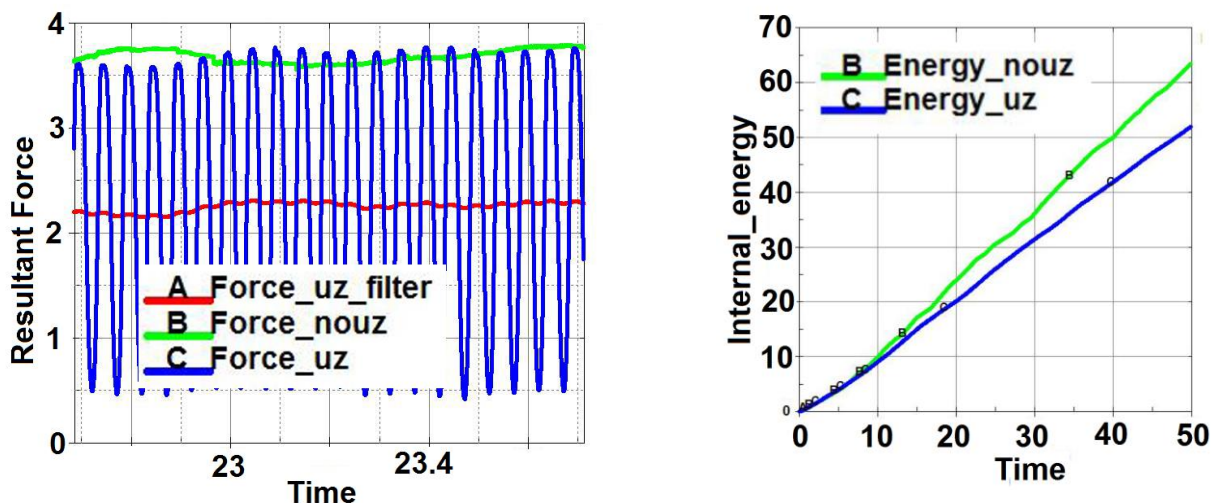


Рис.4. Вид стружки и распределения эффективных напряжений по von mises без наложения УЗК (а) и с наложением УЗК (б)



а б
 Рис.5. Сравнение усилия, кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) от времени мсек без наложения УЗ (кривая В) и с наложением УЗ (кривая С)

В работе было исследовано влияние коэффициента трения на процесс резания. Рассмотрено 3 варианта с коэффициентами трения 0,05; 0,3 и 0,5. При одинаковом времени воздействия (рис. 6) толщина снимаемой стружки при коэффициенте трения 0,5 значительно больше, чем при 0,05.

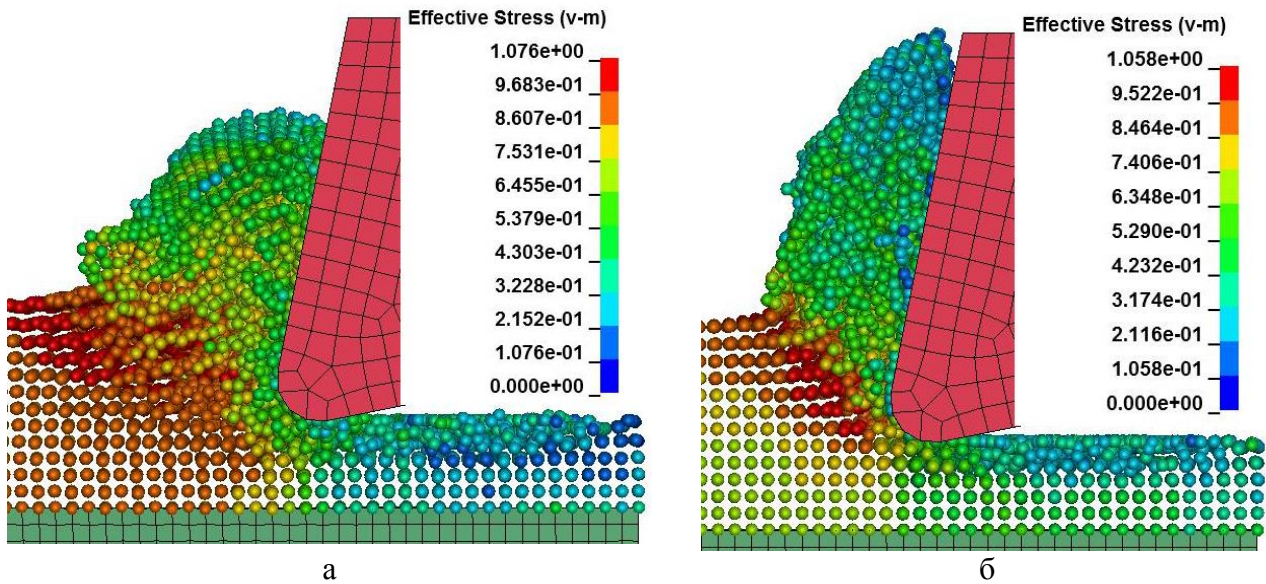


Рис.6. Вид стружки и распределения эффективных напряжений по von mises при коэффициенте трения 0,5 (а) и 0,05 (б)

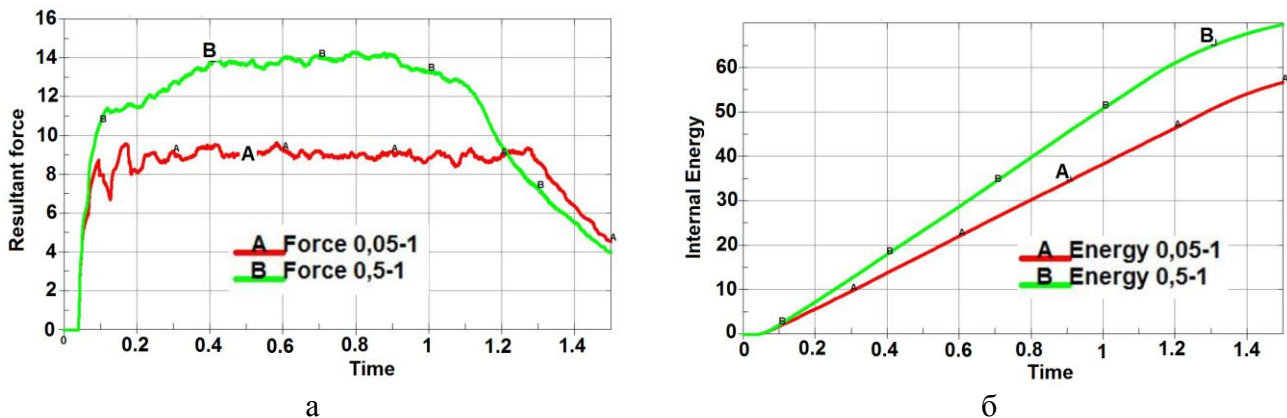


Рис.7. Сравнение результатов по усилию резания, кН (а) и энергии деформирования Дж (б) при различном коэффициенте трения (А – коэффициент трения 0,05, В - коэффициент трения 0,5)

Как видно из графиков рис.7,а величина усилия резания составляла 14 кН при использовании коэффициента трения 0,5 и 9 кН при использовании коэффициента трения 0,05. Энергия деформирования в конце хода составляла 70 Дж при использовании коэффициента трения 0,5 и 56 Дж при использовании коэффициента трения 0,05.

Анализ результатов показывает, что увеличение коэффициента трения приводит к увеличению усилия резания и энергии деформирования заготовки.

Также было исследовано влияние величины радиуса закругления режущей кромки резца. Было рассмотрено 3 варианта: с величиной радиуса R0,25 мм, R0.5 мм и R1 мм.

Как видно из результатов исследований, уменьшение радиуса при вершине реза вызывает уменьшение усилия резания. Если при радиусе $R=1$ мм усилие составляет 15,5 кН, то при радиусе $R=0,25$ мм усилие уже составляет 10 кН. По энергии деформирования зависимость аналогичная: уменьшение величины радиуса приводит к уменьшению энергии деформирования (рис.7,б).

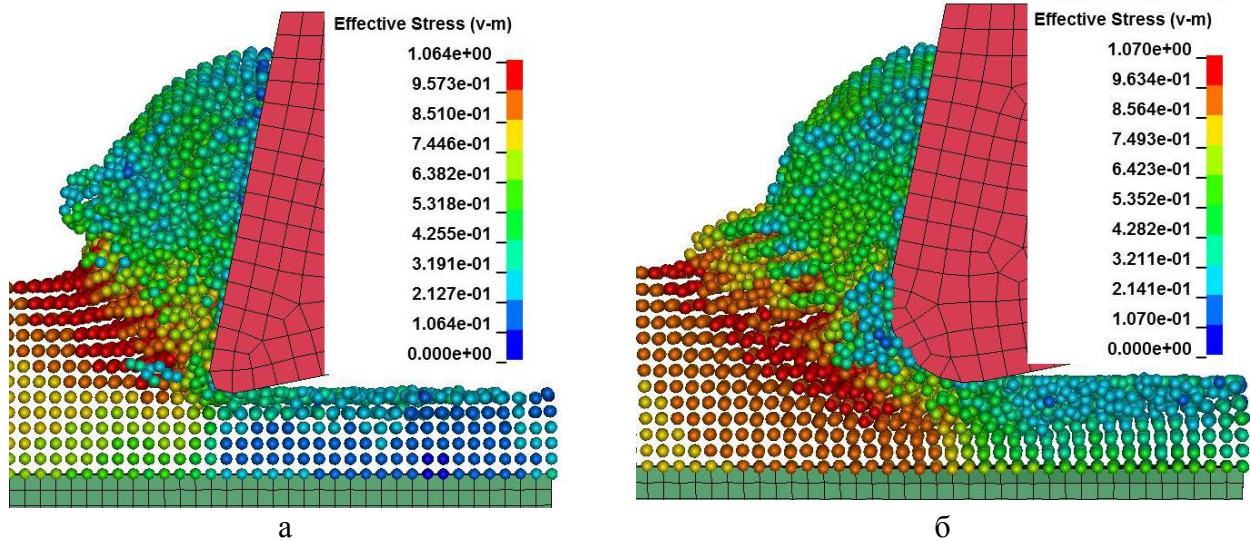


Рис.7. Вид стружки и распределение эффективных напряжений по von mises при величине радиуса закругления при вершине реза 0,25 мм (а) и 1 мм (б)

Как видно из результатов исследований, представленных на рис.8, уменьшение радиуса при вершине реза вызывает уменьшение усилия резания. Если при радиусе $R=1$ мм усилие составляет 15,5 кН, то при радиусе $R=0,25$ мм усилие уже составляет 10 кН. По энергии деформирования зависимость аналогичная: уменьшение величины радиуса приводит к уменьшению энергии деформирования.

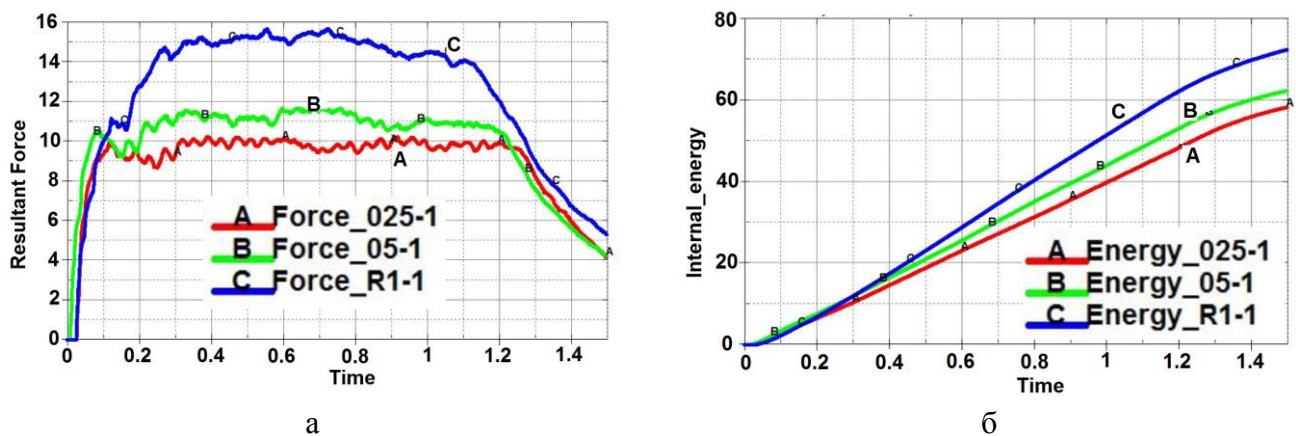


Рис.8. Сравнение результатов по усилию резания, кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) при различной величине радиуса закругления вершины реза: А – $R=0.25$ мм, В – $R=0.5$ мм, С – $R=1$ мм

Было рассмотрено влияние глубины резания (величины съема) на процесс стружкообразования и энергосиловые параметры процесса. Величина съема (глубина резания) составляла 1,4; 0,7 и 0,35 мм).

Анализ полученных результатов исследований показывает (рис.9), что как толщина снимаемой стружки, так и распределения эффективных напряжений по von mises уменьшаются с уменьшением глубины резания.

Сравнение результатов по усилию резания (а) и энергии деформирования (б) в зависимости от величины глубины резания показывают, что если при съеме 1,4 мм усилие резания составляет 11 кН, то при съеме 0,35 мм уже 2,5 кН. Сравнение по энергии деформирования показывает аналогичные результаты: при величине съема 1,4 мм энергия деформирования составляет 62 Дж, при 0,35 мм – 25 Дж (рис.10).

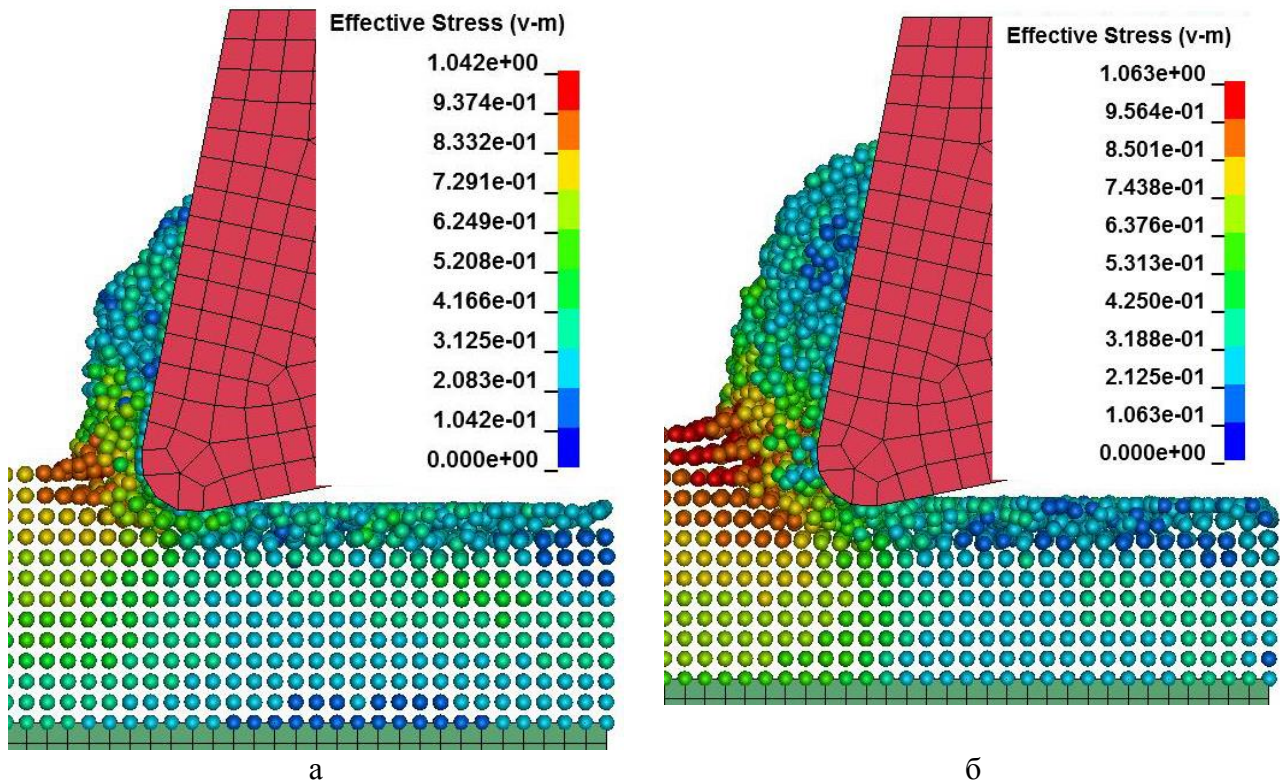


Рис.9. Вид стружки и распределения эффективных напряжений по von mises при глубине резания 0,35 мм (а) и 0,7 мм (б)

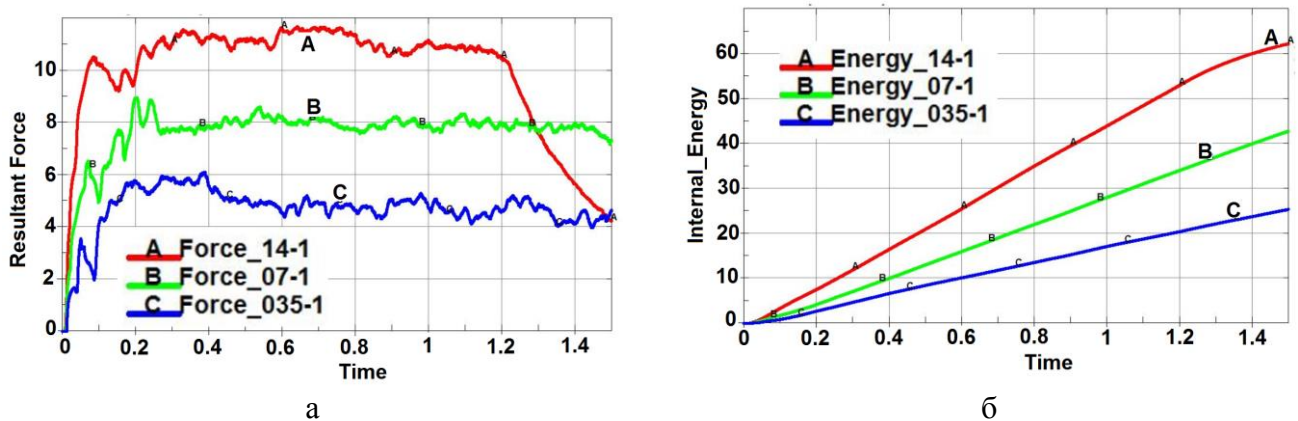


Рис.10. Сравнение результатов по усилию резания, кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) в зависимости от величины глубины резания: А – 1,4 мм, В – 0,7 мм, С – 0,35 мм

Как показали выполненные исследования, уменьшение величины съема приводит к уменьшению усилия и энергии деформирования. Если при съеме 1,4 мм усилие деформирования составляет 11 кН, то при съеме 0,35 мм уже 2,5 кН. По энергии деформирования при величине съема 1,4 мм составляет 62 Дж, то при 0,35 мм – 25 Дж.(рис.10)

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Представленные результаты численных экспериментальных исследований процесса резания титановых заготовок с использованием программ математического моделирования в компьютере (цифровой двойник), позволяют по полученным данным, практически полностью, повторить технологические процессы на реальном технологическом оборудовании.

- Установлено, что применение данного метода адекватно описывает процессы резания, в том числе с введением в зону обработки энергии ультразвукового поля, позволяет существенно сократить длительность проведения экспериментальных исследований и оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на теплосиловые аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин.

Список литературы:

1.Криворучко Д.В. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов: учебное пособие/ Д.В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач.- Сумы: Изд-во СумДУ, 2009. – 208 с. (Краткие теоретические сведения о методе конечных элементов, стр. 15-22).