

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 40X

Козлов В.Н.<sup>1</sup>, Дин Ц.<sup>2</sup>, Чжан Х.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, доцент ОМШ,  
E-mail: kozlov-viktor@bk.ru;  
<sup>2</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ21,  
E-mail: czechul@tpu.ru;  
<sup>3</sup>НИ ТПУ, ИШНПТ, зр. 4АМ21,  
E-mail: 1764602262@qq.com;

Математическое описание напряженно-деформированного состояния металла в зоне стружкообразования в настоящее время основывается на большом объеме экспериментальных данных, полученных различными методами. Используются экспериментальные данные о длине упругого и пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента, характер распределения контактных напряжений на передней и задней поверхностях инструмента, а также значение и направление силы резания [1–8].

В статье представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне стружкообразования при моделировании методом конечных элементов (МКЭ) процесса строгания стальной полосы и проблемы, возникающие при моделировании. В данном исследовании выбрана явная динамическая модель, материал образца – сталь 40X, материал строгального резца – твёрдый сплав Т15К6, геометрические параметры инструмента: передний угол  $\gamma = 40^\circ$  и  $7^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ . Скорость резания  $v = 180$  м/мин, глубина резания  $t = 0,5$  мм, ширина резания  $b = 5$  мм.

Сравнение распределение напряжений в зоне стружкообразования при врезании строгального резца в заготовку и при работе в установившемся режиме представлено на рис. 1.

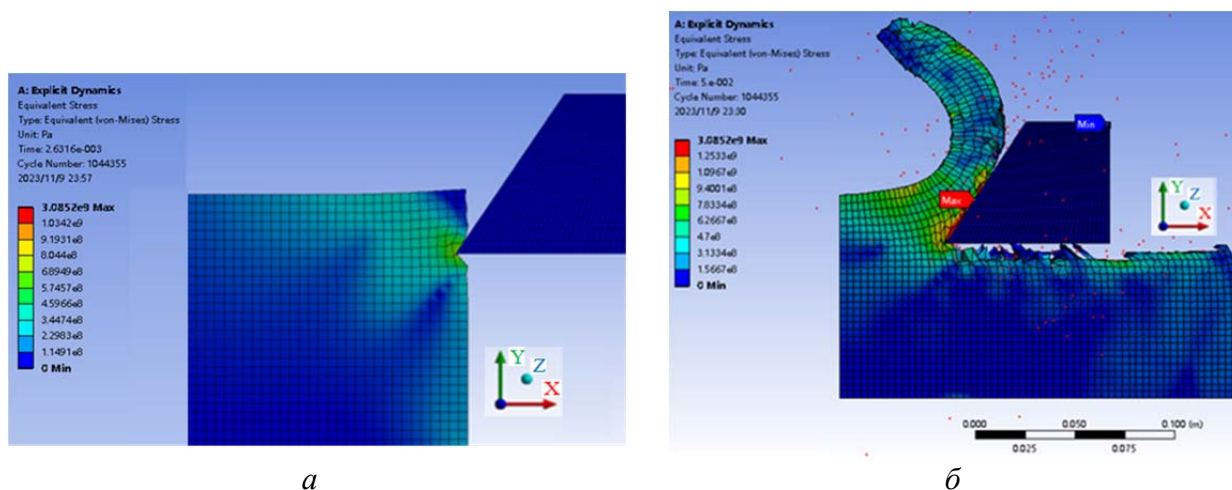


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений  $\sigma_e$  (Па) при врезании (а) и при установившемся резании (б). Сталь 40X – Т15К6,  $v = 180$  м/мин,  $\gamma = 40^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ .

На этапе врезания зона наибольших эквивалентных напряжений в заготовке располагается в месте контакта с режущей кромкой инструмента, т. е. непосредственно у режущей кромки, а его наибольшая величина  $\sigma_{e \max}$  составляет 804 МПа (рис. 1, а), что явно не много для начала резания. При стабильном процессе резания максимальная величина эквивалентного напряжений в зоне стружкообразования переносится от режущей кромки к зоне вторичной пластической деформации, а ее величина составляет 3085 МПа (рис. 1, б). В области условной плоскости сдвига наибольшая величина эквивалентных напряжений изменяется от 1096 МПа (у режущей кромки и на поверхности заготовки) до 783 МПа в её средней части.

Основываясь на приведенных выше результатах, можно сделать вывод, что когда передний угол  $\gamma$  инструмента составляет  $40^\circ$ , то при установившемся резании максимальное эквивалентное напряжение от заготовки передается к режущей кромке инструмента, поэтому инструмент не только изнашивается, но и может происходить скол его режущей кромки. Как показывают расчёты НДС режущего клина, в это время на его передней поверхности действуют более опасные растягивающие напряжения, что может привести к сколу. Поэтому при обработке стали 40X следует выбирать инструмент с меньшим передним углом.

Положение зоны с максимальной эквивалентной деформацией  $\epsilon_{\max}$  (мм) связано с зоной максимальных эквивалентных напряжений. Максимальная величина эквивалентных относительных деформаций в заготовке  $\epsilon_{\max}$  при врезании располагается около режущей кромки и составляет 0,0053248 м/м (рис. 2, а). При этом наблюдается область с деформацией 0,00228, которая совпадает с зоной условной плоскости сдвига, что является косвенным подтверждением правильности отображения процессов, происходящих при моделировании.

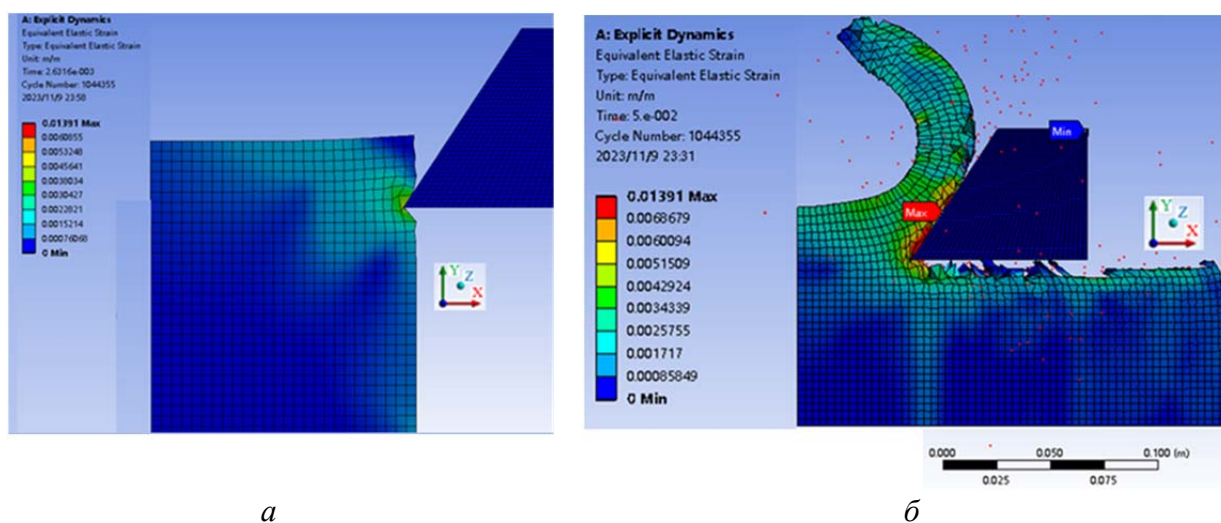


Рис. 2. Распределение эквивалентной относительной деформации  $\epsilon$  (м/м) в заготовке при врезании строгального резца через 0,0026 с (а) и при установившемся резании через 0,05 с (б).

Сталь 40X – T15K6,  $v = 180$  м/мин,  $\gamma = 40^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$

При установившемся режиме резания зона с наибольшей величиной относительных деформации  $\epsilon_{\max} = 0,01391$  находится как в приконтактном слое стружки в зоне вторичной пластической деформации, так и в зоне условного скольжения стружки по передней поверхности (рис. 2, б). Зона контакта стружки с передней поверхностью на отдалении от режущей кромки более  $0,5 \cdot c$  (где  $c$  – длина контакта стружки с передней поверхностью) называется зоной условного скольжения, т. к. там нет чистого трения скольжения (внешнего трения), подчиняющегося закону Амонтона-Кулона, при котором сила трения рассчитывается по формуле  $F = f \cdot N$ , где  $f$  – коэффициент трения, являющийся постоянной величиной для пары контактирующих тел,  $N$  – нормальная сила (сила давления), действующая на движущееся тело.

В рассматриваемой зоне на некоторых участках происходит адгезия стружки с передней поверхностью инструмента, т. е. так называемые «мостики» схватывания [1, 2]. Затем в этих местах происходит срез по поверхности «мостиков», поэтому условный коэффициент трения гораздо больше обычного коэффициента трения скольжения  $f_{\text{ст-ст}} \approx 0,15$  для пары сталь по стали, а для пары сталь по твёрдому сплаву ВК8  $f_{\text{ст-ВК8}} \approx 0,4-0,6$  [2]. В этой зоне при резании условный коэффициент трения увеличивается при отдалении от режущей кромки и изменяется в очень широких пределах:  $\mu_i = \tau_i / \sigma_i \approx 1 \dots 1,9$  [1, 2, 3, 4, 6], где  $\tau_i$  – касательное контактное напряжение (МПа) в  $i$ -й точке,  $\sigma_i$  – нормальное контактное

напряжение (МПа) в  $i$ -й точке. В связи с вышесказанным необходимо учитывать, что в рассматриваемой зоне происходит пластическая деформация, или так называемое внутреннее трение в «мостиках» приконтактного слоя стружки, что и наблюдается на рис. 2, б.

Зона условной плоскости сдвига на рис. 2, б выделяется, но величина относительной деформации  $\epsilon_{\text{пл. сдв}} = 0,0025755$  там не очень большая, как это должно быть при правильном моделировании. В этой зоне деформация должны приближаться к максимальной, т. е. порядка  $\epsilon_{\text{max}} = 0,01391$ , как и в области вторичных пластических деформаций, но немного меньше.

Имеется также зона с деформациями  $\epsilon \approx 0,0025755$ , которая располагается в области режущей кромки и уходит перпендикулярно плоскости резания на всю толщину заготовки, чего быть не должно. Зоны с такой же величиной деформации находятся на обработанной поверхности, что вполне адекватно отображает процессы, происходящие при строгании.

Выполнено сравнение распределения эквивалентных напряжений в зоне стружкообразования при врезании инструмента с передним углом  $40^\circ$  и  $7^\circ$  (рис. 3).

Максимальное эквивалентное напряжение в заготовке в момент врезания резца с передним углом  $\gamma = 7^\circ$  составляет 23 262 МПа, а максимальная эквивалентная относительная деформация 0,16284 (рис. 4, а). Эти данные явно выходят за пределы тех значений, которые может иметь обрабатываемый материал сталь 40Х. Поэтому принимаем, что это ошибка расчёта при моделировании процесса резания. Максимальное эквивалентное напряжение в заготовке перед режущим клином с передним углом  $\gamma = 40^\circ$  в момент контакта с заготовкой составляет 804 МПа, а максимальная эквивалентная относительная деформация  $\epsilon_{\text{max}} = 0,0053248$ .

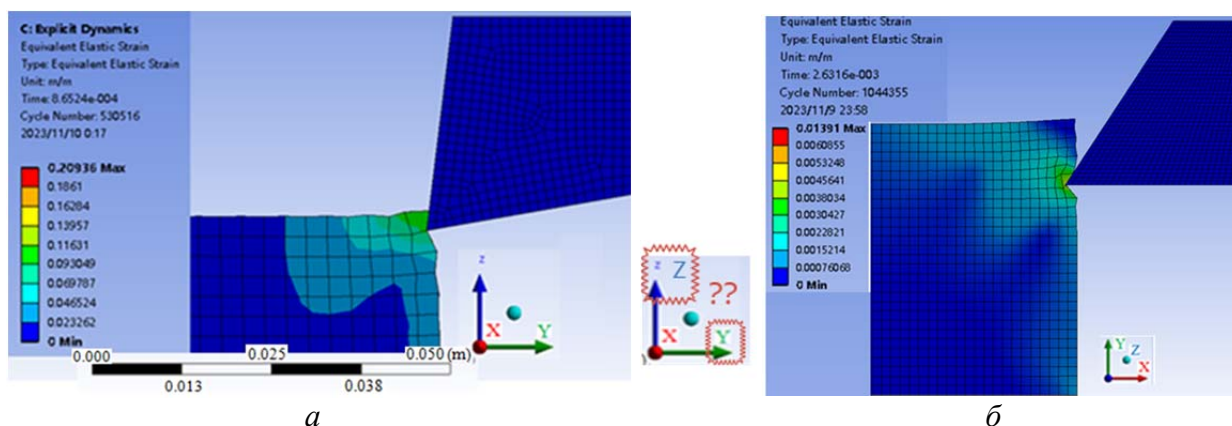


Рис. 4. Распределение эквивалентной деформации  $\epsilon$  (м) при врезании в заготовку из стали 40Х инструментам с передним углом  $\gamma = 7^\circ$  (а) и  $\gamma = 40^\circ$  (б)

Сравнивая распределение эквивалентных напряжений этих двух инструментов в момент врезания, видим, что эквивалентное напряжение в заготовке перед резцом с передним углом  $\gamma = 40^\circ$  образует зонтичное распределение перед острием инструмента, а распределение существенных напряжений в заготовке перед режущей кромкой инструмента совпадает с положением условной плоскости сдвига. Эквивалентное напряжение в зоне резания инструментом с передним углом  $7^\circ$  в момент врезания равномерно распределяется перед передней поверхностью резца, что позволяет инструменту сохранять целостность конструкции. На рис. 4, а показана очень крупная сетка конечных элементов, а попытки уменьшить их величину привели к появлению ошибки расчёта при моделировании.

Небольшая величина эквивалентной относительной деформации отображается и в других частях заготовки по направлению продвижения строгального резца, причем эта деформация распространяется на верхнюю поверхность заготовки. Стоит отметить, что в положении, когда верхняя поверхность заготовки находится на высоте 2,5 мм от вершины



инструмента (от режущей кромки), здесь происходит концентрация эквивалентных напряжений и деформаций. Во время последующего продвижения резца можно видеть, что именно здесь происходит отход будущей стружки от прямолинейной верхней (необработанной) поверхности заготовки, т. е. происходит искривление (изгиб), сопровождающий образование стружки.

**Проблемы, возникающие при экспериментальном моделировании.** В ходе эксперимента возникло множество пока неразрешённых проблем. Например, при проведении моделирования резания с использованием резца с меньшим передним углом резец не мог продвигаться с заданной скоростью. Резец перестаёт двигаться в тот момент, когда он коснулся заготовки, и программа ANSYS сообщает об ошибке, что номер временного шага был слишком мал или ошибка энергии была слишком велика. Попытки изменить соответствующие параметры в настройках всё равно не дали положительного результата, программа показывает ошибку (рис. 5).

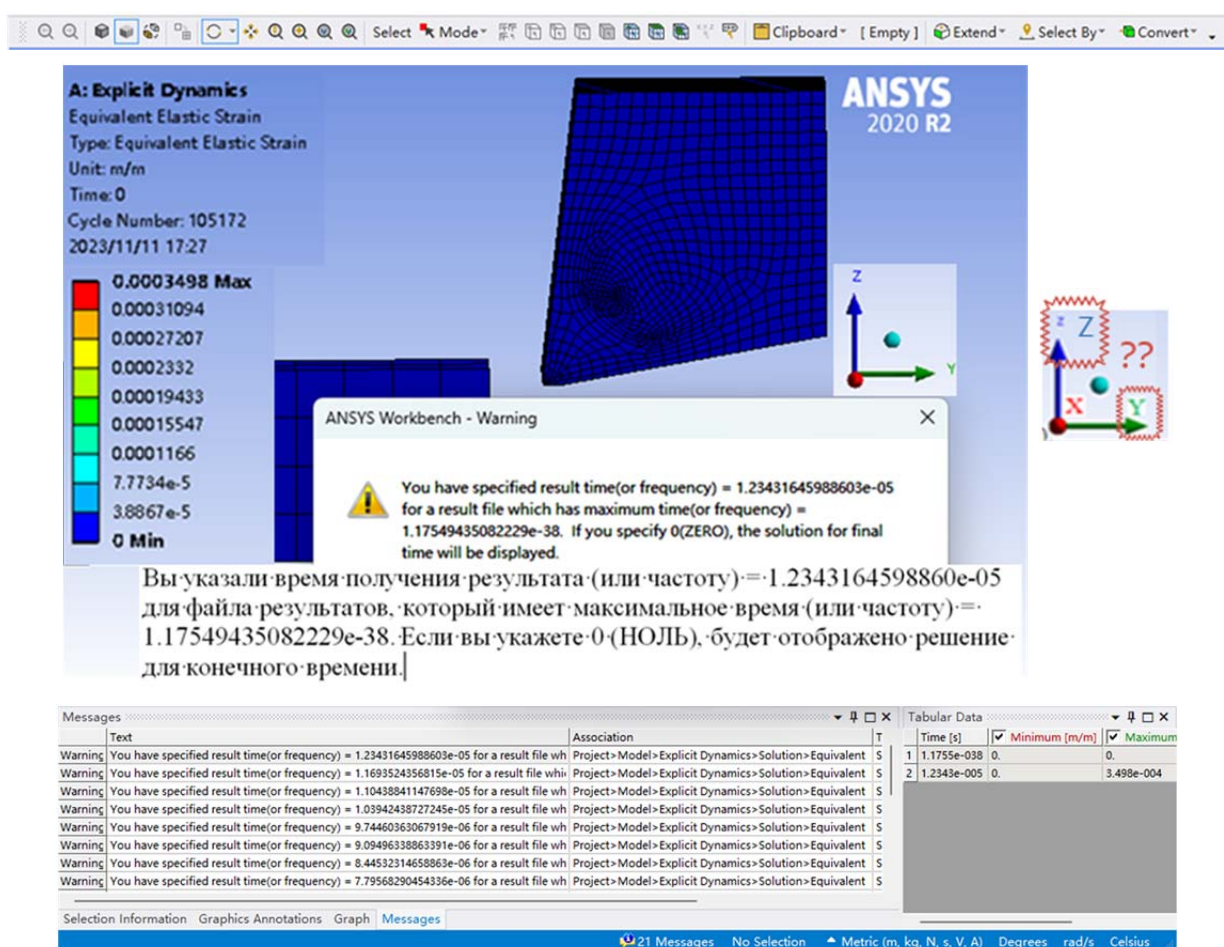


Рис. 5. Проблема, связанная с несовпадением времени получения результата с максимальным временем, возникшая во время моделирования процесса резания

Кроме того, после того, как резец смог нормально продвигаться, возникла ошибка, связанная с невозможностью нормального формирования стружки. В идеале стружка должна изгибаться вверх по мере продвижения резца, но результаты моделирования показывают, что стружка не скручивается нормально, а накапливается перед резцом, образуются небольшие её элементы, как при образовании стружки надлома, характерной для очень хрупких материалов (см. рис. 6), или превращается в бесчисленные маленькие красные точки и исчезает.

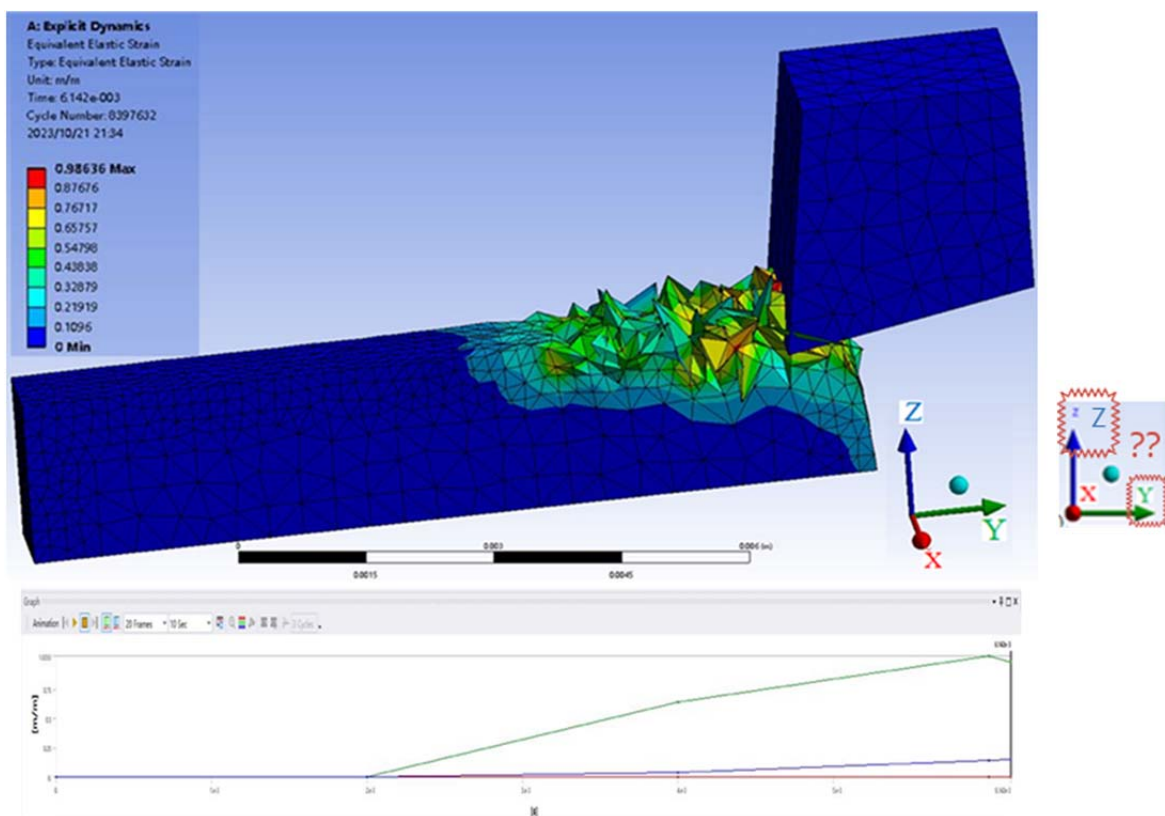


Рис. 6. Проблема с неправильным отображением образования стружки во время строгания

Помимо этого, столкнулись с проблемой, заключающейся в том, что резец не продвигался на заданное расстояние (на расстояние смещения). Окончательное решение этой проблемы состоит в том, чтобы отказаться от использования смещения для ограничения движения резца, а вместо этого использовать ограничения направленного равномерного движения. Однако это приводит к проблеме при расчете энергии (рис. 7).

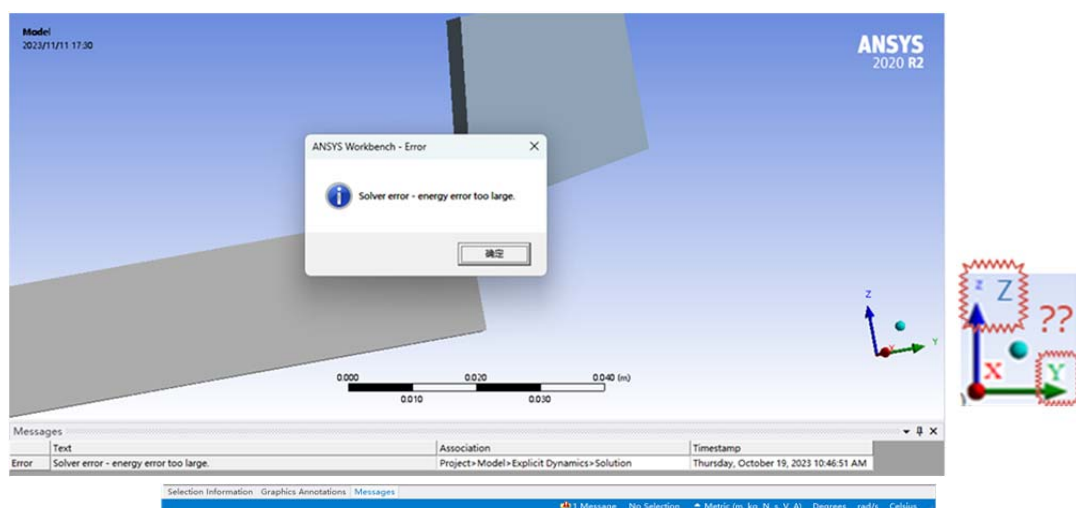


Рис. 7. Ошибка, связанная с энергетической ошибкой (энергия очень большая)

Проанализировав причины этих проблем, мы считаем, что основная причина заключается в том, что существуют проблемы с параметрами задания свойств материала заготовки и режущего инструмента. Вторая причина в том, что мы до сих пор недостаточно глубоко понимаем параметры в настройках и не можем их отрегулировать в соответствии с реальными возникшими проблемами.

В целом можно констатировать, что моделирование процесса строгания со скоростью резания  $v = 180$  м/мин и с глубиной резания  $t = 0,5$  мм в среде ANSYS возможно, но требуется основательное изучение работы программы и особенностей задания исходных данных.

В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

### Список литературы

1. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
2. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента/Полетика М.Ф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с.
3. Физические основы процесса резания металлов / под ред. В.А. Остафьева. Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.
4. Армарево И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарево, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
5. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. Москва: Машиностроение, 2009. – 640 с.
6. Козлов В.Н., Дин Ц., Ли В. Исследование распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента при обработке стали // Современные проблемы машиностроения сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, г. Томск, 22-25 ноября 2022 г.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. кол. Е. Н. Пашков [и др.]. – Томск: Томский политехнический университет, 2022. – [С. 98–100];
7. Мокрицкий Б.Я. Моделирование процессов резания с применением программы ANSYS / Б.Я. Мокрицкий // Вестник машиностроения – 2018. – № 4. – С. 69–72.
8. Маслеников И.А., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Исследование напряжённого состояния зоны стружкообразования с помощью программного комплекса ANSYS Workbench / Обработка материалов резанием, Санкт-Петербург: Политехника, 2012, № 5–6 (71–72). – С. 18–23.