

Д. В. Криворучко, канд. техн. наук, В. А. Залога, д-р техн. наук,
А. Н. Сорокин, Сумы, Украина

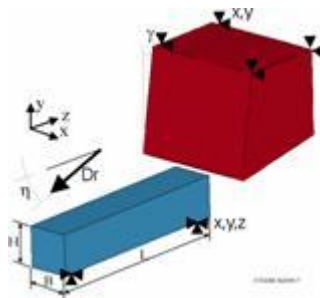
ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕШАТЕЛЯ

Some investigations on productivity and accuracy of explicit finite element simulations of no steady-state machining operations are represented in this article. Element formulation, hourglass method, contact algorithm, explicit integration time step and their parameters are discussed. The recommendations for increasing of analysis productivity are proposed.

На современном этапе развития науки о резании материалов 3D моделирование методом конечных элементов является важным инструментом исследования процессов резания. Программный модуль, называемый решателем, который выполняет интегрирование уравнений движения и теплопроводности, решение контактных задач и другие действия по расчету модели, основан на алгоритмах, которые имеют ряд параметров, обеспечивающих адаптацию этих алгоритмов под конкретные условия решаемой задачи. Параметры решателя влияют на производительность вычислений и ошибку прогнозирования показателей процесса резания. Наиболее сложными с точки зрения выбора параметров решателя являются нестационарные процессы резания (зубообработка, фрезерование, тангенциальное точение и т.п.), а также переходные этапы квазистационарных процессов – врезания и выхода инструмента. Поэтому *целью настоящей работы* является разработка рекомендаций по выбору параметров решателей, работающих методом явного интегрирования уравнений движения, которые при прочих равных условиях обеспечивают 3D моделирование нестационарных процессов резания с наибольшей производительностью и приемлемой ошибкой прогнозирования силы резания и формы стружки.

Рассмотрим переходной процесс врезания с переменной толщиной среза, который свойственен большинству рабочих процессов резания. Расчетная схема представлена в таблице 1. Для определенности угол результирующего движения резания выбран $0,18^\circ$, что соответствует углу результирующего движения резания, например, у вершины сверла диаметром 10 мм, работающего с подачей 0.10 мм/об. Исследования проводились в диапазоне скоростей резания от 50 до 5000 м/мин.

Таблица 1 – Сводная таблица исходных данных модели прямоугольного свободного резания с непрерывно увеличивающейся толщиной среза

Процесс		Прямоугольное свободное резание						РАСЧЕТНАЯ СХЕМА									
Размерность модели		3D															
Геометрические параметры заготовки																	
Lз, мм		Bз, мм		Hз, мм													
12,3		0,16		0,15													
Геометрические параметры инструмента																	
Название инструмента				Лезвие													
Ли, мм	Hi, мм	Bi(d), мм	g, °	a, °	r, мм	hz, мм											
1,25	1,5	1,5	10	10	0,00	0											
Конечно-элементная сетка																	
	Тип КЭ	Кол-во узлов	Кол-во эл-тов	Хар. размер	Флаг равном.	ihq/ qh											
I	Solid1	17587	15414	35 мкм	равном.	-											
3	Solid1	16650	22260	16мкм	равном.	5/0,01											
Допущения																	
ИЖ, ИИ, ИГ, ИП, ЗИ, ЗН, ЗБ, ЗТ, ВК, ВО, ТЖ, ОВ, ПР, ПМ, ПУ, ПЕ, ПЗД																	
Модели материалов																	
Инструмент									Заготовка								
Марка основ. материала						ВК8			Марка материала						Сталь 45		
Номер в БД	HRA	E, ГПа	m	$a_{и} \cdot 10^6, 1/^\circ C$	$r_{20}, кг/м^3$	$S_m, Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	$I, Вт/(м \cdot ^\circ C)$		Номер в БД	HВ	E, ГПа	m	$r_{20}, кг/м^3$	$S_m, Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	$I, Вт/(м \cdot ^\circ C)$		
ВК8	87.5	620	0.3	3,5	14400	153,0	54,4		Ст. 45-1	196	205	0,29	7826	642,0	40,2		
Хар-ка РМ		Абсолютно-жесткое тело							Хар-ка РМ		$(553.1+600.8 \cdot e^{p \cdot 0.234}) \cdot (1+0.0134 \cdot \ln(e^{pr})) \cdot (1-T_m^{1.0})$						
Наим. покрытия			виртуальное		Тол-на, мкм		10		Парам. геометрич. МР			Парам. Физич. МР					
Метод мод-ния	HV	E, ГПа	m	$r_{20}, кг/м^3$	$S_m, Дж/(кг \cdot ^\circ C)$	$I, Вт/(м \cdot ^\circ C)$		$R_q, ^\circ C/Вт$	Алгоритм	Критерий		Алгоритм	Критерий				

В данной работе модель процесса резания реализована в программе LS-DYNA, которая является характерным представителем явных решателей. Несмотря на то, что названия параметров в других решателях могут отличаться от тех, что приняты в LS-DYNA, полученные результаты и разработанные рекомендации для решателя LS-DYNA методологически могут быть использованы и для других решателей. Анализ литературы [1] и предварительные расчеты показали, что при заданной конечно-элементной сетке заготовки и инструмента наиболее существенно влияют следующие 7 факторов: алгоритм подавления безэнергетических форм деформации *ihq* и его параметр q_m , тип элемента *elform*, контактный алгоритм *soft* и величина контактной жесткости *sclfac*, толщина виртуального покрытия *d* (*slthk*), коэффициент увеличения шага интегрирования (ускорения вычислений) $k_{Dt} = Dt/Dt_0$.

Для решения динамических задач наибольшее применение нашли 8-ми узловые конечные элементы-бруски. Известны две реализации этих элементов. Элементы типа 1 имеют 1 квадратную точку в центре масс, требуют мало вычислительных ресурсов и обладают повышенной устойчивостью к искажению своей формы. Однако элементы типа 1 самопроизвольно искажаются в направлениях, перпендикулярных действию внешних сил при моделировании больших пластических деформаций вследствие возникновения безэнергетических форм деформации. Для их подавления используют различные алгоритмы. Анализ результатов проведенных исследований влияния алгоритма подавления безэнергетических форм деформаций показал, что алгоритм Фланаган-Белычко с точным интегрированием по объему в формулировке увеличения жесткости дает значительно более стабильное решение, чем тот же алгоритм в вязкостной формулировке даже при скорости резания 5000 м/мин. Поэтому для практически всех моделей резания следует рекомендовать алгоритм подавления безэнергетических форм деформаций в формулировке увеличения жесткости (*ihq*=5).

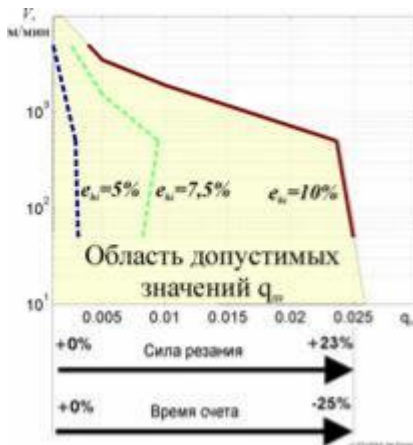


Рис. 1 – Область допустимых значений параметра q_m

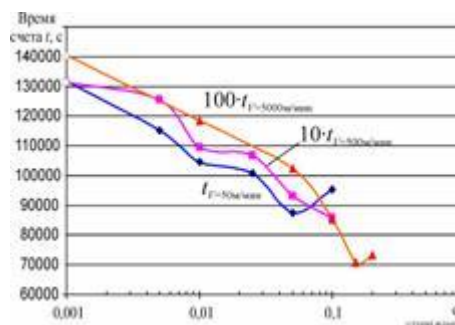


Рис. 2 – Влияние параметра q_m на время счета t

Существенное влияние оказывает параметр алгоритма q_m . С его увеличением возрастает относительная энергия безэнергетических форм деформации. Согласно рекомендациям [1] $e_{\text{нб}}$ не должно превышать 10%.

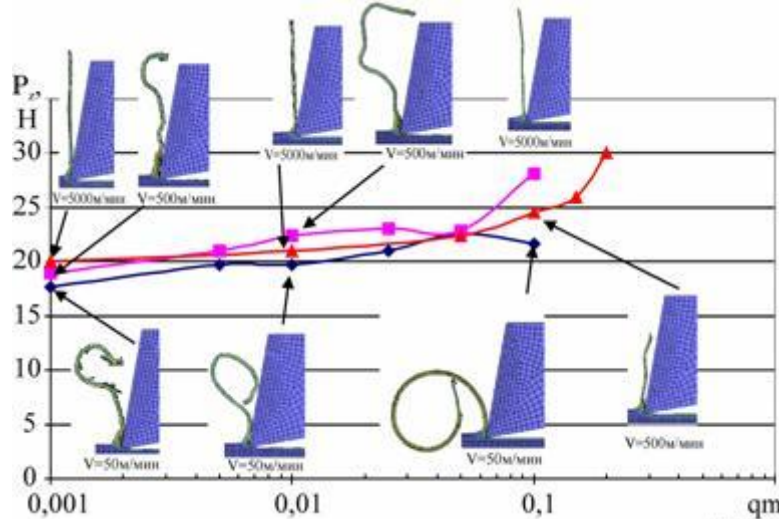


Рис. 3 – Влияние параметра q_m на прогноз силы резания и форму стружки

Установлено, предельное значение q_m , обеспечивающее это условие, изменяется с изменением скорости резания. Для удобства его определения построена диаграмма (рис. 1). С увеличением q_m увеличивается жесткость КЭ, поэтому увеличивается сила резания и уменьшается время счета. Увеличение q_m до 10% увеличивает силу резания примерно на 20%, но и на столько же уменьшает время счета для всех скоростей резания. При решении задач, где ошибка в значении силы резания не имеет решающего значения, но важным является время счета (например, при исследовании влияния геометрии лезвия на форму стружки) можно существенно уменьшить время счета за счет увеличения q_m (рис. 2). Вместе с тем надо учитывать, что q_m влияет и на форму стружки, особенно при врезании, когда размер элемента соизмерим с толщиной среза (рис. 3).

Элементы типа 2 имеют 8 квадратурных точек, и, следовательно, значительно более ресурсоемкие, чем элементы типа 1. Пробные расчеты показывают, что время вычислений при применении этих элементов почти в 2 раза больше,

чем при применении элементов типа 1. Вместе с тем элементам типа 2 не свойственно появление безэнергетических форм деформаций. Следует также отметить, что при использовании элемента типа 2, вследствие его повышенной жесткости при врезании устойчивое стружкообразование начинается позже (в два раза и более), что вносит существенную ошибку при моделировании переходных процессов.

Для моделирования контактного взаимодействия в LS-DYNA реализованы две модификации алгоритма штрафов []. Пробные вычисления показали, что стандартный алгоритм штрафов ($soft=0$ и $soft=1$) дает лучшие результаты при малых скоростях резания, в то время как сегментная модификация алгоритма штрафов ($soft=2$) оказывается применимой только при скоростях 500 м/мин и более из-за значительного времени расчета с помощью этого алгоритма.

Следует обратить внимание на выполнение граничных условий в области режущей кромки при использовании различных контактных алгоритмов. Как видно из рис. 4 при использовании алгоритма $soft=1$ узел на вершине лезвия проникает в элемент заготовки перед ней, в то время как ни один из узлов заготовки не проникает в лезвие. Тем самым в элементах, которые моделируют трещину создаются напряжения растяжения, что существенно отличается от реальных условий перед режущей кромкой. Это отличие будет тем большим, чем больше размер конечных элементов, моделирующих разрушение.

В то же время при использовании алгоритма $soft=2$ проникновения узлов лезвия в заготовку не наблюдается, чем реализуются достоверные граничные условия в области режущей кромки. Однако учитывая значительные затраты вычислительных ресурсов, необходимых для реализации алгоритма $soft=2$, на практике следует его использовать лишь тогда, когда действительно необходимо обеспечить достоверные граничные условия в области режущей кромки.

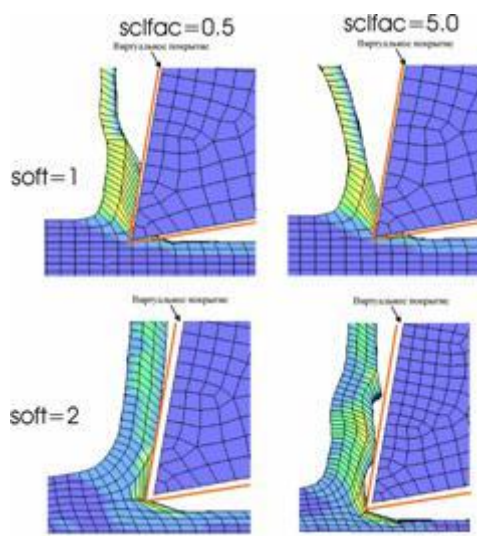


Рис. 4 – Влияние контактного алгоритма и коэффициента жесткости контакта на форму стружки при скорости резания 500 м/мин

Важным параметром любой модификации алгоритма штрафов является величина коэффициента контактной жесткости $slsfac$. На его величину влияют модули упругости контактируемых тел K и размер конечных элементов. Опыты показали, что при одинаковых размерах КЭ на контактных поверхностях для твердосплавного инструмента наиболее выгодное значение $slsfac$ равно 0.5.

Рассмотрим влияние размеров конечных элементов, образующих контактные поверхности на наиболее выгодное значение коэффициента контактной жесткости $slsfac$. Пусть инструмент и заготовка описаны конечными элементами в виде прямоугольных параллелепипедов объемом V со сторонами длиной a , b , c , причем стороны a и b образуют контактный сегмент площадью A , а сторона c перпендикулярна ему. Тогда контактная жесткость может быть вычислена по формуле []:

$$k_t = \frac{slsfac \cdot K \cdot A}{V} = \frac{slsfac \cdot K \cdot a^2 \cdot b^2}{a \cdot b \cdot c} = \frac{slsfac \cdot K \cdot (a \cdot b)}{c} \quad (1)$$

Пусть существует некоторое наиболее выгодное значение контактной жесткости k_{topt} , которое не зависит от размеров и формы элементов, а определяется лишь свойствами материалов системы. Тогда выбором величины коэффициента $slsfac$ следует обеспечить величину k_{topt} при решении задачи с конкретной КЭ сеткой. Если переписать выражение (1) в виде

$$slsfac = \frac{k_t}{K} \cdot \frac{c}{(a \cdot b)}, \quad \text{т.е.} \quad slsfac \propto \frac{c}{(a \cdot b)}, \quad (2)$$

то становится очевидным, что коэффициент $slsfac$ прямо пропорционален размеру c элемента (его «глубине») и обратно пропорционален площади контактного сегмента (произведению длин сторон $a \cdot b$) и модулю упругости K . Поэтому если размеры КЭ при решении конкретной задачи будут существенно (более чем в 4 раза) отличаться от тех, что применялись в данном исследовании (16 мкм для заготовки и 35 мкм для лезвия), то величина коэффициента контактной жесткости $slsfac$ должна быть скорректирована в соответствии с формулой (2). Например, если размер КЭ лезвия составляет около 1 мм, то коэффициент $slsfac$ необходимо уменьшить до величины

$$0.5 \cdot \frac{0.035 \cdot 0.035}{1.0 \cdot 1.0} \cdot \frac{1.0}{0.035} = 0.017$$

Как показали исследования повысить численную устойчивость контактного алгоритма при моделировании врезания абсолютно острым лезвием можно введением виртуального покрытия толщиной d , обеспечивающего достоверное определение направления нормали к контактной поверхности в области режущей кромки, имеющей острый угол заострения. Оптимальное значение параметра d составляет около 0,01 мм во всем исследованном диапазоне скоростей резания.

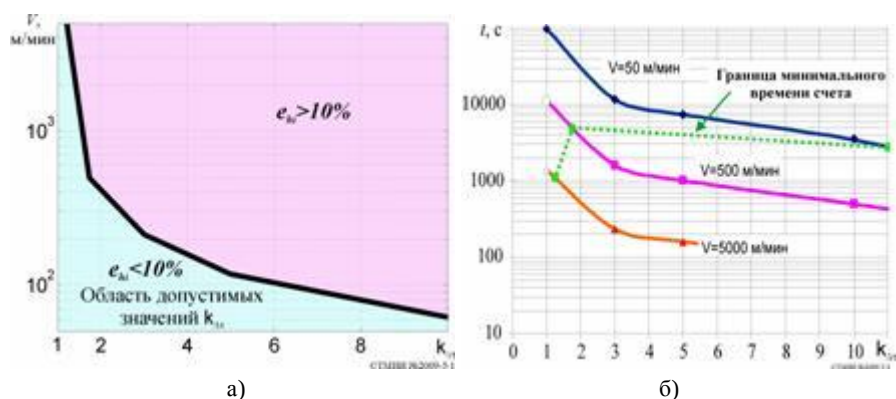


Рис. 5 – Область допустимых значений коэффициента увеличения шага интегрирования $k_{Dt}=Dt/Dt_0$

Алгоритм явного интегрирования уравнений движения имеет ограничение шага интегрирования Dt_0 , которое выражается условием Куранта-Фредрика-Леви (CFL-условие):

$$\Delta \tau_i < \Delta \tau_{\max} = L/c, \quad c = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

где L - характерный размер КЭ; c - скорость звука в деформируемом теле; ρ - плотность, E - модуль упругости.

За счет увеличения шага интегрирования Dt_0 можно существенно увеличить производительность вычислений. Не нарушая CFL-условие это можно сделать путем масштабирования массы (плотности) заготовки. Это особенно важно для моделирования резания со средними и малыми скоростями резания (до 500 м/мин). Исследования показывают, что с увеличением шага интегрирования $k_{Dt}=Dt/Dt_0$ время счета нелинейно убывает (рис. 5,б). Однако добавление массы вносит в систему дополнительные нереальные динамические силы, которые при некоторых значениях k_{Dt} проявляются, внося значительную ошибку в результаты расчета. Предложено оценить допустимое значение k_{Dt} по условию не превышения относительной энергией безэнергетических форм деформации величины 10%. Предельная кривая k_{Dt} от скорости резания V представлена на рис. 5. Видно, что чем меньше скорость резания в моделируемом процессе, тем можно использовать больший коэффициент увеличения шага интегрирования. Это положение позволяет ожидать, что минимальное время счета моделей 3D рабочих процессов резания с одинаковым количеством элементов со скоростями резания в диапазоне от 50 до 500 м/мин будет практически одинаковым (пунктирная кривая на рис. 5,б) и резко убывать при реализации моделей со скоростями резания более 500 м/мин.

Выводы.

Проведенные исследования показали, что наивыгоднейшие значения параметров решателя LS-DYNA обеспечивают минимальное время вычислений и наименьшую ошибку прогнозирования силы резания, формы стружки, времени начала устойчивого стружкообразования и других показателей процесса резания. В диапазоне скоростей резания от 50 до 5000 м/мин для сталей эти параметры могут быть выбраны следующими:

- алгоритм подавления безэнергетических форм деформации - алгоритм Фланаган-Белычко с точным интегрированием по объему для объемных элементов в формулировке увеличения жесткости **ihq**=5;
- параметр **qm** - по рисунку 1 для заданной скорости резания;
- элемент типа 1 - **elform** =1;
- контактный алгоритм - **soft**=1, во всех случаях, где можно допустить неточность граничных условий в области режущей кромки, и **soft**=2 во всех остальных случаях;
- величина коэффициента контактной жесткости **sclfac** = 0.5 с учетом коррекции на размер КЭ по формуле (2),
- толщина виртуального покрытия **d**=0.01,
- коэффициент увеличения шага интегрирования (ускорения вычислений) **kDt** - по рисунку 5,а для заданной скорости резания.

Список литературы: 1. Hallquist J. O. LS-DYNA Theoretical manual. -Livermore: LSTC, 1998. -

498 с. 2. Муйземек А. Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа. -Пенза: ИЦ ПГУ, 2005. -152 с.

Поступила в редакцию 15.05.2009