

УДК 621.9.01.001.572

Некрасов С.С., Голобородько Л.В.  
Сумський державний університет, г. Суми, Україна

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСАДКИ СТРУЖКИ ПРИ МИКРОРЕЗАНИИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Nekrasov S., Goloborodko L.  
Sumy State University, Sumy, Ukraine

### PREDICTION OF SHRINKAGE OF CHIPS WITH MICRO CUTTING BY FINITE ELEMENT METHOD

*В работе авторами было предложено провести виртуальный эксперимент процесса микрорезания. Модель реализована на основе КЭ-метода. Проблема при моделировании процесса микрорезания методом конечных элементов заключается в невозможности учесть масштабный фактор. В ходе исследования было установлено, что на погрешность моделирования влияют два фактора: размер конечного элемента и время перестроения конечно-элементной сетки. В результате эксперимента были разработаны рекомендации для моделирования процесса микрорезания методом конечных элементов, позволяющие учесть влияние масштабного фактора.*

*Ключевые слова:* микрорезание, моделирование, радиус округления, масштабный фактор.

#### Введение

В связи с интенсивным развитием в последние десятилетия микроэлектроники, микрохирургии, оптики все более актуальным становится исследование процессов лезвийной обработки в микроразмерах. Для создания компьютерной техники, роботов и других точных приборов необходимо изготовление деталей с высокой точностью. При этом толщины среза могут достигать десятых частей микрометра, что значительно меньше толщины среза в традиционных процессах резания. Одним из способов исследования процесса микрорезания является, конечно-элементное, моделирование. Для конечно-элементного исследования процесса микрорезания необходима такая модель, которая позволила бы учесть большинство факторов, которые влияют на процесс микрорезания, например соотношение толщины срезаемого слоя к радиусу округления режущей кромки, гетерогенность материала и т.д.

Развитие систем САМ опирается на моделях производственных процессов, в том числе и процессов обработки резанием. В условиях внедрения в машиностроение новых конструкционных материалов имитационное моделирование этих процессов методом конечных элементов имеет преимущество по сравнению с другими методами моделирования, поскольку позволяет реализовать прогнозирование широкого диапазона показателей обработки, основываясь лишь на результатах элементарных физико-механических испытаний обрабатываемого материала. Авторами разработана модель прямоугольного свободного микрорезания сталей, реализованная методом явного интегрирования уравнений движения частиц заготовки [1, 2].

Развитие методологии создания конечно-элементных моделей процесса резания имеет более чем тридцатилетнюю историю. Важным элементом ее реализации является проверка адекватности разработанной модели эксперименту. В связи с этим целью настоящей работы является демонстрация адекватности разработанной конечно-элементной модели.

#### Краткое описание методики моделирования

Общий алгоритм моделирования описан в работах [1, 2]. Рассматривается связанная термомеханическая задача расчета напряженно-деформированного и теплового состояния системы резания в условиях больших пластических деформаций. Решение задачи реализуется итерационным процессом, который интегрирует уравнения движения на некотором малом промежутке времени, вычисляет температурное поле и проверяет выполнение условия разрушения. После этого обновляется, конечно-элементная, сетка, граничные условия, вычисляются мощности тепловых источников, и выполняется следующая итерация. Процесс продолжается до завершения указанного времени расчета.

В качестве решателя использовалась программа LS-DYNA.

Геометрические размеры моделируемых тел выбирались пропорционально толщине среза. Моделирование выполнялось в постановке с жестким инструментом.

Граничные условия при решении механической задачи реализованы жестким закреплением основания изначально прямоугольной заготовки и ограничением перемещения лезвия в направлении оси  $Y$  (рис. 1).

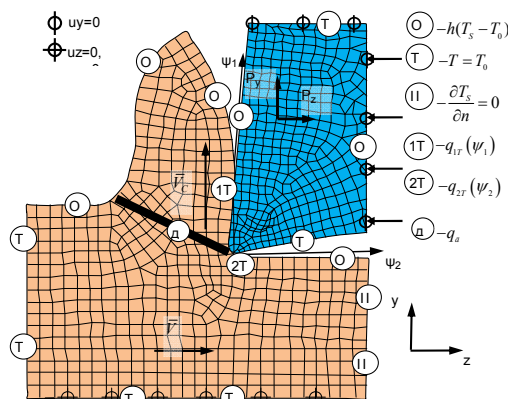


Рис. 1. Расчетная схема и граничные условия

Нагрузки прикладывались к инструменту его перемещением в направлении, противоположном положительному направлению оси  $x$ , со скоростью резания.

В работе рассматривалось резание на воздухе. Следуя работе В.А. Остафьева [3] принято, что коэффициент теплообмена в этом случае равен  $h = h_0 \Delta T^n$  ( $h_0 = 0,004$  кВт/( $m^2 \times ^\circ C$ ),  $n=0,25$ ).

#### Критерий сравнения результатов моделирования с экспериментом

Для установления влияния соотношения  $a/\rho$  на величину усадки стружки в процессе микрорезания был проведен виртуальный эксперимент в соответствии с планом, представленным в таблице 1.

Таблица 1

План эксперимента: Сталь 45-T15K6;  $b=1$ мм;  $V=200$ м/мин

a/ρ	Толщина среза a, мм			
		0.1	0.05	0.005
0.1	1	0.5	0.005	
0.2	0.5	0.25	0.0025	
0.5	0.2	0.1	0.001	
1	0.1	0.05	0.005	

Используя модели [4, 5] разработанные для моделирования процесса микрорезания было установлено, что при измерении усадки стружки получаются завышенные значения [6]. Анализируя причины такой погрешности, было установлено, что в процессе стружкообразования происходит увеличение объема обрабатываемого материала. Такой эффект можно объяснить тем, что поскольку используется геометрический критерий разрушения, то при перестроении конечно-элементной сетки возникает увеличение объема материала в области зоны резания (рис. 2). Проведя анализ увеличения объема материала в используемой модели, табл. 2, было установлено, что во всех случаях наблюдается увеличение объема обрабатываемой заготовки.

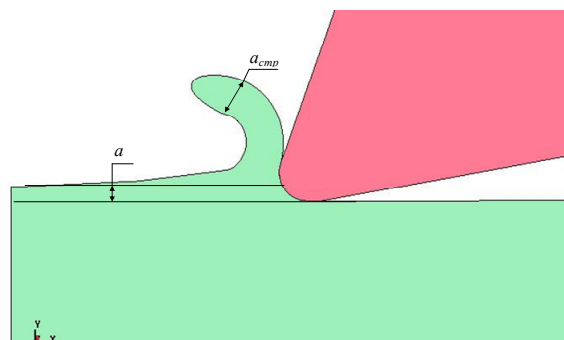


Рис. 2. Увеличение площади заготовки в процессе резания

Таблица 2

Анализ увеличения площади обрабатываемого материала

a, мм	ρ, мм	Площадь, мм <sup>2</sup>		Разница площадей, мм <sup>2</sup>	Увеличение площади, %
		начальная	в процессе стружкообразования		
0.1	0.1	4.400	4.511	0.111	21.7
0.1	1.0	8.801	8.945	0.145	15.3
0.1	0.2	4.400	4.550	0.150	27.3
0.1	0.5	4.400	4.536	0.135	25.3
0.005	0.001	0.044	0.046	0.002	49.5
0.005	0.0005	0.044	0.046	0.002	50.4
0.005	0.005	0.044	0.046	0.002	45.0
0.005	0.0025	0.044	0.046	0.002	43.8
0.05	0.10	1.142	1.142	0.041	29.3
0.05	0.05	1.127	1.127	0.026	20.9
0.05	0.5	2.264	2.264	0.064	38.9
0.05	0.25	1.114	1.114	0.014	12.4

Анализируя полученные данные можно увидеть, что увеличение объема составляет от 12% до 50%. Поскольку изменение геометрии происходит лишь в срезаемом слое, то соответственно, увеличивается толщина стружки, это увеличение составляет от 50 до 88%, что вносит значительную погрешность в прогнозировании усадки стружки, часть заготовки, которая не подвергается резанию остается неизменной. Можно также предположить, что увеличение объема срезаемого слоя, по сравнению с первоначально заданным, приводит к увеличению сил резания и температур в зоне резания.

Проведя исследования различных параметров, влияющих на эту погрешность, было установлено, что на увеличение объема срезаемого слоя влияют время между перестроениями конечно-элементной сетки (adpfreq) и размер конечных элементов (adptol) (рис. 3)

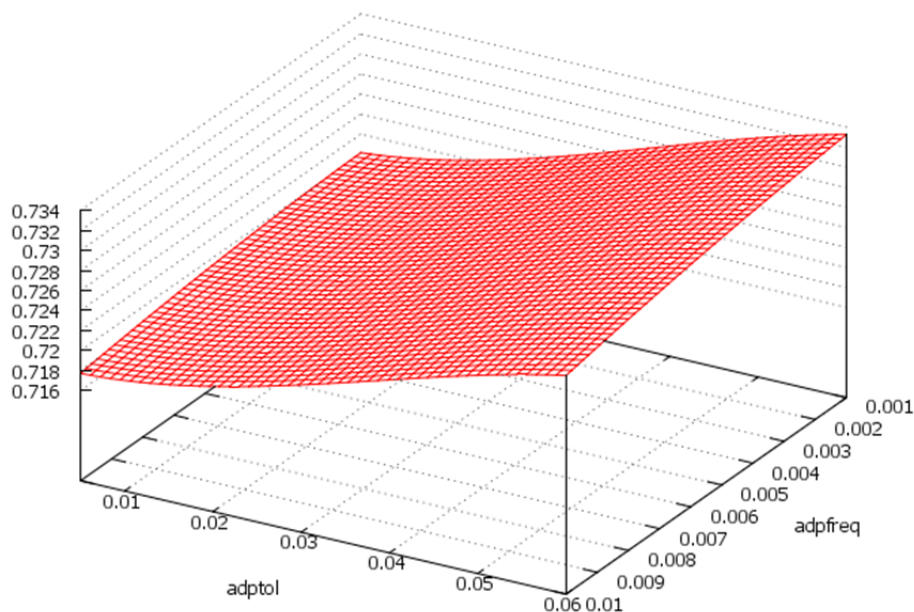


Рис. 3. График влияния частоты перестроения сетки и размера конечного элемента на изменение площади

Анализируя полученные результаты можно сделать рекомендации для конечно-элементной модели процесса микрорезания. Размер конечных элементов должен быть близок к  $0.1a$ , при этом интервал между перестроениями сетки должен в два раза больше размера конечных элементов. Полученные рекомендации относительно размера элемента можно объяснить тем, что при использовании слишком маленьких размеров конечных элементов необходимо часто перестраивать сетку для того чтобы избежать искажения конечных элементов в зонах больших пластических деформаций, в то же время частые перестроения сетки вызывают накопление ошибки прогнозирования выходных показателей моделируемого процесса. При использовании больших размеров конечных элементов увеличивается погрешность прогнозирования выходных показателей процесса резания, которая связана с увеличением погрешности описания геометрии и усреднением напряжений и температур по объему конечного элемента. Такие же рекомендации будут и касательно времени между перестроениями конечноэлементной сетки: при малых интервалах будет происходить накопление погрешности, а при больших происходит сильное искажение конечных элементов, что приводит к нестабильности расчета.

Проведя моделирование процесса микрорезания по ранее разработанному плану эксперимента с учетом рекомендаций для повышения точности прогнозирования усадки стружки был получен следующий результат (табл. 3):

Таблица 3

Усадка стружки в зависимости от  $a/\rho$

$a/\rho$	Толщина среза $a$ , мм		
	0.10	0.05	0.005
0.1	4.347	3.314	2.343
0.2	2.817	2.856	2.604
0.5	2.023	2.065	2.678
1.0	1.751	1.779	1.951

Из полученных результатов (табл. 4) видно, что увеличение объема обрабатываемого материала не превышает 6%, что значительно меньше ранее полученных значений.

Таблиця 4

**Анализ увеличения площади обрабатываемого материала с учетом рекомендаций для повышения точности прогнозирования усадки стружки**

$a$ , мм	$\rho$ , мм	Площадь, мм <sup>2</sup>		Разница площадей, мм <sup>2</sup>	Увеличение площади, %
		начальная	в процессе стружкообразования		
0.1	0.1	4.4004	4.4101	0.0097	2.4
0.1	1.0	8.8005	8.8139	0.0133	1.6
0.1	0.2	4.4004	4.403	0.0025	0.6
0.1	0.5	4.4004	4.4079	0.0075	1.8
0.005	0.001	0.0529	0.0530	0.00007	2.6
0.005	0.0005	0.0529	0.0530	0.00006	2.3
0.005	0.005	0.0195	0.0196	0.0001	6.2
0.005	0.0025	0.0217	0.0217	0.00005	2.9
0.05	0.10	1.1001	1.1021	0.0020	2.0
0.05	0.05	1.1008	1.1011	0.0003	0.3
0.05	0.5	2.2001	2.2023	0.0022	1.1
0.05	0.25	1.1001	1.1027	0.0026	2.5

Разработанная модель позволила установить влияние  $a/\rho$  на усадку стружки. (Рис. 4)

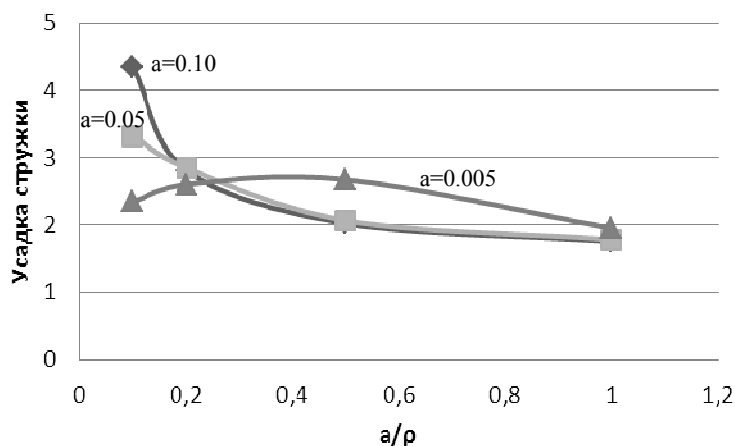


Рис. 4. Влияние отношения  $a/\rho$  на величину усадки стружки

Такой характер изменения усадки стружки при изменении толщины срезаемого слоя можно объяснить влиянием масштабного фактора на выходные показатели процесса резания.

В ходе исследования было установлено, что при уменьшении отношения  $a/\rho$  с 1.0 до 0.1 при толщине среза  $a=0.005$  мм главная проекция удельной силы резания  $P_z$  возрастает в 2.5 раза, радиальная проекция удельной силы резания  $P_y$  – в 6 раз (рис. 5); при толщине среза  $a=0.1$  мм главная проекция удельной силы резания  $P_z$  возрастает в 1.6 раза, радиальная проекция удельной силы резания  $P_y$  – в 3 раза. При этом главные проекции удельной силы резания  $P_z$  и радиальные проекции удельной силы резания  $P_y$  с уменьшением толщины среза  $a$  от  $a=0.10$  мм к  $a=0.005$  мм уменьшается в 1.5 раза.

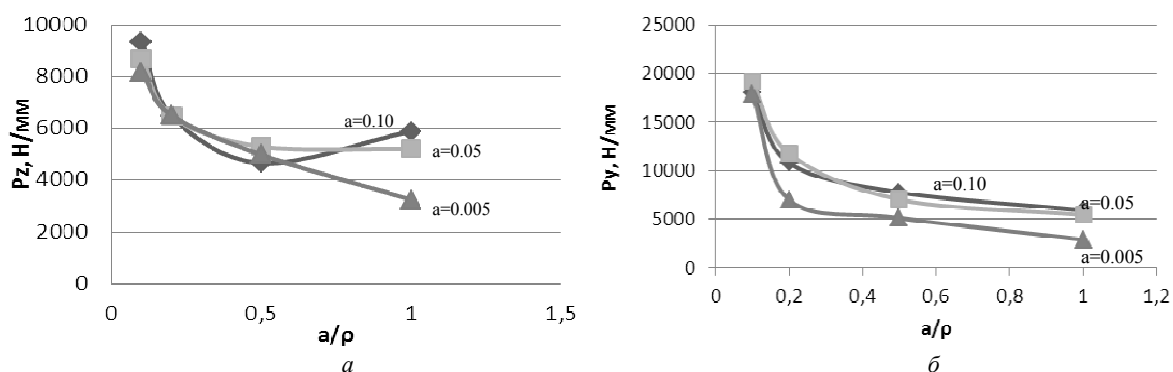


Рис. 5. Влияние  $a/\rho$  и толщины среза,  $a$  на тангенциальную  $P_z$  (а) и радиальную силу резания  $P_y$  (б)

Такой характер изменения удельных сил резания при изменении толщины срезаемого слоя можно объяснить влиянием масштабного фактора на выходные показатели процесса резания.

### Выводы

Существенную погрешность на прогнозирование методом конечных элементов выходных показателей процесса микрорезания оказывает изменение объема срезаемого материала, который значительно увеличивается в связи с накоплением погрешностей перестроения конечно-элементной сетки.

При моделировании процесса микрорезания методом конечных элементов необходимо учитывать величину размера элементов, которая должна составлять 1/10 от толщины срезаемого слоя, а время перестроения конечно-элементной сетки должно быть в два раза больше характерного размера конечного элемента.

Из полученных результатов можно установить, что разработанные рекомендации для моделирования процесса микрорезания методом конечных элементов позволяют учесть влияние масштабного фактора.

*Анотація.* У роботі авторами було запропоновано провести віртуальний експеримент процесу мікрорізання. Модель реалізована на основі КЕ-методу. Проблема при моделюванні процесу мікрорізання методом скінчених елементів полягає в складності врахувати вплив масштабного фактора. У ході дослідження було встановлено, що на похибку моделювання впливають два фактори: розмір скінченого елемента і час перестроювання скінчено-елементної сітки. В результаті експерименту було розроблено рекомендації для моделювання процесу мікрорізання методом скінчених елементів, що дозволяють врахувати вплив масштабного фактора.

*Ключові слова:* мікрорізання, моделювання, радіус округлення, масштабний фактор.

*Abstract.* In this article, the authors proposed modeling of micro cutting process with finite element method. Micro cutting is characteristic of large ratio by slice thickness to cutting edge rounding, which leads to large plastic deformations in the cutting zone. The main problem in the simulation of micro-cutting associated with the impossibility of account of the scale factor when using the finite element method. The authors found that the size of the finite element and update time of finite element mesh considerably affect the accuracy of prediction. The studies have allowed to establish some requirements for finite element model. The recommendations can improve the accuracy prediction of shrinkage of chips with micro cutting and allow for the effect of the scale factor for the weekend indicators of micro cutting process.

*Keywords:* microcutting, simulation, radius of rounding, scale factor.

### Библиографический список использованной литературы

1. Залогова В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания/ В. А. Залогова, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик //Вестник СумГУ. -2005. -№ 11. -С. 113- 122.
2. Heisel U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances/ U. Heisel, D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak //Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. - Calabria, 2007. -С. 141- 148.
3. Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1979. - 168 с.
4. Некрасов С. С. Повышение ресурса твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса: Дисс. канд. техн. наук:05.03.01. -К., 2012. -167 с.
5. Криворучко Д. В. Основи прогнозування моделювання процесів різання методом скінчених елементів: Дисс. докт. техн. наук:05.03.01. -Х., 2010.
6. Голобородько Л.В. О критерии начала стружкообразования в процессе микрорезания/ Л.В. Голобородько, Д.В. Криворучко, С.С. Некрасов // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: Сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. -Вып. 27. -№ 2. -С. 12- 17.

### References

1. Zaloga V. A., Krivoruchko D. V., Hvostik S. N. Modelirovanie processa rezanija [Information Support of Science. Collected papers] Sumy SumGU: Vestnik SumGU, 2005, No 11, pp. 113- 122.
2. Heisel U., Krivoruchko D. V., Zaloha V. A., Storchak M. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances [Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations] Calabria, 2007, pp. 141- 148.
3. Ostaf'ev V. A. Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta (Calculation of the dynamic strength of the cutting tool). Moscow: Mashinostroenie, 1979, 168 c.
4. Nekrasov S. S. Povyshenie resursa tverdosplavnyh koncevyh frez pri obrabotke litejnyh stalej austenitnogo klassa (Improving resource carbide end mills in processing casting austenitic steels): Diss. kand. tehn. nauk:05.03.01. Kyiv, 2012. 167 p.
5. Krivoruchko D. V. Osnovi prognuzujuchogo modeljuvanija procesiv rizannja metodom skincheni elementiv (Basics predictive modeling of cutting processes using the finite element): Diss. dokt. tehn. nauk:05.03.01. Harkiv., 2010.
6. Goloborod'ko L.V., Krivoruchko D.V., Nekrasov S.S. O kriterii nachala struzhkoobrazovanija v processe mikrorezanija Nauchnyj [Information Support of Science. Collected papers]. Vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii: Sb. nauch. trudov. Kramatorsk: DGMA, 2012. Vyp. 27. No 2. pp. 12-17.

Подана до редакції 08.10.2014