

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ

Председатель д.т.н. Павлов В.Ф.

УДК 621.914.1

Евдокимов Д.В., Букатый А.С.

РАЗРАБОТКА СИМУЛЯЦИОННОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В современном производстве значительное место в технологических процессах изготовления деталей отводится операциям фрезерования, в особенности это относится к производству маложёстких деталей со сложным фасонным профилем, где наибольшее применение находят концевые фрезы [1, 2]. При этом нередко операции фрезерования являются окончательными операциями, на которых обеспечивается заданная геометрическая точность, шероховатость поверхности и закладываются такие параметры качества поверхностного слоя, как остаточные напряжения и микротвёрдость. При этом остаточные напряжения, сформированные на заключительных стадиях технологического процесса, оказывают большое влияние не только на усталостную прочность изделия, но и на её геометрическую точность, поскольку являются основной причиной появления технологических остаточных деформаций, которые зачастую превышают технологические допуски [3, 4].

Таким образом, возникает необходимость в проведении исследований, направленных на разработку математических моделей, позволяющих прогнозировать параметры качества поверхностного слоя изготавливаемых деталей при достаточной точности.

В данной работе представлены результаты разработки симуляционной конечно-элементной модели, позволяющей определять массив значений остаточных напряжений, распределённых в поверхностном слое заготовок на этапе процесса концевое фрезерование и затем отображать его в виде объёмной эпюры с цветовой дифференциацией. При этом эпюра строится по виртуальному телу заготовки. Применимость данной модели для тех случаев, когда концевое фрезерование

не является завершающей операцией технологического процесса, также уместна в контексте технологической наследственности.

Изначально для конечно-элементной модели были определены физико-механические свойства материалов, из которых выполнена заготовка и режущий инструмент. Далее представлена возможность ознакомиться со структурой, выбранной для описания материалов в компьютерном пакете конечно-элементного анализа с теми иностранными названиями, которые непосредственно записаны внутри использованной программы:

1) Density (плотность материала).

2) Isotropic Elasticity (Изотропная эластичность). В соответствующую вкладку программы конечно-элементного анализа внесены значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

3) Johnson Cook Strength (модель пластичности, которая также называется «Johnson Cook flow stress model»). Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\sigma_o = \left[A + B_d (\varepsilon^p)^n \right] \cdot \left[1 + C \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_c}{T_{nl} - T_c} \right)^m \right],$$

где σ_o – напряжения пластического течения материала; ε^p – эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^p$ – скорость пластической деформации материала; $\dot{\varepsilon}_o$ – справочная скорость пластической деформации; T – температура материала; T_c – справочная температура; T_{nl} – температура плавления обрабатываемого материала; A – предел текучести материала, соответствующий справочным скоростям деформации и температуры; B_d – модуль деформационного упрочнения; n – показатель степени деформационного упрочнения; m – экспонента термопластичности [5]; C – показатель чувствительности к скорости деформирования [6, 7].

4) Johnson Cook Failure (модель разрушения, которая также называется «Johnson Cook fracture model»). Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \cdot \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}_{f-M}} \right) \right] \cdot \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot (1 + D_5 \hat{T}),$$

где σ_m – средняя величина из трёх главных напряжений, $\bar{\sigma}_{f-M}$ – эквивалентные напряжения, полученные по критерию пластичности Мизеса, $\bar{\varepsilon}_f$ – эквивалентная деформация при разрушении, D_i – коэффициенты, полученные по результатам эксперимента. Параметр \hat{T} определяется по следующим зависимостям:

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & \text{при } T < T_c \\ \frac{T - T_c}{T_{nl} - T_c} & \text{при } T_c \leq T \leq T_{nl} \\ 1 & \text{при } T > T_{nl} \end{cases}$$

Для контактируемых поверхностей была определена кулоновская модель трения.

Перед тем, как виртуальное тело заготовки конвертировать в конечно-элементное тело, тело заготовки было разделено на зоны, каждой из которых был присвоен свой тип конечно-элементной сетки, что можно видеть на рис. 1.

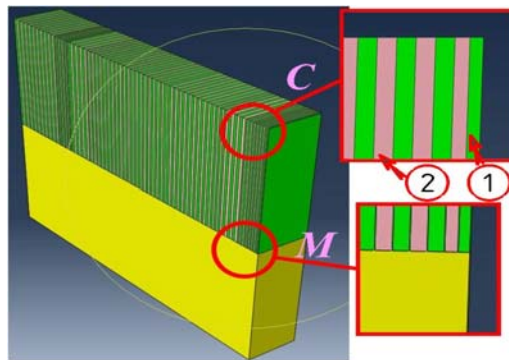


Рис. 1. Схема разбиения заготовки на конечные элементы

Удаляемый в процессе обработки материал отмечен как C , а материал, остающийся после обработки как M (рис. 1). В свою очередь зона C делится ещё на попеременно чередующиеся области 1 и 2, которые определяют собой снимаемые слои материала в процессе прохождения каждого зуба фрезы. Область 1 представлена структурированной гексагональной сеткой «*hex structured*», область 2 образована четырёхгранной сеткой «*tet free*», а зона M состоит из структурированной сетки, разбитой по методу «зачищаемая сетка» – «*sweep mesh*», так как поверхность зоны M является обработанной поверхностью заготовки.

С конечным видом составных элементов конечно-элементной модели можно ознакомиться на рис. 2, а с примером выполненных вычислений по разработанной конечно-элементной модели – на рис. 3.

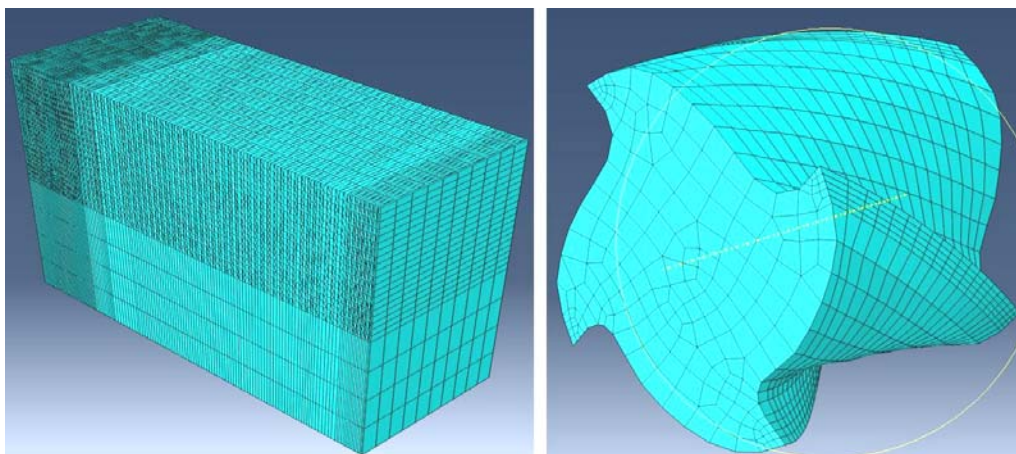
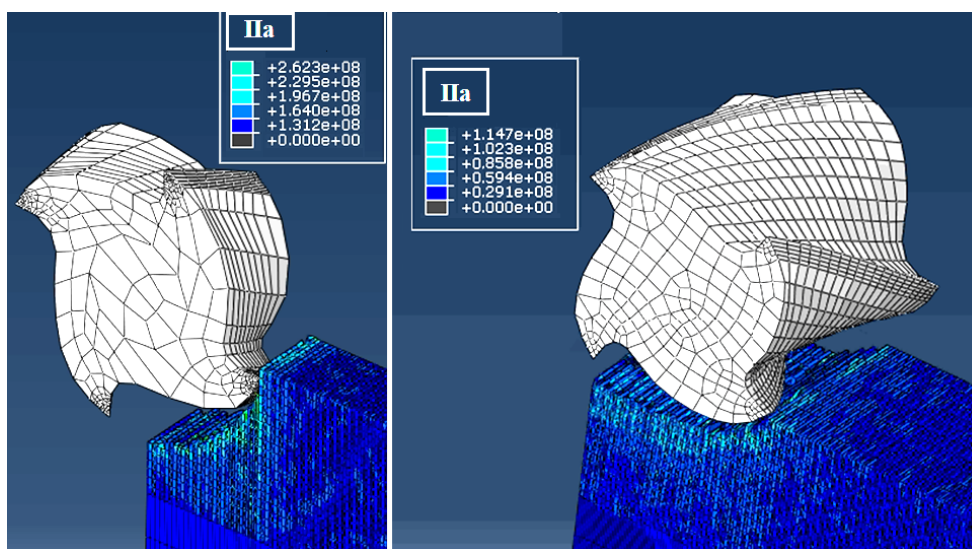


Рис. 2. Вид заготовки и рабочего участка концевой фрезы
разработанной конечно-элементной модели



Режим резания: $v = 37,7$ м/мин;
 $s_z = 0,08$ мм/зуб; $t = 5$ мм, $B = 3$ мм,
диаметр фрезы 12 мм, ВК8

a

Режим резания: $v = 23,8$ м/мин;
 $s_z = 0,08$ мм/зуб; $t = 1,5$ мм, $B = 8$ мм,
диаметр фрезы 12 мм, ВК8

б

Рис. 3. Примеры визуализации проведённых вычислений величины, знака и характера распределения остаточных напряжений по разработанной конечно-элементной модели на этапе прохождения концевой фрезой обрабатываемого участка

Для оценки адекватности модели был проведён натурный эксперимент, результаты которого были сопоставлены с данными, полученными расчётным способом по конечно-элементной модели. В результате сравнительного анализа была выявлена достаточно хорошая корреляция данных, например, на рисунке 3, б, максимальная величина окружных остаточных напряжений соответствует +114,7 МПа, а полученное аналогичное значение в ходе натурального эксперимента составляет +101,2 МПа (рис. 4).

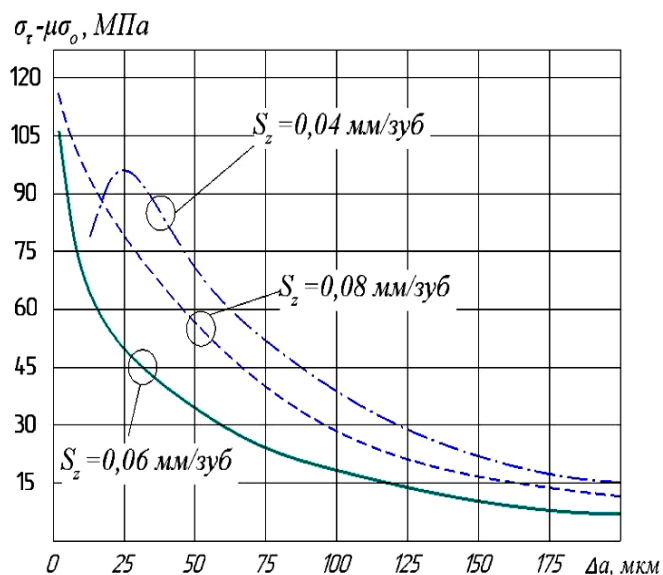


Рис. 4. Влияние подачи на зуб S_z при скорости резания $v = 23,8$ м/мин на величину и характер распределения окружных остаточных напряжений при концевом фрезеровании

Таким образом, была разработана конечно-элементная модель, сопоставление результатов вычислений по которой с проведённым полнофакторным натурным экспериментом [8] не превысило погрешности в 12,7%, что достаточно хорошо для определения остаточных напряжений. Кроме того, точность модели увеличивается при учёте температурного фактора по методике [9] и использовании уточнённых коэффициентов трения [10], а получаемые по данной конечно-элементной модели эпюры остаточных напряжений могут быть использованы в задачах, связанных с определением геометрической точности изделий [11, 12].

Библиографический список

1. Акимов, В.М. Основы надёжности газотурбинных двигателей / В.М. Акимов. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
2. Антонюк, В.Е. Технологические возможности повышения точности изготовления дисков и валов / В.Е. Антонюк // Технология машиностроения. – 2005. – №6. – С. 43–48.
3. Кравченко, Б.А. Механизм формирования остаточных напряжений при свободном резании закаленных сталей / Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвёрдых синтети-

ческих материалов: межвуз. (межвед.) тематич. сб. науч. тр., 1980. – №2. – С. 91-97.

4. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1968. – 132 с.

5. Каналес, О. Изучение деформации частиц никелевых покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления низкого давления / О. Каналес, А.В. Шоринов, А.О. Волков, С.Е. Маркович, А.И. Долматов // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – №6/3(26). – С. 4–9.

6. Dorogoy, A. Numerical Validation of the Shear Compression Specimen. Part I: Quasi-static Large Strain Testing / A. Dorogoy, D. Rittel // Experimental mechanics. – 2005. – Vol. 45. – №2. – P. 167–177.

7. Dorogoy, A. Numerical Validation of the Shear Compression Specimen. Part II: Dynamic Large Strain Testing / A. Dorogoy, D. Rittel // Experimental mechanics. – 2005. – Vol. 45. – №2. – P. 178-185.

8. Evdokimov, D.V. Thermal Stress Resarch of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece / D.V. Evdokimov, D.G. Fedorov, D.L. Skuratov // World Applied Sciences Journal. – 2014. – №31(1). – P. 51–55.

9. Evdokimov, D.V. Thermal Fields in the End Milling of VT6 Titanium Alloy with Cooling / D.V. Evdokimov, D.L. Skuratov, D.G. Fedorov // Russian Engineering Research. – 2015. – №35(10). – P. 773–776.

10. Евдокимов, Д.В. Динамика коэффициента трения между титановыми и инструментальными сплавами в среде СОЖ / Д.В. Евдокимов, А.П. Батурин, Д.Г. Федоров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т.20. – №1. – С. 18–22.

11. Букатый, А.С. Конечно-элементное моделирование и исследование остаточных напряжений и деформаций деталей после дробеструйного упрочнения [Текст] / А.С. Букатый // Вестник машиностроения. – 2016. – №6. – С. 52–57.

12. Букатый, А.С. Применение динамического моделирования к решению упруго-пластических задач / А.С. Букатый, С.А. Букатый, В.Э. Костичев, Е.А. Денискина // Труды второй междунар. науч.-техн. конф. «Динамика и виброакустика машин 2014». – Самара: СГАУ, 2014. – С. 427-430.