

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ
ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ЗАГОТОВКИ С УЧЁТОМ ТЕПЛОФИЗИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

Изготовление большинства деталей машин, в том числе газотурбинных двигателей и энергетических установок, неразрывно связано с процессами механической обработки, при которых формируется их поверхностный слой.

Формирование поверхностного слоя деталей, согласно теории Б.А. Кравченко [1,2], осуществляется под влиянием силового и температурного факторов при доминирующем влиянии первого, однако, если в поверхностном слое происходят структурные и фазовые изменения, то роль температурного фактора резко возрастает. Также стоит отметить, что остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое заготовок на этапах механической обработки, находятся в непосредственной зависимости от комплексного воздействия указанных факторов, а остаточные напряжения в значительной степени оказывают влияние на сопротивление усталости детали и, следовательно, на ресурс изделия в целом.

Вопрос, связанный с оценкой теплонапряжённости процесса резания, является также важным ещё и по причине того, что температура в зоне резания может оказывать существенное влияние на стойкость режущего инструмента. Так, например, повышение производительности обработки чаще всего сопровождается ростом температуры в зоне резания, снижением стойкости инструмента и, следовательно, ростом затрат на его эксплуатацию. Исходя из этого, исследования, направленные на прогнозирование функциональных параметров при резании и параметров качества обработки являются актуальными.

В данной статье изложена методика, позволяющая определять температурные поля в зоне резания при концевом фрезеровании, а также прогнозировать величину, знак и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок. Разработанная методика базируется на аналитической методике А.Н. Резникова по расчёту величин плотностей тепловых потоков, поступающих в инструмент [3-5] и двух конечно-элементных моделей. Исходная методика А.Н. Резникова [3-5] позволяет получать с достаточной точностью решение по определению температуры в расчётных сечениях инструмента и заготовки, однако сам процесс вычисления занимает большое количество времени и в целом методика плохо поддаётся автоматизации. Современным решением,

реализованным в представленной работе, стало применение метода конечных элементов, а в роли граничных условий для разработанных в работе конечно-элементных моделей были использованы величины плотностей теплового потока, полученные по методике А.Н. Резникова, но адаптированной для процесса концевой фрезерования.

Разработка первой конечно-элементной модели была начата с разработки геометрической виртуальной модели концевой фрезы (рис. 1).



Рис. 1. Виртуальная геометрическая модель фрезы

Представленная геометрическая модель фрезы была экспортирована в программу ANSYS CFX. Процесс экспорта сопровождался трудностями, которые подробно описаны в работах [6-9].

Следующим этапом в программе ANSYS CFX была разработана непосредственно сама конечно-элементная модель, которая исходя из величин плотностей теплового потока, действующих в зоне резания, строит температурные поля, распределенные по инструменту и заготовке. Кроме этого модель является мультифазной, так как вычисления ведутся исходя из того, что элементы виртуальной технологической системы (заготовка-фреза) расположены внутри воздушной среды и из форсунки подаётся смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) в зону резания. Также модель является симуляционной за счёт того, что в ней, в процессе расчёта, происходит симуляция поливом СОЖ зоны резания, выполняемая посредством методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Структура модели представлена на рис. 2 и содержит виртуальное тело фрезы, заготовки, форсунки, через которую задана подача СОЖ и атмосферы.

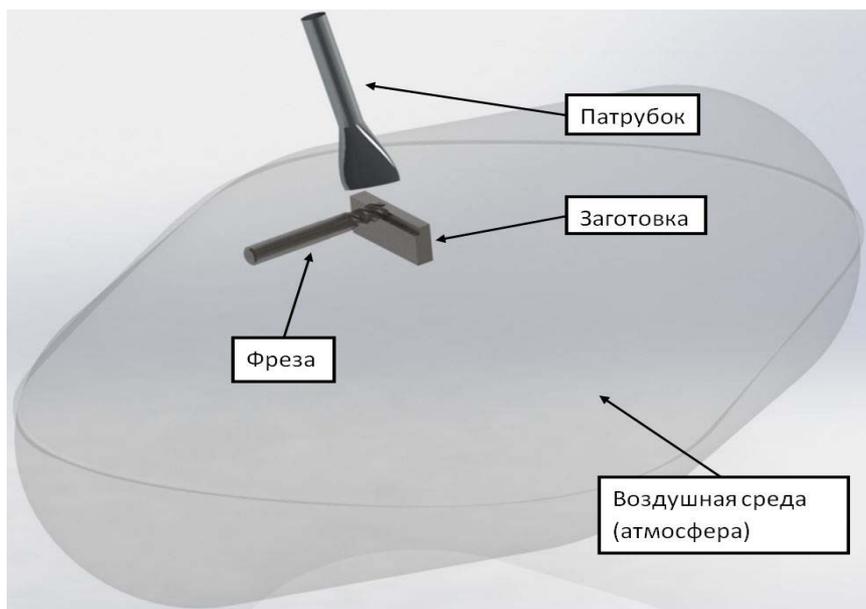


Рис. 2. Виртуальная модель процесса фрезерования

В качестве примера вычислений, выполняемых по конечно-элементной модели по расчёту температурных полей в зоне резания, в настоящей статье представлены результаты расчёта температурных полей для условий концевое фрезерования твёрдосплавной фрезой конструкционного титанового сплава ВТ6 на режиме: скорость резания – $v = 30$ м/мин, подача на зуб фрезы – $S_z = 0,08$ мм/зуб, глубина резания – $t = 3$ мм, ширина фрезерования – $B = 5$ мм. Иллюстрацию результатов можно видеть на рис. 3.

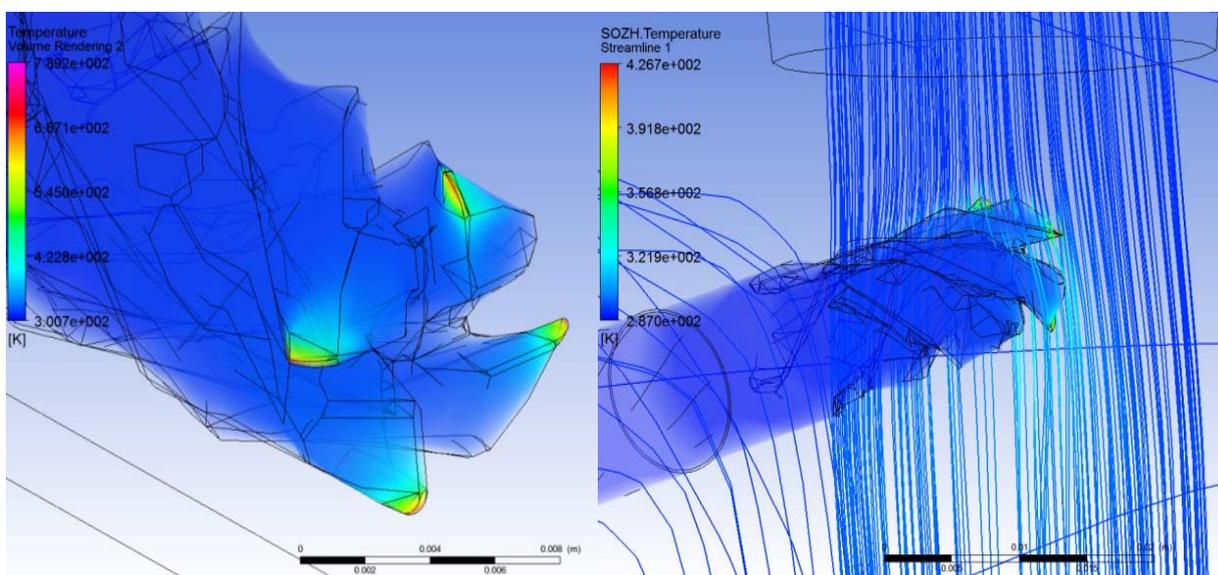


Рис. 3. Поля температур фрезы и СОЖ

Как видно из иллюстративного материала, СОЖ за время контакта с фрезой успевает нагреться от комнатной температуры до примерно 50 градусов Цельсия. При этом режущие кромки фрезы достигают температуры в 516 градусов Цельсия.

Финальным этапом создания предлагаемой в работе методики являлась разработка компьютерной конечно-элементной модели, позволяющей рассчитывать поля остаточных напряжений, распределённых в поверхностном слое заготовок на этапах конечного фрезерования. В этой конечно-элементной модели используются данные по температурным полям, возникающим в процессе резания, которые получены при использовании первой конечно-элементной модели по расчёту температурных полей. Компьютерная модель была разработана в постановке явной динамики, с помощью программного комплекса прочностного анализа «Abaqus». Пример визуализации результата вычислений для режима, указанного ранее в статье, представлен на рис. 4.

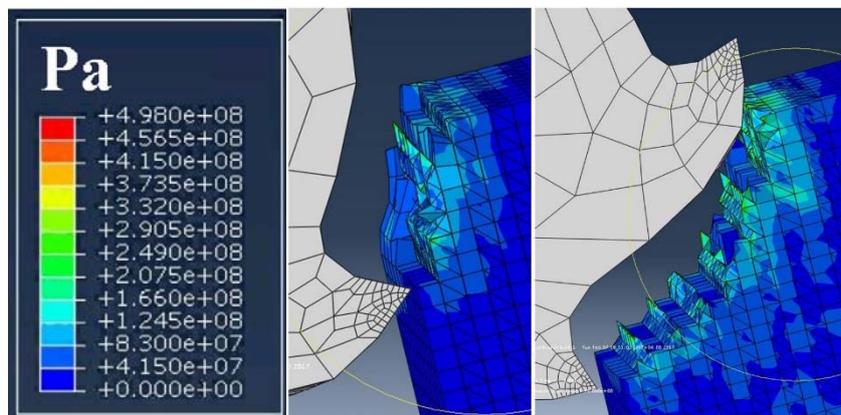


Рис. 4. Распределение напряжений по заготовке в процессе её обработки

Проведя численную симуляцию конечного фрезерования, было получено, что максимальная величина окружных остаточных напряжений, действующих в поверхностном слое заготовки, составляет +112,6 МПа.

Заключение

Создана методика расчёта температурных полей в концевых фрезах при резании материалов с учётом гидродинамики СОЖ, а также разработана методика, позволяющая определять характер распределения, величину и знак остаточных напряжений в заготовке. Методика базируется на САЕ технологиях и может быть использована для расчёта тепловых полей практически в любых лезвийных режущих инструментах. При этом время, затраченное на расчёт тепловых полей в инструменте, значительно меньше времени, необходимого для подготовки и проведения натурального эксперимента, а точность расчётов более чем достаточна по сравнению с той, которая необходима для инженерных расчётов, то есть это 5% погрешность для величины температуры в зоне резания и 15% для величины максимальных остаточных напряжений [10-12].

Библиографический список

1. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов [Текст] / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.
2. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке [Текст]: учебное пособие / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: Куйбышев. политехн. ин-т, 1981. – 90 с.
3. Резников, А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машгиз, 1963. – 199 с.
4. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
5. Резников, А.Н. Теплофизика резания [Текст] / А.Н. Резников. – М.:Машиностроение, 1969. – 288 с.
6. Евдокимов, Д.В. Исследование теплофизических процессов и параметров поверхностного слоя при концевом фрезеровании методами CAE и CFD анализа [Текст] / Д.В. Евдокимов, М.А. Олейник // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т.19. – № 4. – С. 65-69.
7. Евдокимов, Д.В. Исследование тепловых полей в инструменте при концевом фрезеровании с охлаждением конструкционного титанового сплава ВТ6 [Текст] / Д.В. Евдокимов, Д.Л. Скуратов, Д.Г. Фёдоров // СТИН. – 2015. – №4. – С. 12-15.
8. Evdokimov, D.V. Thermal Stress Research of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece [Text] / D.V. Evdokimov, D.G. Fedorov, D.L. Skuratov // World Applied Sciences Journal. – 2014. – №31(1). – pp. 51-55.
9. Evdokimov, D.V. Thermal Fields in the End Milling of VT6 Titanium Alloy with Cooling [Text] / D.V. Evdokimov, D.L. Skuratov, D.G. Fedorov // Russian Engineering Research. – 2015. – №35(10). – pp. 773-776.
10. Кравченко, Б.А. Повышение выносливости и надёжности деталей машин и механизмов [Текст] / Б.А. Кравченко, Д.Д. Папшев, Б.И. Колесников, Н.И. Моренков; Под ред. Б.А. Кравченко. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1966. – 224 с.
11. Benabid, F. Thermal modeling to predict and control the cutting temperature. The simulation of facemilling process [Text] / F. Benabid, H. Benmoussa, M. Arrouf // Procedia Engineering. – 2014. – №74. – P. 37-42.
12. Chukwujekwu Okafor, A. Finite element modeling and simulation of residual stresses, cutting forces and temperature in orthogonal machining of titanium alloy [Text] / A. Chukwujekwu Okafor, A. Oteka, S. Aramalla // 8th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations. – 2005. – P. 207-215.