

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT9

Евдокимов Д.В.^{1,2}, Скуратов Д.Л.¹, Хаймович А.И.^{1,2},
Зотов В.А.^{1,2}, Бочкарев Н.О.¹

¹Самарский университет, г. Самара, dmitry.evd.ssau@gmail.com

²СамНЦ РАН, г. Самара

Ключевые слова: фрезерование, титановый сплав BT9, температура, структурно-фазовые превращения, конечно-объёмное моделирование, CFD.

Неуклонное повышение эффективности общественного производства неразрывно связано с применением всё более широкого парка высокопроизводительных машин и оборудования. Повышение производительности процессов механической обработки достигается за счёт увеличения объёма снимаемого материала в единицу времени, что напрямую связано с интенсификацией режимов и увеличением скорости резания. Это приводит к росту теплонапряжённости процесса резания, которая оказывает существенное влияние на стойкость режущего инструмента и состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Следует отметить, что такие параметры, как глубина и степень наклёпа поверхностного слоя, а также величина, знак и характер распределения остаточных напряжений, при механической обработке формируются преимущественно под воздействием силового фактора. Указанные параметры, в свою очередь, существенно влияют на геометрические показатели качества изделий. Однако, если в зоне резания формируется температурное поле, при скоростях нагрева и охлаждения, соответствующих условию структурно-фазовых превращений, то температурный фактор будет оказывать решающее влияние на формирование поверхностного слоя. Протекание же процессов структурно-фазового перехода в материале режущей части инструмента почти всегда приводит к полной потере режущих свойств инструмента. При этом до наступления этого момента нарастающий с температурой износ инструмента будет менять условия обработки, а значит будет изменяться и весь комплекс параметров качества поверхностного слоя.

Перспективным является разработка моделей по определению температурных полей в зоне резания при механической обработке, которые могут быть использованы в оптимизационных задачах по подбору наивыгоднейших условий обработки, особенно если при помощи такой методики возможно отслеживать достаточность термоактивационного импульса для реализации структурно-фазовых переходов.

Для данной работы была разработана модель, позволяющая оценивать динамику теплонапряжённости процесса фрезерования по мере поворота зубьев фрезы с учётом гидродинамики СОЖ.

Первым этапом была разработана математическая модель по определению величин плотностей тепловых потоков, поступающих через контактные поверхности в режущий зуб фрезы и заготовку в процессе обработки. Модель является адаптацией методики А.Н. Резникова [1], разработанной для условий токарных операций, функционал которой был расширен возможностью определять плотности тепловых потоков, действующих в зоне резания в зависимости от поворота зуба фрезы.

Следующим этапом была разработана конечно-объёмная модель фрезерования, позволяющая симулировать поток СОЖ в зону резания при помощи алгоритмов вычислительной гидродинамики CFD. Модель содержит виртуальные тела заготовки, фрезы, патрубка, через который подаётся СОЖ, и ограниченного объёма атмосферы. Со строением модели возможно ознакомиться по рис. 1.

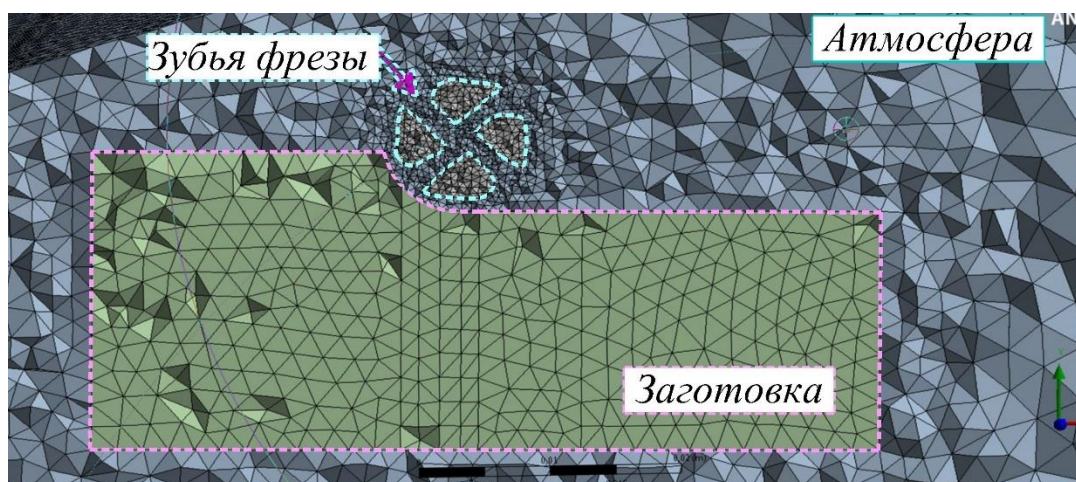


Рис. 1. – Сечение конечно-объёмной модели в инструментальной плоскости

Поверхность, образованная в результате прохода главной режущей кромки отдельно взятого зуба фрезы, а также передняя и задняя поверхности зуба топологически разделены в модели для задания на них плотностей тепловых потоков. При этом упомянутая формообразованная поверхность виртуального тела заготовки дискретизирована по углу поворота зуба фрезы с шагом $\Delta\varphi = 10^\circ 15'$.

Проведение численного эксперимента по разработанной модели позволило получить распределение температурных полей по заготовке для всего диапазона угла контакта зуба фрезы с заготовкой. Например, на рис. 2 представлены результаты численного эксперимента для условий концевой фрезерования титанового сплава ВТ9 твердосплавной фрезой диаметром $d = 12$ мм на режиме $t = 5$ мм, $B = 3$, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $\vartheta = 30,2$ м/мин.

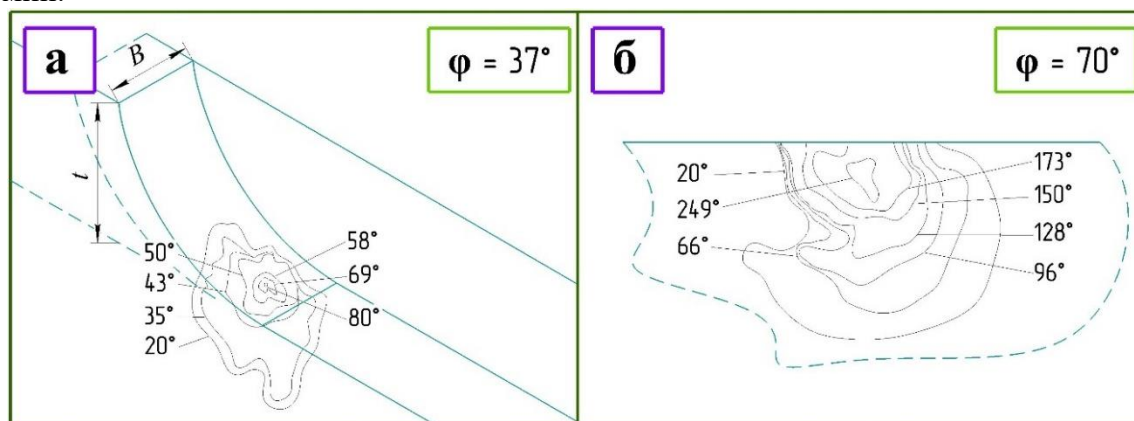


Рис. 2. – Изображение изотерм поля температур ($^{\circ}\text{C}$), распределённых по заготовке: в зоне резания, при угле поворота зуба $\varphi = 37^\circ$ (а) и на глубине, равной t от обрабатываемой поверхности (финишный поверхностный слой), при угле поворота зуба $\varphi = 70^\circ$ (б)

Разработанная модель позволяет получать графики изменения пиковых температур в зоне резания и на получаемой поверхности в зависимости от угла поворота зуба фрезы, но, кроме этого, позволяет оценивать скорости нагрева и охлаждения. Например, для представленных условий обработки в ходе численного эксперимента были получены данные, которые могут быть представлены через аппроксимированные зависимости:

$$\vartheta_{\Theta}(\varphi) = (132,98 - 23,79\varphi + 1,23\varphi^2 - 0,02\varphi^3) \cdot 100, \quad (1)$$

$$\Theta_{\max}(\varphi) = 20,2 + 6\varphi - 0,6\varphi^2 + 0,02\varphi^3, \quad (2)$$

где $\mathcal{G}_\Theta(\varphi)$ – функция скорости нагрева-охлаждения в зависимости от угла поворота зуба φ ($^{\circ}\text{C}/\text{c}$); а $\Theta_{\max}(\varphi)$ – функция максимальной температуры в зоне резания ($^{\circ}\text{C}$).

График зависимости скорости изменения максимальной температуры в зоне резания от угла поворота зуба фрезы представлен на рис. 3.

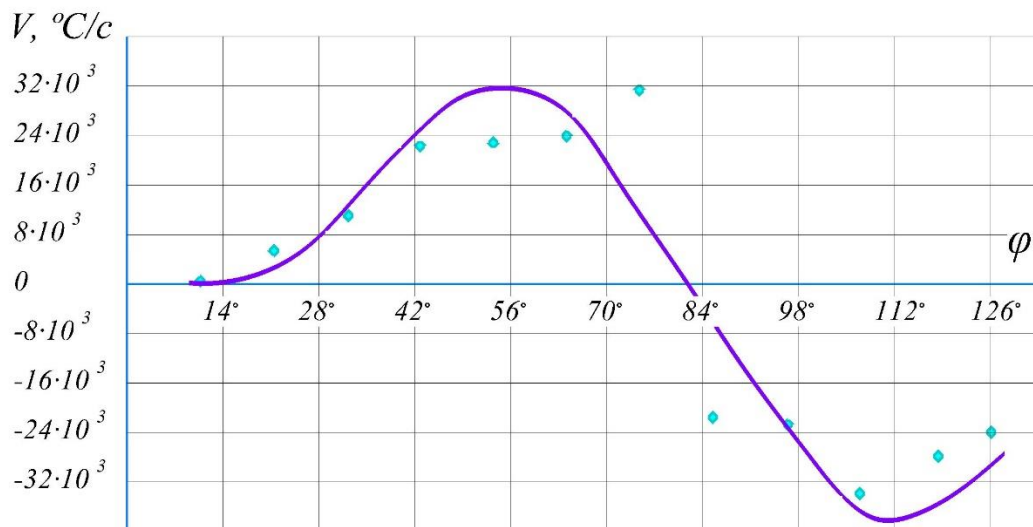


Рис. 3. – График зависимости скорости изменения максимальной температуры в зоне резания от угла поворота зуба фрезы;

● – экспериментальные данные; — — — аппроксимированная зависимость

Таким образом, оценить вероятность структурно-фазового превращения в поверхностном слое изделий возможно при помощи следующих интегралов:

$$P_{\Theta} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \Theta_S(\varphi) \frac{d\varphi}{\omega}, \quad (3)$$

$$\Omega = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} H(\Theta_S(\varphi) - \Theta_{кр}) \frac{d\varphi}{\omega}, \quad (4)$$

где P_{Θ} – температурно-временной импульс, $\Theta_S(\varphi)$ – функция максимальной температуры, действующей на получаемой поверхности; $\Theta_{кр}$ – критическая температура фазового превращения; ω – угловая скорость фрезы; H – функция Хевисайда [2].

Значение критерия Ω характеризует суммарное время пребывания поверхностного слоя в температурном диапазоне, потенциально опасном с позиции структурно-фазовых превращений.

Благодарности:

Работа выполнена сотрудниками лаборатории «Инженерии поверхности» в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН по теме № FMRW-2025-0052.

Список литературы

1. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 289 с.
2. Dhar A., Levitas V.I., Pandey K.K., Park C., Somayazulu M., Velisavljevic N. Quantitative kinetic rules for plastic strain-induced α - ω phase transformation in Zr under high pressure // npj Computational Materials. – 2024. – Vol. 10. – Article number 290. – DOI: 10.1038/s41524-024-01491-4.

Сведения об авторах

Евдокимов Дмитрий Викторович – к.т.н., доцент кафедры технологий производства двигателей; с.н.с. лаборатории «Инженерия поверхности».

Скуратов Дмитрий Леонидович – д.т.н., профессор кафедры технологий производства двигателей.

Хаймович Александр Исаакович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологий производства двигателей; г.н.с. лаборатории «Инженерия поверхности».

Зотов Владислав Александрович – студент ПИАШ; лаборант лаборатории «Инженерия поверхности».

Бочкарев Никита Олегович – студент ПИАШ.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE THERMAL ACTIVATION IMPULSE IN MILLING OF TITANIUM ALLOY VT9

Evdokimov D.V.^{1,2}, Skuratov D.L.¹, Khaimovich A.I.^{1,2},
Zotov V.A.^{1,2}, Bochkarev N.O.¹

¹Samara University, Samara, Russia, dmitry.evd.ssau@gmail.com

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Keywords: milling, titanium alloy VT9, temperature, structural-phase transformations, finite volume modeling, CFD.

This paper presents a methodology for evaluating the thermal activation impulse during end milling of titanium alloy VT9. A finite volume model coupled with CFD simulation of coolant flow was developed to obtain temperature fields, heating and cooling rates in the cutting zone. The proposed approach allows predicting the conditions for structural-phase transformations in the workpiece surface layer using integral criteria based on the Heaviside function. The methodology enables optimization of milling regimes to prevent undesirable phase transitions.