

**Евдокимов Д.В., Алексенцев А.А., Санхинес Ф., Лунин В.В.,  
Доденгефт С.С., Попов А.Д.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРЯЖЁННОСТИ ПРОЦЕССА  
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭМПИРИЧЕСКИХ  
ЗАВИСИМОСТЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ**

Производство часто требует назначения припусков на обработку и режимов резания расчётным путём. Это особенно актуально для авиационной промышленности, что связано в основном с повышенными требованиями к точности изготавливаемых изделий, дороговизной используемых в авиационной промышленности материалов, а также с трудностью их обработки. Например, своё значительное распространение в сфере авиационной промышленности получили титановые сплавы, из-за своих уникальных физико-механических свойств. Однако, высокие эксплуатационные свойства титановых сплавов являются нежелательными при их механической обработке. Низкая теплопроводность приводит к концентрации высокой температуры в узкой области вблизи зоны резания, а повышенная, по сравнению с конструкционными сталями, сопротивляемость разрушению титановых сплавов приводят к росту сил резания и повышенному износу инструмента.

Таким образом, возникает необходимость в изучении физики процесса резания и формирования поверхностного слоя. Вместе с этим именно углубленное изучение физики силовых и тепловых явлений при лезвийной и абразивной обработке заготовок способно дать необходимую информацию по разработке методик, позволяющих находить оптимальные режимы и условия обработки, что в конечном итоге позволяет осуществлять мероприятия, направленные на снижение себестоимости технологических операций и улучшения качества обработки.

В исследовании, представленном в данной работе, был проведён полнофакторный натурный эксперимент с целью определения коэффициента трения между инструментальным твёрдым спечённым сплавом ВК8 и титановыми сплавами ВТ6, ВТ9 и ОТ4. Данное сочетание сплавов имеет широкое применение в авиационной промышленности [1]. Проведение эксперимента осуществлялось на автоматическом трибOMETрическом комплексе CSM Instruments TRB, при изменяющихся условиях трения. К ним относились усилие прижатия пары трения, относительная скорость скольжения и наличие или отсутствие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Исходя из полученных в ходе эксперимента данных, были составлены степенные зависимости, которые в практическом при-

менении могут быть полезны при определении функциональных параметров процесса резания [2]. Ознакомиться с эмпирическими зависимостями возможно по табл. 1.

Таблица 1. Эмпирические зависимости для определения коэффициента трения между твёрдым сплавом ВК8 и титановыми сплавами ОТ4, ВТ6, ВТ9

Материал	При подаче СОЖ	Без подачи СОЖ
ОТ4	$\mu_f = 1,027 / v^{0,197} P^{0,256}$	$\mu_f = 0,335 \cdot v^{0,126} / P^{0,112}$
ВТ6	$\mu_f = 0,167 \cdot v^{0,063} P^{0,031}$	$\mu_f = 0,171 \cdot v^{0,265} / P^{0,124}$
ВТ9	$\mu_f = 1,357 / v^{0,315} P^{0,166}$	$\mu_f = 0,007 \cdot v^{0,734} P^{0,174}$

Практическая ценность использования приведённых зависимостей во многом заключается в том, что они позволяют учесть скорость движения стружки по передней поверхности режущего клина инструмента, скорость скольжения его задней поверхности о заготовку, усилия, возникающие в зоне резания, и наличие или отсутствие СОЖ.

Примером использования эмпирических зависимостей по определению коэффициента трения может служить их использование в методике, позволяющей оценивать теплонапряжённость процесса резания [3]. Указанная методика состоит, главным образом, из двух частей.

Первой частью является аналитическая методика А.Н. Резникова [4], адаптированная для вычисления плотностей тепловых потоков, поступающих в зуб фрезы, в заготовку и стружку в процессе фрезерования. Именно в данной части и были использованы представленные в табл. 1 зависимости.

Второй частью методики является конечно-объёмная модель, разработанная в модуле CFX программы Ansys и состоящая из фрезы, заготовки и потока СОЖ. В зависимости от режима и условий обработки, в первой части методики определяются все необходимые плотности тепловых потоков и задаются для виртуальных конечно-объёмных тел, составляющих модель из второй части методики. Пример визуализации полученных результатов по разработанной методике определения температурных полей в зоне резания при фрезеровании возможно видеть на рис. 1 и рис. 2, где на первом рисунке представлено температурное поле, распределённое по заготовке и изменяющееся в зависимости от угла поворота зуба фрезы, вошедшего в зону резания, а второй рисунок демонстрирует температурное поле, распределённое по телу фрезы и обтекающий её поток СОЖ.

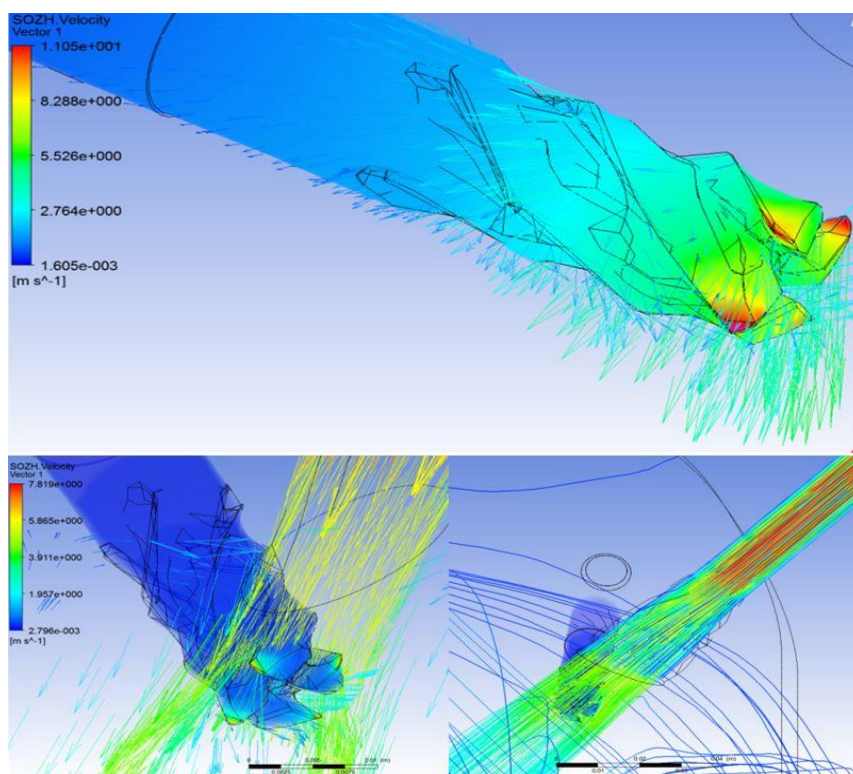


Рис. 1. Поля температур фрезы и скоростей СОЖ

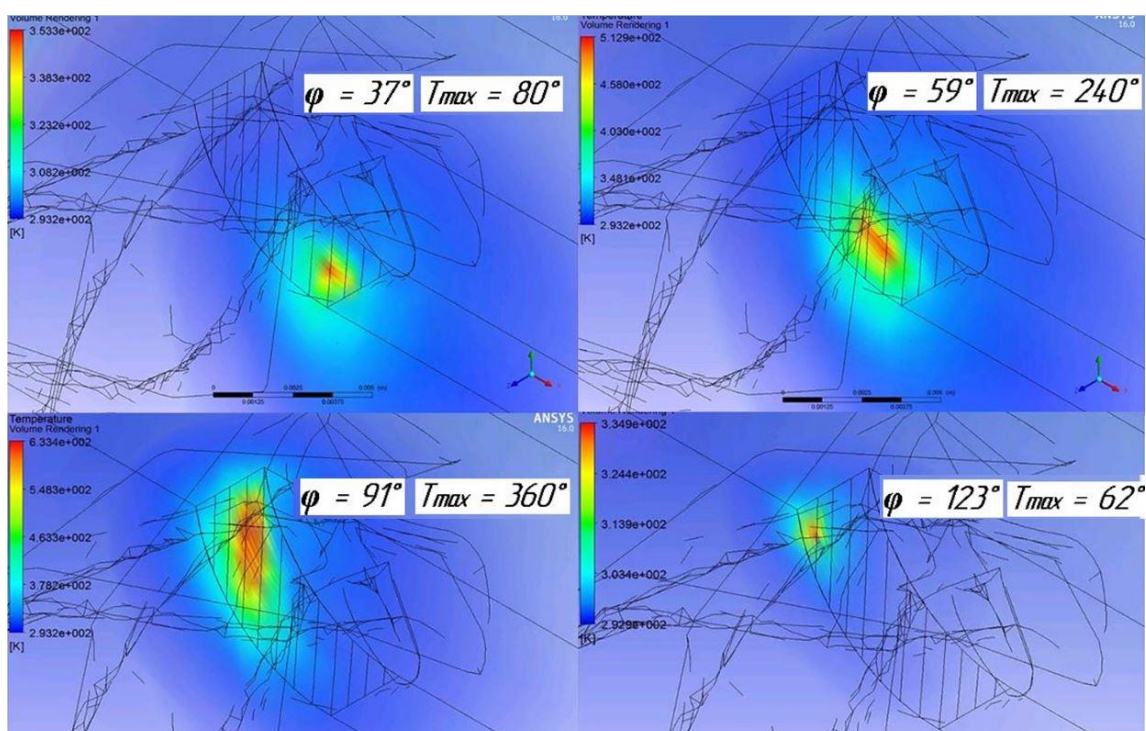


Рис. 2. Результаты расчёта поля температур в зоне резания в модуле CFX ANSYS

При помощи разработанной методики и использованных в ней степенных зависимостей, оценивающих величину коэффициента трения между инструментальным материалом и обрабатываемым, был проведён численный эксперимент по фрезерной обработке титанового сплава ВТ6. Результат представлен на рис. 3.

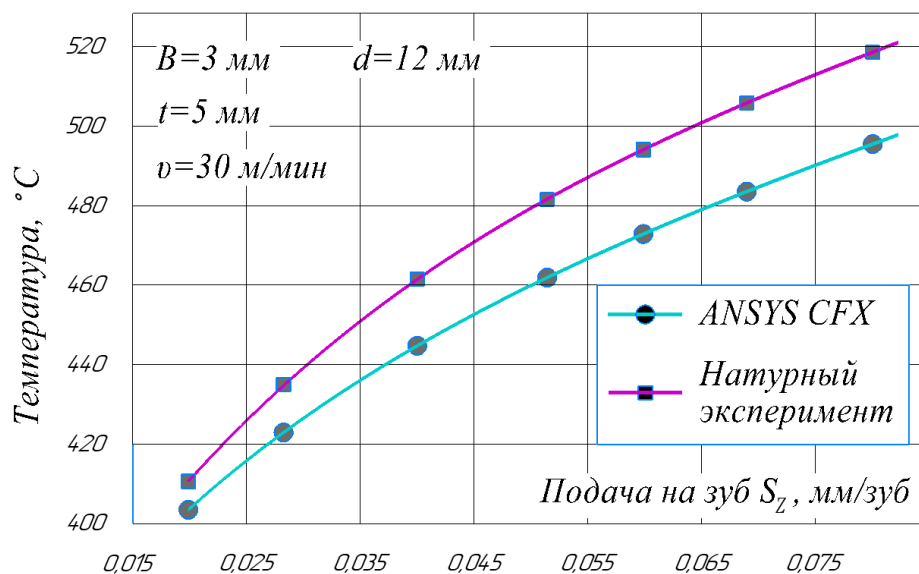


Рис. 3. Зависимости изменения максимальной температуры от величины подачи, полученные на основе численного и натурального экспериментов

Сопоставление результатов численного эксперимента с натурным показало, что расхождение не превышает 5%. Таким образом, данная работа показывает положительный пример использования полученных эмпирических зависимостей коэффициента трения в составе разработанной методики по определению температурных полей в зоне резания при фрезеровании. И данные зависимости могут быть использованы в других методиках и исследованиях, нацеленных на определение функциональных параметров резания и параметров качества на этапах механической обработки.

### Библиографический список

1. Братухин, А. Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей / А. Г. Братухин, Г. К. Язов, Б. Е. Карасев, Ю. С. Крымов, И. П. Нежурин. – М.: Машиностроение, 1997. – 416 с.
2. Вульф, А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Евдокимов, Д. В. Исследование тепловых полей в инструменте при концевом фрезеровании с охлаждением конструкционного титанового сплава ВТ6 / Д. В. Евдокимов, Д. Л. Скуратов, Д. Г. Федоров // СТИН. – 2015. – №4. – С. 23-25.
4. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.