

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕПЛОНАПРЯЖЁННОСТИ ТОНКОГО ТОЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Евдокимов Д.В.^{1,2}, Скуратов Д.Л.¹, Хаймович А.И.^{1,2},
Зотов В.А.^{1,2}, Трофимов Р.А.¹

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

²СамНЦ РАН, г. Самара

Ключевые слова: тонкое точение, температура, износ инструмента.

Качество поверхностного слоя деталей, формируемое на финишных операциях, напрямую определяет их эксплуатационные свойства, такие как усталостная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость, герметичность. В процессе лезвийной обработки инструмент неизбежно изнашивается, что ведёт к росту сил резания, температуры в зоне резания, ухудшению микрогеометрии поверхностного слоя заготовки, а также изменению, распределённому по нему поля остаточных напряжений, степени деформационного упрочнения и отклонения формы. Поэтому величина износа инструмента, особенно при чистовой обработке, должна быть ограничена допустимыми значениями, которые, например, для быстрорежущих резцов составляют 0,25...0,4 мм по задней поверхности [1].

Этому предельному износу соответствует период стойкости инструмента. Перспективный подход к его определению базируется на уравнении Арчарда, адаптированном для процесса резания:

$$V_h = K_v \frac{F_N L}{HV} \quad (1)$$

где V_h – объем материала режущего клина инструмента, удалённого в процессе изнашивания, мм³; K_v – коэффициент износа для пары инструмент – обрабатываемый материал, зависящий от условий взаимодействия контактных поверхностей; F_N – давление в зоне контакта на задней поверхности режущего клина, МПа; HV – твёрдость инструментального материала по Виккерсу, МПа; L – путь, пройденный резцом, мм.

Как видно из формулы (1), она содержит твёрдость материала, которая не является статичной в условиях изменения температуры. Также в формуле (1) присутствует давление в зоне контакта, являющееся производной от сил в зоне резания. Эти силы в значительной мере зависят не только от изменяющихся с величиной износа режущего клина площадок контакта с заготовкой и стружкой, но и изменяющихся физико-механических свойств материалов заготовки и режущей части инструмента вследствие роста температуры при износе.

С целью учёта влияния изменения температуры в зоне резания в процессе износа предлагается математическая модель, базирующаяся на формуле Даниеляна [2] с добавлением некоторых поправочных коэффициентов $K_{\Theta,3}$ и K_u :

$$\Theta_3 = 148,8 \cdot 9^{0,4} S_o^{0,24} t^{0,1} K_{\Theta,3} K_u \quad (2)$$

где $K_{\Theta,3}$ – поправочный коэффициент, определяющий соотношение температуры на задней поверхности к максимальной температуре; K_u – поправочный коэффициент на инструментальный материал. Для условия обработки резцом, оснащённым режущей пластиной, выполненной из быстрорежущей стали марки P18, коэффициент $K_u = 1$. При замене быстрорежущей стали марки P18 на другую быстрорежущую сталь коэффициент

K_u следует рассчитывать по формуле $K_u = 0,701 / (2,388 \cdot 10^{-3} \lambda_u)^{0,125}$, где λ_u – коэффициент теплопроводности инструментального материала, на который производится замена, Вт/(м·К).

Для учёта роста температуры при увеличении износа были выведены нелинейные регрессионные степенные зависимости на основе экспериментальных данных работы [3]:

$$\eta_1 = 0,781 + 17,882(h_3 - 0,214)^2; \quad (3)$$

$$\eta_2 = 1,075 - 4,403(h_3 - 0,432)^2; \quad (4)$$

$$\eta_3 = 1,01 + 2400(h_3 - 0,457)^{4,5}; \quad (5)$$

$$\eta_4 = 0,954 + 2,912(h_3 - 0,07)^{3,03}. \quad (6)$$

Зависимости показывают изменение доли теплового потока η_i , поступающего в режущий клин при различных величинах износа по задней поверхности h_3 (мм) относительно исходного уровня потока, принятого за 100%. Графическое представление экспериментальных данных и полученных аппроксимирующих зависимостей приведено на рис. 1.

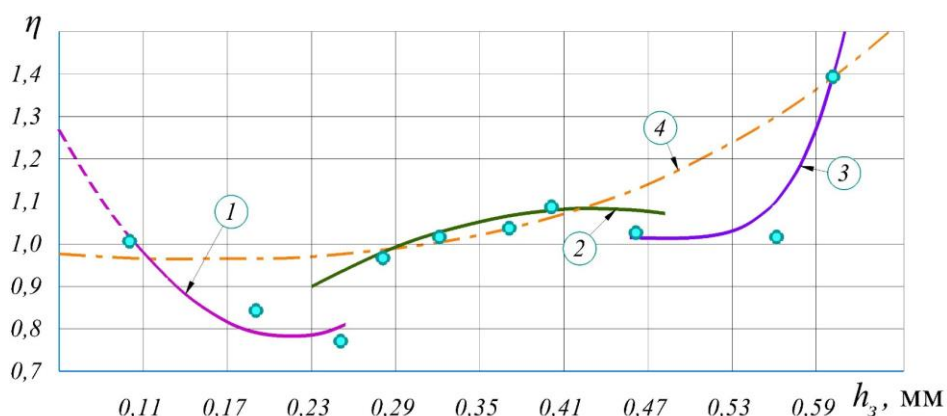


Рис. 1. – Экспериментальные данные [2] и аппроксимированные зависимости доли теплового потока, поступающего в режущий клин в процессе резания при различных стадиях износа инструмента:

1 – для периода приработки; 2 – для нормального износа; 3 – для предельного износа; 4 – обобщенная зависимость для всех ранее указанных периодов износа;

● – экспериментальные данные; — — — аппроксимированные зависимости

Предложенные выражения (3)–(5) позволяют получить более высокую точность расчётов в сравнении с формулой (6). Преимущество достигается за счёт того, что зависимости (3)–(5) учитывают долю теплового потока, переходящего в режущий клин, раздельно для этапов приработки, установившегося и критического (предельного) изнашивания. Напротив, уравнение (6) является универсальным для всех перечисленных стадий, что приводит к некоторой потере точности.

В работе [4] получены расчётные соотношения для оценки приращений температуры при теплообмене резца со стружкой $\Delta\Theta_n$ и с заготовкой $\Delta\Theta_{h_3}$. В результате авторы пришли к следующим выражениям:

$$\Delta\Theta_n(x, y) = 0,028 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} q_n \sqrt{\frac{K_l \cdot l_n}{g}} \tau_n(\psi_f(x, y), \nu_n(x, y)); \quad (7)$$

$$\Delta\Theta_{h_3}(x_1, y_1) = 0,028 \frac{\sqrt{\omega}}{\lambda} q_{h_3} \sqrt{\frac{l_{h_3}}{g}} \tau_{h_3}(\psi_{h_3}(x_1, y_1), \nu_{h_3}(x_1, y_1)), \quad (8)$$

где ω – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; q_n – плотность теплового потока, проходящего через переднюю поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^2$; q_{h_3} – плотность теплового потока, проходящего через заднюю поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^2$; K_l – коэффициент продольной усадки стружки; l_n – длина контакта режущего клина и стружки по передней поверхности, мм ; l_{h_3} – длина контакта режущего клина и заготовки по задней поверхности, мм ; τ_n, τ_{h_3} – величины касательных напряжений, действующих в точках со стороны передней (координатное пространство x, y) и задней (координатное пространство x_1, y_1) поверхностей режущего клина соответственно, МПа ; ψ_n, ψ_{h_3} – безразмерные продольные координаты по передней и задней поверхностям соответственно [4]; ν_n, ν_{h_3} – безразмерные параметры по нормали к передней и задней поверхностям соответственно [4].

Из этих соотношений видно, что изменение температуры в приповерхностных слоях инструмента прямо пропорционально величине теплового потока, поступающего через соответствующую контактную площадку. Следовательно, полученные ранее выражения (3)–(6), описывающие долю теплового потока, уходящего в режущий клин в функции от износа, могут быть обоснованно использованы для расчёта поправочного коэффициента $K_{\Theta,3}$.

Таким образом, в работе представлена методика, позволяющая оценивать температуру в зоне трения по задней поверхности режущего клина и заготовки, а также отслеживать её динамику изменения по мере изнашивания инструмента. Данная методика может быть использована для уточнения результатов расчёта по моделям прогнозирования стойкости инструмента, в частности при адаптации модели Арчарда под задачи прогноза стойкости. В рамках этой модели в качестве исходных данных используются микротвердость поверхностного слоя режущей части инструмента и давление по задней поверхности, являющееся прямым следствием действия сил резания, а оба этих параметра в значительной мере связаны с температурой в зоне резания.

Благодарности:

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

Список литературы

1. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
2. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1954. – 276 с.
3. Резников А.Н. Температура и охлаждение режущих инструментов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1959. – 172 с.
4. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 289 с.

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».

Трофимов Роман Анатольевич – студент ПИАШ.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING
THERMAL STRESS IN FINE TURNING
TO PREDICT CUTTING TOOL LIFE**

Evdokimov D.V.^{1,2}, Skuratov D.L.¹, Khaimovich A.I.^{1,2},
Zotov V.A.^{1,2}, Trofimov R.A.¹

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

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

Keywords: fine turning, temperature, tool wear.

A method for assessing temperature in the rear contact zone of a cutting tool during fine turning is proposed. The method accounts for temperature dynamics as wear progresses. It allows refining the tool life prediction using adapted Archard's model, where microhardness and contact pressure (both temperature-dependent) serve as input parameters.