

ОЦЕНКА ИЗНОСА ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*Ж.В. СИМСИВЕ¹, канд. техн. наук, доцент,
 А.В. КУТЫШКИН², доктор техн. наук, профессор,
 Д.Ц. СИМСИВЕ², аспирант
 (¹РИИ (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Рубцовск
²НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 6 февраля 2012 года

Кутышкин А.В. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
 Новосибирский государственный технический университет,
 e-mail: avk_200761@mail.ru

Предложена комбинированная модель адгезионного и диффузионного изнашивания передней поверхности твердосплавного режущего инструмента при точении конструкционных сталей. Представлены результаты расчета износа режущего инструмента в сравнении с результатами экспериментальных исследований, опубликованных в открытой печати.

Ключевые слова: износ режущего инструмента, износ передней поверхности режущего инструмента, диффузионный износ, адгезионный износ, механическая обработка.

Износ передней поверхности режущей части инструмента при точении на разных скоростях характеризуется образованием лунки износа. Основными источниками возникновения данного вида износа являются процессы абразивного, адгезионного и диффузионного изнашивания. В настоящее время количественные оценки указанного вида износа режущей части инструмента осуществляются с использованием эмпирических и полуэмпирических моделей, построенных на основании статистической обработки данных экспериментальных исследований и данных эксплуатации инструмента в производстве [1,2].

Несмотря на то что подобные модели получили достаточно широкое распространение, они обладают рядом недостатков, среди которых наиболее существенными являются необходимость проведения предварительных экспериментальных исследований износа режущего инструмента и дополнительное обоснование возможности применения полученных моделей для условий эксплуатации, отличных от проведенных экспериментов.

Более перспективным направлением, по мнению авторов, является разработка расчетно-

аналитических моделей, которые учитывают физико-механические особенности процессов износа режущего инструмента.

В настоящей статье предлагается комбинированная модель износа передней поверхности режущей части инструмента, учитывающая влияние процессов адгезионного и диффузионного изнашивания. В качестве допущения предлагается пренебречь влиянием на образование лунки износа процесса абразивного изнашивания. Наряду с этим при разработке данной модели были приняты следующие допущения. Материалы обрабатываемой заготовки и режущей части инструмента (материал инструмента) являются однородными, изотропными, жесткопластичными. Процесс резания считается установившимся, осуществляется с постоянной скоростью, колебания глубины резания отсутствуют, динамические колебания режущего инструмента не учитываются. Значение коэффициента трения μ на передней поверхности режущей части инструмента постоянно в течение времени обработки T . Основные механические характеристики слоев материалов обрабатываемой заготовки,



контактирующих с передней поверхностью режущей части инструмента, зависят от распределения температур вблизи этой поверхности $\Theta_{пj}$, которое определяется по методике, изложенной в работе [3]. Напряженное состояние режущей части инструмента считается плосконапряженным. Нормальные и касательные напряжения, возникающие в процессе резания на рассматриваемой поверхности режущей части инструмента, рассчитываются, в свою очередь, по методике, представленной в работах [4 и 5]. Материал режущей части инструмента состоит из I компонентов ($i = 1, \dots, I$) с размером зерна Δ . Эти компоненты диффундируют в материал обрабатываемой заготовки независимо друг от друга. Коэффициенты диффузии компонентов материала инструмента в материал заготовки зависят только от температуры и постоянны в течение времени T . Механические свойства материала инструмента зависят от распределения температур $\Theta_{пj}$, процентного содержания (концентрации) его компонентов α_i и величины зерна Δ .

Механизм адгезионного изнашивания поверхностей режущей части инструмента связан с образованием и последующим разрушением адгезионных металлических связей (АМС) между материалами обрабатываемой заготовки и режущей части инструмента в пределах участков их взаимного скользящего контакта $l_{пj}$. Процесс диффузионного изнашивания характеризуется диффузией компонентов материала режущей части инструмента в материал обрабатываемой заготовки (стружку), развивающейся также в пределах участка $l_{пj}$.

Будем считать, что активизация процессов адгезионного и диффузионного изнашивания обусловлена преимущественно пластической деформацией элементарных объемов материала обрабатываемой заготовки, контактирующих с рассматриваемой поверхностью режущей части инструмента на участке $l_{пj}$ [6]:

$$l_{пj} = 2a(\xi(1 - \text{tg } \gamma) + \text{sec } \gamma); a = s \cdot \sin \varphi / \cos \gamma, \quad (1)$$

где a – толщина срезаемого слоя; s – подача; γ, φ – передний угол и главный угол в плане режущей части инструмента соответственно; ξ – коэффициент усадки стружки.

Разобьем участок $l_{пj}$ на элементарные площадки l_j ($j = 1, \dots, J$). Критерием разбиения является постоянство температуры $\Theta_{пj}$ на участке l_j .

Рассмотрим элементарный отрезок времени τ_m обработки заготовки $\left(T = \sum_{m=1}^M \tau_m \right)$. Будем

считать, что в течение τ_m механические свойства материала инструмента постоянны и зависят от температуры $\Theta_{пj}$, а также концентрации его компонентов α_{ij} в пределах площадки l_j , которая принимается также постоянной: $\alpha_{ij}(\tau_m, \Theta_{пj}) = \text{const}$.

Объем материала инструмента $dQ_{Aj}(\tau_m)$, удаляемый с элементарной площадки l_j за отрезок времени τ_m , вследствие активации процесса адгезионного изнашивания, определяется зависимостью [7]

$$dQ_{Aj}(\tau_m) = \frac{v}{\xi} \delta p_{1j} p_{2j} l_j \tau_m, \quad (2)$$

где v – скорость резания; δ – толщина зоны разрушения АМС в инструменте, принимаемая равной толщине полос скольжения в металлах и инструментальных материалах; p_{1j} – вероятность активизации процессов адгезионного и диффузионного изнашивания; p_{2j} – вероятность смещения зоны разрушения АМС в материал инструмента.

Вероятность p_{1j} предлагается определять следующим выражением [7]:

$$p_{1j} = (1 + q_{Kj} / q_{пj})^{-1}, \quad (3)$$

где $q_{пj}$ – нормальное давление на площадке l_j передней поверхности режущего инструмента; q_{Kj} – среднее нормальное давление, необходимое для полного пластического смятия микронеровностей материала обрабатываемой заготовки на этой же площадке [8]:

$$q_{Kj} = 2,5 \sigma_{-виj}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj})(1 - \mu) \quad ; \quad \mu = \frac{1}{2(1,385 - \gamma)}, \quad (4)$$

где $\sigma_{-виj}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj})$ – предел прочности на сжатие материала инструмента при температуре $\Theta_{пj}$ и концентрации его компонентов α_{ij} в течение отрезка времени τ_m .

Нормальные давления $q_{п}$, действующие на передней площадке режущей части инструмента, рассчитываются методом конечных элементов с учетом термических напряжений, возникающих вследствие нагрева до температуры $\Theta_{п}$ слоев материала инструмента, прилегающих к этой поверхности [7].

Величина p_{2j} , в свою очередь, определяется выражениями [7]

$$p_{2j} = (1 + \sigma_{smj}^2(\Theta_{пj}) / \sigma_{sij}^2(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj}))^{-1} \cdot \sigma_{sij}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj}) \cong (0,7 \dots 0,8) \sigma_{ij}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj}). \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{smj}(\Theta_{пj})$ – напряжения текучести материала обрабатываемой заготовки вблизи площадки l_j при температуре $\Theta_{пj}$; $\sigma_{sij}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj})$, $\sigma_{ij}(\alpha_{ij}(\tau_m), \Theta_{пj})$ – напряжение текучести и предел прочности при изгибе материала инструмента при температуре $\Theta_{пj}$ и концентрации его компонентов α_{ij} в течение отрезка времени τ_m .

Массу i -го компонента материала режущей части инструмента, которая продифундирует с площади $s_j = bl_j$ за отрезок времени τ_m предлагается оценивать зависимостью [6]

$$M_{ij}(\tau_m) = p_{ij} \frac{2}{\sqrt{\pi}} b \frac{c_0 \sqrt{D_i(\Theta_{пj}) l_j v}}{\sqrt{\xi}} \tau_m, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi \cos \lambda}. \quad (6)$$

Здесь $D_i(\Theta_{пj})$ – коэффициент диффузии i -го компонента материала инструмента в стружку при температуре $\Theta_{пj}$; c_0 – предел насыщения стружки продифундировавшими компонентами материала инструмента; b – ширина срезаемого слоя; λ – угол наклона главной режущей кромки инструмента.

В качестве допущения, так же как и в работе [6], примем, что диффузия i -го компонента происходит из объема материала инструмента, по форме близкого к параллелепипеду, с основанием s_j и высотой h_{ij} , характеризующей толщину слоя материала инструмента (глубину диффузии), из которого продифундировал в

стружку этот компонент, определяемой выражением

$$h_{ij} = \frac{M_{ij}(\tau_m)}{\rho_i s_j} \frac{100}{\alpha_{ij}(\tau_m)}, \quad (7)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента.

У достаточно большого количества современных многокомпонентных инструментальных материалов определенная совокупность компонентов выполняет роль удерживающей связки. Разрушение или существенное снижение ее свойств, включая механические характеристики, независимо от его источника приводит к «выносу/удалению» из инструментального материала его остальных компонентов. Поэтому необходимо сопоставить максимальное значение толщины слоя материала инструмента, из которого произошла диффузия в стружку его компонен-

тов, $h_{\max j} = \max_{i=1}^I(h_{ij})$ с величиной зерна Δ , что

позволит сделать заключение о степени разрушения связки инструментального материала вследствие диффузионного изнашивания и в конечном итоге о величине диффузионного износа в целом. В общем случае возможны следующие соотношения между $h_{\max j}$ и Δ .

1. $h_{\max j} > \Delta$. В этом случае предлагается считать, что все компоненты материала инструмента удаляются из слоя толщиной Δ : $h_{\text{диф}j} = \Delta$.

2. $h_{\max j} > (0,6 \dots 0,7)\Delta$. В этом случае также предлагается считать, что все компоненты материала инструмента удаляются из слоя толщиной Δ – часть из-за диффузии в стружку, а часть вследствие существенного снижения свойств связки удерживать компоненты материала: $h_{\text{диф}j} = \Delta$.

3. $h_{\max j} < 0,6\Delta$. В этом случае предлагается считать, что глубина диффузионного износа будет определяться следующим образом:

$$h_{\text{диф}j} = \min_{i=1}^I(h_{ij}).$$

На основании значения $h_{\text{диф}j}$ находим объем материала инструмента $dQ_{dj}(\tau_m)$, который удаляется вследствие диффузии его компонентов с площадки s_j за отрезок времени τ_m :

$$dQ_{dj}(\tau_m) = h_{\text{диф}j} s_j p_{Ij}. \quad (8)$$

Поскольку процессы адгезионного и диффузионного изнашивания протекают одновременно, то объем материала инструмента $dQ_{\text{изн}j}(\tau_m)$, удаляемый с рассматриваемой площадки за отрезок времени τ_m , предлагается оценивать выражением

$$dQ_{\text{изн}j}(\tau_m) = \max(dQ_{\text{д}j}(\tau_m), dQ_{\text{А}j}(\tau_m)) \quad (9)$$

В том случае, если $dQ_{\text{изн}j}(\tau_m) = dQ_{\text{д}j}(\tau_m)$ и реализуются соотношения пп. 1, 3, то необходимо оценить изменение $\alpha_{ij}(\tau_m)$, которое возможно к окончанию отрезка времени τ_m в слоях материала инструмента \tilde{h}_{ij} , величину которых можно определить следующим выражением:

$$\tilde{h}_{ij} = h_{ij} - \frac{dQ_{\text{изн}j}(\tau_m)}{s_j} \quad (10)$$

Это обусловлено тем, что, как отмечалось ранее, $\alpha_{ij}(\tau_m)$ влияет на значения механических свойств материала инструмента ($\sigma_{\text{ви}j}, \sigma_{\text{и}j}$). Различия в изменениях $\alpha_{ij}(\tau_m)$ обусловлены различной скоростью диффузии компонентов материала инструмента, зависящей от значений $D_i(\Theta_{\text{П}j})$.

Для оценки концентрации компонентов материала инструмента $\alpha_{ij}(\tau_{m+1})$, которая может сформироваться к началу следующего элементарного отрезка времени обработки заготовки τ_{m+1} , предлагается использовать следующую зависимость:

$$\alpha_{ij}(\tau_{m+1}) = \frac{M_{ij}(\tau_m) - dQ_{\text{изн}j}(\tau_m)\rho_i\alpha_{ij}(\tau_m)}{\rho_{\text{инстр}}s_j\tilde{h}_{ij}} \quad (11)$$

На основании значений $\alpha_{ij}(\tau_{m+1})$ определяют для отрезка времени τ_{m+1} величины $\sigma_{\text{ви}j}, \sigma_{\text{и}j}$, например по данным работы [9], используемые для оценки величины $dQ_{\text{А}j}$ (2).

Учитывая ранее принятые допущения о постоянстве в течение отрезка времени τ_m величин $\alpha_{ij}(\tau_m)$ и, как следствие, постоянство величин $\sigma_{\text{ви}j}, \sigma_{\text{и}j}, p_{1j}, p_{2j}$ в пределах участка l_j , можно записать выражение для оценки общего объема материала инструмента, удаляемого с его передней поверхности за все время обработки T :

$$Q_{\text{П}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M dQ_{\text{изн}j}(\tau_m) \quad (12)$$

где $dQ_{\text{изн}j}(\tau_m)$ – определяется зависимостью (9).

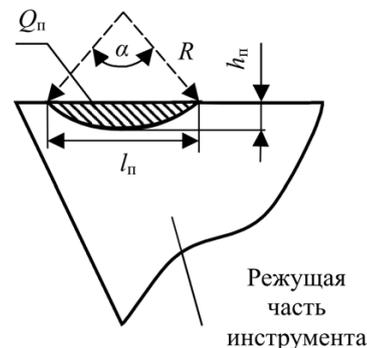
Из геометрических соображений (см. рисунок) величину $Q_{\text{П}}$ можно оценить следующим выражением:

$$Q_{\text{П}} = bS, \quad (13)$$

$$\text{где } S = \left[\frac{A^2}{4h_{\text{П}}^2} \arcsin\left(\frac{C}{A}\right) - \frac{BC}{h_{\text{П}}^2} \right];$$

$$A = \left(\frac{l_{\text{П}}}{2}\right)^2 + h_{\text{П}}^2; \quad B = \left(\frac{l_{\text{П}}}{2}\right)^2 + h_{\text{П}}^2; \quad C = h_{\text{П}}l_{\text{П}}.$$

Приравнявая выражения (12) и (13), можно определить величину $h_{\text{П}}$ при заданном времени обработки заготовки T .



Модель режущей части инструмента

Апробация разработанной модели осуществлялась на данных работы [10]. В этой работе представлены как результаты экспериментальных исследований, так и количественные оценки величины $h_{\text{П}}$ (в работе она обозначена, как K_T), полученные на основе разработанной авторами этой работы модели износа передней поверхности режущей части инструмента. Эксперименты проводились по обработке прутка стали AISI 1045 (сталь 45) диаметром 100 мм инструментом с режущей частью из твердого сплава ISO P40 ($\alpha = 7^\circ, \gamma = 0^\circ$, радиус закругления вершины реза 0,8 мм). В таблице совместно приведены экспериментальные и расчетные данные работы [10], а также расчетные величины глубины лунки износа $h_{\text{П}}$, полученные авторами с использованием представленной в данной статье модели. В столбцах 4 и 6 таблицы приведены значения относительной ошибки между экспериментальными данными и расчетными значениями величины $h_{\text{П}}$, приведенными в работе [9], ϵ_1 и полученными авторами ϵ_2 .

Экспериментальные и расчетные данные

Данные работы [10]			ε_1	Данные авторов	ε_2
T , мин	$h_{\text{п}}$ (эксперимент), мм	$h_{\text{п}}$ (расчетные), мм		$h_{\text{п}}$ (расчетные), мм	
$v = 150$ м/мин, $s = 0,17$ мм/об., $t = 1,5$ мм					
1	0,027	0,023	0,148	0,026	0,037
2	0,038	0,04	-0,053	0,037	0,026
3	0,074	0,076	-0,027	0,069	0,068
6	0,095	0,091	0,042	0,09	0,053
Средняя относительная ошибка			0,028		0,046
Среднеквадратическое отклонение значения относительной ошибки			0,090		0,018
$v = 160$ м/мин, $s = 0,25$ мм/об., $t = 1,5$ мм					
1	0,02	0,025	-0,250	0,0182	0,090
2	0,048	0,049	-0,021	0,0479	0,002
3	0,099	0,093	0,061	0,088	0,111
6	0,11	0,116	-0,055	0,106	0,036
Средняя относительная ошибка			-0,066		0,060
Среднеквадратическое отклонение значения относительной ошибки			0,132		0,050
$v = 190$ м/мин, $s = 0,18$ мм/об., $t = 1,5$ мм					
1	0,042	0,069	-0,643	0,042	0,000
2	0,076	0,082	-0,079	0,068	0,105
3	0,092	0,099	-0,076	0,097	
6	0,132	0,12	0,091	0,118	0,106
Средняя относительная ошибка			-0,177		0,039
Среднеквадратическое отклонение значения относительной ошибки			0,321		0,080

В таблице приведены также значения средней относительной ошибки и ее среднеквадратического отклонения. Эти показатели позволяют сделать вывод о том, насколько предложенная в статье модель износа передней поверхности режущей части инструмента точнее модели работы [10]. Для всех трех режимов обработки среднеквадратическое отклонение величины ε_2 существенно меньше этого показателя для величины ε_1 . Это говорит о том, что разработанная модель дает более «устойчивые» оценки величины $h_{\text{п}}$ на различных режимах механообработки. Средние же значения относительной ошибки по

абсолютной величине также имеют меньшие значения для двух режимов механообработки. Таким образом, представленная в статье модель позволяет осуществлять прогнозирование износа передней поверхности режущей части инструмента с учетом процессов адгезионного и диффузионного изнашивания.

Список литературы

1. Patil R.Y. Cutting Tool Wear-Mechanisms// Journal of Sci., Eng. & Tech. Mgt. v. 2(1), January 2010, pp. 36 – 42.



2. *Arsecularatnea J.A., Zhanga L.C., Montross C.* Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools// *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*. V. 46. – 2006, pp. 482–491.

3. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И.* Разработка новой теории тепловых процессов резания. Определение температурных полей и контактных температур при резании материалов. Часть 2 // *Вестник машиностроения*. – 2011. – № 4. – С. 73–80.

4. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.* Разработка новой теории резания. Определение кинематического, напряженного и деформированного состояния обрабатываемой заготовки// *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 5. – С. 61–70.

5. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.* Разработка новой теории резания. Определение основных параметров процесса резания // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 6. – С. 64–70.

6. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.

7. *Симсиве Ж.В., Кутышкин А.В., Симсиве Д.Ц.* Оценка износа режущего инструмента при высокоскоростной механической обработке // *Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты*. – 2011. – № 3[52]. – С. 23–26.

8. *Степанский Л.Г.* Прогнозирование надежности деформирующего инструмента: учеб. пособие. – М.: МГТУ «Станкин». – 1995. – 99 с.

9. *Металлообрабатывающий* твердосплавный инструмент: справочник / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманис, В.А. Фальковский и др.; редкол.: И.А. Ординарцев (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

10. *Attanasio A., Ceretti E., Rizzuti S., Umbrello D., Micari F.* 3D Finite Element Analysis of Tool Wear in Machining // *Annals of CIRP*. – 2008. – V. 57/1. – PP. 61–64.

Estimation of the tool crater wear of the cutting tool with carbide cutting inserts in turning

J.V. Simsive, A.V. Kutyshkin, D.C. Simsive

In article the combined model of adhesive and diffusion crater wear of the cutting tool with carbide cutting inserts is offered at turning constructional steels. The calculated wear of cutting tools in comparison with the results of experimental studies published in the press is shown.

Key words: wear of the cutting tool, crater wear of the cutting tool, adhesion wear, diffusion wear, turning.