

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Д.Ц. СИМСИВЕ¹, аспирант
Ж.В. СИМСИВЕ², канд. техн. наук, доцент,
А.В. КУТЫШКИН³, доктор техн. наук, профессор,
(^{1,3} НГТУ, г. Новосибирск,
² Рубцовский индустриальный институт (филиал)
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Рубцовск Алтайского края)

Статья поступила 14 июня 2012 года

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

Предложена методика оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента при точении конструкционных сталей по критерию усталостного разрушения его режущей части. Представлены результаты расчета стойкости режущего инструмента в сравнении с результатами экспериментальных исследований, опубликованных в открытой печати.

Ключевые слова: износ режущего инструмента, усталостное разрушение, стойкость режущего инструмента, механическая обработка

Основными видами хрупкого разрушения режущей части инструмента (режущего инструмента) при механической обработке, определяющими ее усталостную прочность, являются микровыкрашивание и сколы режущих кромок [1]. К основным источникам возникновения указанных видов хрупкого разрушения можно отнести:

- поверхностные дефекты режущей части инструмента, неоднородность ее структуры, наличие остаточных напряжений и т.п.;
- «пульсацию» силы резания вследствие образования скалывающей трещины в основании формируемой в процессе резания стружки;
- термические напряжения, возникающие при резании в режущей части инструмента.

В настоящее время разработано большое количество методик оценки усталостной прочности и стойкости инструмента по данному виду износа его режущей части, например, работы [1, 2]. Основным недостатком данных методик является использование эмпирических зависимостей для оценки амплитуд и частоты колебания/пульсаций силы резания и, как следствие, распределений напряжений и температур в режущей части инструмента. Это не только существенно усложняет получение оценок усталостной прочности и соответствующей стойкости инструмента, так как требует предварительного проведения экс-

периментальных исследований, но и ограничивает область применения полученных результатов, поскольку они связаны как с определенными технологическими условиями проведенных исследований, так и с механическими свойствами материалов инструмента и заготовки, которые использовались при этом.

В данной статье авторы предлагают методику оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента, используемого при точении, по критерию усталостного разрушения его режущих поверхностей, основанную на положениях теории резания Воронцова А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиева А.Ю. При разработке этой методики 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 $T_{\text{обр}}$. Напряженное состояние режущей части инструмента считается плосконапряженным.

Особенностью процесса резания, как отмечалось выше, является «пульсация» силы резания, которая



периодически происходит в результате образования в стружке скалывающей трещины. При этом величина силы резания скачкообразно меняется от максимального P_{max} до минимального P_{min} значений, которые рассчитываются по зависимостям, приведенным в работе [3]. Изменяются также значения температур на передней поверхности режущей части инструмента от Θ_{max} до Θ_{min} , которые можно определить по методике, приведенной в работе [4]. Распределение же температуры по задней поверхности режущей части инструмента остается практически постоянным [4].

Такие условия нагружения режущей части инструмента очень близки к схеме многоциклового асимметричного нагружения [5]. Частоту пульсации/изменений силы резания f (частота цикла нагружения) можно оценить следующим выражением:

$$f = (2t_p)^{-1}; \tag{1}$$

$$t_p = s_p / v; \quad s_p = \frac{e_p a k_c}{2,31 \cos \gamma}; \quad a = s \sin \varphi. \tag{2}$$

Здесь s_p – перемещение режущей части инструмента от окончания разрушения стружки в предыдущем цикле стружкообразования до начала образования в стружке трещины в следующем цикле; e_p – накопленная деформация материала заготовки в зоне острия режущей части инструмента, при которой начинается образование скалывающей трещины в основании стружки; k_c – коэффициент изменения толщины стружки [3]; t_p – время, за которое режущая часть инструмента пройдет расстояние s_p ; γ , φ – передний и главный угол в плане режущей части инструмента; v , s – скорость резания и подача.

Величина e_p определяется по следующему алгоритму.

1. Идентифицируется зависимость предела текучести материала обрабатываемой заготовки σ_s от температуры Θ :

$$\sigma_s = A \cdot \exp(b(\Theta_{пл} - \Theta)),$$

где $\Theta_{пл}$ – температура плавления материала обрабатываемой заготовки, К; A , b – коэффициенты, значения которых определяется методами регрессионного анализа.

В качестве исходных используются данные, приведенные в справочной литературе.

2. Рассчитывается температура материала заготовки в зоне резания $\Theta_{з.р.}$ по методике работы [5].

3. Определяется значение σ_s при температуре $\Theta_{з.р.}$

4. На основании полученных значений σ_s рассчитывается гидростатическое давление p в зоне острия режущей части инструмента по методике работы [3].

5. По диаграммам пластичности материала обрабатываемой заготовки для температуры $\Theta_{з.р.}$ определяется e_p , соответствующая найденному значению p .

Общее число циклов нагружения до разрушения и соответствующая стойкость режущей части инструмента оценивается следующими выражениями:

$$N = N_6 \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{max\Sigma}} \right)^m; \quad T = \frac{N_6}{f} \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{max\Sigma}} \right)^m. \tag{3}$$

Здесь $\sigma_{max\Sigma}$ – максимальное суммарное напряжение, действующее на режущую часть инструмента в цикле нагружения; σ_R – предел выносливости материала режущей части инструмента при асимметричном цикле нагружения; N_6 – базисное количество циклов нагружения.

Величина $\sigma_{max\Sigma}$ рассчитывается по следующей зависимости:

$$\sigma_{max\Sigma} = \sigma_{эkv max} + \sigma_{\Theta max}, \tag{4}$$

где $\sigma_{эkv max}$ – максимальное эквивалентное напряжение цикла нагружения режущей части инструмента; $\sigma_{\Theta max}$ – максимальное термическое напряжение, возникающее в режущей части инструмента в течение цикла нагружения.

Предел выносливости σ_R при асимметричном цикле нагружения рассчитывается по зависимостям:

$$\sigma_R = \sigma_a + \sigma_m; \tag{5}$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m; \quad \psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0};$$

$$\sigma_m = 0,5(\sigma_{max} + \sigma_{min}), \tag{6}$$

где σ_a , σ_m , σ_{max} , σ_{min} – амплитуда напряжений, максимальное, минимальное и среднее напряжения цикла нагружения; ψ_σ – коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений при нагружении; σ_{-1} , σ_0 – пределы выносливости материала режущей части инструмента при симметричном и отнулевом цикле нагружения.

Максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{эkv max}$ цикла нагружения режущей части инструмента определяется согласно критерию Писаренко – Лебедева [6]:

$$\sigma_{эkv max} = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-J}; \tag{7}$$

$$\chi = \frac{\sigma_{\hat{a}}}{\sigma_{\hat{a}}}; \quad \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$J = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i};$$

$$\sigma_1 = 0,5 \left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right];$$

$$\sigma_1 = 0,5 \left[\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right]; \sigma_3 = 0,$$

где A – константа, определяющая статическую сущность процесса разрушения, зависящая от характера имеющихся в материале дефектов и размеров тела; χ – параметр, определяющий долю сдвиговой деформации в процессе разрушения; σ_i – интенсивность напряжений; J – параметр, характеризующий жесткость нагружения; σ_B, σ_{-B} – предел прочности материала режущей части инструмента и его предел выносливости при симметричном цикле нагружения; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в режущей части инструмента в цикле ее нагружения.

С достаточной степенью точности для твердых сплавов можно принять следующие значения константы A [1]:

- $A = 0,7$ – твердые сплавы WC – TiC – Co;
- $A = 0,8$ – твердые сплавы WC – Co и WC – TiC – TaC – Co.

Распределения температур Θ , термических напряжений и напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ в режущей части инструмента для P_{max} и P_{min} определялись методом конечных элементов.

Апробация предложенной методики осуществлялась с использованием экспериментальных данных, приведенных в работе [7]. Обработывались заготовки из стали ASTM 4340 (ст. 40XH2MA, HB 217) с размером $\varnothing 76,2 \times 457,2$ мм. На основании данных работы [8] предел текучести материала обрабатываемой заготовки σ_s оценивается зависимостью $\sigma = 0,011 \cdot 100 - \Theta$. В качестве инструмента использовались твердосплавные пластины Kennametal K7H (T30K4) со следующими геометрическими характеристиками ($\varphi = 60^\circ, \alpha = 5^\circ, \gamma = 5^\circ$ [1a–2a], $\gamma = -5^\circ$ [4a, 4b, c]). Механические параметры материала режущей пластины характеризуются следующими величинами [9]: $\sigma_B = 617$ МПа, $\sigma_{-B} = 3980$ МПа, $\sigma_0 = 500$ МПа, $\sigma_{-1} = 430$ МПа.

Режимы обработки заготовки приведены в табл. 1 (сохранены обозначения экспериментов работы [7]).

Таблица 1

Номер эксперимента	Режимы обработки		
	v , м/мин	s , мм/об	t , мм
1a	85,344	0,6096	1,27
1b	67,056	0,889	1,27
1c	33,528	1,0922	1,27
2b	73,152	0,6858	1,27
4a	76,2	1,0922	1,27
4b,c	67,056	1,0922	1,27

Расчетные значения температур в зоне резания, на передней и задней поверхностях приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер эксперимента	Температура на передней поверхности режущей части инструмента $\Theta_p, ^\circ\text{C}$		Температура на задней поверхности режущей части инструмента $\Theta_z, ^\circ\text{C}$		Средняя температура в зоне резания $\Theta_{з.р.}, ^\circ\text{C}$	Напряжение $\sigma_{\Theta_{max}}, \text{МПа}$
	$\Theta_{p_{max}}$		$\Theta_{z_{max}}$	$\Theta_{z_{min}}$		
1a	967	955	207	205	769	989
1b	598,6	588	273	272	458	609
1c	621	610	234	231	579	826
2b	910	898	208	207	752	579
4a	903	893	265	262	827	994
4b,c	877	866	269	267	806	934

Из данных табл. 2 видно, что колебания значений температур на передней и задней поверхностях режущей части инструмента при изменении силы резания от P_{max} до P_{min} не превышают 5%. Это позволяет при оценке величин напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_a, \sigma_m, \sigma_{max}, \sigma_{min}$ (6) использовать средние значения температур Θ_p, Θ_z . Расчетные значения $P_{max}, P_{min}, \sigma_a, \sigma_m, \sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_R$ (5), $\sigma_{экр. max}$ (7), $\sigma_{max\Sigma}$ (4) приведены в табл. 3 и 4. В табл. 3 также приведены расчетные значения величин t_p (2) и e_p .

Таблица 3

Номер эксперимента	$P_{max}, \text{кН}$	$P_{min}, \text{кН}$	$\sigma_{экр. max}, \text{МПа}$	$\sigma_{max\Sigma}, \text{МПа}$	t_p	e_p
1a	996	559	660	1649	$3,94 \cdot 10^{-5}$	5,73
1b	514	329	406	1015	$2,11 \cdot 10^{-5}$	5,7
1c	1680	885	551	1377	$1,81 \cdot 10^{-4}$	5,72
2b	1117	616	386	965	$5 \cdot 10^{-5}$	5,73
4a	1763	1071	534	1528	$1 \cdot 10^{-4}$	8,4
4b,c	1770	1080	624	1558	$1,58 \cdot 10^{-4}$	8,41

Таблица 4

Номер эксперимента	$\sigma_a, \text{МПа}$	$\sigma_{max}, \text{МПа}$	$\sigma_{min}, \text{МПа}$	$\sigma_m, \text{МПа}$	$\sigma_R, \text{МПа}$
1a	714,7	1649	1530	1590	875
1b	287	1015	976	996	709
1c	420	1377	986	1181	761
2b	296	965	950	1008	712
4a	888	1528	1458	1830	943
4b,c	880	1558	1476	1819	939

В табл. 5 совместно приведены расчетные и экспериментально полученные значения стойкости T режущей части инструмента, а также относительная ошибка ϵ между ними.



Таблица 5

Номер эксперимента	$T_{\text{эксп}}$, мин	$T_{\text{расч.}}$, мин	ϵ
1a	2	1,84	0,080
1b	5,5	4,9	0,109
1c	9	10	0,111
2b	20	17,2	0,140
4a	5,5	4,93	0,104
4b,c	6	5,37	0,105
Среднее значение относительной ошибки $\epsilon_{\text{ср}}$			0,108

Значения средней относительной ошибки $\epsilon_{\text{ср}}$ между экспериментальными и расчетными значениями стойкости твердосплавного режущего инструмента по критерию его хрупкого/усталостного разрушения, не превышающие 11 %, позволяют сделать вывод о возможности использования предложенной методики при разработке технологических процессов механообработки и выборе режущего инструмента.

Список литературы

1. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. *Павлов П.А.* Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П.А. Павлов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отд., 1988. – 252 с.

3. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю.* Разработка новой теории резания. 7. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации силы резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 56–71.

4. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И.* Разработка новой теории тепловых процессов резания. 6. Определение температурных полей и контактных температур при резании// Вестник машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 63–71.

5. *Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.И.* Разработка новой теории тепловых процессов резания. 7. Примеры практических расчетов температуры резания// Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 72–79.

6. *Троценко В.Т., Сосновский Л.А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Т.1. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 346 с.

7. *Masood, Zaher Abdel Meged, «Chipping and Breakage of Carbide Tools»* (1976). Open Access Dissertations and Theses. Paper 462. <http://digitalcommons.mcmaster.ca/opensdissertations/462>.

8. *Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М.* Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник. – Екатеринбург: УрОРАН, 1996. – 408 с.

9. *Креймер Г.С.* Прочность твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1971. – 247 с.

Prediction of fatigue failure of the cutting tool with carbide cutting inserts at orthogonal turning

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

In a paper the technique of an estimation of firmness cutting tool with carbide cutting inserts is offered at turning constructional steels by criterion of fatigue failure of its cutting part. Results of calculation of firmness of the cutting tools in comparison with results of the experimental researches published in an open printing are presented.

Key words: cutting tool wear, fatigue failure, cutting tool life, orthogonal turning.