

О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С КУБИЧЕСКИМ НИТРИДОМ БОРА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

*Д.Ц.СИМСИВЕ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 29 сентября 2012 года

Симсиве Д.Ц. – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: simsive.dc@yandex.ru

Предложена методика оценки стойкости режущего инструмента, оснащенного кубическим нитридом бора (КНБ), применяемого при точении титанового сплава 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, точение.

В настоящее время разработано достаточно большое количество методик оценки усталостной прочности и стойкости режущей части инструмента [1, 2]. К основному недостатку этих методик можно отнести использование эмпирических зависимостей для оценки амплитуд и частоты колебания 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 экспериментальных 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 работе предлагается методика оценки стойкости режущего инструмента, оснащенного КНБ, используемого при точении титанового сплава, по критерию усталостного разрушения его режущих поверхностей, основанная

на положениях теории резания А.Л. Воронцова, Н.М. Султан-Заде, А.Ю. Албагачиева. При разработке данной методики были приняты следующие допущения. Материалы обрабатываемой заготовки и режущей части инструмента являются однородными, изотропными, жесткопластичными. Процесс резания считается установившимся, осуществляется с постоянной скоростью, колебания глубины резания отсутствуют, динамические колебания режущего инструмента не учитываются. Циклом нагружения считается одно колебание силы резания. Значение коэффициента трения μ на передней и задней поверхностях режущей части инструмента постоянно в течение времени обработки $T_{обр}$. Напряженное состояние режущей части инструмента считается плосконапряженным. Разрушение режущей части инструмента происходит в условиях многоциклового усталости из-за циклических колебаний силы резания в процессе обработки.

Периодическое колебание силы резания происходит в результате образования в стружке скалывающейся трещины. При этом величина силы резания скачкообразно меняется от макси-



мального 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].

В качестве критерия, определяющего возникновение усталостного разрушения режущей части инструмента при его эксплуатации, предлагается принять общее число циклов нагружения до разрушения, которое можно оценить зависимостью [2]

$$N = N_6 \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{\max\Sigma}} \right)^m \quad (1)$$

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 – базовое количество циклов нагружения.

Учитывая, что общее число циклов нагружения до разрушения N соответствует стойкости инструмента $N = T f$, выражение для определения стойкости режущего инструмента принимает вид

$$T = \frac{N_6}{f} \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{\max\Sigma}} \right)^m \quad (2)$$

где f – частота колебаний силы резания.

Частоту колебаний силы резания f можно оценить следующим выражением:

$$f = (2t_p)^{-1} \quad (3)$$

$$t_p = \frac{s_p}{v} \quad ; \quad s_p = \frac{e_p a k_c}{2,31 \cos \gamma} \quad ; \quad a = s \sin \varphi \quad (4)$$

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 определялась по методике, представленной в работе [3].

Максимальное суммарное напряжение в режущей части инструмента $\sigma_{\max\Sigma}$, действующее в пределах цикла, оценивается выражением

$$\sigma_{\max\Sigma} = \sigma_{\text{экв max}} + \sigma_{\Theta \max} \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{экв max}}$ – 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:

$$\sigma_R = \sigma_a + \sigma_m \quad (6)$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m \quad ; \quad \psi_\sigma = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \quad ; \quad \sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (7)$$

где σ_a , σ_m , σ_{\max} , σ_{\min} – амплитуда напряжений, среднее, максимальное и минимальное 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.

Для расчета максимального эквивалентного напряжения предлагается применить следующие теории прочности, используемые для описания поведения хрупких материалов: критерий Писаренко–Лебедева [5] (КПЛ), натуральный критерий прочности [6,7] (НКП), критерий Боткина–Миролюбова [5], критерий максимальных нормальных напряжений (первая теория прочности) [5].

Максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв max}}$ цикла нагружения режущей части инструмента согласно критерию Писаренко – Лебедева оценивается выражением

$$\sigma_{\text{экв max}} = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-J} \quad (8)$$

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

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

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

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

$$\sigma_3 = 0,$$

где A – константа, определяющая статическую сущность процесса разрушения, зависящая от характера имеющихся в материале дефектов и размеров тела [1]; 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 при растяжении и сжатии; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в режущей части инструмента в период цикла ее нагружения.

Согласно натуральному критерию прочности

$$\begin{cases} \sigma_{\text{экв max}} = \sqrt{K_1 \tau_v^2 + K_2 \sigma_v^2} \leq \sigma_B, \\ \sigma_{\text{экв max}} = \sqrt{K_1 \tau_v^2 + K_3 \sigma_v^2} \leq \sigma_B; \end{cases} \quad (9)$$

$$\sigma_v = \sigma_1 \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 \cos^2 \alpha_2 + \sigma_3 \cos^2 \alpha_3;$$

$$\tau_v = \sqrt{(\sigma_1 \cos \alpha_1)^2 + (\sigma_2 \cos \alpha_2)^2 + (\sigma_3 \cos \alpha_3)^2};$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{\Sigma_1}{\Sigma_p}; \cos \alpha_2 = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_p}; \cos \alpha_3 = \frac{\Sigma_3}{\Sigma_p};$$

$$\Sigma_1 = 2\sigma_1 - \chi(\sigma_2 + \sigma_3); \Sigma_2 = 2\sigma_2 - \chi(\sigma_1 + \sigma_3);$$

$$\Sigma_3 = 2\sigma_3 - \chi(\sigma_1 + \sigma_2);$$

$$\Sigma_p = \sqrt{2[(2 + \chi^2)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \chi(4 - \chi)(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)]};$$

$$K_1 = \frac{3(2 + \chi^2)^2}{2(4 - \chi^2)}; \quad K_2 = \frac{(2 + \chi^2)^2}{(4 - \chi^2)}(1 - \chi^2);$$

$$K_3 = \frac{(2 + \chi^2)^2}{4(4 - \chi^2)}(1 - \chi^2)\chi^2;$$

Здесь σ_v, τ_v – функции нормальных и касательных напряжений на опасной площадке с нормалью v ; $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \cos \alpha_3$ – направляющие косинусы нормали v опасной площадки; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы, которые образуют нормаль v с направлениями главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, зависящие от свойств материала и оказывающие сопротивление нормальным и касательным напряжениям.

В соответствии с критерием Боткина–Миролюбова, максимальное эквивалентное напряжение цикла оценивается выражением

$$\sigma_{\text{экв max}} = 3(1 - \chi)\sigma_{\text{cp}} + \frac{1}{2}(1 + \chi)\sigma_i. \quad (10)$$

Здесь σ_{cp} – среднее напряжение, определяемое выражением

$$\sigma_{\text{cp}} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

Согласно первой теории прочности максимальное эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{экв max}} = \sigma_1. \quad (11)$$

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

Апробация предложенной методики осуществлялась с использованием экспериментальных данных, приведенных в работе [8]. Обработывались заготовки из титанового сплава Ti-6Al-4V (BT-6). На основании данных работы [9] предел текучести материала обрабатываемой заготовки σ_s оценивается зависимостью: $\sigma_s = 900 \times \exp(0,0618 \times (1700 - \Theta))$. В качестве инструментального материала использовались режущие пластины CNGA 120408S1020 KD120 (КНБ) со следующими геометрическими характеристиками: $\varphi = 60^\circ, \alpha = 5^\circ, \gamma = 5^\circ$. Механические параметры материала режущей пластины характеризуются следующими величинами [10]: $\sigma_{\text{и}} = 1000$ МПа, $\sigma_B = 700$ МПа, $\sigma_{-B} = 6500$ МПа. Режимы обработки заготовки приведены в табл. 1.



Таблица 1

Режимы обработки

Номер эксперимента	Режимы обработки		
	v , м/мин	s , мм/об	t , мм
1	280	0,25	0,5
2	280	0,25	0,1
3	280	0,05	0,5
4	180	0,25	0,5

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

Из данных табл. 2 видно, что колебания значений температур на передней и задней поверхностях режущей части инструмента при измене-

нии силы резания от P_{max} до P_{min} не превышают 1,5 %. 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 $\Theta_{п}, \Theta_з$.

В табл. 3 приведены значения P_{max}, P_{min} , а также $\sigma_{экр.мах}, \sigma_{мах\Sigma}$ с учетом принятых критериев прочности.

В табл. 4 совместно приведены экспериментальные значения и значения стойкости T режущей части инструмента, рассчитанные с учетом разных критериев прочности, а также относительная ошибка ϵ между ними.

Проведя анализ полученных данных, можно сделать следующие выводы о применимости рассмотренных критериев прочности для оценки

Таблица 2

Расчетные значения температур в зоне резания

Номер эксперимента	Температура на передней поверхности режущей части инструмента $\Theta_{п}$, °С		Температура на задней поверхности режущей части инструмента $\Theta_з$, °С		Средняя температура в зоне резания, $\Theta_{з.р}$, °С	Напряжение $\sigma_{\Theta_{max}}$, МПа
	$\Theta_{п.мах}$	$\Theta_{п.мин}$	$\Theta_{з.мах}$	$\Theta_{з.мин}$		
1	950	937	268	265	743	852
2	592	578	292	288	442	825
3	714	702	574	570	679	787
4	834	823	393	390	653	584

Таблица 3

Учет критериев прочности

Номер эксперимента	1	2	3	4	
P_{max} , кН	869	1632	1570	543	
P_{min} , кН	595	1170	953	341	
Критерий Писаренко–Лебедева	$\sigma_{экр.мах}$, МПа	671	613	554	421
	$\sigma_{мах\Sigma}$, МПа	1523	1438	1341	1005
Натуральный критерий прочности	$\sigma_{экр.мах}$, МПа	620	557	505	370
	$\sigma_{мах\Sigma}$, МПа	1472	1382	1292	954
Критерий наибольших нормальных напряжений	$\sigma_{экр.мах}$, МПа	584	549	473	364
	$\sigma_{мах\Sigma}$, МПа	1437	1374	1260	948
Критерий Боткина–Миролюбова	$\sigma_{экр.мах}$, МПа	656	683	476	450
	$\sigma_{мах\Sigma}$, МПа	1507	1508	1263	1034

Экспериментальные и рассчитанные значения стойкости T режущей части инструмента

Номер эксперимента	$T_{\text{эсп}}, \text{ мин}$	$T_{\text{расч}}, \text{ мин}$		$T_{\text{расч}}, \text{ мин}$		$T_{\text{расч}}, \text{ мин}$		$T_{\text{расч}}, \text{ мин}$	
		ϵ	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ	ϵ
		Критерий Писаренко–Лебедева (КПЛ)		Натуральный критерий прочности (НКП)		Критерий Боткина–Миролюбова		Критерий наибольших нормальных напряжений	
1	0,7	0,6	0,142	0,736	–0,05	0,642	0,082	0,9	–0,285
2	1	0,93	0,07	1,15	–0,15	0,7	0,3	1,22	–0,22
3	2,5	2,24	0,104	2,8	–0,12	3,2	–0,2	3,25	–0,3
4	1	0,87	0,13	1,16	–0,16	0,73	0,27	1,31	–0,31
Среднее значение ϵ			0,115		–0,12		0,21		–0,28
Среднеквадратическое отклонение σ_{ϵ}			0,031		0,049		0,25		0,63

максимального эквивалентного напряжения цикла нагружения режущей части инструмента. Теория максимальных нормальных напряжений и критерий прочности Боткина–Миролюбова не применимы для данного инструментального материала, так как описывают результаты экспериментов [11] с погрешностью 1...32 %. Согласно [11] для оценки максимального эквивалентного напряжения целесообразно использовать критерий Писаренко–Лебедева, который позволяет оценивать прочность инструментального материала с погрешностью, не превышающей 13%. Натуральный критерий прочности также хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работах [6 и 7].

В обоих случаях при использовании критерия Писаренко–Лебедева и натурального критерия прочности колебания относительной ошибки ϵ незначительны и по своим значениям близки друг другу: $\sigma_{\epsilon\text{КПЛ}} = 0,031$; $\sigma_{\epsilon\text{НКП}} = 0,049$. Абсолютные значения относительной ошибки также близки друг другу. Данные критерии позволяют получать верхнюю (КПЛ) и нижнюю оценки (НКП) стойкости режущего инструмента из КНБ при обработке титановых сплавов. Полученные оценки стойкости в целом достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными и характеризуются устойчивостью по показателю среднеквадратического отклонения, что говорит о возможности использования предложенного подхода оценки усталостной стойкости режущего инструмента при разработке технологических процессов механической обработки и выборе режущего инструмента.

Список литературы

1. *Лоладзе Т.Н.* Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
2. *Ибатуллин И.Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2008. – 387 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. *Троценко В.Т., Сосновский Л.А.* Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Т. 1. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 346 с.
6. *Цыбулько А.Е., Романенко Е.А., Козлов П.Н.* Оценка прочности конструкций по натуральному критерию предельного состояния материалов // Вестник машиностроения. – 2007. – № 7. – С. 10–12.
7. *Цыбулько А.Е., Козлов П.Н.* Теория прочности широкого класса изотропных материалов при сложном напряженном состоянии // Вестник машиностроения. – 2005. – № 12. – С. 21–24.
8. *Y. Burhanuddin, C.H. Che Haron, J.A. Ghani, A. K. Ariffin, G.A. Ibrahim, A. Yasir and N.H. El-Maghribi.* The Effects of CBN Cutting Tool Grades on the Tool Life and Wear Mechanism When Dry Turning of Titanium Alloy//Asian International Journal of Science



and Technology in Production and Manufacturing. – 2008. – Vol. 1, No.2. – P. 105–110.

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

10. *Петруша И.А., Смирнова Т.И., Осипов А.С., Стратийчук Д.А., Шишонок Н.А.* Твердость и прочность высокочистых поликристаллических мате-

риалов кубического нитрида бора// Актуальные проблемы физики твердого тела. Междунар. науч. конф. «ФТТ–2005», Минск, 26 - 28 октября 2005 г.: Сб. докл. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. Т. 1. – С. 484 – 486.

11. *Лошак М.Г.* Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев.: Наукова думка, 1984. – 328 с.

About using of criteria of toughness for an estimation tool life of the cutting tool with CNB at turning of titanic alloys

D.Tc. Simsive

The paper proposes a method of estimating the life of the tool, equipped with cubic boron nitride (CBN), in turning titanium alloy by fatigue failure of its cutting part. The results of the calculation of life of the tool in comparison with the results of experimental studies published in the press.

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