

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ИНСТРУМЕНТА

Е.Г. Тивирев

e_tivirev.bmstu@mail.ru

К.Б. Даниленко

ctahok@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены понятия эксплуатационного и технического ресурсов. Выявлены рациональный режим обработки, соответствующий максимальной выработке за период стойкости и минимальному износу инструмента, и некоторые факторы, влияющие на выбор режимов резания, которые ранее не учитывались. Рассмотрены примеры режимов резания и их область применения, исходя из графика зависимости стойкости и наработки от скорости резания. Показаны примеры аппроксимации стойкостных зависимостей и пределы, в которых степенные уравнения могут точно описать экспериментальные данные. Приведены данные, позволяющие рассчитать оптимальные режимы резания при сохранении критерия требуемой надежности режущего инструмента

Ключевые слова

Режущий инструмент, стойкость, наработка, режимы резания

Поступила в редакцию 26.12.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. В предлагаемой работе используется понятие «эксплуатационный ресурс» режущего инструмента, т. е. наработка режущего инструмента до отказа, что с учетом восстанавливаемости является составной частью технического ресурса [1]. Нарботка до отказа в соответствии с [2] может быть оценена разными показателями. Наиболее часто в резании металлов используется временная наработка — период стойкости (далее стойкость инструмента T). Стойкость (T) — это время работы инструмента до затупления, т. е. до того момента, когда износ инструмента достигает установленного критерия затупления. Рекомендуемые значения критерия затупления и стойкости для данных условий приводятся в нормативных документах [3]. Значения стойкости традиционно принято выражать в минутах машинного времени, хотя минута и не является единицей системы СИ.

Используются другие показатели наработки, в отличие от стойкости наработка характеризуется не временем, а количеством конкретной работы, выполненной за период стойкости, например длиной пути резания L , площадью обработанной поверхности A , количеством обработанных заготовок и др. Рассмотрим более подробно два вида меры оценки эксплуатационного ресурса инструмента.

Стойкость и другие виды наработки.

Необходимо отметить, что зависимости стойкости от скорости резания $T = f(v)$ в широком диапазоне скоростей резания, включающем весьма низкие скорости, чаще всего имеют вид экстремальных кривых с максимумом в области малых скоростей резания (рисунок) [4].

Образование максимума на кривых стойкости объясняется, прежде всего, образованием нароста на режущем лезвии при работе на определенных скоростях [5, 6].

Если стойкостные зависимости $T = f(v)$ носят сложный экстремальный характер, то скорости резания, где на кривых $T = f(v)$ имеется максимум, считаются оптимальными, рекомендуются и используются при обработке инструментами [7], имеющими ограничения скорости резания, обусловленные технологическими показателями и эксплуатационными требованиями (последние приведены далее).

Однако стойкость, выраженная в минутах машинного времени, не является достаточно полным показателем работоспособности инструмента, поскольку снижение режимов обработки приводит к увеличению стойкости инструмента, в то время как суммарная работа, выполненная инструментом за период стойкости, может сокращаться. Поэтому работу, выполненную инструментом, можно характеризовать наработкой, выраженной в количестве обработанных деталей, числом просверленных отверстий, площадью обработанной поверхности и т. п. [8]. Показатели наработки характеризуются зависимостями, в состав которых входит выражение vT , т. е. произведение стойкости на скорость. Так, например, объем металла Q , снятого с обрабатываемой детали при точении, можно подсчитать по формуле

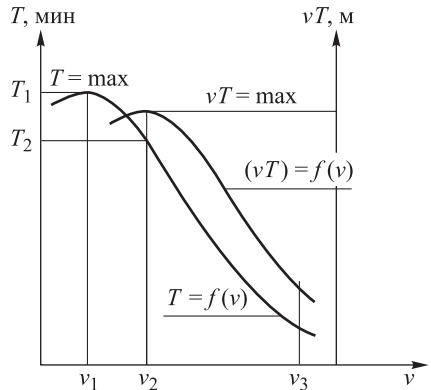
$$Q = \frac{1000st(D-t)}{D} vT,$$

где s — подача; t — глубина резания; D — диаметр заготовки; v — скорость резания; T — стойкость инструмента.

Площадь A обрабатываемой поверхности при резании со скоростью V , переменной за время резания подачей s , глубиной резания $t = \text{const}$ и стойкостью T можно подсчитать по расчетной формуле $A = 10^{-3}vTs$.

При резании со скоростью v , переменными подачей s и глубиной резания t можно подсчитать объем Q или массу m_p металла, срезанного с заготовки за время стойкости T , как

$$Q = 10^{-6}vTst; \quad m_p = 10^{-6}\rho vTst,$$



Зависимость стойкости и наработки от скорости резания

где ρ — плотность обрабатываемого металла, а общую условную длину отверстия, обработанного осевыми инструментами, — по формуле

$$L = \frac{1000s_0}{\pi D} vT,$$

где s_0 — подача на оборот; T — период стойкости; D — диаметр обработки.

Путевая наработка, или произведение $L = vT$, определяет длину пути, пройденного режущим лезвием при относительном движении с обрабатываемой деталью, и поэтому пройденный инструментом путь следует считать наиболее информативным показателем и точной характеристикой работы инструмента по сравнению со временем его работы. Показатели, характеризующие наработку инструмента, были введены в ГОСТ 25751–83.

Математический анализ взаимосвязи наработки и стойкости. На рис. 1 показана зависимость наработки от скорости резания $vT = f(v)$, которая также является экстремальной. Следует иметь в виду, что скорость резания v_2 , обеспечивающая получение максимальной наработки за период стойкости, не совпадает со скоростью резания v_1 , которая обеспечивает максимальную стойкость. Это положение легко подтверждается аналитически, т. е. дифференцирование в частных производных позволяет показать, что экстремумы кривых стойкости $T = f_1(v)$ и наработки $vT = f_2(v)$ не совпадают.

Если дифференцировать функцию $vT = f_2(v)$ по v , учитывая, что $T = f_1(v)$, получаем

$$\frac{d(vT)}{dv} = \frac{\partial(vT)}{\partial v} \frac{dT}{dv} + \frac{\partial(vT)}{\partial v} \frac{dv}{dv} = \frac{dT}{dv} v + T.$$

Экстремум функции $vT = f_2(v)$ достигается при скорости v_2 , когда производная равна нулю:

$$\frac{dT}{dv} v + T = 0, \text{ откуда } \frac{dT}{dv} = -\frac{T}{v}.$$

Таким образом, функция $T = f_1(v)$ при скорости v_2 будет иметь отрицательную производную, а это значит, что максимальная стойкость будет достигнута при какой-то меньшей скорости резания v_1 . Поэтому для получения максимальной эффективности от применения данного инструмента выгоднее работать с более высокими скоростями по сравнению с теми, которые обеспечивают максимальную стойкость по времени его работы. Обработка экспериментальных кривых в координатах (путевая наработка от скорости резания) $[vT - v]$ позволяет выявить рациональные режимы обработки, которым соответствует максимальная выработка за период стойкости и минимальная потребность в инструменте.

Однако в нормативах режимов резания старого образца для создания таблиц использовались математические модели на основе степенной зависимости [4]:

$$T = \frac{C_T}{v^{1/m}} \text{ или } v = \frac{C_v}{T^m}, \quad (1)$$

что является справедливым только для диапазона средних и высоких скоростей резания ($v > v_2$).

Принцип выбора режимов резания. Для анализа принципов выбора режимов резания в широком диапазоне скоростей резания были проведены специальные исследования. В результате исследований выявлено, что выбор режима резания будет также зависеть от некоторых факторов, которые ранее практически не учитывались, например:

- тип производства (единичное, серийное, массовое и т. п.);
- критерий оптимизации режима резания (производительность, расход инструмента, его надежность и др.);
- тип используемого оборудования (универсальные станки, станки с ЧПУ, агрегатные станки автоматических линий и др.);
- степень автоматизации смены и переточки инструмента.

Все факторы, влияющие на выбор режима резания, в конечном счете определяют степень интенсивности режимов. Допустимо в первом приближении считать, что эту интенсивность можно характеризовать так: умеренные режимы (наиболее низкие), нормальные (средние) и форсированные (повышенные).

Следует подчеркнуть, что для каждого вида режущего инструмента значения скоростей резания, характеризующие тот или иной вид режима, могут отличаться.

Умеренные режимы резания в диапазоне значений ($v > v_2$) обычно характеризуют максимумы зависимости стойкости и наработки от скорости резания. Такие режимы используются, когда необходимо получить максимальную наработку и надежность, наименьший расход и затраты по инструменту, или когда операция при работе этим инструментом не является лимитирующей. Обычно на таких режимах работают агрегатные станки автоматических линий в массовом производстве. Работа на умеренных режимах характеризуется периодами стойкости, в несколько раз (иногда до 10–20 раз) превышающими нормативные значения стойкости.

Нормальные режимы резания (в диапазоне v_2-v_3) обычно используются в единичном и серийном производствах при работе на универсальных станках.

Форсированные режимы резания ($v > v_3$) используются в тех случаях, когда данная операция лимитирует производительность, при работе на дорогом автоматизированном оборудовании с автоматической сменой изношенного инструмента, использовании инструмента высокого качества и т. д.

Изучение стойкостных зависимостей. Ввиду сложного характера стойкостных зависимостей потребовалось внести изменения в подходы к выбору характеризующих их математических моделей. Для того чтобы наиболее полно использовать положительный опыт, накопленный в теории резания металлов и нашедший применение в разработке существующей нормативной документа-

ции по режимам резания, необходимо сохранить степенные уравнения (1) для аппроксимации по ним обобщенных результатов экспериментальных исследований. Однако во всех случаях необходимо указывать пределы, в которых степенные уравнения могут достаточно точно описать экспериментально найденные зависимости.

Во всех остальных случаях стойкостные зависимости могут аппроксимироваться по эмпирическому показательно-степенному уравнению вида $y = ax^b e^{cx}$ [4, 9], т. е. $T = av^b e^{Cv}$, где e — основание натурального логарифма. Это эмпирическое уравнение может описать практически все закономерности, встречающиеся в резании.

Широкое использование автоматизированного производства и безлюдных технологий поставило вопрос о выборе режимов резания с учетом надежности инструмента, в частности, с учетом необходимости использования так называемого установленного периода стойкости или установленной наработки, которые характеризуют величину параметра, в течение которого инструмент не достигнет отказа с установленной вероятностью γ . На практике вместо установленной стойкости чаще используют гамма-процентный период стойкости с заданной вероятностью безотказной работы $\gamma = 90$ или 95 %.

В большинстве случаев распределение стойкости стандартных инструментов подчиняется закону, близкому к закону нормального распределения, а коэффициент вариации стойкости при нормальных условиях эксплуатации не превышает $var < 0,35$.

При нормативной стойкости гамма-процентный период стойкости инструмента можно подсчитать по формуле $T_\gamma = T_{\text{норм}}(1 + U_\gamma var)$, где U_γ — квантиль нормального распределения, характеризующий заданный уровень вероятности γ (по ГОСТ Р 50779.21–2004) [10].

Если скорость резания выбирается по нормативам в диапазоне, где справедлива стойкостная зависимость вида (1), то для получения нормативной стойкости с заданной вероятностью γ необходимо работать с пониженной скоростью $v_\gamma = v_{\text{норм}} k_\gamma$, где $k_\gamma = (T_\gamma / T_{\text{норм}})^m$.

Представленные данные позволяют выбрать оптимальные режимы резания также с учетом требуемой надежности работы режущего инструмента.

Необходимые параметры режима резания выбираются по существующим нормативам режимов резания, которые предполагают получение нормативной (экономической) стойкости инструмента (практически всегда выбранные по нормативам режимы лежат в диапазоне «нормальных» режимов); на основе экспертной оценки заданных условий операции самим технологом.

Диапазон умеренных режимов резания, где возможно получения «горбов» на кривых зависимостей $T = f(v)$, в настоящее время используется не очень часто и поэтому в первом приближении принято считать, что чем больше скорость резания, тем больше производительность, однако тем ниже стойкость инструмента и, следовательно, больше его расход.

Для установления приемлемости выбранного режима резания обычно используются два критерия: соответствие получаемых при работе на данном режиме заданной нормы выработки и допустимого расхода инструмента — это справедливо для черновой обработки. Для чистовой и отделочной обработки важнейшими критериями являются точность и качество обработанной поверхности.

Норма выработки (сменная выработка) определяется по формулам [11, 12]:

$$N_{\text{см}} = \frac{T_{\text{см}}}{t_{\text{шт}}};$$

$$t_{\text{шт}} = t_o + \sum t_b;$$

$$t_o = \frac{\pi l_o D}{1000 v s_o},$$

где $N_{\text{см}}$ — сменная выработка; $T_{\text{см}}$ — продолжительность смены; $t_{\text{шт}}$ — штучное время на операцию; t_o — основное технологическое (машинное) время; $\sum t_b$ — сумма вспомогательных времен на одну операцию; l_o — длина обрабатываемой поверхности.

Сменный расход инструмента $n_{\text{и}}$ определяется по формуле

$$n_{\text{и}} = \frac{N_{\text{см}} t_o}{T(i+1)},$$

где i — число возможных переточек.

Таким образом, для получения заданной нормы выработки $N_{\text{см}}$ анализируемая операция должна выполняться на режимах, соответствующих зависимости

$$(v s_o) > \frac{\pi N_{\text{см}} l_o D}{(T_{\text{см}} - N_{\text{см}} \sum t_b) \cdot 10^3}.$$

Чтобы не превысить заданный сменный расход инструмента $n_{\text{и}}$ при выполнении данной операции, необходимо работать при

$$(v s_o) \leq \frac{\pi N_{\text{см}} l_o D}{n_{\text{и}} T(i+1) \cdot 10^3}.$$

В том случае, если норма сменной выработки или ограничения по расходу инструмента не устанавливаются, режимы резания рекомендуется выбирать по существующим нормативам [13, 14], что позволяет в первом приближении получить минимальную себестоимость технологической операции.

Заключение. Выявлено, что показатель наработки vT входит в расчетные зависимости других видов обработки инструментов. Аналитическим путем, а именно дифференцированием зависимости наработки от скорости резания $vT = f(v)$ в частных производных показано, что экстремумы кривых стойкости и наработки не совпадают. Это означает, что существуют разные диапазоны скоростей: умеренные, нормальные, форсированные. Все виды режимов имеют свою область применения, а также свои граничные условия, и следует учиты-

вать все факторы, которые влияют на стойкость, наработку и критерий надежности режущего инструмента, т. е. установлены диапазоны режимов резания в рамках стойкостных зависимостей. Предложены зависимости для определения параметра режущего инструмента при достижении заданной нормы сменной выработки и расчета сменного расхода инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25751–83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий. М.: Изд-во стандартов, 1984. 27 с.
2. ГОСТ 25.002–83. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1983. 30 с.
3. *Общемашиностроительные* нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. В 2 ч. Часть 2. Нормативы режимов резания. М.: Экономика, 1990. 473 с.
4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
5. Грановский Г.И., Панченко К.П. Фасонные резцы. М.: Машиностроение, 1975. 309 с.
6. Древаль А.Е., Лужанский М.С. Наростообразование и работоспособность режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 12. С. 3–7.
7. Даниленко Б.Д., Древаль А.Е., Жилис В.И. Выбор режимов резания при сверлении // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1989. № 535. С. 30–34.
8. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 343 с.
9. Панченко К.П., Даниленко Б.Д. Анализ причин экстремальности стойкостных зависимостей при резании // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 1. С. 79–82.
10. ГОСТ Р 50779.21–2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. М.: Изд-во стандартов, 2004. 43 с.
11. Косилова А.Г., Меццяков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.
12. Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. Выбор режимов резания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 52 с.
13. Локтев А.Д., Гуцен И.Ф., Батуев В.А. *Общестроительные* нормативы режимов резания. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
14. Малова А.Н. Справочник металлиста. В 5 т. Т. 3. М.: Машиностроение, 1977. 752 с.

Тивирев Евгений Геннадьевич — инженер-аналитик информационно-аналитического отдела МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Даниленко Константин Борисович — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тивирев Е.Г., Даниленко К.Б. Критерии оценки эксплуатационного ресурса инструмента // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 112–120.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-112-120

ESTIMATION CRITERIA FOR TOOL OPERATING LIFE

E.G. Tivirev

e_tivirev.bmstu@mail.ru

K.B. Danilenko

ctahok@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article gives the concepts of operational and technical resources and identifies a rational operating mode corresponding to the maximum production during the period of resistance and minimum wear of the tool, as well as some factors influencing the choice of cutting parameters that were not previously taken into account. We study examples of cutting parameters and their application making use of the graph of dependence of the resistance and the operating age on the cutting speed. Moreover, we show examples of approximations of the stability relations and the limits in which the power equations can accurately describe the experimental data. Finally, we give the data allowing to calculate optimal cutting parameters while maintaining the criterion of the required reliability of the cutting tool

Keywords

Cutting tools, durability, operating age, cutting parameters

REFERENCES

- [1] GOST 25751–83. Instrumenty rezhushchie. Terminy i opredeleniya obshchikh ponyatiy [State standard 25751–83. Cutting tools. General terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1983. 24 p.
- [2] GOST 25.002–83. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [State standard 25.002–83. Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1983. 30 p.
- [3] Obshchemashinostroitel'nye normativy vremeni i rezhimov rezaniya dlya normirovaniya rabot, vypolnyaemykh na universal'nykh i mnogotselevykh stankakh s chislovyim programmym upravleniem. V 2 chastyakh. Chast' 2. Normativy rezhimov rezaniya [General machine-building standards of time and cutting mode for standardization of working on universal and multifunction NC machines. In 2 vol. Vol. 2. Cutting mode standards]. Moscow, Ekonomika Publ., 1990. 473 p.
- [4] Granovskiy G.I., Granovskiy V.G. Rezanie metallov [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p.
- [5] Granovskiy G.I., Panchenko K.P. Fasonnye reztsy [Forming tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 309 p.

- [6] Dreval' A.E., Luzhanskiy M.S. Build-up formation and cutting tool workability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 12, pp. 3–7 (in Russ.).
- [7] Danilenko B.D., Dreval' A.E., Zhilis V.I. Vybor rezhimov rezaniya pri sverlenii [Cutting mode selection in process of drilling]. *Trudy MGTU im. N.E. Baumana* [Proc. of the Bauman MSTU], 1989, no. 535, pp. 30–34 (in Russ.).
- [8] Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov [Fundamentals of the metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 343 p.
- [9] Panchenko K.P., Danilenko B.D. Analysis of the origin of wear dependence extremality in cutting process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2006, no. 1, pp. 79–82 (in Russ.).
- [10] GOST R 50779.21–2004. Statisticheskie metody. Pravila opredeleniya i metody rascheta statisticheskikh kharakteristik po vyborochnym dannym [State standard R 50779.21–2004. Statistical methods. Determination rules and methods for calculation of statistical characteristics based on sample data]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2004. 43 p.
- [11] Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. V 2 t. T. 2 [Handbook of metalworker-technologist. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 496 p.
- [12] Danilenko B.D., Zubkov N.N. Vybor rezhimov rezaniya [Cutting mode selection]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 52 p.
- [13] Loktev A.D., Gushchen I.F., Batuev V.A. Obshchestroitel'nye normativy rezhimov rezaniya [General construction standards for cutting modes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 640 p.
- [14] Malova A.N. Spravochnik metallista. V 5 t. T. 3 [Handbook of metalworker. In 5 vol. Vol. 3]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 752 p.

Tivirev E.G. — analytical engineer of Information-Analytical Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Danilenko K.B. — Assist. Professor of Applied Mechanics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Tivirev E.G., Danilenko K.B. Estimation Criteria for Tool Operating Life. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 4, pp. 112–120. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-112-120