

УДК 621.9: 658.5

Т. Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГАРАНТИРОВАННОГО УРОВНЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Представлены результаты оптимизации по критериям производительности и себестоимости режимов резания, обеспечивающих заданный уровень безотказности режущего инструмента. Расчеты выполнены с учетом закона Вейбулла распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины. Основными показателями безотказности являются средний период стойкости и период стойкости с заданной вероятностью (гамма-процентный период стойкости). Установлены необходимые для обеспечения заданного уровня безотказности коэффициенты изменения режимов резания.

Ключевые слова: режущий инструмент, стойкость, коэффициент вариации, производительность, себестоимость.

T.G. Ivchenko

PROVIDING OF THE ASSURED LEVEL OF RELIABILITY OF THE CUTTING TOOL DURING OPTIMIZATION OF THE CUTTING REGIMES

There are presented the results of optimization on the productivity and prime price criteria of the cutting regimes, providing the set level of cutting tool reliability. Calculations are executed taking into account the Weibull distributing law of the cutting tool life as casual value. The basic reliability measures are mean period of the cutting tool life and period of the cutting tool life with the set probability (gamma-percent period of the cutting tool life). There are set the necessary for providing of the set level of reliability the coefficient of the cutting regimes change.

Keywords: cutting tool, cutting tool life, coefficient of variation, productivity, prime price.

1. Введение

Повышение производительности и снижение себестоимости изготовления продукции являются актуальной задачей машиностроительного производства. Наиболее эффективно она решается на основе оптимизации режимов резания по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости в различных условиях обработки [1]. Основные методы решения задач оптимизации основаны на рассмотрении параметров процесса резания как детерминированных величин и замене случайных параметров их средними значениями [2].

Современные автоматизированные технологические системы предъявляют также и повышенные требования к надежности режущих инструментов, причем весьма важным является гарантированное обеспечение показателей надежности их функционирования, так как случайные отказы приводят к внеплановым простоям дорогостоящего оборудования и значительному увеличению затрат на его обслуживание [3].

В настоящее время обоснованы представления о стойкости режущих инструментов как случайной величины и предложены методы учета законов ее распределения при оптимизации режимов резания [4, 5]. Однако вопросы обеспечения гарантированного уровня безотказности режущего инструмента при оптимизации режимов резания практически не рассматриваются и требуют дальнейшего развития.

Цель работы – совершенствование методики оптимизации режимов резания с учетом закона распределения стойкости инструмента как случайной величины по критериям производительности и себестоимости с обеспечением гарантированного уровня

безотказности режущего инструмента.

2. Основное содержание и результаты работы

При анализе стойкости режущего инструмента как случайной величины наиболее распространен закон Вейбулла [3], для которого интегральная $P(t)$ и дифференциальная $f(t)$ функции распределения:

$$P(t) = e^{-(t/a)^b}, \quad f(t) = (b/a)(t/a)^{b-1} e^{-(t/a)^b}, \quad (1)$$

где a, b - параметры масштаба и формы закона распределения. Параметр масштаба a определяется средним периодом стойкости T_C в зависимости от параметра b :

$$a = T_C / \Gamma(1 + 1/b), \quad (2)$$

где $\Gamma(1 + 1/b)$ - гамма-функция.

Параметр b взаимосвязан с коэффициентом вариации стойкости V_T :

$$V_T = \sqrt{[\Gamma(1 + 2/b) - \Gamma^2(1 + 1/b)]} / \Gamma(1 + 1/b); \quad b(V_T) = \exp(-1,092 \ln V_T). \quad (3)$$

В настоящей работе в качестве показателей безотказности режущего инструмента рассматриваются средний период стойкости T_C и гамма-процентный период стойкости T_γ - время резания, в течение которого инструмент не достигает отказа с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах [1]:

$$T_C = a\Gamma(1 + 1/b); \quad T_\gamma = a(-\ln(\gamma/100))^{1/b}; \quad \gamma = 100 \exp\left[-\left((T_\gamma/T_C) \cdot \Gamma(1 + 1/b)\right)^b\right] \quad (5)$$

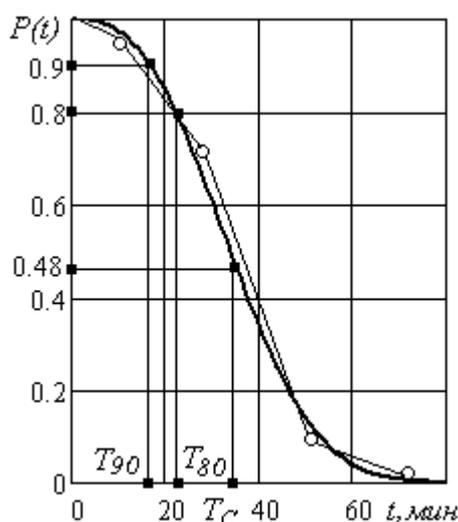


Рисунок 1. Графики экспериментальной и теоретической функций распределения $P(t)$ стойкости режущего инструмента

По результатам производственных экспериментальных исследований выполнен анализ закона распределения стойкости сборных резцов с механическим креплением квадратных пластин Т5К10 в следующих условиях эксплуатации: обрабатываемый материал - сталь 45 (НВ163...207); скорость резания $V = 95$ м/мин, подача $S = 0,7$ мм/об, глубина резания $t_p = 1,8$ мм.

Графики экспериментальной и теоретической функций распределения стойкости режущего инструмента представлены на рис.1.

В результате экспериментов установлены средний период стойкости $T_C = 35$ мин; коэффициент вариации стойкости $V_T = 0,4$. Проверка по критерию Фишера подтверждает адекватность закона Вейбулла распределения стойкости режущего инструмента в указанных условиях (параметры закона Вейбулла: $b = 2,7$; $a = 39$).

В результате анализа установлено, что средний период стойкости для заданных условий

обработки может быть гарантирован с вероятностью $P(T_C) = 0,48$ (рис. 1).

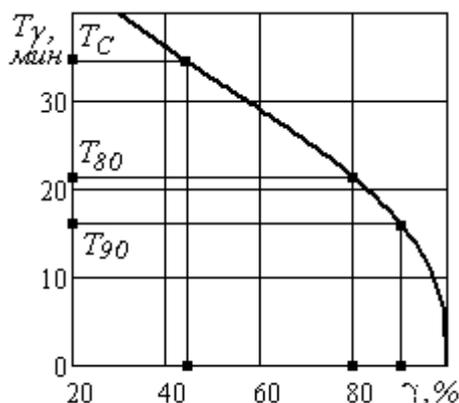


Рисунок 2. График зависимости гамма-процентного периода стойкости T_γ инструмента от гамма-процента γ

Для обеспечения более высокого гарантированного уровня безотказности режущего инструмента – вероятности безотказной работы $P(t) = 0,8$ (гамма-процент $\gamma = 80\%$) гамма - процентный период стойкости инструмента должен быть равен $T_{80} = 22$ мин. Для заданного уровня вероятности $P(t) = 0,9$ (гамма-процент $\gamma = 90\%$) период стойкости $T_{90} = 17$ мин. График зависимости гамма - процентного периода стойкости T_γ от гамма - процента γ , представленный на рис. 2, свидетельствует о том, что для повышения уровня безотказности режущего инструмента необходимо существенно понижать его стойкость.

Коэффициент, характеризующий соотношение гамма - процентного периода стойкости режущего инструмента T_γ со средним периодом стойкости T_C , может быть рассчитан по формуле:

$$K_\gamma = T_\gamma / T_C = [-\ln(\gamma/100)]^{1/b} / \Gamma(1+1/b). \quad (6)$$

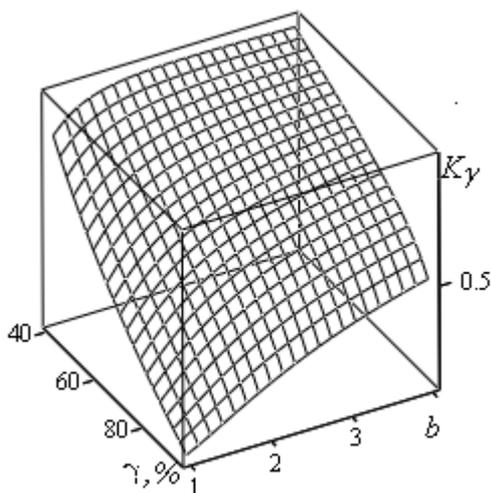


Рисунок 3. График двухпараметрической зависимости коэффициента K_γ от гамма-процента γ и параметра закона Вейбулла b

Общие закономерности изменения коэффициента K_γ в зависимости от гамма-процента γ и параметра закона Вейбулла b представлены на рис. 1. Чем выше гарантированный гамма-процентный уровень вероятности безотказной работы инструмента, тем ниже гамма-процентный период стойкости T_γ , а, следовательно, и коэффициент K_γ . Гамма-процентный период стойкости T_γ и коэффициент K_γ возрастают с увеличением параметра закона Вейбулла b .

В представляемой работе рассматривается пример однопараметрической оптимизации скорости резания при заданных значениях глубины резания и подачи по критериям максимальной производительности K_P и минимальной себестоимости K_C . В этом случае в качестве параметра оптимизации сначала определяется стойкость инструмента, а затем по

известным зависимостям рассчитывается скорость резания.

Целевые функции, выражающие зависимость критериев K_P и K_C от параметра оптимизации T выражаются следующим образом:

$$K_P(T) = (aT^m + at_c T^{m-1})^{-1}; \quad K_C(T) = a(T^m + (t_c + A'/A)T^{m-1}), \quad (7)$$

где $a = \pi D L t^{x_v} S^{y_v} / 1000 C_V K_V$ – постоянный коэффициент; D - диаметр обрабатываемой поверхности; L – длина обработки; V – скорость резания; S – подача; C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, которые характеризуют степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания V , определяемые в зависимости от условий эксплуатации; A – стоимость станко-минуты; A' – стоимость инструмента, приведенная к одному периоду стойкости.

Оптимальные периоды стойкости с учетом случайного характера ее распределения по критериям производительности T_{oP} и себестоимости T_{oC} [5]:

$$T_{oP}(V_T) = \mu_P(V_T)(1/m - 1)t_{\bar{n}}; T_{oC}(V_T) = \mu_C(V_T)(1/m - 1)(t_{\bar{n}} + A'/A), \quad (8).$$

где $\mu_P(V_T), \mu_C(V_T)$ – поправочные коэффициенты на оптимальные периоды стойкости по критериям производительности и себестоимости соответственно, учитывающие случайный характер распределения стойкости и коэффициент ее вариации V_T .

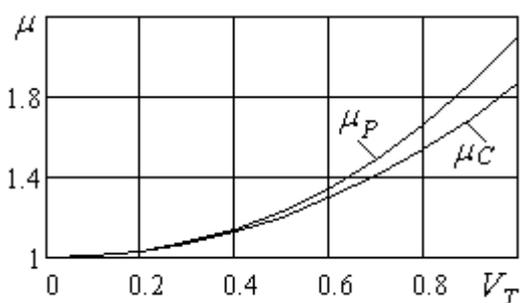


Рисунок 4. Графики зависимости поправочного коэффициента на оптимальный период стойкости μ от коэффициента ее вариации V_T

Поправочные коэффициенты $\mu_P(V_T)$ и $\mu_C(V_T)$ могут быть определены с использованием графика, представленного на рис. 4 [5]. При значении коэффициента вариации $V = 0$ рассеивание отсутствует и $\mu_P(V_T) = \mu_C(V_T) = 1$. При коэффициенте вариации $V < 0,3$ степень его влияния на оптимальный период стойкости весьма незначительна, и его можно пренебречь.

Существенное влияние на оптимальный период стойкости коэффициент вариации имеет при $V_T > 0,4$. В этом случае возможная ошибка в оценке оптимального периода стойкости может достигать 80%, что

свидетельствует о необходимости учета случайного характера критерия и параметра оптимизации. Для приближенной оценки оптимального периода стойкости при $V_T > 0,3$ поправочные коэффициенты $\mu_P(V_T)$ и $\mu_C(V_T)$ могут быть аппроксимированы следующими зависимостями (рис. 5):

$$\mu_{Pa}(V_T) = e^{0,9(V_T - 0,3)}; \mu_{Ca}(V_T) = e^{0,8(V_T - 0,3)}. \quad (9)$$

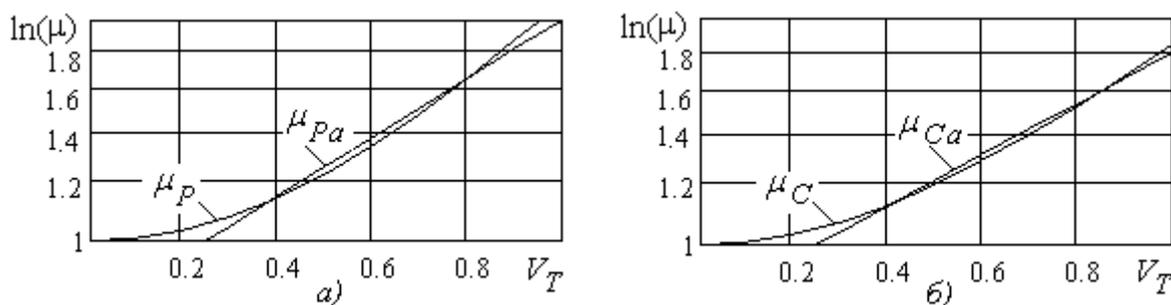


Рисунок 5. Графики зависимости поправочного коэффициента μ на оптимальные по критериям производительности – а) и себестоимости – б) периоды стойкости от коэффициента ее вариации V_T

Закономерности изменения поправочного коэффициента K_γ , учитывающего соотношение гамма-процентного периода стойкости режущего инструмента T_γ со средним (оптимальным) периодом стойкости T_C , в зависимости от коэффициента вариации стойкости представлены на рис. 6а. Коэффициенты K_γ представлены для различных значений гамма – процента: $\gamma = 90\%$ (K_{90}); $\gamma = 80\%$ (K_{80}); $\gamma = 48\%$ (K_{48}).

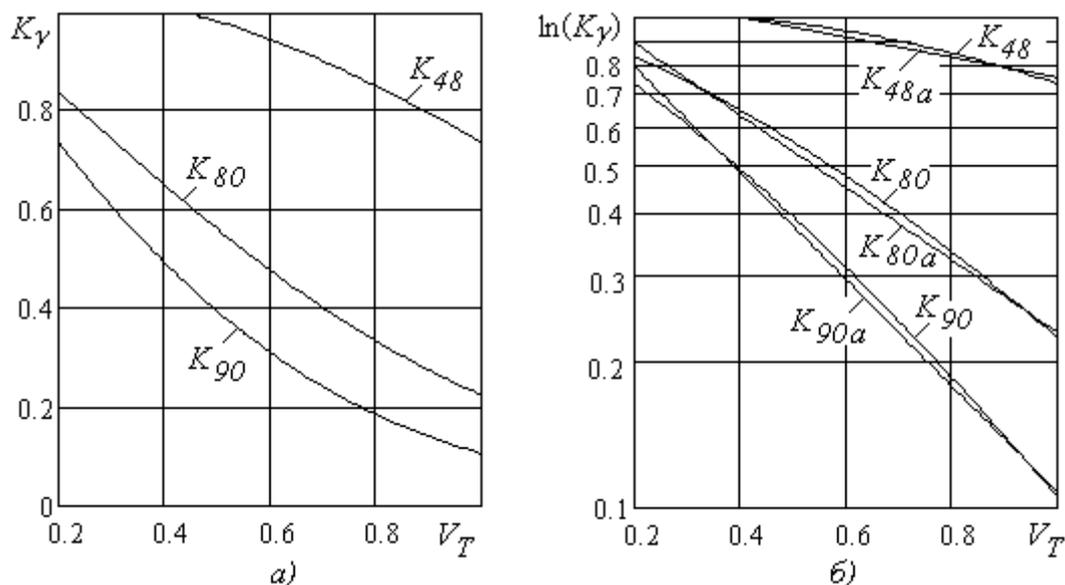


Рисунок 6. Графики зависимости поправочного коэффициента K_γ от коэффициента вариации стойкости режущего инструмента V_T

Для приближенной оценки при коэффициенте вариации стойкости режущего инструмента $V_T > 0,3$ поправочные коэффициенты $K_\gamma(V_T)$ могут быть аппроксимированы следующими зависимостями:

$$K_{90a}(V_T) = 0,62e^{-2,5(V_T-0,3)}; K_{80a}(V_T) = 0,62e^{-1,7(V_T-0,3)}; K_{48a}(V_T) = e^{-0,5(V_T-0,3)}. \quad (10)$$

Графики аппроксимированных зависимостей $\mu_{Pa}(V_T)$ и $\mu_{Ca}(V_T)$, представленных на рис. 5 в логарифмической шкале, а также $K_{90a}(V_T)$, $K_{80a}(V_T)$ и $K_{48a}(V_T)$, представленных на рис. 6б в логарифмической шкале, достаточно хорошо (погрешность не превышает 5%) совпадают с их расчетными значениями для коэффициента вариации $V_T > 0,3$.

Оптимальные скорости резания по производительности V_{oP} и по себестоимости V_{oC} с учетом коэффициента вариации стойкости инструмента V_T определяются по соответствующим оптимальным периодам стойкости T_{oP} и T_{oC} (8):

$$V_{oP}(V_T) = \frac{K_{VP} K_{V\gamma}(V_T) C_V K_V}{T_{oP}^m(V_T) S^{y_v} t_p^{x_v}}; V_{oC}(V_T) = \frac{K_{VC} K_{V\gamma}(V_T) C_V K_V}{T_{oC}^m(V_T) S^{y_v} t_p^{x_v}}, \quad (11)$$

где $K_{VP}(V_T)$, $K_{VC}(V_T)$ - поправочные коэффициенты на оптимальную по производительности и себестоимости скорость резания, учитывающие коэффициент вариации стойкости инструмента V_T , $K_{V\gamma}(V_T)$ – заданный уровень поправочный коэффициент на опти-

мальную скорость резания, учитывающий заданный уровень гамма – процента γ :

$$K_{VP}(V_T) = [\mu_P(V_T)]^{-m}; K_{VC}(V_T) = [\mu_C(V_T)]^{-m}; K_{V\gamma}(V_T) = [K_\gamma(V_T)]^m. \quad (12)$$

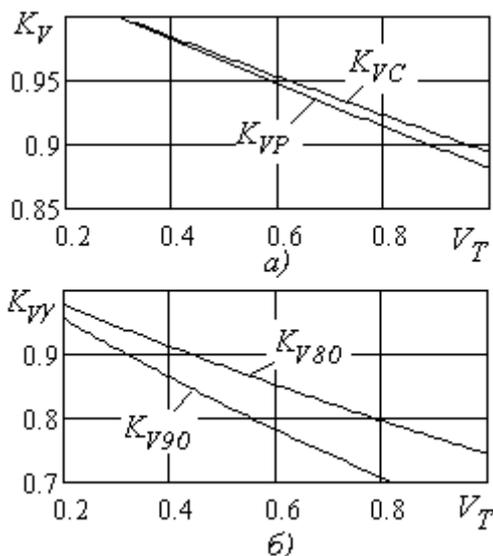


Рисунок 7. Графики зависимости поправочных коэффициентов K_{VP} , K_{VC} и $K_{V\gamma}$ на оптимальную скорость резания от коэффициента вариации стойкости инструмента V_T

На рис. 7 представлены графики указанных поправочных коэффициентов на оптимальную скорость резания K_{VP} , K_{VC} и $K_{V\gamma}$, в зависимости от коэффициента вариации стойкости инструмента V_T .

Выводы.

Усовершенствована методика оптимизации режимов резания с учетом закона распределения стойкости инструмента как случайной величины по критериям производительности и себестоимости с обеспечением гарантированного уровня безотказности режущего инструмента. Установлены необходимые для обеспечения заданного уровня безотказности коэффициенты изменения оптимальной скорости резания для различных коэффициентов вариации стойкости инструмента.

Предлагаемый метод учета коэффициента вариации при решении задачи оптимизации повышает эффективность функционирования

режущего инструмента в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640с.
2. Ивченко, Т. Г. Использование мультипликативных критериев при оптимизации режимов резания / Т. Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – № 30. – С. 325-330.
3. Ивченко, Т. Г. Определение оптимального уровня показателей качества режущего инструмента с учетом случайного характера критерия и параметров оптимизации / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – № 27. – С.97-104.
4. Ивченко, Т. Г. Прогнозирование параметров закона распределения стойкости режущего инструмента как случайной величины / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 3(54). – С. 49-54.
5. Ивченко, Т. Г. Оптимизация режимов резания с учетом случайного характера стойкости режущего инструмента / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – №4 (59). – С. 24-30.

Поступила в редколлегию 18.01.2019 г.