

УДК 621.9: 658.5

И. А. Петряева, канд. техн. наук, доцент
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

Представлены результаты оптимизации периода стойкости режущего инструмента и скорости резания по критериям максимальной производительности, минимальной себестоимости и их мультипликативной свертки. Обоснованы коэффициенты взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости и скоростями резания, рассчитанными по различным критериям оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, скорость резания, , производительность, себестоимость

I. A. Petryaeva

ONESELF-PARAMETER OPTIMIZATION OF CUTTING REGIMES ON DIFFERENT CRITERIA OF THE OPTIMIZATION

The results of the optimization of the cutting tool life of the cutting tool and cutting speed on the criteria of burst performance, minimum prime price and their multiplicative association are presented. The coefficients of inter-communication between of the cutting tool life and cutting speed expected on the different criteria of optimization are grounded.

Keywords: optimization, cutting speed, cutting tool life, productivity, prime price

1. Введение

Повышение эффективности механической обработки деталей машин является актуальной задачей современного машиностроительного производства. Наиболее успешно эта задача решается на основе оптимизации параметров процессов резания и условий эксплуатации режущего инструмента. В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы как однопараметрической, так и многопараметрической оптимизации режимов резания по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости [1].

В современных условиях производства весьма актуален учет стохастического характера процесса резания при однопараметрической оптимизации стойкости как случайной величины и скорости резания, ее обеспечивающей [2, 3].

В ряде работ обоснована целесообразность многокритериальной оптимизации одновременно по нескольким критериям, в том числе с использованием мультипликативной свертки критериев, позволяющих различные критерии оптимизации привести к единому критерию, обеспечивающему наилучшее сочетание каждого из них [4, 5].

Установленные аналитические зависимости оптимальных периодов стойкости от параметров процесса резания, обеспечивающие минимальное значение мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости [4], открывают новые возможности в повышении эффективности обработки.

Представляют интерес дальнейшие исследования взаимосвязей между оптимальными по различным критериям периодами стойкости и скоростями резания с обоснованием возможностей повышения производительности и себестоимости.

Цель работы – анализ результатов однопараметрической оптимизации режимов резания по критериям максимальной производительности, минимальной себестоимости и их мультипликативной свертки и оценка возможностей повышения эффективности механообработки.

2. Основное содержание и результаты работы

Основным параметром однопараметрической оптимизации режимов резания является скорость резания V , причем наиболее целесообразно сначала определять функционально связанный со скоростью оптимальный период стойкости инструмента T_o , а затем рассчитывать соответствующую ему оптимальную скорость резания V_o .

При однопараметрической оптимизации в качестве критериев традиционно рассматриваются переменные части производительности и себестоимости обработки, зависящие от режимов резания [4, 5].

Целевая функция, выражающая зависимость критерия производительности $P(T)$ от параметра оптимизации T , выражается следующим образом:

$$P(T) = \left[a \left(T^m + t_c T^{m-1} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $a = \pi D L t^{x_v} S^{y_v - 1} / 1000 C_V K_V$ – постоянный коэффициент; t_c – время смены инструмента; 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 обработки.

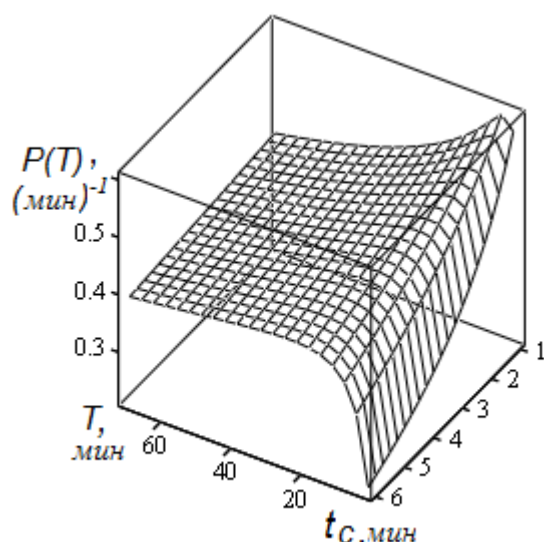


Рисунок 1. Двухпараметрический график зависимости критерия производительности P от периода стойкости T и времени смены t_c режущего инструмента ($m = 0,2$)

Закономерности изменения целевой функции производительности $P(T)$ в зависимости от периода стойкости T и времени смены режущего инструмента t_c представлены на рис.1. Функция рассчитана для значения постоянного коэффициента $a = 1$, что позволяет для любых других заданных значений этого коэффициента достаточно просто вычислять абсолютное значение функции производительности P . Производительность возрастает с уменьшением времени смены инструмента t_c . Во всем диапазоне изменения параметров целевая функция производительности $P(T)$ непрерывна и имеет экстремальный характер.

Оптимальные по производительности период стойкости T_{oP} и скорость резания V_{oP} определяются как:

$$T_{oP} = (1/m - 1) t_c ; V_{oP} = C_V K_V / T_{oP}^m t^{x_v} S^{y_v} . \quad (2)$$

Оптимальный по производительности период стойкости зависит только от показателя относительной стойкости m и времени смены инструмента t_c и не зависит от других условий обработки, связанных с характеристиками оборудования, оснастки, инструмента и детали. На рис. 2 представлены графики зависимости целевой функции производительности $P(T)$ от периода стойкости T .

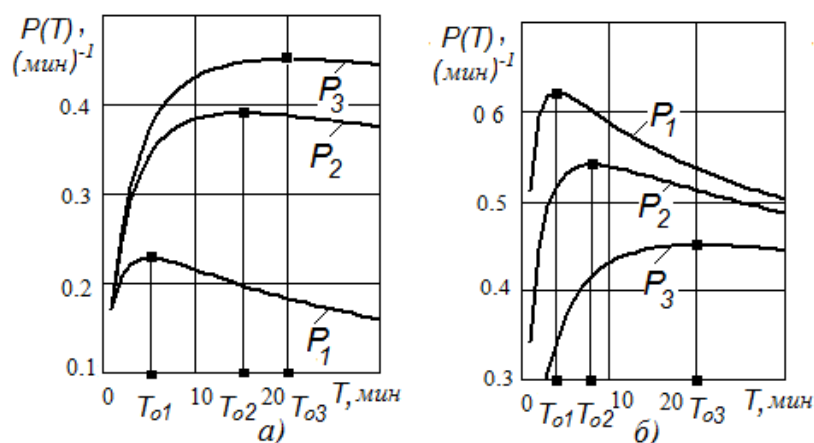


Рисунок 2. Графики зависимости целевой функции производительности $P(T)$ от периода стойкости T для различных значений показателя относительной стойкости: $m_1 = 0,5$; $m_2 = 0,25$; $m_3 = 0,2$ – а) и времени смены инструмента: $t_{c1} = 1$ мин; $t_{c2} = 2$ мин; $t_{c3} = 5$ мин – б)

Оптимальный период стойкости зависит от показателя относительной стойкости m (рис. 2а). Чем выше его значение, тем меньше оптимальный период стойкости T_o и ниже производительность.

Так при токарной обработке твердосплавным инструментом ($m_3 = 0,2$) оптимальный период стойкости $T_{o3} = 20$ мин и производительность P_3 в 1,15 выше, чем при обработке быстрорежущим инструментом ($m_2 = 0,25$; $T_{o2} = 15$ мин) и почти в 2раза выше, чем при обработке сверхтвердым материалом – эльбором ($m_1 = 0,5$; $T_{o1} = 5$ мин).

С увеличением времени смены инструмента t_c (рис. 2.4 б) оптимальный период стойкости T_o возрастает, однако производительность существенно снижается. Так при изменении времени смены от $t_{c1} = 1$ мин до $t_{c3} = 5$ мин оптимальный период стойкости $T_{o1} = 4$ мин возрастает до $T_{o3} = 20$ мин, а максимальная производительность снижется в 1,4 раза.

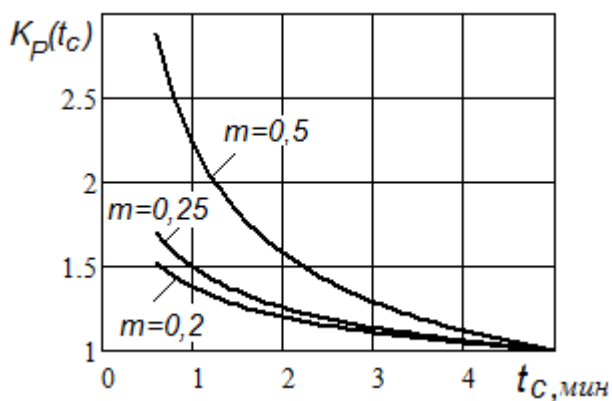


Рисунок 3. Графики зависимости коэффициента повышения производительности $K_P(t_c)$ от времени смены t_c для различных значений m

рост производительности.

Оценка возможности повышения производительности за счет снижения времени смены инструмента может быть осуществлена на основании коэффициента $K_P(t_c)$, представленного на рис. 3:

$$K_P(t_c) = (t_{cb}/t_c)^m, \quad (3)$$

где t_{cb} – базовое для сравнения вариантов значение времени смены инструмента (принято $t_{cb} = 5$ мин).

С увеличением значений показателя относительной стойкости m наблюдается более интенсивный

Максимальная производительность достигается при оптимальных значениях периода стойкости T_{oP} и скорости резания V_{oP} и определяется как:

$$P_{\max} = \left[at_c^m (1-m)^{m-1} / m^m \right]^{-1}. \tag{4}$$

Росту производительности способствует повышение быстротенности инструмента (снижение времени смены t_c), например, использование инструмента с механическим креплением пластин.

Целевая функция, выражающая зависимость критерия себестоимости $C(T)$ от параметра оптимизации T , выражается следующим образом:

$$C(T) = aA(T^m + cT^{m-1}), \tag{5}$$

где $c = t_c + A'/A$ – постоянный коэффициент; A - стоимость станко-минуты; A' - стоимость инструмента, приведенная к одному периоду стойкости.

Закономерности изменения целевой функции себестоимости $C(T)$ в зависимости от периода стойкости T и времени смены режущего инструмента t_c представлены на рис.4.

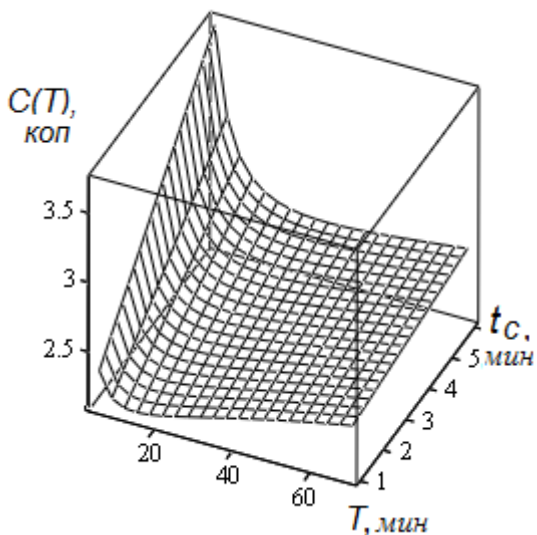


Рисунок 4. Двухпараметрический график зависимости критерия себестоимости C от периода стойкости T и времени смены t_c режущего инструмента

Функция рассчитана для значения постоянного коэффициента $aA = 1$, что позволяет для любых других заданных значениях этого коэффициента достаточно просто вычислять абсолютное значение функции себестоимости. Для расчетов приняты значения параметров: $A'/A = 2,5$ мин, $m = 0,2$. Себестоимость убывает с уменьшением времени смены инструмента t_c . Во всем диапазоне изменения параметров целевая функция себестоимости $C(T)$ непрерывна и имеет экстремальный характер.

Оптимальные по себестоимости период стойкости T_{oC} и скорость резания V_{oC} определяются как:

$$T_{oC} = (1/m - 1)(t_c + A'/A), V_{oC} = C_V K_V / T_{oC}^m t^{x_v} S^{y_v}. \tag{6}$$

Из полученного выражения следует, что оптимальная по себестоимости стойкость зависит от показателя относительной стойкости m и времени смены инструмента t_c , а также соотношения стоимостей одной минуты работы инструмента и оборудования A'/A . Оптимальный по себестоимости период стойкости всегда больше, чем по производительности

На рис. 5 представлены графики зависимости целевой функции себестоимости $C(T)$ от периода стойкости T .

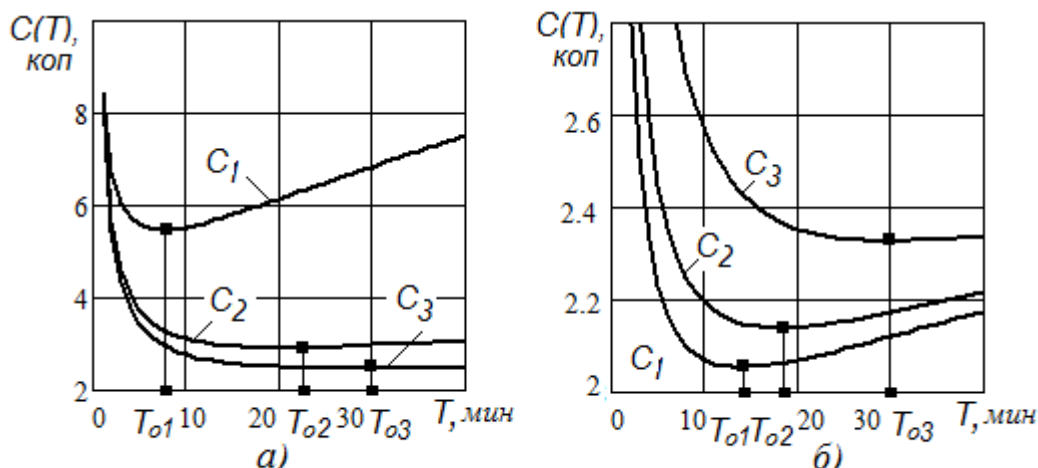


Рисунок 5. Графики зависимости целевой функции себестоимости $C(T)$ от периода стойкости T для различных значений показателя относительной стойкости: $m_1 = 0,5$; $m_2 = 0,25$; $m_3 = 0,2$ – а) и времени смены инструмента: $t_{c1} = 1$ мин; $t_{c2} = 2$ мин; $t_{c3} = 5$ мин – б)

Оптимальный период стойкости зависит от показателя относительной стойкости m (рис. 5а). Чем выше его значение, тем меньше оптимальный период стойкости T_o и выше себестоимость.

Так при токарной обработке твердосплавным инструментом ($m_3 = 0,2$) оптимальный период стойкости $T_{o3} = 30$ мин и минимальная себестоимость C_3 в 1,18 выше, чем при обработке быстрорежущим инструментом ($m_2 = 0,25$; $T_{o2} = 22,5$ мин) и в 2,2 раза выше, чем при обработке сверхтвердым материалом – эльбором ($m_1 = 0,5$; $T_{o1} = 7,7$ мин).

С увеличением времени смены инструмента t_c (рис. 5 б) оптимальный период стойкости T_o и себестоимость возрастают. Так при изменении времени смены от $t_{c1} = 1$ мин до $t_{c3} = 5$ мин оптимальный период стойкости $T_{o1} = 14$ мин возрастает до $T_{o3} = 30$ мин, а минимальная себестоимость возрастает в 1,17 раза.

Минимальная себестоимость достигается при оптимальных значениях периода стойкости T_{oC} и скорости резания V_{oC} и определяется как:

$$C_{\min} = aA(t_c + A'/A)^m(1 - m)^{m-1} / m^m . \tag{7}$$

Оценка возможности снижения себестоимости за счет снижения времени смены инструмента может быть осуществлена на основании коэффициента $K_C(t_c)$, представленного на рис. 6:

$$K_C(t_c) = [(t_c + A'/A)/(t_{cb} + A'/A)]^m , \tag{8}$$

где t_{cb} – базовое для сравнения вариантов значение времени смены инструмента (принято $t_{cb} = 5$ мин).

С увеличением значений показателя относительной стойкости m и увеличением соотношения стоимости одного периода стойкости инструмента и станкоминуты A'/A

наблюдается более интенсивное снижение себестоимости.

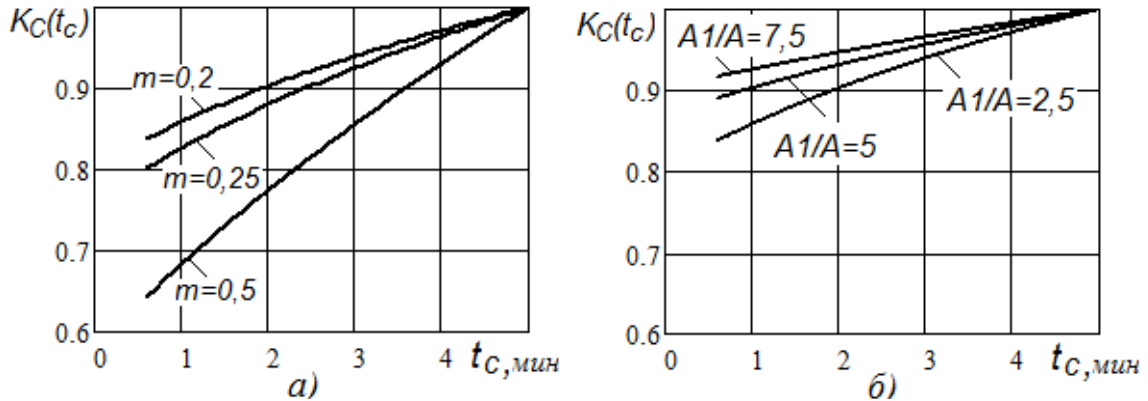


Рисунок 6. Графики зависимости коэффициента снижения себестоимости $K_C(t_c)$ от времени смены t_c для различных значений показателей m – а) и A'/A – б)

Для обеспечения наилучшего сочетания критериев производительности и себестоимости целесообразно использовать критерий оптимизации, представляющий собой мультипликативную свертку критериев, а именно – отношение критериев себестоимости и производительности, для каждого из которых потери для оптимального периода стойкости T_o будут минимальными. В этом случае целевая функция может быть представлена следующим образом:

$$M(T) = \frac{C(T)}{P(T)} = \frac{aA(T^m + (t_c + A'/A)T^{m-1})}{[a(T^m + t_c T^{m-1})]^{-1}} \tag{9}$$

Закономерности изменения целевой функции - мультипликативной свертки критериев себестоимости и производительности $M(T)$ в зависимости от периода стойкости T и времени смены режущего инструмента t_c представлены на рис. 7. Для расчетов приняты значения параметров: $A'/A = 2,5$ мин, $m = 0,2$.

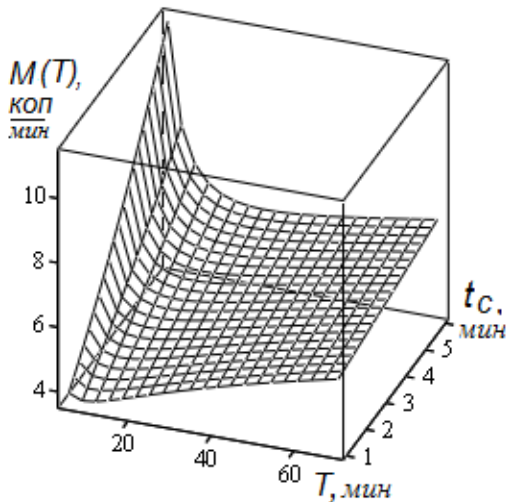


Рисунок 7. Двухпараметрический график зависимости свертки $M(T)$ критериев себестоимости и производительности от периода стойкости T и времени смены t_c

Во всем диапазоне изменения параметров целевая функция мультипликативной свертки критериев себестоимости и производительности $M(T)$ непрерывна и имеет экстремальный характер.

Оптимальные по свертке критериев производительности и себестоимости период стойкости T_{oM} и скорость резания V_{oM} могут быть определены следующим образом:

$$T_{oM} = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \left[t_c + \frac{A'}{A} \left[1 + \left(1 + \frac{A'}{At_c} \right)^m \right]^{-1} \right], V_{oM} = C_V K_V / T_{oM}^m t^{x_v} S^{y_v}. \quad (10)$$

На рис. 8 представлены графики зависимости целевой функции свертки критериев себестоимости и производительности $M(T)$ от периода стойкости T .

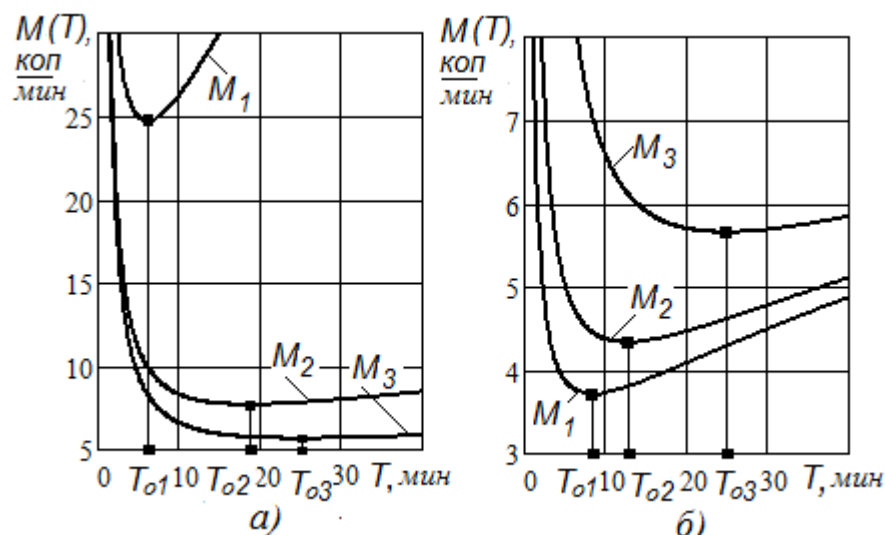


Рисунок 8. Графики зависимости целевой функции свертки критериев себестоимости и производительности $M(T)$ от периода стойкости T для различных значений показателя относительной стойкости: $m_1 = 0,5$; $m_2 = 0,25$; $m_3 = 0,2$ – а) и времени смены инструмента: $t_{c1} = 1$ мин; $t_{c2} = 2$ мин; $t_{c3} = 5$ мин – б)

С увеличением показателя m (рис. 8 а), оптимальный период стойкости T_o уменьшается, а минимальное значение целевой функции $M(T)$ возрастает.

Так при токарной обработке твердосплавным инструментом ($m_3 = 0,2$) оптимальный период стойкости $T_{o3} = 24,8$ мин и минимальное значение функции M_3 в 1,18 выше, чем при обработке быстрорежущим инструментом ($m_2 = 0,25$; $T_{o2} = 18,6$ мин) и в 2,6 раза выше, чем при обработке сверхтвердым материалом – эльбором ($m_1 = 0,5$; $T_{o1} = 6,1$ мин).

С увеличением времени смены инструмента t_c (рис. 8 б) оптимальный период стойкости T_o и минимальное значение функции M_3 возрастают. Так при изменении времени смены от $t_{c1} = 1$ мин до $t_{c3} = 5$ мин оптимальный период стойкости $T_{o1} = 8,4$ мин возрастает до $T_{o3} = 24,8$ мин, а минимальное значение функции M_3 возрастает в 1,46 раза.

Повышению эффективности обработки будут способствовать наряду с повышением быстросменности инструмента, снижение стоимости одной минуты работы инструмента, как за счет снижения стоимости самого инструмента, так и за счет роста его долговечности. Использование современного оборудования, в том числе с программным управлением, с более высокой стоимостью станкоминуты, также приводит к необходимости снижения оптимального периода стойкости, что обеспечит и повышение эффективности обработки.

Взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости, рассчитанными по различным критериям оптимизации, могут быть определены с помощью коэффициентов $k_i = T_{oi}/T_{обаз}$.

Если в качестве базового оптимального периода стойкости $T_{обаз}$ принимается период стойкости, оптимальный по критерию себестоимости, то коэффициенты $k_N = T_{oN}/T_{oC}$, $k_P = T_{oP}/T_{oC}$, $k_M = T_{oM}/T_{oC}$ определяют снижение различных оптимальных периодов стойкости в сравнении с периодом, оптимальным по себестоимости.

$$k_P = \frac{T_{oP}}{T_{oC}} = \left(\frac{1}{m} - 1\right) t_c / \left(\frac{1}{m} - 1\right) \left(t_c + \frac{A1}{A}\right) = 1 / \left(1 + \frac{A1}{At_c}\right);$$

$$k_M = \frac{T_{oM}}{T_{oC}} = \left[1 + \frac{A'}{At_c} \left[1 + \left(1 + \frac{A'}{At_c}\right)^m\right]^{-1}\right] / \left(1 + \frac{A1}{At_c}\right). \tag{11}$$

На их основании могут быть рассчитаны так же коэффициенты $k_{NV} = V(T_{oN})/V(T_{oC})$, $k_{PV} = V(T_{oP})/V(T_{oC})$, $k_{MV} = V(T_{oMN})/V(T_{oC})$, T_{oM}/T_{oC} , определяющие изменение оптимальных по любым критериям скоростей резания в сравнении с периодом, оптимальным по себестоимости:

$$k_{PV} = \frac{V(T_{oP})}{V(T_{oC})} = \left(1 + \frac{A1}{At_c}\right)^m;$$

$$k_{MV} = \frac{V(T_{oM})}{V(T_{oC})} = \left(1 + \frac{A1}{At_c}\right)^m / \left[1 + \frac{A'}{At_c} \left[1 + \left(1 + \frac{A'}{At_c}\right)^m\right]^{-1}\right]^m. \tag{12}$$

Графики зависимости коэффициентов изменения оптимальных по различным критериям оптимизации периодов стойкости инструмента k и скоростей резания k_V от времени смены инструмента t_c представлены на рис. 9.

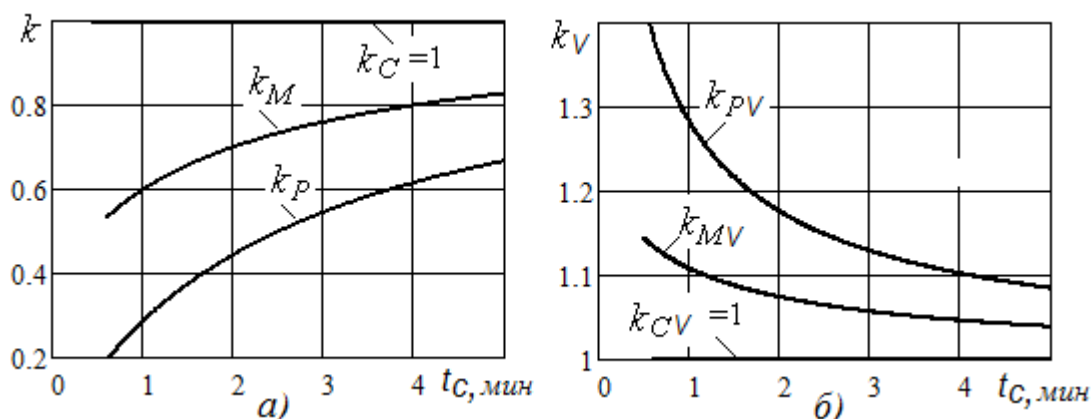


Рисунок 9. Графики зависимости коэффициентов изменения оптимальных по различным критериям оптимизации периодов стойкости инструмента k - а) и скоростей резания k_V от времени смены инструмента t_c - б)

Для всех рассмотренных критериев оптимизации время смены инструмента весьма существенно влияет на оптимальные периоды стойкости и скорости резания. При выборе режущих инструментов предпочтение следует отдавать быстросменным инструментам с минимально возможным временем их восстановления. Это обеспечит более низкий уровень оптимальных периодов стойкости инструмента и более высокий уровень скоростей резания.

Установленные коэффициенты (11), (12) позволяют для любых условий механической обработки на основании периода стойкости и скорости резания, оптимальных по себестоимости, определять оптимальные периоды и скорости резания для любых критериев оптимизации.

3. Заключение

Таким образом, выполнена однопараметрическая оптимизация стойкости инструмента и скорости резания по критериям максимальной производительности, минимальной себестоимости и их мультипликативной свертки, обеспечивающим наилучшее сочетание критериев производительности и себестоимости.

На основании проведенных исследований выполнена оценка возможностей повышения производительности и снижения себестоимости, а так же достижения минимальных потерь производительности и себестоимости изготовления деталей машин за счет выбора рациональных параметров обработки.

Впервые обоснованы коэффициенты взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости инструмента и скоростям резания, рассчитанными по различным критериям оптимизации. Это позволяет для любых условий механической обработки на основании периода стойкости и скорости резания, оптимальных по себестоимости, определять оптимальные периоды и скорости резания для любых критериев оптимизации, в том числе по мультипликативным критериям, обеспечивающим наилучшее сочетание критериев максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. - М.: Машиностроение, 2009. - 640с.
2. Михайлов, А. Н. Научно-обоснованная оптимизация стойкости режущего инструмента по критерию себестоимости. / А. Н. Михайлов, Т. Г. Ивченко, // Научные технологии в машиностроении. - Брянск: БГТУ. - 2018. - № 5. – С. 3-9.
3. Mikhailov, A. Accounting casual character of the cutting tool life at the optimization of the cutting regimes / A. Mikhailov, T. Ivchenko, I. Petryaeva / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 564 (2019) 012013. - P. 1-6.
4. Ивченко, Т. Г. Определение оптимального периода стойкости режущего инструмента по различным критериям оптимизации инструмента / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. - 2020. - № 1 (68). – С. 37-42.
5. Петряева, И. А. Многокритериальная оптимизация режимов резания в условиях переменности действующих ограничений / И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ. - 2021. - № 3 (74). – С. 81-85.

Поступила в редколлегию 15.02.2022 г.