

Ф.В. НОВИКОВ, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;
О.С. КЛЕНОВ, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков

УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

Приведено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, инструментальный материал, себестоимость обработки, скорость резания, температура резания, производительность обработки.

Ф.В. НОВІКІВ, О.С. КЛЕНОВ УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОВИРОБНИЧОЇ ОБРОБКИ

Наведено аналітичне рішення щодо умов зменшення технологічної собівартості обробки та можливості реалізації високошвидкісного різання. Показано, що швидкість різання обмежена екстремумом (мінімумом) собівартості обробки. Збільшити швидкість різання та реалізувати умови високошвидкісної обробки можна за рахунок підвищення стійкості різального інструменту шляхом застосування більш міцних та зносостійких інструментальних матеріалів та покриттів інструментів, що характеризуються низьким коефіцієнтом тертя.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, інструментальний матеріал, собівартість обробки, швидкість різання, температура різання, продуктивність обробки.

F.V. NOVIKOV, O.S. KLENOV CONDITIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF HIGH-PERFORMANCE PROCESSING

An analytical solution is given on the conditions for reducing the technological cost of processing and the possibility of implementing high-speed cutting. It is shown that the cutting speed is limited by the extremum (minimum) of the cost of processing. It is possible to increase the cutting speed and implement high-speed machining conditions by increasing the tool life by using stronger and more wear-resistant tool materials and tool coatings characterized by a low coefficient of friction.

Key words: high-speed machining, tool material, machining cost, cutting speed, cutting temperature, machining productivity.

Введение. Современные металлорежущие станки с ЧПУ типа “обрабатывающий центр” реализуют условия высокоскоростного резания, что открывает широкие возможности повышения точности, качества и производительности обработки. Однако, как показывает практика, обработка в условиях высокоскоростного резания характеризуется повышенной технологической себестоимостью, что нивелирует преимущества этого

© Ф.В. Новиков, О.С. Кленов, 2021

прогрессивного метода обработки. В связи с этим актуальной является проблема поиска новых технологических решений, обеспечивающих снижение себестоимости обработки без снижения параметров точности, качества и производительности обработки в условиях высокоскоростного резания.

Анализ основных достижений и литературы. Задачи теоретического определения условий уменьшения технологической себестоимости освещены в работах [1-3]. Вместе с тем, полученные решения основаны на использовании эмпирических зависимостей для определения стойкости режущего инструмента, справедливых для частных условий обработки. Кроме того, используемые эмпирические зависимости содержат лишь параметры режима резания, тогда как стойкость инструмента зависит от различных физических факторов, учет которых позволил бы получить более общие теоретические решения и обосновать основные пути снижения технологической себестоимости обработки в условиях высокоскоростного резания. Поэтому теоретический анализ технологической себестоимости обработки с позиции аналитического представления стойкости инструмента позволит более полно раскрыть технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки по критерию себестоимости обработки.

Цель исследования, постановка задачи. Целью работы является обоснование условий уменьшения технологической себестоимости обработки на основе математического моделирования технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки. Работа является развитием работ по исследованию технологической себестоимости обработки [4-6].

Материалы исследования. Для достижения поставленной цели воспользуемся зависимостью для определения технологической себестоимости обработки C при продольном точении для трех основных изменяющихся статей затрат, учитывающих затраты по заработной плате рабочего за обработку партии деталей и замену изношенного инструмента, а также затраты на инструмент [4,6]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot Ц, \quad (1)$$

где N, N_0 – количество обрабатываемых деталей и потребляемых режущих инструментов;

t_0 – основное технологическое время обработки, мин;

$S_{\text{час}}$ – тарифная ставка рабочего, грн/мин;

k – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

t_c – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента [1], мин;

$Ц$ – цена инструмента, грн.

С учетом соотношений $t_0 = \mathcal{G}/Q$ и $N \cdot t_0 = N_0 \cdot T$ получено:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + \Pi)}{T}, \quad (2)$$

где $Q = V \cdot t \cdot S$ – производительность обработки (при продольном точении), $\text{м}^3/\text{с}$;

V – скорость резания, $\text{м}/\text{мин}$;

t – глубина резания, м ;

S – подача, $\text{м}/\text{об}$;

T – стойкость режущего инструмента, с .

Стойкость режущего инструмента T можно представить:

$$T = \frac{h}{V_{\text{изн}}}, \quad (3)$$

где h – длина площадки износа на задней поверхности инструмента, м ;

$V_{\text{изн}}$ – скорость износа инструмента на задней поверхности, $\text{м}/\text{с}$.

Тогда зависимость (2) опишется:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + \Pi) \cdot V_{\text{изн}}}{h}. \quad (4)$$

Как видно, с увеличением параметров режима резания V , t , S и T (или h) себестоимость обработки C будет уменьшаться. Однако при этом с увеличением V , t , S , очевидно, будет увеличиваться $V_{\text{изн}}$ и уменьшаться T , что приведет к увеличению C . Следовательно, в общем случае себестоимость обработки C будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Для определения экстремального значения C выразим стойкость режущего инструмента T эмпирической зависимостью [1]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (5)$$

где C_4, m_1, q, p – постоянные для определенных условий обработки ($m_1 > p > q; m_1 > 1$).

В результате зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (6)$$

Поскольку $m_1 > 1$, $p > 1$, $q < 1$, то скорость резания V и подача S неоднозначно влияют на себестоимость обработки C , т.е. существуют экстремумы функции C от переменных V и S . Для определения экстремальных значений V и S следует подчинить функцию C необходимым условиям экстремума: $C'_V = 0$; $C'_S = 0$. Тогда

$$-N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V^2 \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1 - 2} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (7)$$

$$-N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S^2} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1 - 1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-2} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (8)$$

После преобразований получено:

$$-N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (9)$$

$$-N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \mathcal{G} \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (10)$$

Как видно, решением системы уравнений является условие $m_1 = p$. Однако, как установлено экспериментально, $m_1 > p$. Следовательно, данное решение лишено физического смысла. Такое же неопределенное решение получено в работе [3]. Чтобы уйти от неопределенности, необходимо в качестве переменной величины рассматривать производительность обработки $Q = V \cdot t \cdot S$, а не ее компоненты V и S . Тогда зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{Q} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \frac{Q^{m_1 - 1}}{t^{m_1 - q} \cdot S^{m_1 - p}} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) вытекает, что минимум себестоимость обработки C будет достигаться при экстремальной производительности обработки $Q_{\text{эктр}}$ и максимально возможных значениях глубины резания t и подачи S . Подчиняя функцию C необходимому условию экстремума $C'_Q = 0$ получено:

$$Q_{\text{эктр}} = \left[\frac{S_{\text{vac}} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1 - p} \cdot t^{m_1 - q} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (12)$$

$$C_{\text{min}} = \frac{N \cdot \mathcal{G} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k}{Q_{\text{эктр}}} \cdot \left[1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (13)$$

Как следует из зависимостей (12) и (13), увеличить $Q_{экстр}$ и уменьшить минимальное значение себестоимости обработки C_{min} можно главным образом за счет увеличения величины C_4 , зависящей от физико-механических свойств инструментального материала. Экстремальное значение скорости резания $V_{экстр}$ определяется из зависимости $V_{экстр} = Q_{экстр} / t \cdot S$. Следовательно, увеличение $V_{экстр}$ ограничено экстремумом (минимумом) себестоимости обработки C_{min} . Увеличить $V_{экстр}$ и соответственно реализовать условия высокоскоростной обработки можно в основном увеличением величины C_4 за счет применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов.

Для раскрытия физической сущности полученного решения проведем его анализ на основе аналитической зависимости для определения температуры резания, возникающей на задней поверхности резца [6]:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot V}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения резца с обрабатываемым материалом;

HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м²;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Как видно, при заданной температуре резания θ существенно увеличить скорость резания V и таким образом осуществить высокоскоростную обработку можно уменьшением двух параметров – f и h за счет применения инструментальных материалов, характеризующихся низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, например, синтетических сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и т.д.), твердых сплавов с износостойкими покрытиями. Уменьшение длины площадки износа на задней поверхности инструмента h предполагает уменьшение стойкости режущего инструмента T . Если представить $V_{изн} = k_1 \cdot V^{n_1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}$ (где k_1 , n_1 , n_2 , n_3 – величины, зависящие от физико-механических свойств инструментального материала), то с учетом зависимости (3) зависимость (14) примет вид:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot T \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (15)$$

Откуда

$$T = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}. \quad (16)$$

Сравнивая зависимости (5) и (16) видно, что по структуре они фактически идентичны, рассматривая

$$C_4 = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2}. \quad (17)$$

Таким образом, полученное аналитическое решение позволяет раскрыть физическую сущность постоянной величины C_4 (которая устанавливается экспериментальным путем) и определить условия осуществления высокоскоростной обработки, которые, как установлено выше, состоят в увеличении C_4 . Согласно зависимости (17), они реализуются за счет увеличения предельной температуры резания θ и уменьшения коэффициента трения f .

Из зависимости (16) вытекает, что стойкость режущего инструмента T обусловлена температурным фактором. Чем больше предельная температура резания θ для рассматриваемого инструментального материала, тем больше T . Причем, наличие квадратичной зависимости между T и θ указывает на существенное влияние физико-механических свойств инструментального материала на стойкость режущего инструмента T . Такое же существенное влияние на T оказывает и коэффициент трения инструмента с обрабатываемым материалом f : чем меньше f , тем больше T , а соответственно и производительность обработки $Q_{эксп}$, и меньше технологическая себестоимость обработки C_{min} .

Выводы. В работе получено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

Список литературы

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
3. Армарего И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. Новиков Ф.В. Разработка

эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215. **5.** Новиков Ф.В. Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247. **6.** Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 P. **2.** *Granovskiy G.I., Granovskiy V.G.* Rezanie metallov: uchebник. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 P. **3.** *Armarego I.Dzh.A., Braun R.Kh.* Obrabotka metallov rezaniem. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 325 P. **4.** *Novikov F.V., Zhovtobruk V.A.* Razrabotka effektivnykh tekhnologiy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin. Avtomobil transport: sbornik nauchnykh trudov. – Kharkov.: KhNADU, vyp. 29, 2011. – P. 212-215. **5.** *Novikov F.V., Zhovtobruk V.A., Benin E.Y.* Opredelenie optimalnykh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin po kriteriyu naimenshey sebestoimosti. Visnyk Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Ser.: Tekhnichni nauky: Zb. nauk. pratP. – Mariupol: DVNZ “Priazov. derzh. tekhn. un-t”, 2012. – No1 (24). – 2012. – P. 241-247. **6.** *Zhovtobruk V.A.* Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskiikh sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti: avtoref. diP. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spetP. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya”. – Mariupol, 2012. – 21 P.

Поступила (received) 12.08.2021