

УДК 621.9.01:531.3

**Ю.В. ЯРОВОЙ**, канд. техн. наук,

**И.А. ЯРОВАЯ**, канд. техн. наук, Одесса, Украина

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА ПО УСЛОВИЮ МИНИМУМА УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ РЕЗАНИЯ**

Розглянуто критерій «питома робота різання». За умовою мінімізації питомої роботи різання запропоновано метод розподілу припусків на операціях механічної обробки. Встановлено кількісний взаємозв'язок енергетично економічного розподілу припусків з співвідношенням подачі та швидкості різання на двох суміжних переходах технологічної операції.

Рассмотрен критерий «удельная работа резания». По условию минимизации удельной работы резания предложен метод распределения припусков на операциях механической обработки. Установлена количественная взаимосвязь энергетически экономичного распределения припусков с соотношением подачи и скорости резания на двух смежных переходах технологической операции.

The criterion "specific work of cutting" is studied. Method of machining allowance apportion based on condition of specific work of cutting minimizing is provided. The quantitative relationship between energetically economic allowance apportion and correlation of feed and cutting speed for two adjacent steps of technological operation is determined.

**Введение.** Внедрение новых технологий, современного оборудования, технологического обеспечения направлено на увеличение производительности обработки и улучшение качества изделия. В свою очередь, улучшение качества изделия связано с методами распределения припуска на разных этапах обработки.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросы распределения припуска рассматриваются только для шлифовальных операций [1, 2]. Критерию «удельная работа резания» посвящены работы В.К. Старкова, С.С. Силина [3, 4]. Распределение припуска с учетом достижения минимальной удельной работы резания не изучено.

**Цель статьи.** Предложить метод распределения припуска между рабочими ходами технологического перехода по условию минимума суммарной удельной работы резания.

**Основной материал.** При формообразовании новой поверхности заданного качества удаление припуска с заготовки происходит дискретно, в соответствии с принятым маршрутом обработки. В течение каждого рабочего хода режущего инструмента, приводимого в движение исполнительными органами станка, совершается некоторая работа резания. Результатом этой работы является формирование поверхностей детали со свойствами, отличными от исходных.

Удельную работу резания представим выражением [5]:

$$e = \frac{A}{V}, \quad (1)$$

где  $A$  – работа резания, Дж.

В интервале времени обработки работу формообразования выразим через мощность резания:

$$A = \int_0^t N(\tau) d\tau = NT_o, \quad (2)$$

где  $N$  – мощность резания, Вт.

Тогда выражение удельной работы резания примет вид:

$$e = \frac{NT_o}{V} = \frac{N}{V/T_o} = \frac{N}{W}. \quad (3)$$

Объемная производительность, характеризующая скорость удаления стружки, определяется по выражению

$$W = stv, \quad (4)$$

где  $s$  – подача, мм/об;

$t$  – глубина резания, мм;

$v$  – скорость резания, м/мин.

Подставляя в (3) выражение для объемной производительности (4), получим зависимость для определения удельной работы резания:

$$e = \frac{N}{stv}. \quad (5)$$

Удельная работа резания не связана с размерами заготовки, напрямую не зависит от времени обработки, и следовательно, может использоваться в качестве критерия для сравнения энергетической эффективности альтернативных процессов обработки, а также параметров отдельных операций. После преобразования зависимости (5) в целевую функцию вида  $e \rightarrow \min$  ее можно использовать в качестве критерия оптимизации для установления параметров обработки резанием, которые позволяют минимизировать энергетические затраты без потери производительности.

Если мощность резания представить в виде зависимости от режимов резания и параметров режущего инструмента, то выражение (5) приводится к целевой функции вида  $e \rightarrow \min$ , содержащей в качестве аргументов управляемые факторы. Следует также отметить, что увеличение мощности резания и объемной производительности приводят к уменьшению удельной работы резания.

Представим удельную работу резания в эмпирическом виде [6, 7]:

$$e = C_3 t^{x-1} s^{y-1} v^n K_p. \quad (6)$$

В полученном выражении удельная работа резания является целевой функцией, которая зависит от режимов резания. Это дает возможность выполнить анализ зависимости удельной работы от режимов резания и определить, какой из параметров оказывает большее влияние.

По выражению (5) определяется удельная работа резания для отдельного технологического перехода. Для совокупности технологических переходов в операции или рабочих ходов в переходе:

$$e_{\Sigma} = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n = \sum_{i=1}^n e_i, \quad (7)$$

где  $e_{\Sigma}$  – суммарная удельная работа формообразования;

$e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$  – удельная работа формообразования каждого технологического перехода (рабочего хода), из которых состоит технологическая операция (переход).

Выражение (7) справедливо также для анализа суммарной удельной работы резания для разработанного технологического маршрута обработки

детали. В этом случае слагаемые  $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$  представляют собой удельную работу резания для отдельных технологических операций.

Выражение (7) позволяет перейти от параметрической оптимизации отдельных рабочих ходов к структурной оптимизации элементов технологического процесса. Это дает возможность количественно сравнивать между собой различные способы формообразования поверхностей деталей машин.

Анализ теоретических зависимостей для удельной работы резания показывает, что глубина резания не влияет на рассматриваемый критерий оптимизации. С целью повышения производительности и сокращения потерь энергии на вспомогательные ходы рекомендуется удалять предварительный односторонний припуск за один рабочий ход. Если по каким-либо причинам (наличие литейной корки, ковочных напусков, завышенных припусков) реализовать это затруднительно, необходимо осуществлять несколько последовательных смежных рабочих ходов. В этом случае условие  $e_{\Sigma} \rightarrow \min$  будет выполняться лишь при энергетически обоснованном распределении общего припуска между рабочими ходами.

Согласно выражению (7), суммарная удельная работа для двух рабочих ходов (технологических переходов):

$$e_{1,2} = e_1 + e_2 = Ct_1^{x-1} s_1^{y-1} v_1^n + Ct_2^{x-1} s_2^{y-1} v_2^n. \quad (8)$$

Аргументы функции удовлетворяют уравнению

$$z = t_1 + t_2, \quad (9)$$

где  $z$  – общий припуск на выполнение первого и второго рабочего хода.

Для поиска оптимального значения распределения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе) выражение (8) должно удовлетворять следующему условию: функция  $e_{1,2} = f(t)$  определима и дифференцируема на отрезке  $[0; z]$ .

Поиск экстремума функции проводим по методу множителей Лагранжа [8]. Составим функцию Лагранжа

$$F(t_1, t_2) = Ct_1^{x-1} s_1^{y-1} v_1^n + Ct_2^{x-1} s_2^{y-1} v_2^n + \lambda(t_1 + t_2 - z), \quad (10)$$

где  $\lambda$  – неопределенный постоянный множитель.

Определив частные производные выражения (6) по аргументам  $t_1, t_2$ , получаем систему уравнений, которая имеет вид

$$\begin{cases} C(x-1)t_1^{x-2}s_1^{y-1}v_1^n + \lambda = 0 \\ C(x-1)t_2^{x-2}s_2^{y-1}v_2^n + \lambda = 0. \\ t_1 + t_2 = z \end{cases} \quad (11)$$

Решив данную систему уравнений, получаем модель энергетически обоснованного распределения припуска:

$$t_1 = \frac{z}{1 + \left( \frac{v_2^n}{v_1^n} \cdot \frac{s_2^{y-1}}{s_1^{y-1}} \right)^{\frac{1}{x-2}}}. \quad (12)$$

Функция (12) имеет общий вид для всех операций механической обработки. Подставляя в нее значения показателей степеней [103], получаем выражение для определения глубины резания на первом рабочем ходе (технологическом переходе). Для обработки на токарных станках функция (12) примет вид

$$t_1 = \frac{z}{1 + \frac{v_2^{0,15}}{v_1^{0,15}} \cdot \frac{s_2^{0,25}}{s_1^{0,25}}}. \quad (13)$$

Например: при общем припуске  $z = 3$  мм припуск на черновой этап составит  $t_1 = 1,75$  мм ( $v_1 = 200$  м/мин,  $s_1 = 0,5$  мм/об), а припуск на чистовой этап  $t_2 = 1,25$  мм ( $v_2 = 300$  м/мин,  $s_2 = 0,1$  мм/об).

В частном случае, когда при выполнении технологических переходов (рабочих ходов) скорость резания и подача остаются постоянными ( $v_1 = v_2$ ,  $s_1 = s_2$ ), распределение припуска имеет вид  $t_1 = t_2 = 0,5z$ .

**Выводы.** Предложен метод распределения припуска между рабочими ходами технологического перехода по условию минимума суммарной удельной работы формообразования. Установлена количественная взаимосвязь энергетически экономичного распределения припусков с соотношением подачи и скорости резания на двух смежных переходах технологической операции.

**Список использованных источников:** 1. Якимов А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, Н.А. Поршаков, В.И. Свищев, В.П. Ларшин – Киев: Техніка, 1983. – 184 с. 2. Калафатова Л.П. Оптимизация технологического процесса шлифования ситаллов / Л.П. Калафатова, С.А. Поезд // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр.. Вип. 111/2010. Серія Машиноприладобудування та транспорт – Севастополь, 2010. – С. 75-80. 3. Старков В.К. Физика и оптимизация резания металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. 4. Силин С.С. Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критерия / С.С. Силин, А.В. Баранов // Станки и инструменты. – 1999. – № 1. – С. 16-17. 5. Остафьев В.А. Диагностика процесса металлообработки / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. – К.: Техника, 1991. – 152 с. 6. Грановский Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов / Г.И. Грановский. – М.: Машиностроение, 1982. – 112 с. 7. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 944 с. 8. Гусак А.А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак, Г.М. Гусак, Е.А. Бричикова. – Мн.: ТетраСистемс. – 1999. – 640 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Jakimov A.V. Upravlenie processom shlifovaniya / A.V. Jakimov, N.A. Porshakov, V.I. Svishhev, V.P. Larshin – Kiev: Tehnika, 1983. – 184 s. 2. Kalafatova L.P. Optimizacija tehnologicheskogo processa shlifovaniya sitallov / L.P. Kalafatova, S.A. Pоеzd // Visnik SevNTU: zb. nauk. pr.. Vip. 111/2010. Serija Mashinopriladobuduvannja ta transport – Sevastopol', 2010. – S. 75-80. 3. Starkov V.K. Fizika i optimizacija rezaniya metallov / V.K. Starkov. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 640 s. 4. Silin S.S. Optimizacija operacij mehanicheskoy obrabotki po jenergeticheskim kriterija / S.S. Silin, A.V. Baranov // Stanki i instrumenty. – 1999. – № 1. – S. 16-17. 5. Ostaf'ev V.A. Diagnostika processa metalloobrabotki / V.A. Ostaf'ev, V.S. Antonjuk, G.S. Tymchik. – K.: Tehnika, 1991. – 152 s. 6. Granovskij G.I. Obrabotka rezul'tatov jeksperimental'nyh issledovanij rezaniya metallov / G.I. Granovskij. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 112 s. 7. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja: v 2-h t. / Pod red. A.M. Dal'skogo, A.G. Suslova, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova. – M.: Mashinostroenie-1, 2001. – T. 2. – 944 s. 8. Gusak A.A. Spravochnik po vysshej matematike / A.A. Gusak, G.M. Gusak, E.A. Brichikova. – Mn.: TetraSistems. – 1999. – 640 s.