УДК 621.923

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО КАЧЕСТВУ ОБРАБОТКИ

Новиков Ф.В., докт. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

In work the approach to optimization of structure and parameters of technological operation is offered in view of restrictions on quality of processing.

Традиционно задачи оптимизации технологических процессов обработки решаются в рамках структурно-параметрической оптимизации с использованием эмпирических зависимостей основных технологических показателей обработки. Для этого чисто интуитивно на основе производственного опыта выбираются несколько вариантов технологического маршрута, математически описываются и после решения задачи оптимизации выбирается наиболее оптимальный вариант. Затем производится уточненный расчет оптимальных параметров технологических операций (режимов резания и т.д.). Однако, данный подход не гарантирует выбора оптимального варианта технологического маршрута обработки, т.к. в числе рассматриваемых вариантов его может просто не оказаться.

Чтобы более обоснованно подойти к выбору оптимального варианта маршрута обработки (или структуры операции), следует использовать теоретические (аналитические) подходы к решению задач структурно-параметрической оптимизации, основанные на разработанных математических (аналитических) моделях рассматриваемых процессов обработки.

Рассмотрим первоначально задачу оптимизации структуры и параметров операции обработки с учетом ограничения по температурному фактору. Предположим, обрабатывается прямолинейный образец по схеме врезного шлифования торцом круга со скоростью радиальной подачи V, рис. 1. Требуется за минимальное время τ удалить припуск величиной $П$ и при этом не допустить распространение образующегося тепла вглубь обрабатываемого образца на величину более Δh. Этим будет обеспечено требуемое качество обработки с точки зрения исключения образования температурных дефектов в поверхностном слое обрабатываемого образца.

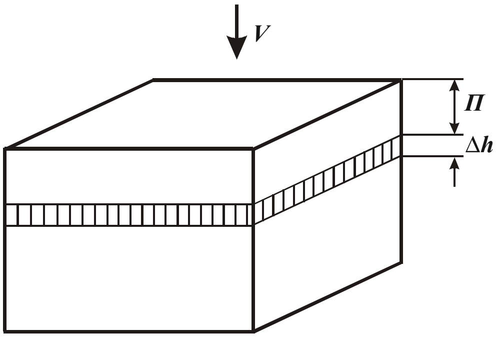

Рис. 1. Расчетная схема.

Предположим, что величина Δh упрощенно выражается зависимостью

$$\Delta h = A \cdot V_0 , \quad (1)$$

где V_0 - скорость радиальной подачи режущего инструмента (шлифовального круга), м/с; A - размерный коэффициент, учитывающий характеристики режущего инструмента и обрабатываемого материала, режимы резания.

Тогда при обработке в один переход основное время обработки τ определится простой зависимостью

$$\tau = \frac{П}{V_0} = A \cdot \frac{П}{\Delta h} . \quad (2)$$

При обработке в два перехода основное время обработки τ определится как сумма двух слагаемых

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{П_1}{V_1} + \frac{П_2}{V_2} , \quad (3)$$

где $П_1$, $П_2$ - соответственно припуски, удаляемые на первом и втором переходах, м; V_1, $V_2 = V_0$ - соответственно скорости радиальной подачи, реализуемые на первом и втором переходах, м/с.

На первом переходе величина Δh_1 может быть больше, чем на втором переходе Δh_2. При этом справедливы зависимости

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= A \cdot V_1, \\ \Delta h_2 &= \Delta h = A \cdot V_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Величины удаляемых припусков $П_1$ и $П_2$ определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} П_1 + \Delta h_1 &= П + \Delta h, \\ П_2 &= \Delta h_1 - \Delta h. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом зависимости (4) величины $П_1$ и $П_2$ выразятся

$$\begin{aligned} П_1 &= П + \Delta h - A \cdot V_1, \\ П_2 &= A \cdot V_1 - \Delta h. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим зависимости (6) в зависимость (3)

$$\tau = \frac{\Pi + \Delta h - A \cdot V_1}{V_1} + \frac{A \cdot V_1 - \Delta h}{V_0} = \frac{\Pi + \Delta h}{V_1} + \frac{A \cdot V_1}{V_0} - 2 \cdot A . \quad (7)$$

Здесь параметры Π , Δh , V_0 , A заданы, неизвестна скорость V_1 .

Как видим, скорость V_1 оказывает на основное время обработки τ неоднозначное влияние. Следовательно, имеет место экстремальная зависимость функции τ от скорости V_1 . Для определения экстремума функции τ продифференцируем ее по переменной V_1 и первую производную приравняем к нулю:

$$\tau'_{V_1} = -\frac{(\Pi + \Delta h)}{V_1^2} + \frac{A}{V_0} = 0 .$$

Откуда

$$V_1 = \sqrt{\frac{V_0}{A} \cdot (\Pi + \Delta h)} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\Delta h} + 1} = \frac{1}{A} \cdot \sqrt{(\Pi + \Delta h) \cdot \Delta h} . \quad (8)$$

Из зависимости (8) следует, что скорость V_1 больше скорости V_0 ($V_1 > V_0$).

Определим наличие минимума или максимума в точке экстремума. Для этого определим вторую производную функции τ в точке экстремума:

$$\tau''_{V_1} = \frac{2 \cdot (\Pi + \Delta h)}{V_1^3} > 0 .$$

Поскольку в точке экстремума вторая производная функции τ положительна, то имеет место минимум функции τ , рис. 2.

Минимальное значение основного времени обработки τ_{min} определим путем подстановки зависимости (8) в (7):

$$\tau_{min} = 2 \cdot A \cdot \left[\sqrt{\frac{\Pi}{\Delta h} + 1} - 1 \right] . \quad (9)$$

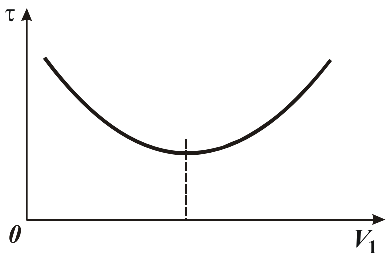

Рис. 2. Зависимость основного времени обработки τ от скорости V_1 .

Умножим и разделим зависимость (9) на сопряженную величину $\left[\sqrt{\frac{\Pi}{\Delta h} + 1} + 1 \right]$:

$$\tau_{min} = 2 \cdot A \cdot \frac{\Pi}{\Delta h} \cdot \frac{1}{\left[\sqrt{\frac{\Pi}{\Delta h} + 1} + 1 \right]} . \quad (10)$$

Исходя из зависимости (10), уменьшить основное время обработки τ_{min} можно уменьшением отношения $\Pi / \Delta h$, т.е. уменьшением величины снимаемого припуска Π и увеличением толщины прогретого слоя Δh обрабатываемого материала.

Сравним зависимости (2) и (10), определяющие основное время обработки в один и два перехода. Нетрудно видеть, что эти зависимости отличаются лишь множителем

$$\frac{2}{\left[\sqrt{\frac{\Pi}{\Delta h} + 1} + 1 \right]} .$$

Поскольку $\Pi / \Delta h > 0$, то данный множитель всегда меньше единицы. Следовательно, время обработки в два перехода меньше времени обработки в один переход. Чем больше отношение $\Pi / \Delta h$, тем меньше рассматриваемый множитель и выше эффект от применения обработки в два перехода.

Определим величины припусков Π_1 и Π_2 , удаляемых на первом и втором переходах:

$$\Pi_1 = \sqrt{\Pi + \Delta h} \cdot \left(\sqrt{\Pi + \Delta h} - \sqrt{\Delta h} \right) . \quad (11)$$

Умножим и разделим зависимость (11) на сопряженную величину $\left(\sqrt{\Pi + \Delta h} + \sqrt{\Delta h} \right)$:

$$\Pi_1 = \frac{\Pi}{1 + \sqrt{\frac{\Delta h}{\Pi + \Delta h}}} . \quad (12)$$

Величина припуска Π_1 , удаляемого на первом переходе, тем больше, чем меньше Δh и больше Π .

Величина припуска Π_2 , удаляемого на втором переходе, равна

$$П_2 = П - П_1 = \frac{П}{1 + \sqrt{\frac{П}{\Delta h} + 1}}. \qquad (13)$$

Как видим, величина $П_2$ увеличивается с увеличением Δh и $П$.

Сравним значения $П_1$ и $П_2$. Для этого установим их отношение

$$\frac{П_1}{П_2} = \sqrt{\frac{П}{\Delta h} + 1}. \qquad (14)$$

Отношение $П_1 / П_2$ больше единицы и увеличивается с увеличением $П$ и уменьшением Δh.

Для более полного представления о закономерностях обработки в два перехода определим основное время обработки, затрачиваемое на первом и втором переходах:

$$\tau_1 = \frac{П_1}{V_1} = \left[\frac{A \cdot П}{\sqrt{(П + \Delta h) \cdot \Delta h} + \Delta h}\right], \qquad \tau_2 = \frac{П_2}{V_0} = \left[\frac{A \cdot П}{\sqrt{(П + \Delta h) \cdot \Delta h} + \Delta h}\right].$$

Из приведенных зависимостей следует, что $\tau_1 = \tau_2$, т.е. справедливы соотношения:

$$\frac{П_1}{V_1} = \frac{П_2}{V_0} \quad \text{или} \quad \frac{П_1}{П_2} = \frac{V_1}{V_0}. \qquad (15)$$

Применим полученные зависимости для выработки более общего решения, позволяющего уменьшить основное время обработки (увеличить производительность обработки) с учетом ограничений по качеству обработки (величине Δh).

Исходя из зависимости (10), основной путь уменьшения основного времени обработки τ_{min} состоит в уменьшении величины снимаемого припуска на переходе. Это достигается применением обработки в $n \to \infty$ переходов (многопереходной обработки) со съемом бесконечно малого припуска $\Delta П = П / n$ на каждом переходе. Тогда, на первом переходе величина Δh (будем ее рассматривать условно $\Delta \overline{h}$) может быть увеличена до значения снимаемого припуска $П$, что, согласно зависимости (10), ведет к дополнительному уменьшению основного времени обработки τ_{min}.

На втором переходе величина $\Delta \overline{h}$ уменьшится на величину $\Delta П$, т.е. будет равна $\Delta \overline{h} = П - \Delta П$.

На третьем переходе – $\Delta \overline{h} = П - 2 \cdot \Delta П$ и т.д.

На последнем (n-ном) переходе величина $\Delta \overline{h}$ станет равной заданному (исходному) значению Δh.

На рис.3 показан характер изменения величины $\Delta \overline{h}$ и основного времени обработки τ_{min} по мере увеличения числа переходов n.

Скорость радиальной подачи V_1 с учетом сказанного и, исходя из зависимости (8), опишется

$$V_1 = \frac{\Delta h}{A}. \qquad (16)$$

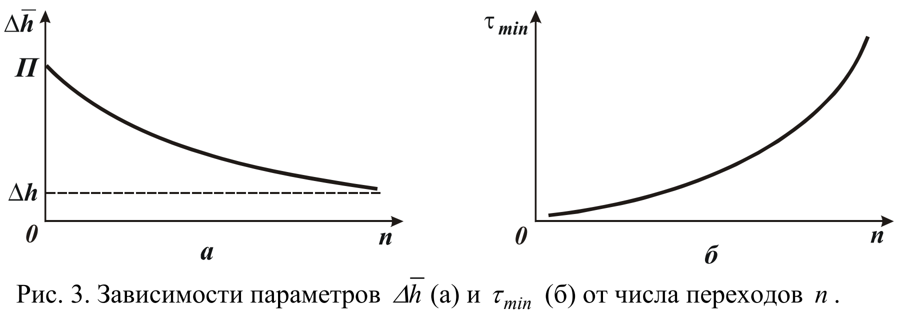

Рис. 3. Зависимости параметров $\Delta \overline{h}$ (а) и τ_{min} (б) от числа переходов n.

На первом переходе скорость V_1 принимает наибольшее значение V_{1_0}, а на последнем переходе – наименьшее значение V_0, рис. 4.

Параметры V_{1_0} и V_0, согласно зависимости (8), определятся

$$V_{1_0} = \frac{П}{A}, \quad V_0 = \frac{\Delta h}{A}. \qquad (17)$$

Принимая в первом приближении зависимость уменьшения скорости V_1 (с увеличением числа переходов n) линейной, можно определить среднюю скорость

$$V_{ср} = \frac{V_{1_0} - V_0}{2} = \frac{П - \Delta h}{2 \cdot A}. \qquad (18)$$

Зная среднюю скорость $V_{ср}$, можно определить основное время многопереходной обработки

$$\tau_{min} = \frac{\Pi}{V_{cp}} = \frac{2 \cdot A \cdot \Pi}{\Pi - \Delta h} \approx 2 \cdot A . \quad (19)$$

Сравнивая данное значение с основным временем обработки в два перехода, описываемое зависимостью (10), видим, что многопереходная обработка характеризуется значительно меньшим временем, т.е. более производительна. Причем, чем больше снимаемый припуск Π и меньше величина Δh, тем значительнее эффект многопереходной обработки.

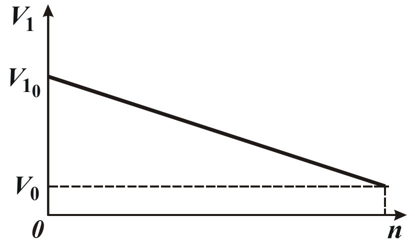

Рис. 4. Зависимость скорости V_1 от числа переходов n.

Таким образом, наибольшую производительность обработки с учетом ограничения по температурному фактору (величине Δh) можно достичь, используя обработку с переменной (уменьшающейся во времени) скоростью радиальной подачи.

Оптимизация структуры и параметров операции обработки с учетом ограничения по точности обработки

Определим наиболее производительный вариант обработки прямолинейного образца (рис. 1) по схеме врезного шлифования торцом круга с учетом ограничения по точности обработки δ, обусловленной упругими перемещениями в технологической системе.

Предположим, что величина упругого перемещения δ упрощенно выражается зависимостью

$$\delta = B \cdot V_0 , \quad (20)$$

где V_0 - скорость радиальной подачи шлифовального круга, м/с; B - размерный коэффициент, учитывающий характеристики круга и обрабатываемого материала, режимы резания.

При обработке в один переход основное время обработки τ определится

$$\tau = \frac{\Pi}{V_0} = B \cdot \frac{\Pi}{\delta} . \quad (21)$$

где Π - величина снимаемого припуска, м.

При обработке в два перехода основное время τ определится как сумма двух слагаемых

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{\delta_1}{V_2} , \quad (22)$$

где V_1, $V_2 = V_0$ - соответственно скорости радиальной подачи на первом и втором переходах, м/с; δ_1 - величина упругого перемещения, возникающего на первом переходе ($\delta = B \cdot V_0$), который затем удаляется на втором переходе.

Преобразуем зависимость (22)

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + B \cdot \frac{V_1}{V_0} . \quad (23)$$

В данной зависимости параметры Π, B, V_0 заданы, неизвестным параметром является скорость V_1. Очевидно, с изменением V_1 основное время обработки τ изменяется по экстремальной зависимости. Для определения точки экстремума функции τ приравняем первую производную τ'_{V_1} нулю

$$\tau'_{V_1} = -\frac{\Pi}{V_1^2} + \frac{B}{V_0} = 0 . \quad (24)$$

Откуда

$$V_1 = \sqrt{\frac{\Pi}{B} \cdot V_0} = V_0 \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\delta}} = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\Pi \cdot \delta} . \quad (25)$$

Определим знак второй производной:

$$\tau''_{V_1} = \frac{2 \cdot \Pi}{V_1^3} > 0 .$$

Следовательно, в точке экстремума функция τ принимает минимальное значение.

Подставляя в (23) зависимость (25), определим минимальное основное время обработки

$$\tau_{min} = B \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\delta}} + B \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\delta}} = 2 \cdot B \cdot \sqrt{\frac{\Pi}{\delta}} . \quad (26)$$

В результате пришли к зависимости, близкой по структуре к зависимости (10).

Исходя из зависимости (26), уменьшить основное время обработки τ_{min} можно уменьшением величины снимаемого припуска $П$ и размерного коэффициента B, а также увеличением величины упругого перемещения в технологической системе (точности размера обработки) δ. Заслуживает внимания то, что по длительности первый и второй переходы равны.

Сравнивая зависимости (26) и (21), видим, что основное время обработки в два перехода меньше основного времени обработки в один переход, т.е. обработка в два перехода более производительна.

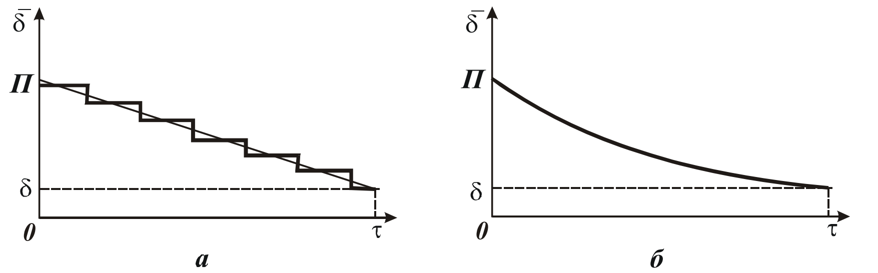

Рис. 5. Зависимости величины $\bar{\delta}$ от времени обработки τ.

Анализируя зависимость (26), можно сделать важный практический вывод.

Уменьшить фактическую величину припуска $П$ на каждом переходе (и тем самым уменьшить основное время обработки τ_{min}) можно созданием в технологической системе начального натяга величиной $П$ и его периодическим уменьшением во времени (на переходах) на величину $\Delta П \to 0$. Тогда на каждом переходе будет удаляться припуск величиной $\Delta П$.

Текущая величина упругого перемещения $\bar{\delta}$ в технологической системе будет уменьшаться с течением времени обработки от значения $\bar{\delta} = П$ (на первом переходе) до заданного значения $\bar{\delta} = \delta$ (на последнем переходе) по линейному закону, как это показано на рис. 5,а.

Изменение величины упругого перемещения $\bar{\delta}$ в диапазоне $\delta < \bar{\delta} < П$, исходя из зависимости (26), создает дополнительный эффект уменьшения основного времени обработки τ_{min}. Иными словами, основное время обработки τ_{min} будет уменьшаться как от уменьшения величины снимаемого припуска на каждом переходе, так и от увеличения величины $\bar{\delta}$.

В общем случае в зависимости (26) вместо параметров $П$ и δ необходимо рассматривать параметры $\Delta П = П / n$ и $\bar{\delta}$ (где n - количество переходов). Тогда зависимость (26) примет вид

$$\tau_{min} = 2 \cdot B \cdot \sqrt{\frac{П}{n \cdot \bar{\delta}}}. \tag{27}$$

Как отмечалось выше, с течением времени обработки параметр $\bar{\delta}$ уменьшается. В соответствии с зависимостью (27), это ведет к увеличению τ_{min}.

При условии создания начального натяга в технологической системе удаление припуска и уменьшение упругого перемещения может происходить автоматически. Под действием упруго-восстанавливающей силы технологическая система будет стремиться возвратиться в исходное состояние, что обеспечит удаление припуска.

На первом переходе обработки справедливо условие $\bar{\delta} = П$. С течением времени обработки величина $\bar{\delta}$ будет уменьшаться до заданного исходного значения δ, определяемого точностью размера обработки.

Данная схема обработки на практике получила название выхаживание. Как показано в работе [1], интенсивность съема обрабатываемого материала и изменение упругого перемещения во времени при выхаживании подчиняются экспоненциальному закону, рис. 5,б. Величина $\bar{\delta}$ изменяется по нелинейному закону.

Скорость радиальной подачи V_1, определяемая зависимостью (25), на первом переходе обработки будет равна (с учетом условия $\bar{\delta} = П$):

$$V_{1_0} = \frac{П}{B}. \tag{28}$$

На последнем переходе обработки (с учетом условия $П = \delta$):

$$V_0 = \frac{\delta}{B}. \tag{29}$$

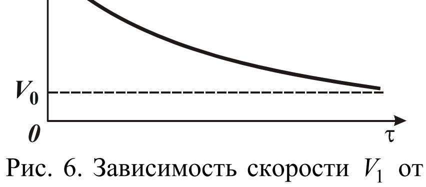

Рис. 6. Зависимость скорости V_1 от времени обработки τ.

Примерный характер изменения скорости радиальной подачи V_1 с течением времени обработки показан на рис. 6. Если в первом приближении принять линейный характер изменения скорости V_1 во времени, то средняя скорость V_{cp} определится

$$V_{cp} = \frac{V_{1_0} - V_0}{2} = \frac{П - \delta}{2 \cdot B} \approx \frac{П}{2 \cdot B}. \tag{30}$$

Соответственно основное время обработки выразится

$$\tau = \frac{\Pi}{V_{cp}} = 2 \cdot B \ . \qquad (31)$$

В итоге пришли к аналогичному результату, полученному в предыдущем параграфе и описываемому зависимостью (19).

Необходимо отметить, что решение, описываемое зависимостью (31), является более общим по сравнению с решением, описываемым зависимостью (19). Это связано с тем, что, создавая начальный натяг в технологической системе, можно обеспечить уменьшение во времени как величины упругого перемещения $\overline{\delta}$, так и величины $\Delta\overline{h}$ (обусловленной температурным фактором), т.е. двух ограничений обработки одновременно.

Используя схему выхаживания, можно также обеспечить требуемую шероховатость обработки, поскольку с уменьшением скорости радиальной подачи во времени (как известно) параметр шероховатости обработки уменьшается.

Проведенный теоретический анализ справедлив для различных обрабатываемых поверхностей: плоских, цилиндрических (наружных и внутренних) и различных методов механической обработки: лезвийной и абразивной.

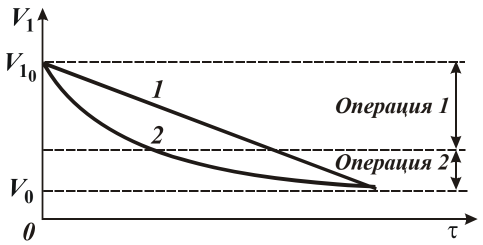

Рис. 7. Зависимости скорости V_1 от времени обработки τ : 1 – линейная зависимость; 2 – нелинейная зависимость.

Как показано выше, припуск на обработку эффективно удалять с переменной (уменьшающейся) во времени скоростью радиальной подачи. Поэтому, наиболее оптимальным вариантом обработки следует рассматривать обработку в одну операцию. Однако, в связи с необходимостью съема относительно больших припусков, как правило, технологических возможностей режущего инструмента не достаточно для обеспечения высокопроизводительного съема припуска и выполнения высоких требований по качеству и точности обрабатываемых поверхностей. В этом случае целесообразно обработку производить в две и более операции. Как показано на рис. 7, на первой операции обеспечивается съем основной части припуска с высокой производительностью обработки. На второй операции формируются параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей с меньшей производительностью обработки. При этом наибольший эффект будет достигаться при условии изменения (уменьшения) во времени скорости радиальной подачи (скорости съема припуска).

Литература

1. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999.- 450 с.
2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.