

УДК 621.9.01

В.Д. Дмитриенко, И.П. Хавина

Харьковский национальный технический университет «ХПИ»

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЯМИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Показана постановка задачи оптимального управления операцией лезвийной обработки оптических полимеров за счет минимизации функции приведенной операционной себестоимости путем варьирования переменными операционными технологическими параметрами: подачей, скоростью и глубиной резания с учетом технологических и эксплуатационных ограничений.

оптимальное управление, процесс лезвийной обработки, оптические полимеры, приведенные затраты, переменные операционные параметры, ограничения

Введение

Постановка проблемы. Оптические полимеры находят широкое применение при создании детекторов для нового поколения ускорителей элементарных частиц, изделий оптико-волоконной связи, диагностической медицинской аппаратуры, солнечных конверторов, радиационных дозиметров и т.д. Поэтому актуальным становится вопрос об обеспечении высоких эксплуатационных показателей изделий и экономичности производства за счет оптимального управления процессом изготовления изделий из оптических полимеров [1].

В данной работе рассмотрена постановка задачи оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров, которая состоит в определении оптимальных переменных режимных параметров операции (скорости – v , подачи – s и глубины резания – t) с позиции некоторого критерия оптимальности [2].

Анализ литературы. Наибольшее распространение в задачах технологической оптимизации получили экономические и технико-экономические критерии в виде максимальной производительности (минимального штучного времени) и минимальной себестоимости операции [2, 3]. В отдельных случаях используется компромиссная функция, учитывающая эти критерии одновременно. В работе [3] представлена постановка задачи минимизации приведенных затрат за период стойкости инструмента (себестоимости удаления единицы объема материала). При этом оптимальные операционные параметры s , v , t за период стойкости остаются постоянными и практически определяются технологическими возможностями изношенного инструмента.

Целью статьи является постановка задачи оптимального управления операцией лезвийной обработки оптических полимеров за счет минимизации функции приведенной себестоимости при оптимальном износе инструмента путем варьирования изме-

няющихся за период стойкости инструмента операционных технологических параметров: подачи s , скорости резания v и глубины обработки t с учетом технологических и эксплуатационных ограничений.

Результаты исследований

Дополнительный эффект от оптимального управления операциями технологического процесса лезвийной обработки оптических полимеров может быть достигнут за счет обработки с переменными операционными параметрами, т.е. изменяющимися за период стойкости по оптимальному закону. При изменяющихся во времени операционных параметрах (управлениях) $s(\tau)$, $v(\tau)$, $t(\tau)$ процесс лезвийной обработки оптического материала (процесс резания) описывается системой уравнений

$$\frac{dV}{d\tau} = svt; \quad \frac{dh_3}{d\tau} = F(h_3, s, v, t) \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$V(0) = 0, \quad V(T) = V_0, \quad h_3(0) = 0, \quad h_3(T) = h_{3к}, \quad (2)$$

где V – объем снимаемого материала; h_3 – величина износа инструмента в момент времени τ , изменяющегося в интервале $[0, T]$; $F(h_3, s, v, t)$ – функция скорости износа инструмента; $T = T(s, v, t)$ – период стойкости инструмента (время достижения максимального допустимого износа $h_{3к}$), $V_0 = \int_0^T s(\tau)v(\tau)t(\tau)d\tau$ – объем материала,

снимаемого за период стойкости инструмента.

При этом должны выполняться ограничения на управления $s_2 \leq s \leq s_1$, $v_2 \leq v \leq v_1$, $t_2 \leq t \leq t_1$, а также ряд технологических и эксплуатационных ограничений.

1. По шероховатости поверхности R_a , которое представляет требование обеспечения уровня среднеарифметического отклонения профиля обработанной поверхности: $C_R R_a(s, v, t) \leq K_{Ra}$, где

C_R – коэффициент влияния износа инструмента на шероховатость поверхности; K_{Ra} – максимально допустимая шероховатость.

2. По величине коэффициента внутреннего отражения обработанной поверхности R_B , которое задается в виде требования: $R_B(R_a) \geq R_{B0}$, где R_{B0} – минимально допустимая величина коэффициента внутреннего отражения для соответствующей обрабатываемой поверхности.

3. По температуре резания θ : $C_\theta \theta(s, v, t) \leq \theta_0$, где C_θ – коэффициент влияния износа инструмента на температуру резания; $\theta_0 = 80 - 100$ °C – максимально допустимая температура.

4. По величине деструкции Δ_d – глубине измененного слоя обработанной поверхности изделия, которая связана с обеспечением долговечности изделия: $C_\Delta \Delta_d(s, v, t) \leq \Delta_{d0}$, где C_Δ – коэффициент влияния износа инструмента на глубину поврежденного слоя; Δ_{d0} – максимально допустимая глубина поврежденного слоя.

5. По упругому восстановлению обработанной поверхности Δ_y , которое связано с обеспечением необходимой размерной точности: $C_y \Delta_y(s, v, t) \leq \Delta_0$, где C_y – коэффициент влияния износа инструмента на упругое восстановление; Δ_0 – величина допуска для данной операции.

6. Ограничение по прочности инструмента, связанное с напряжениями, возникающими в инструменте: $C_\sigma \sigma_{\max} \leq [\sigma]$, где C_σ – коэффициент влияния износа инструмента на максимальные напряжения; σ_{\max} – максимальные напряжения, уровень которых определяется геометрией инструмента и величиной сил резания для острого инструмента; $[\sigma]$ – допустимые напряжения.

В качестве критерия оптимальности технологического процесса (целевого функционала) выбирается критерий минимальной приведенной себестоимости процесса обработки, которая вычисляется как отношение стоимости операции за весь период стойкости инструмента к объему снимаемого материала за этот же период. В этом случае величина приведенных затрат (приведенной себестоимости) примет вид [2]:

$$W = (E(T + \tau_{cm}) + И) \int_0^T s(\tau) v(\tau) t(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где E – приведенные затраты на эксплуатацию станка (без затрат на режущий инструмент) и зарплату рабочего; τ_{cm} – продолжительность простоя станка, связанного со сменой режущего инструмента; $И$ – приведенные затраты, обусловленные эксплуатацией режущего инструмента за период его стойкости, включая затраты на переточку и зарплату наладчика.

В терминах теории оптимального управления представленная задача формулируется следующим образом.

Требуется определить такие законы изменения управлений $s(\tau)$, $v(\tau)$, $t(\tau)$, которые минимизируют функционал (3) при выполнении уравнений (1) с граничными условиями (2) и удовлетворяют выше указанным ограничениям.

Зависимости, определяющие износ инструмента $h_3 = h_3(L, s, v, t)$, где L – длина пути резания; состояние обработанной поверхности – шероховатость поверхности $R_a = R_a(s, v, t)$; коэффициент внутреннего отражения $R_B = R_B(R_a)$; температуру резания $\theta = \theta(s, v, t)$; глубину измененного слоя $\Delta_d = \Delta_d(s, v, t)$; упругое восстановление обработанной поверхности $\Delta_y = \Delta_y(s, v, t)$ задаются семействами соответствующих экспериментальных кривых.

Как пример, на рис. 1 показаны кривые износа инструмента для двух различных наборов операционных параметров s, v, t . Семейство экспериментальных кривых аппроксимировалось при помощи нейронных сетей [4]. Для определения сил резания использованы обобщенные зависимости, рекомендуемые в работе [5].

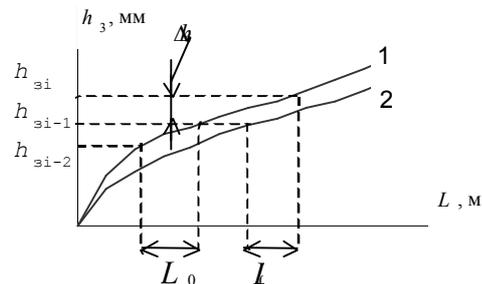


Рис. 1. Определение приращения износа инструмента на i -м этапе процесса обработки: 1 – кривая износа при значениях $s = s_{i-1}, v = v_{i-1}, t = t_{i-1}$; 2 – кривая износа при значениях $s = s_i, v = v_i, t = t_i$

Учет влияния износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности, на силы резания, на температуру резания, на глубину измененного слоя, на упругое восстановление обработанного материала осуществлялся с помощью соответствующих коэффициентов, полученных при обработке экспериментальных данных [5]. В работе [2] показано решение данной задачи оптимального управления на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина при фиксированном периоде стойкости T , простых зависимостях для скорости износа инструмента (1) и без учета ограничений. Минимизация (3) как функции параметра T позволяет определить оптимальные управления s, v, t , соответствующие оптимальному значению периода стойкости T_K .

Функционал (3) ввиду зависимости периода стойкости T от управлений и наличие значительного числа ограничений существенно усложняют процесс поиска оптимальных управлений. Решение этой задачи в аналитическом виде, даже в отсутствии ограничений возможно лишь при известных закономерностях износа инструмента. Для оптических полимеров данные о таких закономерностях отсутствуют, информация об износе инструмента представлена только некоторым семейством экспериментальных кривых. Ситуацию усложняют и ограничения, представляющие собой неявные функции управлений. В этом случае единственно возможный вариант решения задачи – это численное решение во времени, например, реализация управлений в виде кусочно-постоянной функции. В этом случае решение задачи принимает следующий вид.

Задается длина критического пути резания L_k , которому соответствует некоторая величина предельного износа $h_{зк}$. Выбирается длина пути резания $L_0 = L_k / N$, в пределах которой за период времени $\Delta\tau_i = L_0 / v_i$ $i = 1, 2, \dots, N$ подача s_i , скорость резания v_i и глубина t_i выдерживаются постоянными. Суммарное операционное время до предельного износа $h_{зк}$ представляет собой период стойкости инструмента

$$\sum_{i=1}^N \Delta\tau_i = T \text{ или } L_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} = T, \quad (4)$$

а объем материала, снимаемый за период стойкости, инструмента определяется выражением

$$V_0 = L_0 \sum_{i=1}^N s_i t_i. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) функционал (3) преобразуется в целевую функцию, которая зависит от набора $3N$ варьируемых переменных

$$W = \left(E \left(L_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} + \tau_{см} \right) + И \right) / \left(L_0 \sum_{i=1}^N s_i t_i \right). \quad (6)$$

Зависимость для износа (1) преобразуется к дискретному аналогу, введением для скорости износа кусочной аппроксимации за период времени $\Delta\tau_i$. В этом случае величина накопленного износа после i -го операционного этапа имеет вид:

$$h_{zi} = h_{zi-1} + \Delta h_{zi}, \quad i = 1, 2, \dots, N;$$

$$h_{z0} = 0; \quad h_{zN} = h_{зк}.$$

Приращение износа инструмента Δh_{zi} на i -м операционном этапе с учетом ранее накопленного износа h_{zi-1} определяется по экспериментальной кривой износа, соответствующей режиму работы с $s = s_i$; $v = v_i$; $t = t_i$ (рис. 1).

На всех этапах операции должны выполняться вышеперечисленные ограничения. Параметры состояния определяются по экспериментальным дан-

ным через s_i , v_i , t_i . Коэффициенты, учитывающие износ:

$$C_{Ri} = C_{Ri}(s_j, v_j, t_j); \quad C_{\theta i} = C_{\theta i}(s_j, v_j, t_j);$$

$$C_{\Delta i} = C_{\Delta i}(s_j, v_j, t_j); \quad C_{yi} = C_{yi}(s_j, v_j, t_j);$$

$$C_{pi} = C_{pi}(s_j, v_j, t_j), \quad j = 1, 2, \dots, i-1,$$

определяются в зависимости от величины текущего износа инструмента $h_{zi-1} = h_{zi-1}(s_j, v_j, t_j)$. На варьируемое управление накладываются ограничения $s_2 \leq s_1$, $v_2 \leq v_1$, $t_2 \leq t_1$.

Т.к. величина оптимального критического пути резания L_k известна приблизительно, то процедура численного решения задачи такова.

1. Для некоторого значения критического пути резания путем варьирования кусочно-постоянными управлениями определяется минимум функции (6) при выполнении ограничений, что позволяет получить локально-оптимальное управление $s_{i\text{опт}}$, $v_{i\text{опт}}$, $t_{i\text{опт}}$ $i = 1, 2, \dots, N$.

2. Варьированием критического пути резания определяется минимум функции W по L_k , что позволяет получить глобально оптимальное решение и соответствующее ему управления s_i^* , v_i^* , t_i^* .

Выводы

Задача оптимального управления процессами лезвийной обработки оптических полимеров сведена к задаче нелинейного программирования в виде минимизации приведенной операционной себестоимости путем варьирования кусочно-постоянного управления с учетом износа инструмента и технологических и эксплуатационных ограничений.

Список литературы

1. Везуб Н.В., Хавина И.П., Чернышев А.А. Применение методов искусственного интеллекта для выбора структуры технологического процесса лезвийной обработки // Вестник НТУ "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2005. – № 24. – С. 155-162.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
3. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
4. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.
5. Литвиненко М.В. Повышение функциональных и эксплуатационных характеристик оптических полистирольных изделий, полученных фрезерованием. Дисс...канд. техн. наук: 05.03.01. – Х., 2004. – 178 с.

Поступила в редколлегию 7.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Харьковский национальный технический университет «ХПИ», Харьков.