

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

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

5. По упругому восстановлению обработанной поверхности  $\Delta_y$ , 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;  $\Delta_0$  – величина допуска для данной операции.

6. Ограничение по прочности инструмента, связанное с напряжениями, возникающими в инструменте:  $C_\sigma \sigma_{\max} \leq [\sigma]$ , где  $C_\sigma$  – коэффициент влияния износа инструмента на максимальные напряжения;  $\sigma_{\max}$  – 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;  $\tau_{cm}$  – 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].

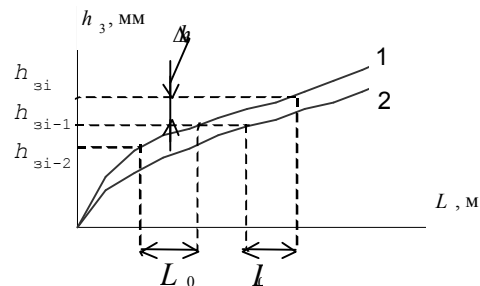


Рис. 1. Определение приращения износа инструмента на  $i$ -м этапе процесса обработки: 1 – кривая износа при значениях  $s = s_{i-1}, v = v_{i-1}, t = t_{i-1}$ ; 2 – кривая износа при значениях  $s = s_i, v = v_i, t = t_i$

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  $\Delta h_{zi}$  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.