

УДК 621.9.01

И.П. Хавина

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

На примере изготовления изделия "Tile" рассмотрено численное решение задачи управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров при минимизации функции приведенной операционной себестоимости путем варьирования подачи и скорости резания с учетом технологических и эксплуатационных ограничений. Полученные результаты показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

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

Введение

Постановка проблемы. Изделия из оптических полимеров широко применяются в современной технике и научных исследованиях. При этом вопросы технологии их изготовления разработаны еще не в полной мере. В частности, практически не нашли отражения постановка и решение задачи оптимального управления технологическими операциями процессов лезвийной обработки оптических полимеров.

В данной работе рассмотрен численный метод решения задачи оптимального управления технологическими операциями лезвийной обработки оптических полимеров и проведен расчет оптимального управления в варианте задачи параметрической оптимизации, которая состоит в определении не изменяющихся за период стойкости инструмента управлений: подачи s и скорости резания v , обеспечивающих минимальную операционную себестоимость [1].

Анализ литературы. В работах [2 – 5] рассмотрены различные варианты постановки задач оптимального управления операциями лезвийной обработки. В работе [6] представлена постановка и общий метод решения задачи оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров путем сведения к задаче нелинейного программирования, заключающейся в минимизации приведенной операционной себестоимости за счет варьирования кусочно-постоянных управлений с учетом износа инструмента, технологических и эксплуатационных ограничений.

Целью работы является конкретная реализация общего метода решения задачи оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров на примере изготовления изделия "Tile" и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

Результаты исследований

Рассмотрим задачу оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров.

Пусть задается длина критического пути резания L_k , которому соответствует некоторая величина предельного износа обрабатываемого инструмента $h_{зк}$. Задается некоторое достаточно большое целое число N и определяется длина пути резания $L_0 = L_k / N$, в пределах которой за период времени $\Delta t_i = L_0 / v_i$, $i = 1, 2, \dots, N$ 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 T

$$\sum_{i=1}^N \Delta t_i = T \quad \text{или} \quad L_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} = T,$$

а объем материала V_0 , снимаемый за период стойкости, инструмента определяется выражением

$$V_0 = L_0 \sum_{i=1}^N s_i t_i.$$

Целевая функция приведенной себестоимости представляет собой функцию $3N$ варьируемых переменных и имеет вид [3]

$$W = \frac{E(L_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} + \tau_{см}) + И}{L_0 \sum_{i=1}^N s_i v_i}, \quad (1)$$

где E – приведенные затраты на эксплуатацию станка (без затрат на режущий инструмент) и зарплату рабочего; $\tau_{см}$ – продолжительность простоя станка, связанного со сменой режущего инструмента; $И$ – приведенные затраты, обусловленные экс-

плутацией режущего инструмента за период его стойкости, включая затраты на переточку и зарплату наладчика.

Величина накопленного износа после i -го операционного этапа имеет вид

$$h_{3i} = h_{3i-1} + \Delta h_{3i}, \quad i = 1, 2, \dots, N;$$

$$h_{30} = 0; \quad h_{3N} = h_{3к}.$$

Приращение износа инструмента Δh_{3i} на i -м операционном этапе с учетом ранее накопленного износа h_{3i-1} определяется по экспериментальной кривой износа, соответствующей режиму работы с $s = s_i$, $v = v_i$, $t = t_i$ [6].

На i -м этапе управления операцией ($i = 1, 2, \dots, N$) должны выполняться технологические и эксплуатационные ограничения.

По шероховатости поверхности R_a . Это ограничение требует обеспечения уровня среднеарифметического отклонения профиля обработанной поверхности

$$G_{1i} = K_{Ra} - C_{Ri} R_a(s_i, v_i, t_i) \geq 0, \quad (2)$$

где K_{Ra} – величина максимальной допускаемой шероховатости; C_{Ri} – коэффициент влияния износа инструмента на шероховатость поверхности.

По температуре резания θ

$$G_{2i} = \theta_0 - C_{\theta i} \theta(s_i, v_i, t_i) \geq 0, \quad (3)$$

где θ_0 – максимально допускаемая температура резания для данного полимера; C_{θ} – коэффициент влияния износа инструмента на температуру резания.

По величине коэффициента внутреннего отражения обработанной поверхности R_B , зависящего от шероховатости и задаваемого в виде требования

$$G_{3i} = R_B(R_a(s_i, v_i, t_i)) - R_{B0} \geq 0, \quad (4)$$

где R_{B0} – минимально допускаемая величина коэффициента внутреннего отражения для соответствующей обрабатываемой поверхности.

По величине деструкции Δ_d – глубине измененного слоя обработанной поверхности изделия, которая связана с обеспечением долговечности изделия

$$G_{4i} = \Delta_{d0} - C_{\Delta i} \Delta_d(s_i, v_i, t_i) \geq 0, \quad (5)$$

где Δ_{d0} – максимально допускаемая глубина поврежденного слоя; C_{Δ} – коэффициент влияния износа инструмента на глубину поврежденного слоя.

По упругому восстановлению обработанной поверхности Δ_y , которое связано с обеспечением необходимой размерной точности

$$G_{5i} = \Delta_0 - C_{yi} \Delta_y(s_i, v_i, t_i) \geq 0, \quad (6)$$

где Δ_0 – величина допуска для данной операции; C_y – коэффициент влияния износа инструмента на упругое восстановление.

Ограничение по прочности инструмента, связанное с напряжениями, возникающими в инструменте

$$G_{6i} = [\sigma] - C_{pi} \sigma_{\max}(s_i, v_i, t_i) \leq 0, \quad (7)$$

где C_{pi} – коэффициент влияния износа инструмента на максимальные напряжения; σ_{\max} – максимальные напряжения, уровень которых определяется геометрией инструмента и величиной сил резания для острого инструмента; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения.

Параметры состояния R_a , θ , R_B , Δ_d , Δ_y и σ_{\max} определяются по экспериментальным данным через s_i , v_i , t_i . Коэффициенты, учитывающие влияние износа на параметры состояния: $C_{Ri} = C_{Ri}(s_j, v_j, t_j)$, $C_{\theta i} = C_{\theta i}(s_j, v_j, t_j)$, $C_{\Delta i} = C_{\Delta i}(s_j, v_j, t_j)$, $C_{yi} = C_{yi}(s_j, v_j, t_j)$, $C_{pi} = C_{pi}(s_j, v_j, t_j)$, $j = 1, 2, \dots, i-1$, определяются в зависимости от величины текущего износа инструмента $h_{3i-1} = h_{3i-1}(s_j, v_j, t_j)$.

На варьируемое управление накладываются ограничения:

$$s_2 \leq s_i \leq s_1, \quad v_2 \leq v_i \leq v_1,$$

$$t_2 \leq t_i \leq t_1, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

Таким образом, сформулированная задача нелинейного программирования сводится к минимизации функции (1) путем варьирования $3N$ переменных s_i , v_i , t_i , $i = 1, 2, \dots, N$ при выполнении ограничений (2) – (8).

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 (1) при выполнении ограничений (2) – (8), 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 соответствующие ему управления s_i^* , v_i^* , t_i^* .

В настоящей работе для решения поставленной задачи нелинейного программирования использован метод штрафных функций [8]. С помощью этого метода исходная задача преобразуется в последовательность задач безусловной минимизации в рамках

ограничений на варьируемые переменные (8). Конкретная реализация метода определяется видом штрафной функции и правилами, по которым производится пересчет величины штрафующих параметров по окончании каждого цикла безусловной минимизации.

При преобразовании задачи для учета ограничений вида (2) – (7) используются различные типы штрафов [8]. В настоящей работе использовался штраф типа квадрата срезки, который удобен тем, что преобразованная целевая функция определена и непрерывна всюду, и процесс оптимизации может включать как допустимые, так и недопустимые точки пространства варьируемых переменных.

При применении штрафной функции типа квадрата срезки целевая функция (1) преобразуется к виду

$$W^* = W + R \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^N (G_{ki}(s_i, v_i, t_i))^2, \quad (9)$$

где $R > 0$ – штрафующий множитель,

$$G_{ki} = \begin{cases} G_{ki}, & \text{если } G_{ki} \leq 0; \\ 0, & \text{если } G_{ki} > 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, 6; \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

На каждом этапе решается подзадача безусловной минимизации функции (9) с условиями (10) в рамках ограничений на варьируемые переменные (8) и с заданным значением параметра R . После решения очередной подзадачи безусловной минимизации значение R увеличивается и вновь решается задача минимизации до тех пор, пока не будет выполнено требование по точности определения минимума целевой функции W .

Ввиду гладкости целевой функции и ограничений, и наличия только трех управлений успешное решение данной задачи возможно при помощи самых простых методов поиска экстремума функции многих переменных, например, методом покоординатного спуска. В настоящей работе задача безусловной минимизации функции (9) с условиями (10) в рамках ограничений (8) решалась методом покоординатного спуска в комбинации с методом золотого сечения [9].

Часто применяемая для лезвийной обработки параметрическая оптимизация режима резания [1] фактически определяет управление технологической операцией при оптимальных постоянных за период стойкости инструмента значениях операционных параметров s^* , v^* , t^* и представляет собой частный случай задачи оптимального управления при $L_0 = L_k$. При этом W определяется за один вычислительный цикл ($N = 1$) и представляет собой решение задачи нелинейного программирования для заданной величины предельного износа h_{3k} , которо-

му соответствует длина пути резания L_k .

Технологические операции обработки заготовок при изготовлении изделий полимерной оптики, как правило, реализуются за один проход инструмента с фиксированной глубиной резания t . В такой постановке задача оптимального управления процессом лезвийной обработки легко может быть обобщена на случай $t = t_0 = \text{const}$.

Создан комплекс программ, реализующих данный метод решения поставленной задачи.

В качестве примера рассмотрено оптимальное управление процессом фрезерования торцевой поверхности изделия “Tile” (рис. 1), реализуемое за период стойкости инструмента в режиме параметрической оптимизации с постоянными значениями оптимальных операционных параметров s^* и v^* .

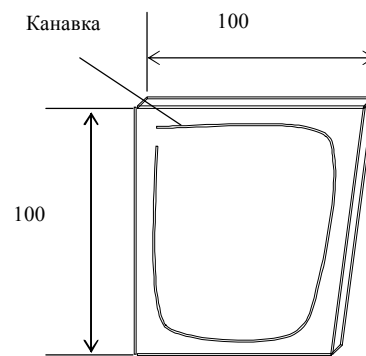


Рис. 1. Изделие “Tile”

Изделие “Tile” представляет собой пластину с канавкой под световод. Торцевая поверхность образуется при вырезании изделия из листовой заготовки способом концевой фрезерования. Вследствие этого глубина фрезерования t в процессе выполнения операции постоянна и равна половине диаметра фрезы ($t = D/2$). Процесс концевой фрезерования оптимизируется при следующих входных параметрах: материал – полистирол, инструмент – однозубая цилиндрическая фреза диаметром 3 мм, глубина фрезерования $t = 1,5$ мм, ширина фрезерования равна толщине пластины ($b = 4$ мм), материал режущего клина ВК8, передний угол инструмента $\gamma = 15^\circ$, охлаждающая среда – воздух. В табл. 1 приведены данные для решения задачи оптимизации.

Коэффициенты влияния износа на параметры состояния определялись по экспериментальным данным из работы [7].

При решении задачи учитывались ограничения (2) – (6). Ограничение (7) не учитывалось ввиду незначительных напряжений, возникающих в инструменте при выполнении данной операции.

Функциональные зависимости (уравнения состояния), связывающие варьируемые управления и

параметры состояния R_a , θ , Δ_d , Δ_y определяются при помощи базы знаний, сформированной на основе экспериментальных зависимостей [7, 10 – 13] и моделирующей состояние процесса концевой фрезерования.

Таблица 1

№	Параметры	Значение
1	Затраты на эксплуатацию станка E , грн/час	72,2
2	Затраты на эксплуатацию инструмента за период стойкости I , грн/час	13,8
3	Простой станка, связанный со сменой инструмента $\tau_{см}$, мин	1
4	Максимальная допустимая шероховатость K_{Ra} , мкм	1
5	Допускаемая температура θ_0 , °C	100
6	Минимальная величина коэффициента внутреннего отражения R_{B0}	0,23
7	Максимально глубина поврежденного слоя Δ_{d0} , мкм	0,05
8	Величина допуска для операции Δ_0 , мкм	100

Так, зависимости, представленные на рис. 2, отображающей влияние варьируемых управлений s и v на шероховатость обработанной поверхности. Кривая 1 получена при $v = 30$ м/мин; 2 при $v = 50$ м/мин и 3 при $v = 100$ м/мин.

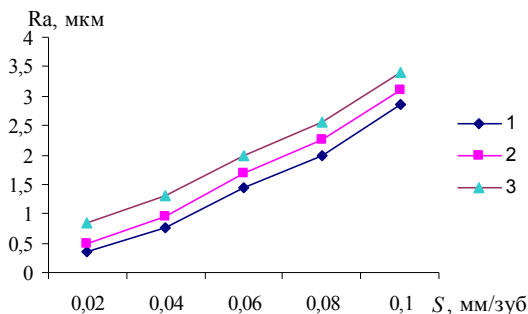


Рис. 2. Зависимость шероховатости от подачи

Графики на рис. 3 отражают зависимость температуры резания от управлений s и v при обработке полистирола острой фрезой с режущим клином из ВК8. Кривая 1 соответствует $s = 0,01$ мм/об; 2 – $s = 0,03$ мм/об; 3 – $s = 0,05$ мм/об.

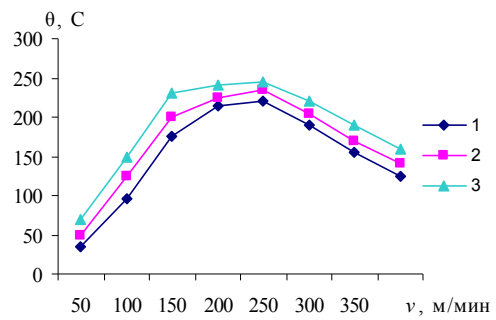


Рис. 3. Зависимость температуры резания от скорости $t = 1,5$ мм.

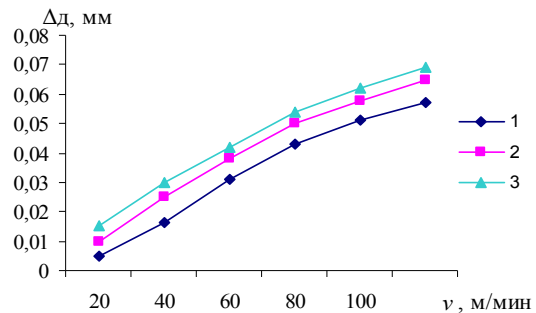


Рис. 4. Зависимость глубины измененного слоя от скорости резания

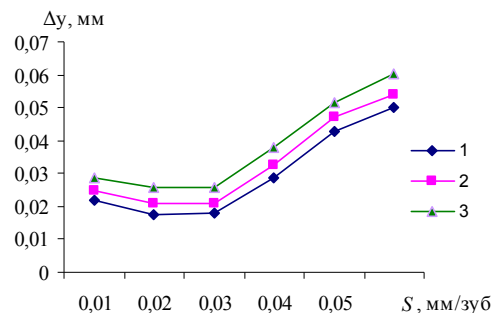


Рис. 5. Зависимость упругого восстановления от подачи

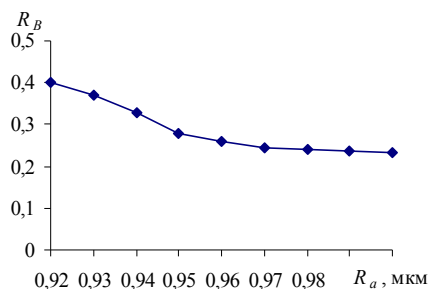
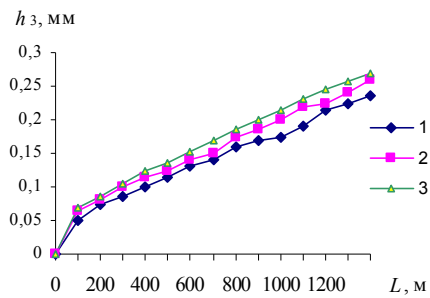


Рис. 6. Зависимость коэффициента внутреннего отражения от шероховатости

В расчетах использовались также экспериментальные зависимости, описывающие влияние подачи и скорости резания при фрезеровании заготовки из полистирола острым инструментом на глубину измененного поверхностного слоя (рис. 4) и упругое восстановление обрабатываемой торцевой поверхности [7] (рис. 5). Использовалась также зависимость коэффициента внутреннего отражения от шероховатости торцевой поверхности изделия из работы [7] (рис. 6).

Величина износа инструмента по задней поверхности в зависимости от пути резания и варьируемых управлений определялась при помощи семейства экспериментальных кривых, полученных при фрезеровании торцевой поверхности изделия “Tile” [13] в соответствии с методикой, приведенной в работе [6] (рис. 7).

Рис. 7. Зависимость износа инструмента h_3 от длины пути резания L

Для определения параметров состояния при любом сочетании варьируемых управлений применялась нейронная сеть перцептрон с двумя скрытыми слоями, осуществляющей хранение информации и аппроксимацию соответствующих экспериментальных зависимостей.

Варьирование управлений производилось в диапазонах $0,005 \text{ мм/зуб} \leq s_i \leq 0,035 \text{ мм/зуб}$, и $10,0 \text{ м/мин} \leq v_i \leq 50,0 \text{ м/мин}$.

Проведенные расчеты позволили получить операционные параметры оптимального управления процессом фрезерования торцевой поверхности изделия "Tile" и соответствующую им минимальную операционную себестоимость. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета

№	Параметры	Величина
1	Оптимальная подача s^* , мм/зуб	0,0275
2	Оптимальная скорость v^* , м/мин	32,0
3	Минимальная приведенная себестоимость W , грн/см ³	3,25
4	Минимальная операционная себестоимость на изделие $W_{\text{изд}}$, грн/шт	7,8
5	Оптимальная критическая длина пути резания L_k , м	1940
6	Критический износ h_{sk} , мм	0,2
7	Экспериментальные данные из [7] подача s^* , мм/зуб	0,026
8	Экспериментальные данные из [7] скорость v^* , м/мин	30,0

Численное решение задачи управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров при минимизации функции приведенной операционной себестоимости продемонстрировало работоспособность программного обеспечения, правильность предложенного метода решения и хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Выводы

1. Рассмотрен метод и создано программное обеспечение для численного решения задачи опти-

мального управления технологическими операциями лезвийной обработки оптических полимеров. Представлено практическое решение этой задачи на примере фрезерования торцевой поверхности изделия "Tile".

2. Полученные результаты показали работоспособность предложенного подхода, что подтверждается совпадением с данными экспериментов.

Список литературы

1. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
3. Феофанов А.Н., Иевлев И.В. О методах многокритериальной оптимизации в связи с их применением к задаче построения гибких автоматических линий // Стружка. "Роспечать". – 2006. – 3 (14). – С. 20-23
4. Сикора Е. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 226 с.
5. Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
6. Дмитриенко В.Д., Хавина И.П. Постановка задачи оптимального управления операцией лезвийной обработки оптических полимеров // Системы обработки информации. – Х.: ХУ ПС, 2007. – Вып. 2 (60). – С. 20-22.
7. Литвиненко М. В. Повышение функциональных и эксплуатационных характеристик оптических полистирольных изделий, полученных фрезерованием: Дисс...канд. техн. наук: 05.03.01. – Х., 2004. – 178 с.
8. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгедел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 349 с.
9. Мудров А. Е. Численные методы на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП "Раско", 1991. – 272 с.
10. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении / Под ред. А.И. Грабченко. – Х., 1999. – С. 195-197.
11. Верезуб Н.В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композиций: Дисс...д-ра. техн. наук: 05.03.01 – Х., 1995. – 300 с.
12. Особенности формирования микрогеометрии крупногабаритных оптических полимеров / Н.В. Верезуб, М.В. Литвиненко, А.С. Мазманишвили, В.Г. Сенчишин, Я. Кундрак // Весник НТУ "КПИ": Сер. Машиностроение. – К.: НТУ "КПИ", 2001. – Вып. 41. – С. 38-47.
13. Технология производства изделий типа "Tile" / Н.В. Верезуб, М.В. Литвиненко, А.А. Чернышев, В.Г. Сенчишин // Резание и инструмент в технологических системах. – Х.: НТУ "ХПИ", 2002. – Вып. 63. – С. 9-22.

Поступила в редколлегию 27.07.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет "ХПИ", Харьков.