

Н.В.Верезуб д-р техн.наук, В.Д.Дмитриенко д-р техн.наук, И.П.Хавина  
Национальный технический университет “ХПИ” г.Харьков, Украина

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОПЕРАЦИЯМИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

---

*На прикладі фрезерування поверхні торця виробу “Tile” розглянуто чисельне рішення задачі оптимального управління операціями лезвийної обробки оптичних полімерів при мінімізації функції приведеної операційної собівартості шляхом варіювання швидкості різання та подачі з урахуванням технологічних і експлуатаційних обмежень. Тестування показало працездатність створеного програмного комплексу. Реалізація процесів обробки при умовах корегування швидкості різання і подачі, що оптимально змінюються, дозволяє понизити операційну собівартість, в порівнянні з режимом обробки з оптимальними постійними швидкістю різання і подачею, та збільшити кількість виробів, що обробляються до заміни інструменту.*

*On the example of milling of butt end surface of good of “Tile” the numeral decision of task of optimum management the operations of cutting processes of optical polymers is considered during minimization of function of the resulted operating prime price by varying the speed of cutting and serve taking into account technological and operating limitations. Testing showed the capacity of the created programmatic complex. Realization of processes of treatment at optimum changing cutting speed and serve allows to reduce an operating prime price, as compared to the mode of treatment with optimum permanent cutting speed and serve, and to multiply the amount of wares, processed to replacement of instrument.*

---

**Постановка задачі.** Изделия из оптических сцинтилляционных полимеров нашли широкое применение в современной технике и научных исследованиях. При этом вопросы технологии их изготовления, в частности процессы механической обработки разработаны еще не в полной мере. Практически не нашли отражения постановка и решение задачи оптимального управления технологическими операциями лезвийной обработки оптических полимеров.

В работе рассмотрен численный метод решения задачи оптимального управления технологическими операциями лезвийной обработки оптических полимеров, заключающийся в определении оптимальных закономерностей изменения варьируемых операционных параметров – управлений за период стойкости инструмента. В качестве варьируемых управлений применялись переменные скорость резания  $v$ , подача  $s$  и глубина обработки  $t$ , обеспечивающие с учетом износа инструмента минимальную удельную операционную себестоимость [1]. Проведен расчет оптимальных управлений для операции фрезерования торцевой поверхности полимерного изделия “Tile”.

**Анализ літератури.** В работах [2 – 5] рассмотрены различные варианты постановки задач оптимального управления операциями лезвийной обработки. В работе [6] предложена постановка и 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 скорости и подачи с учетом износа инструмента, технологических и эксплуатационных ограничений.

**Целью работы** является реализация предложенного метода решения задачи оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров на примере процесса фрезерования торцевой поверхности изделия “Tile”.

**Результаты исследований.** Задача оптимального управления операциями лезвийной обработки оптических полимеров заключается в следующем [6].

Задана длина критического пути резания  $L_{\hat{e}}$ , которой соответствует некоторая величина допустимого износа режущего инструмента  $h_{\hat{c}\hat{e}}$ . Задано также некоторое достаточно большое целое число  $N$  и длина пути резания  $L_0 = L_{\hat{e}} / N$ , в пределах которой за период времени  $\Delta\tau_i = L_0 / v_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  скорость резания  $v_i$ , подача  $s_i$  и глубина  $t_i$  выдерживаются постоянными. Суммарное операционное время до достижения допустимого износа  $h_{\hat{c}\hat{e}}$  представляет собой величину периода стойкости инструмента  $T$

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

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  $3 \cdot N$  варьируемых переменных ( $v_i, s_i, t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ) и имеет вид [3]

$$W = \frac{E(L_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{v_i} + \tau_{\text{нн}}) + \dot{E}}{L_0 \sum_{i=1}^N v_i s_i t_i}, \quad (1)$$

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

Величина суммарного износа  $h_{\hat{c}i}$  после  $i$ -го операционного этапа управления имеет вид:

$$h_{\hat{c}i} = h_{\hat{c}i-1} + \Delta h_{\hat{c}i}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad h_{\hat{c}0} = 0, \quad h_{\hat{c}N} = h_{\hat{c}\hat{e}}.$$

Приращение износа инструмента  $\Delta h_{\hat{c}i}$  на  $i$ -м операционном этапе с учетом ранее накопленного износа  $h_{\hat{c}i-1}$  определяется по экспериментальной кривой износа,

соответствующей режиму работы с  $v = v_i$ ,  $s = s_i$ ,  $t = t_i$  [6, 7].

На любом этапе управления технологической операцией обработки полимерных материалов должны выполняться следующие технологические и эксплуатационные ограничения.

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

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

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

*По температуре резания  $\theta$*

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

где  $\theta_0$  – максимально допускаемая температура резания для данного полимера;  $C_{\theta}$  – коэффициент влияния износа инструмента на температуру резания.

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

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

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

*По величине деструкции  $\Delta_{\bar{a}}$  – глубине измененного слоя обработанной поверхности изделия,* которая связана с обеспечением долговечности изделия

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

где  $\Delta_{\bar{a}0}$  – максимально допускаемая глубина поврежденного слоя;  $C_{\Delta i}$  – коэффициент влияния износа инструмента на глубину поврежденного слоя.

*По упругому восстановлению обработанной поверхности  $\Delta_y$ ,* величина которого обеспечивает необходимую размерную точность поверхности

$$G_{5i} = \Delta_0 - \tilde{N}_{\delta i} \Delta_y(v_i, s_i, t_i) \geq 0, \quad (6)$$

где  $\Delta_0$  – величина допуска для данной операции;  $C_{\delta}$  – коэффициент влияния износа инструмента на упругое восстановление.

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

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

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

Параметры состояния  $R_a$ ,  $\theta$ ,  $R_B$ ,  $\Delta_{\bar{a}}$ ,  $\Delta_y$  и  $\sigma_{\max}$  определяются по экспериментальным данным через  $v_i$ ,  $s_i$ ,  $t_i$ . Коэффициенты, учитывающие влияние износа на параметры состояния  $C_{Ri} = C_{Ri}(v_j, s_j, t_j)$ ,  $C_{\theta i} = C_{\theta i}(v_j, s_j, t_j)$ ,  $C_{\Delta i} = C_{\Delta i}(v_j, s_j, t_j)$ ,  $C_{\sigma i} = C_{\sigma i}(v_j, s_j, t_j)$ ,  $C_{pi} = C_{pi}(v_j, s_j, t_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, i-1$ , определяются в зависимости от величины текущего износа инструмента  $h_{\zeta i-1} = h_{\zeta i-1}(v_j, s_j, t_j)$  по экспериментальным данным [7].

На варьируемое управление накладываются ограничения:

$$v_2 \leq v_i \leq v_1, s_2 \leq s_i \leq s_1, t_2 \leq t_i \leq t_1, i = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

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

Так как величина оптимального критического пути резания  $L_{\hat{e}}$  известна приблизительно, то процедура численного решения задачи следующая.

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  $v_{i\hat{0}}$ ,  $s_{i\hat{0}}$ ,  $t_{i\hat{0}}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

2. Варьированием критического пути резания определяется минимум функции  $W$  по значению  $L_{\hat{e}}$ , что позволяет получить глобально оптимальное решение и соответствующие ему управления  $v_i^*$ ,  $s_i^*$ ,  $t_i^*$ .

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). Реализация метода определяется видом штрафной функции и правилами, по которым производится пересчет величины штрафующих параметров по окончании каждого цикла безусловной минимизации.

При преобразовании задачи нелинейного программирования для учета ограничений вида (2) – (7) используются различные типы функций штрафов [8]. В настоящей работе используется функция штрафа типа квадрата срезки, который удобен тем, что преобразованная целевая функция определена и непрерывна всюду; 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

$$W^* = W + R \sum_{k=1}^6 \sum_{i=1}^N (G_{ki}^*(v_i, s_i, t_i))^2, \quad (9)$$

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 задача безусловной минимизации функции (9) с учетом условий (10) в рамках ограничений на варьируемые переменные (8) и заданным значением параметра  $R$ . После решения очередной задачи безусловной минимизации  $R$  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 (1) и ограничений 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  $v^*$ ,  $s^*$ ,  $t^*$ , и представляет собой частный случай задачи оптимального управления при  $L_0 = L_{\hat{e}}$ . При этом значение  $W$  определяется за один вычислительный цикл ( $N = 1$ ) и представляет собой решение задачи нелинейного программирования для заданной величины предельного износа  $h_{\hat{c}\hat{e}}$ , которому соответствует длина пути резания  $L_{\hat{e}}$ .

Технологические операции 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 может быть обобщена при условии  $t = t_0 = const$ .

Для расчета оптимальных операционных параметров при обработке изделий из оптических полимеров создан программный комплекс “Optic\_optim”, в котором для определения параметров состояния при любом сочетании варьируемых управлений применялась программно реализованная нейронная сеть персептрон с одним скрытым слоем, осуществляющей хранение информации и аппроксимацию соответствующих экспериментальных зависимостей.

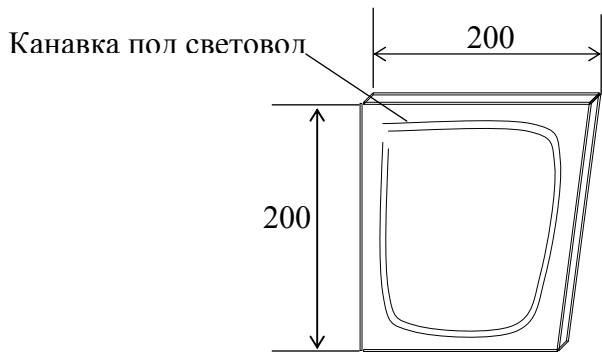


Рис. 1. Изделие “Tile” (общий вид).

В качестве примера рассмотрено оптимальное управление процессом фрезерования торцевой поверхности изделия “Tile” (рис. 1).

Изделие “Tile” представляет собой полимерную пластину размером 200x200 мм постоянной толщины  $t$  с канавкой под световод. Торцовая поверхность формируется вырезанием из листовой заготовки способом концевой фрезерования.

Ширина обрабатываемой поверхности  $B$  и глубина фрезерования  $t$  ( $t = D/2$ , где  $D$  – диаметр фрезы) постоянны.

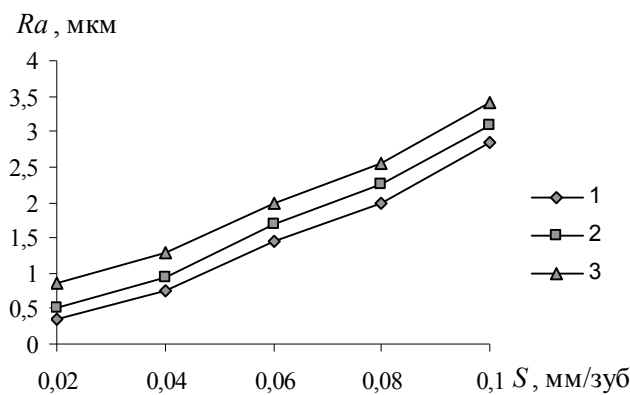


Рис. 2. Зависимость шероховатости от подачи

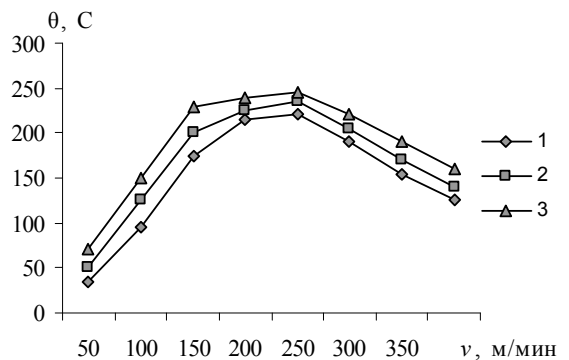


Рис. 3. Зависимость температуры резания от скорости  $t = 1,5$  мм

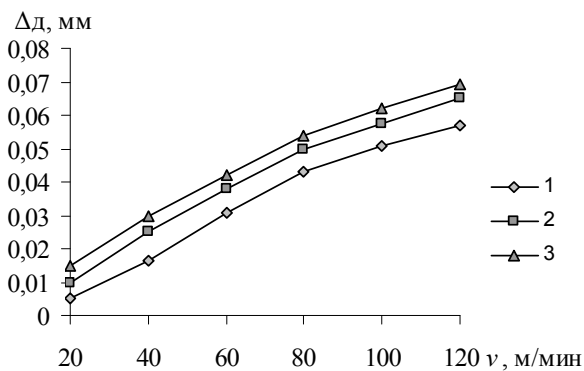


Рис. 4. Зависимость глубины измененного слоя от скорости резания.

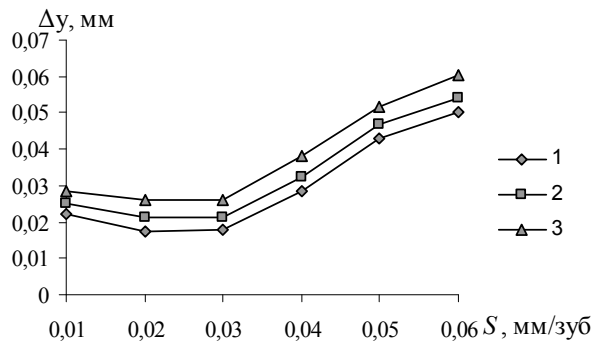


Рис. 5. Зависимость упругого восстановления от подачи.

Процесс концевой фрезерования оптимизируется при следующих входных параметрах: материал – полистирол, инструмент – однозубая цилиндрическая фреза:  $D = 3$  мм,  $t = 1,5$  мм,  $B = 4$  мм; материал режущего клина ВК8, передний угол инструмента  $\gamma = 15^\circ$ , охлаждающая среда – воздух. В табл. 1 приведены другие данные, необходимые для решения задачи оптимизации.

Исходные данные

№	Параметры	Значение
1	Затраты на эксплуатацию станка $E$ , грн/час	72,2
2	Затраты на инструмент за период стойкости $I$ , грн/час	13,8
3	Простой станка, связанный со сменой инструмента $\tau_{см}$ , мин	1,0
4	Максимальная допускаемая шероховатость $K_{Ra}$ , мкм	1,0
5	Допускаемая температура $\theta_0$ , °C	100
6	Минимальная величина коэффициента внутреннего отражения $R_{B0}$	0,23
7	Максимально глубина поврежденного слоя $\Delta_{д0}$ , мкм	50
8	Величина допуска для операции $\Delta_0$ , мкм	50
9	Суммарная длина торцевой поверхности, мм.	800

Коэффициенты влияния износа на параметры состояния процесса фрезерования 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  $R_a$ ,  $\theta$ ,  $\Delta_{\ddot{a}}$ ,  $\Delta_y$  определяются при помощи базы знаний, сформированной на основе экспериментальных зависимостей [7, 10 – 13]. Так, зависимости, представленные на рис. 2, отображают влияние варьируемых управлений  $v$  и  $s$  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. 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.

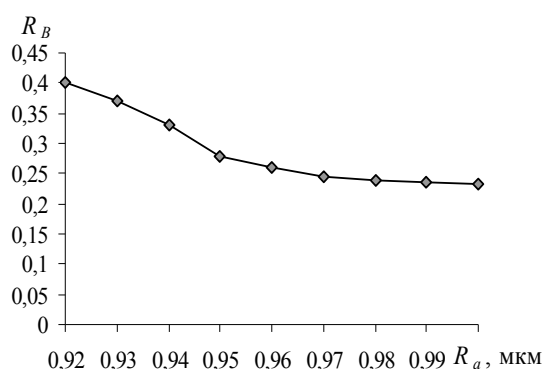


Рис. 6. Зависимость коэффициента внутреннего отражения от шероховатости

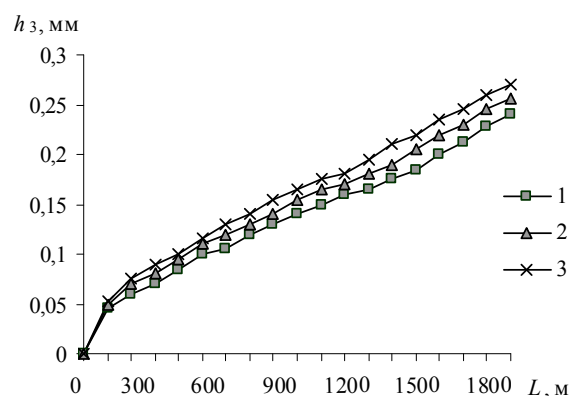


Рис. 7. Зависимость износа инструмента  $h_3$  от длины пути резания  $L$ .

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 торцовой поверхности [7] (рис. 5). Использовалась также зависимость, учитывающая влияние шероховатости на коэффициент внутреннего отражения поверхности изделия [7] (рис. 6).

Износ инструмента в зависимости от пути резания и варьируемых управлений определялся при помощи экспериментальных кривых, полученных при фрезеровании торцовой поверхности [13] в соответствии с методикой работы [6] (рис. 7).

Варьирование управлений производилось в диапазонах  $10,0 \text{ м/мин} \leq v_i \leq 60,0 \text{ м/мин}$  и  $0,04 \text{ мм/об} \leq s_i \leq 0,01 \text{ мм/об}$ .

В качестве тестовой задачи рассматривалось решение задачи параметрической оптимизации, состоящей в определении не изменяющихся за период стойкости инструмента операционных параметров – скорости резания  $v$  и подачи  $s$ , обеспечивающих минимальную операционную себестоимость.

Проведенные расчеты позволили получить оптимальные операционные параметры процесса фрезерования торцовой поверхности изделия “Tile” и соответствующую минимальную операционную себестоимость. Основные результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты параметрической оптимизации

№	Параметры	Величина
1	Оптимальная скорость резания $v^*$ , м/мин.	49,9
2	Оптимальная подача $s^*$ , мм/об.	0,03
3	Минимальная удельная себестоимость $W$ , коп/мм <sup>3</sup>	0,136
4	Минимальная операционная себестоимость на изделие $W_{\text{сцä}}$ , грн/шт.	3,26
5	Максимальный износ инструмента $h_{\text{сçé}}$ , мм.	0,03
6	Графическое решение задачи, скорость $v^{**}$ , м/мин.	42,0
7	Графическое решение задачи, подача $s^{**}$ , мм/об.	0,03

Для проверки результатов оптимизации было получено графическое решение задачи, представленное на рис. 8. На рис. 8 область допускаемых решений формируется кривыми, соответствующими активным ограничениям: 1 – ограничение по шероховатости поверхности  $R_a$  (2); 2 – ограничение по величине деструкции  $\Delta_a$  (5); 3 – ограничение по минимальной скорости резания  $v_i$  (8); 4, 5, 6 – линии уровня целевой функции  $W$  (1), 4 –  $W = 0,16 \text{ коп/мм}^3$ ; 5 –  $W = 0,14 \text{ коп/мм}^3$ ; 6 –  $W = 0,13 \text{ коп/мм}^3$ . Оптимальное решение задачи соответствует точке пересечения кривых 1, 2 и 5. Оптимальное решение ( $v^{**}$  и  $s^{**}$ ) приведено в табл. 2 и на рис. 8.

Сравнение результатов полученных расчетным путем и графического решения показывает их хорошее совпадение.

Были проведены расчеты по определению оптимального режима обработки при варьировании переменными управлениями (скоростью резания и подачей) для рассматриваемой операции (рис. 9).



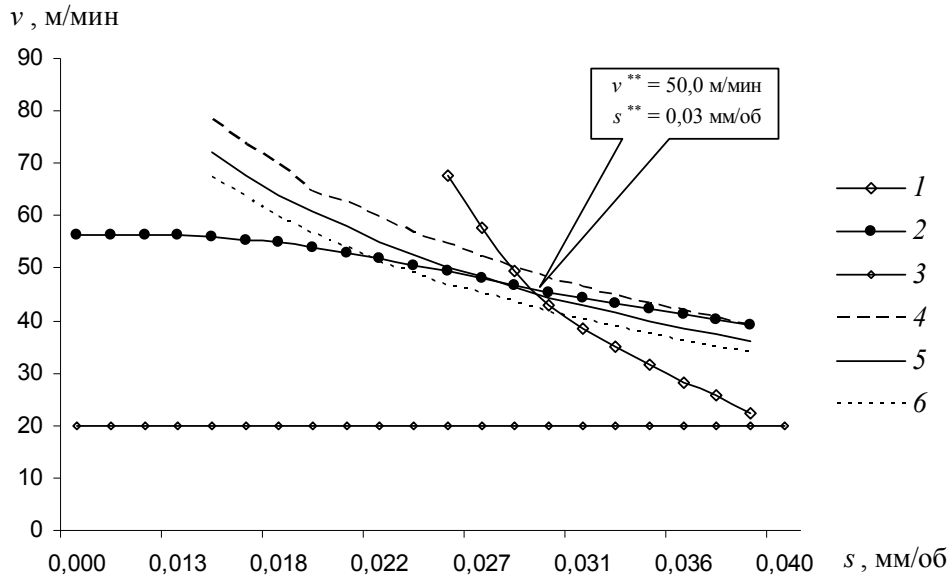


Рис. 8. Графическое решение задачи параметрической оптимизации.

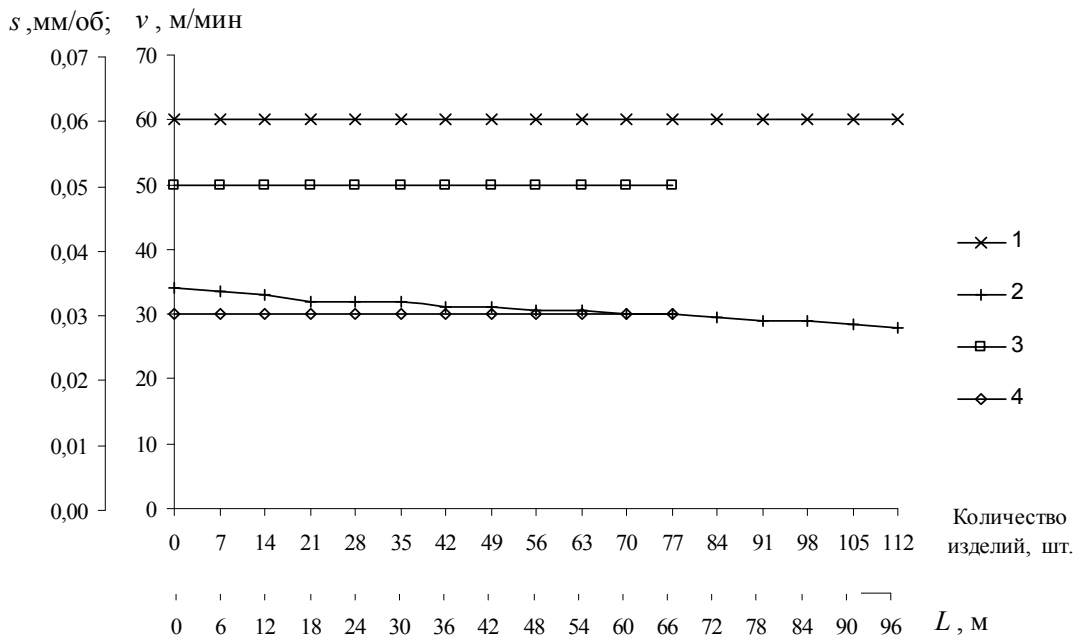


Рис. 9

Получено оптимальное изменение скорости резания, подачи и оптимальной длины пути резания до смены инструмента (длина пути, пройденного инструментом  $L = 96$  м, количество обработанных изделий “Tile” 112 шт.). Соответствующие зависимости представлены на рис. 9: 1 – оптимальное изменение скорости резания; 2 – оптимальное изменение подачи. Для сравнения на рис. 9 также представлен режим обработки с оптимальной постоянной скоростью и подачей: 3 – скорость резания; 4 – подача.

Соответствующие численные результаты оптимизации процесса фрезерования торцевой поверхности изделия “Tile” представлены в таблице 3.

Таблица 3

## Результаты оптимизации процесса фрезерования торцовой поверхности

№	Характеристики процесса	Обработка при оптимально изменяющихся во времени скорости и подаче	Оптимальная обработка при постоянных величинах скорости и подачи
1	Удельная операционная себестоимость, коп/мм <sup>3</sup>	0,114	0,136
2	Средняя стоимость обработки изделия, грн/шт.	2,74	3,26
3	Путь, пройденный инструментом до смены, м.	96	66
4	Количество обработанных изделий до смены инструмента, шт.	112	78
5	Износ инструмента, мм.	0,025	0,027

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение режима оптимального управления операционными параметрами процесса фрезерования торцовой поверхности изделия “Tile” позволяет снизить операционную себестоимость изготовления одного изделия на 16 % и увеличить количество изделий обрабатываемых до смены инструмента на 47 %.

## Выводы

1. Предложена реализация решения задачи оптимального управления технологическими параметрами лезвийной обработки оптических полимеров.
2. Практическое решение задачи оптимального управления технологическими операциями представлено на примере фрезерования торцовой поверхности изделия “Tile”.
3. Проведено тестирование результатов численного расчета путем сравнения с графическим решением задачи параметрической оптимизации.
4. Реализация процессов обработки при оптимально варьируемых параметрах - скорости резания и подачи позволяет снизить операционную себестоимость, по сравнению с режимом обработки при постоянных значениях скорости резания и подачи, на 15 – 20 % и увеличить количество изделий, обрабатываемых до смены инструмента на 40 – 50 %.

## 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 С., 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. “Системи обробки інформації” Збірник наукових праць. Харківський університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба. – 2007. Вип. 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. – Харьков, 2004. – 178 с.
8. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгедел К. Оптимизация в техники: 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. Грабченко А.И. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 1999. – С. 195– 197.
11. Вerezub Н.В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: – Дисс...д-ра. техн. наук: 05.03.01 – Харьков, 1995. – 300 с.
12. Особенности формирования микрогеометрии крупногабаритных оптических полимеров / Вerezub Н.В., Литвиненко М.В., Мазманишвили А.С., Сенчишин В.Г., Кундрак Я. // Вестник НТУ “КПИ”: Сер. Машиностроение. – Киев. – 2001. – Вып. 41. – С. 38 – 47.
13. Технология производства изделий типа “Tile” / Вerezub Н.В., Литвиненко М.В., Чернышев А.А., Сенчишин В.Г. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002. – Вып. 63. – С. 9 – 22.

**УДК 629.5.064.3**

**А. В. Малахов, д-р физ.-матем. наук,  
И. В. Ткаченко, В.В.Леонов, С.А.Карьянский  
Одесский национальный морской университет, г.Одесса, Украина**

### **ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУДОВЫХ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКАХ.**

---

*Дано опис головних принципів технології гідродинамічної очистки судових стічних та льяльних вод. Показано яким чином може бути досягнута повна очистка води від нафтових добавок. Приведені основні фізичні аналоги, щодо суперкавітаційної течії всередині замкнутого каналу, та дано опис головних результатів досліджень.*

*For fluid dynamics technology on bilge or sludge water cleaning there was done description of main principles. It was shown in what way full water purification from oil additions could be achieved. There were presented main physical analogues on supercavitating flows inside restricted channel and had been done description for main results.*

---

При эксплуатации всех типов судов возникает проблема возникновения, сбора, хранения и последующей переработки сточных технологических и льяльных вод (СЛВ). Сепарация таких вод, в состав которых в основном входят продукты нефтехимии является одной из самых актуальных. Эта проблематика напрямую связана с использованием природных ресурсов и контролем за состоянием экологии и биосферы в планетарном масштабе. Вопросы регенерации отработанных продуктов