

УДК 621.9.014.5

## ОБ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МАШИН ФИГУРНОЙ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧПУ ПРИ УСЛОВИИ НЕПОСТОЯНСТВА СКОРОСТИ РАБОЧЕГО ХОДА

<sup>1</sup>Петунин А.А., <sup>2</sup>Таваева А.Ф.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: a.a.petunin@urfu.ru;

<sup>2</sup>АО «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод имени Э.С. Яламова”», Екатеринбург, e-mail: tavaeva\_a\_f@bk.ru

В статье рассматриваются задачи оптимизации маршрутизации инструмента для машин термической и гидроабразивной резки с ЧПУ. Выделены основные особенности и ограничения термической и гидроабразивной резки, которые должны быть учтены при решении поставленных задач. Исследуется точность вычисления параметров целевых функций для этих задач. Показано, что скорость режущего инструмента на рабочем ходу – величина не постоянная, а зависит от определенных параметров. Приведены зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу от количества кадров в управляющей программе от длины прямого реза (количества мелких/крупных контуров на карте раскроя), от конфигурации детали. Полученные результаты изменения скорости режущего инструмента на рабочем ходу учитываются в целевой функции. Кроме того, в работе предложена математическая модель для решения поставленных задач, которая позволяет, по сравнению с известными алгоритмами, учитывать дополнительные ограничения (выбор точек врезок и выхода инструмента, условие предшествования, некоторые технологические требования, связанные с термической технологией резки).

**Ключевые слова:** термическая резка, машины фигурной листовой резки с ЧПУ, оптимизация маршрута инструмента, минимизация стоимости резки, минимизация времени резки, скорость перемещения режущего инструмента

## OPTIMIZATION OF TOOL ROUTE FOR CNC SHAPE CUTTING MACHINES PROVIDED THAT WORKING STROKE SPEED IS NOT CONSTANT VALUE

<sup>1</sup>Petunin A.A., <sup>2</sup>Tavaeva A.F.

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, e-mail: a.a.petunin@urfu.ru;

<sup>2</sup>AO «Production association “Urals Optical and Mechanical Plant”», Ekaterinburg, e-mail: tavaeva\_a\_f@bk.ru

The problem of cutting time and cost minimization for CNC thermal and water-jet machines is considered in this paper. The paper deals with the basic restrictions and features of thermal and water-jet cutting which must be considered when solving this problem. The paper describes the problem formalization in the form of objective function. The parameters of objective function are considered. The accuracy of the parameters calculation is investigated. The working stroke speed is not constant value. It depends on various parameters, such as number of frames in control program, length of cut (number of small or large contours on nesting plan), and geometry of part. The paper describes dependences of working stroke speed. The correction coefficients for value of working stroke speed are presented which are considered in objective function. Moreover in order to solve the assigned problem the mathematical model is proposed. The model takes into account additional restrictions and features of thermal and water-jet cutting.

**Keywords:** thermal cutting, CNC shape cutting machines, optimization of tool route, minimization of cutting cost, minimization of cutting time, working stroke speed

Среди металлообрабатывающего оборудования можно выделить класс машин фигурной листовой резки с ЧПУ. К ним относятся машины термической (лазерной, плазменной, газовой резки) и гидроабразивной резки. Данные типы машин работают по управляющим программам (УП). Можно выделить ряд ограничений, которых придерживаются технологи при проектировании УП для машин данного типа.

Во-первых, перед началом вырезки заготовки необходимо врезаться в материал.

Врезку необходимо расположить на некотором расстоянии от обрабатываемого контура для того, чтобы избежать «напльва» материала на поверхность заготовки (рис. 1). Во-вторых, при термической и гидроабразивной обработке происходит «сгорание», «выметание» материала при обработке, поэтому при вырезке деталей необходимых размеров и геометрии контур обрабатываемой детали и движение инструмента не совпадают. Инструмент перемещается по эквидистанте этого контура (рис. 1).

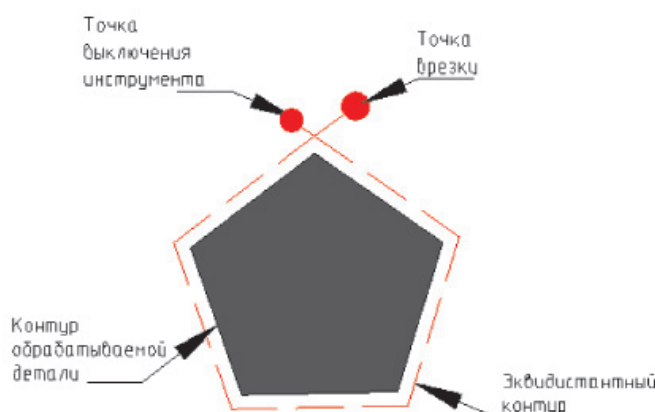


Рис. 1. Пример схемы резки по «замкнутому контуру»

В-третьих, необходимо учесть *условие предшествования*, которое обусловлено особенностями машин портального типа [3]. Если деталь содержит внутренний контур, то сначала необходимо вырезать его, а только потом внешний, т.к. после вырезки внешнего контура деталь может сместиться на рабочем столе. Также если на карте раскроя внутренний контур одной детали будет содержать внешний контур другой детали, то сначала вырезаем деталь, находящуюся внутри другой детали, а затем – внешнюю.

При подготовке УП пользуются различными способами резки, например стандартная резка (рис. 1), резка «змейкой», цепная резка и др. [1, 3, 4, 5, 6]. Применение того или иного способа может приводить к минимизации времени и стоимости обработки, которые рассчитываются по следующим формулам соответственно [1, 2, 3]:

$$T_{cut} = L_{off}/V_{off} + L_{on}/V_{on} + N \cdot t_{pt}; \quad (1)$$

$$F_{cost} = L_{off} \cdot C_{off} + L_{on} \cdot C_{on} + N \cdot C_{pt}; \quad (2)$$

где  $L_{off}$  и  $L_{on}$  – длины холостых и рабочих переходов режущей головки соответственно;  $V_{off}$  и  $V_{on}$  – соответственно скорость холостых и рабочих переходов;  $C_{off}$  и  $C_{on}$  – стоимость единицы пути с отключенным и включенным режущим инструментом соответственно;  $N$  – количество точек врезок всей раскройной карты и  $t_{pt}$  – время, которое

приходится на одну точку врезки;  $C_{pt}$  – стоимость одной точки врезки.

В разделе 2 будет описана постановка задач минимизации стоимости и времени обработки. В разделе 3 рассматривается вопрос определения поправочных коэффициентов для скорости режущего инструмента на рабочем ходу и приводится формула целевой функции с учетом этих поправочных коэффициентов. Результаты, полученные в данной работе, приведены в заключении.

### Задачи оптимизации маршрута инструмента машин термической и гидроабразивной резки с ЧПУ

В [3] была приведена формализация задач минимизации стоимости и времени обработки в виде задач дискретной оптимизации. Кратко рассмотрим постановку этих задач. Пример карты раскроя приведен на рис. 2.

Пусть  $N$  – количество контуров на карте раскроя,  $M_i = (x_i, y_i)$  и  $M_i^* = (x_i^*, y_i^*)$  – соответственно точки врезки и точки отключения инструмента для  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $M_0^* = (x_0^*, y_0^*)$  – исходная точка положения инструмента перед и после завершения обработки материала. Учитывая требования, описанные в разделе 1, последовательность вырезаемых контуров задаётся перестановкой  $I = (i_1, i_2, \dots, i_N)$  порядка  $N$ . Таким образом, маршрут резки определяется вектором  $R$  размерности  $5N$  [3]:

$$R = (i_1, x_{i_1}, y_{i_1}, x_{i_1}^*, y_{i_1}^*, i_2, x_{i_2}, y_{i_2}, x_{i_2}^*, y_{i_2}^*, \dots, i_N, x_{i_N}, y_{i_N}, x_{i_N}^*, y_{i_N}^*). \quad (3)$$

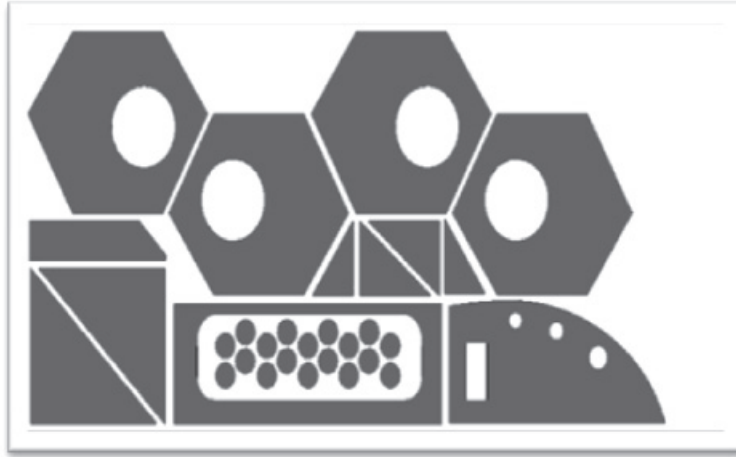


Рис. 2. Пример карты раскроя для 31 заготовки

Задачи оптимизации времени и стоимости обработки для заданной карты раскроя при применении стандартной техники резки сводятся к поиску векторов  $R$ , при которых целевые функции (1) и (2) достигают минимума. Запишем (1) и (2) с использованием обозначений элементов вектора  $R$ . Для этого введём дополнительные обозначения. Пусть  $L_i^j(x_i^*, y_i^*, x_j, y_j)$  – расстояние, которое проходит режущая головка на холостом ходу при переходе от детали  $i$  к  $j$  ( $i, j = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j$ ),  $L_N^0(x_N^*, y_N^*)$  – расстояние, которое проходит режущая головка на холостом ходу после окончания обработки карты раскроя к исходному положению. Пусть также  $P_i$  – периметр эквидистантного контура с номером  $i$ ,  $\Delta_i^{in}(x_i, y_i)$  – расстояние перемещения резака из точки врезки  $M_i$  до эквидистантного контура и  $\Delta_i^{out}(x_i^*, y_i^*)$  – расстояние перемещения резака от эквидистантного контура до точки отключения инструмента  $M_i^*$ . Длины перемещений на холостом и рабочем ходе резака  $L_{off}^n$  и  $L_{on}^n$  могут быть записаны в следующем виде [3]:

$$L_{off}^n = \sum_{i=0}^{N-1} L_i^{i+1}(x_i^*, y_i^*, x_{i+1}, y_{i+1}) + L_N^0(x_N^*, y_N^*); \quad (4)$$

$$L_{on}^n = \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^{in}(x_i, y_i) + \Delta_i^{out}(x_i^*, y_i^*)). \quad (5)$$

Предположим, что имеется конечное множество  $G^1$  множества допустимых значений  $G$  кортежа  $R$ . Пусть  $k^i$  – число возможных врезок для контура  $i$ ;  $K$  – общее число врезок для карты раскроя,  $K = \sum_{i=1}^N k^i$ ;

$L^1(i^s, j^t)$  – расстояние между точкой отключения инструмента  $s$  контура  $i$  до врезки  $t$  контура  $j$ . Тогда (4) примет вид [3]:

$$L_{off}^n(R^1) = L^1(0, i_1^{s_1}) + \sum_{p=1}^{N-1} L^1(i_p^{s_p}, i_{p+1}^{s_{p+1}}) + L^1(i_N, 0). \quad (6)$$

Если при подготовке УП задаются расстояние от врезки до эквидистантного контура  $i$  ( $\Delta_i^{in}(x_i, y_i)$ ) и длина перемещения от контура  $i$  до точки отключения инструмента ( $\Delta_i^{out}(x_i^*, y_i^*)$ ), то  $\Delta_i^*(s_i) = \Delta_i^{in}(x_i, y_i) + \Delta_i^{out}(x_i^*, y_i^*)$  – сумма перемещений режущего инструмента от точки врезки до контура и от контура до точки отключения инструмента. Если у нас конечное число точек врезок, то (5) примет вид

$$L_{off}^n(R^1) = \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^*(s_i)),$$

а (1) и (2) [3]:

$$T_{cut} = \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^*(s_i)) / V_{on} + L_{off}^n(R^1) / V_{off} + N \cdot t_{pt}; \quad (7)$$

$$F_{cost} = \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^*(s_i)) \cdot C_{on} + L_{off}^n(R^1) \cdot C_{off} + N \cdot C_{pt}. \quad (8)$$

**Влияние количества кадров УП и конфигурации обрабатываемого контура на скорость режущего инструмента**

В целевой функции (1), (7) скорость рабочих перемещений режущей головки принята постоянной величиной. Но в результате проведенных ранее исследований и опыта установлено, что скорость обработки материала при увеличении количества кадров в УП снижается [7]. Поэтому встала задача о нахождении поправочных коэффициентов для величины  $V_{on}$  в целевой функции (1), (7) [8].

Было проведено исследование для определения влияния количества кадров в УП, конфигурации вырезаемых контуров для лазерного комплекса ByStar 3015 [8]. По результатам были получены некоторые зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу от количества кадров в УП и длины прямого реза (количества мелких/крупных контуров на раскройной карте) и поправочные коэффициенты для скорости режущего инструмента на рабочем ходу в целевой функции (1), (7) [8].

На рис. 3 можно увидеть, что с увеличением количества крупных деталей на раскройной карте скорость рабочего хода имеет тенденцию к возрастанию. Отсюда следует, что скорость на рабочем ходу при обработке деталей с различной геометрией и размерами не постоянна, и чем меньше мелких деталей, т.е. чем больше длина прямого реза, тем скорость выше (рис. 3) [8].

К зависимостям, приведенным в [8], были получены дополнительные зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу от количества кадров  $n$  в УП и от длины прямого реза  $l$  для определен-

ных условий (9)–(37). Ниже приведены зависимости скорости рабочего хода от количества кадров  $n$  в УП для сплава алюминия толщиной от 2 до 5 мм:

– для Амг3М  $t = 2$  мм:

$$v_p = -0,005 \cdot \ln(n) + 0,0728, \quad (9)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9533$ ;

– для Амг3М  $t = 3$  мм:

$$v_p = -0,002 \cdot \ln(n) + 0,033, \quad (10)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9153$ ;

– для Амг3М  $t = 5$  мм:

$$v_p = -9 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0193, \quad (11)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9113$ .

В [8] было рассмотрено, как изменяется скорость резки, если вместо острого угла в обрабатываемой детали использовать скругления различного радиуса.

Из полученных данных следует, что с увеличением радиуса скруглений скорость рабочего хода незначительно, но увеличивается по отношению к контурам с прямыми углами (рис. 4, 5). Величина увеличения скорости рабочего хода зависит от значения радиуса скругления.

Ниже приведены зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу от длины прямого реза  $l$  сплава алюминия толщиной от 1 до 3 мм:

1. С радиусом скругления прямых углов  $R = 1$  мм по следующим формулам:

– для Амг3М  $t = 2$  мм:

$$v_p = 0,0044 \cdot \ln(l) + 0,0144, \quad (12)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,921$ ;

– для Амг3М  $t = 3$  мм:

$$v_p = 0,0016 \cdot \ln(l) + 0,0134, \quad (13)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9208$ .

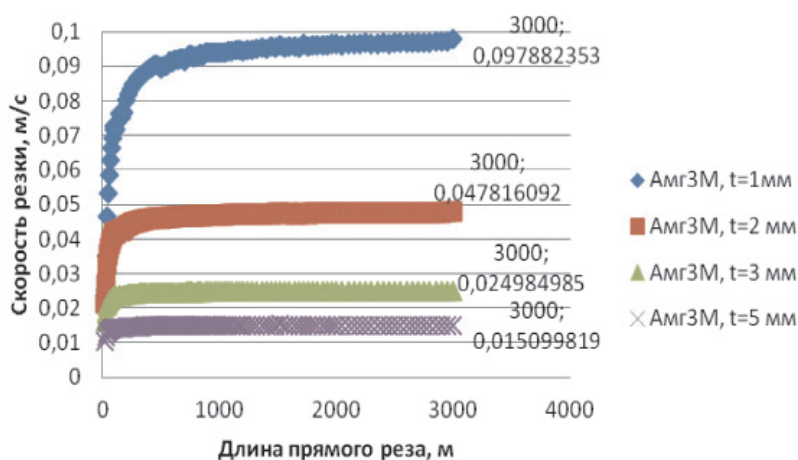


Рис. 3. Изменение скорости обработки при вырезке крупных и мелких контуров по раскройной карте

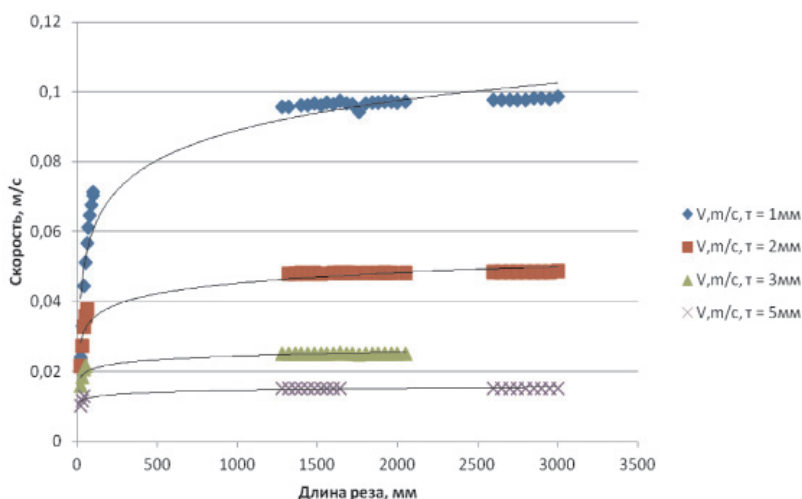


Рис. 4. Изменение скорости обработки заготовок типа прямоугольник с радиусом скруглений 2 мм по углам для Амг3М разной толщины для лазерного комплекса VyStar3015

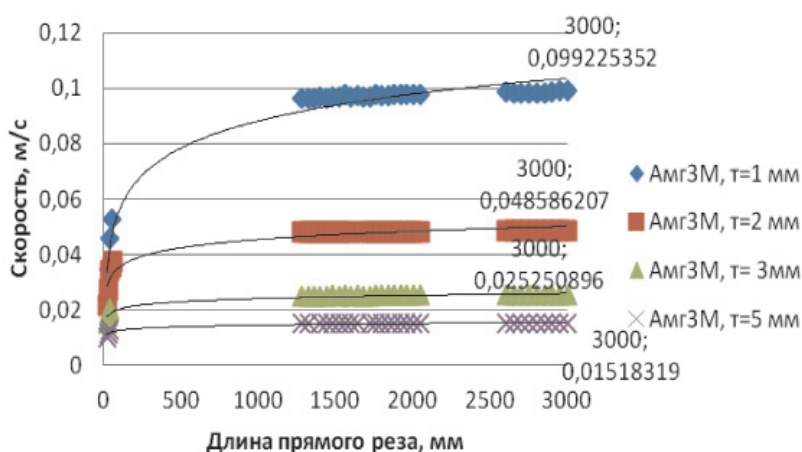


Рис. 5. Изменение скорости обработки заготовок типа прямоугольник с радиусом скруглений 5 мм по углам для Амг3М разной толщины для лазерного комплекса VyStar3015

2. С радиусом скругления прямых углов  $R = 2$  мм по следующим формулам:

– для Амг3М  $t = 1$  мм:

$$v_p = 0,0123 \cdot \ln(l) + 0,0039, \quad (14)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9353$ ;

– для Амг3М  $t = 2$  мм:

$$v_p = 0,0043 \cdot \ln(l) + 0,0153, \quad (15)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9185$ ;

– для Амг3М  $t = 3$  мм:

$$v_p = 0,0016 \cdot \ln(l) + 0,0136, \quad (16)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9147$ .

3. С радиусом скругления прямых углов  $R = 5$  мм по следующим формулам:

– для Амг3М  $t = 1$  мм:

$$v_p = 0,014 \cdot \ln(l) - 0,0087, \quad (17)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9654$ ;

– для Амг3М  $t = 2$  мм:

$$v_p = 0,0043 \cdot \ln(l) + 0,0156, \quad (18)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9144$ ;

– для Амг3М  $t = 3$  мм:

$$v_p = 0,0017 \cdot \ln(l) + 0,0127, \quad (19)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9114$ ;

4. С радиусом скругления прямых углов  $R = 10$  мм по следующим формулам:

– для Амг3М  $t = 1$  мм:

$$v_p = 0,0094 \cdot \ln(l) + 0,0269, \quad (20)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9564$ ;

– для Амг3М  $t = 2$  мм:

$$v_p = 0,0027 \cdot \ln(l) + 0,0277, \quad (21)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9171$ ;

– для АМгЗМ  $t = 3$  мм:

$$v_p = 0,0008 \cdot \ln(l) + 0,0194, \quad (22)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9229$ ;

Ниже приведены зависимости скорости режущего инструмента на рабочем ходу от количества кадров  $n$  в УП для сплава алюминия толщиной от 2 до 5 мм:

1. С радиусом скругления прямых углов  $R = 1$  мм по следующим формулам:

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9413$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 2$  мм:

$$v_p = -0,005 \cdot \ln(n) + 0,0671, \quad (23)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9049$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 3$  мм:

$$v_p = -0,001 \cdot \ln(n) + 0,0312, \quad (24)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8504$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 5$  мм:

$$v_p = -7 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0182, \quad (25)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8408$ .

2. С радиусом скругления прямых углов  $R = 2$  мм по следующим формулам:

– для АМгЗМ  $t = 1$  мм:

$$v_p = -0,015 \cdot \ln(n) + 0,1588, \quad (26)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9666$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 2$  мм:

$$v_p = -0,005 \cdot \ln(n) + 0,0683, \quad (27)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9168$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 3$  мм:

$$v_p = -0,001 \cdot \ln(n) + 0,0313, \quad (28)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8714$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 5$  мм:

$$v_p = -7 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0183, \quad (29)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8589$ .

3. С радиусом скругления прямых углов  $R = 5$  мм и 10 мм соответственно по следующим формулам:

– для АМгЗМ  $t = 1$  мм:

$$v_p = -0,015 \cdot \ln(n) + 0,1613, \quad (30)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9586$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 2$  мм:

$$v_p = -0,005 \cdot \ln(n) + 0,068, \quad (31)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,905$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 3$  мм:

$$v_p = -0,002 \cdot \ln(n) + 0,0317, \quad (32)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8488$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 5$  мм:

$$v_p = -8 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0185, \quad (33)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8345$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 1$  мм:

$$v_p = -0,013 \cdot \ln(n) + 0,1534, \quad (34)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9342$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 2$  мм:

$$v_p = -0,004 \cdot \ln(n) + 0,0649, \quad (35)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9229$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 3$  мм:

$$v_p = -0,001 \cdot \ln(n) + 0,03, \quad (36)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9112$ ;  
– для АМгЗМ  $t = 5$  мм:

$$v_p = -6 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0,0175, \quad (37)$$

с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8945$ .

В [8] приведены таблицы значений поправочного коэффициента для скорости режущего инструмента на рабочем ходу для лазерного комплекса ByStar 3015 в зависимости от длины прямого реза для сплава АМгЗМ толщиной от 1 до 5 мм.

Также значение поправочного коэффициента с определенной погрешностью можно найти, используя зависимости (9)–(37). Таким образом, полученные поправочные коэффициенты  $k$  для скорости рабочих перемещений режущей головки для лазерного комплекса ByStar 3015 можно подставить в целевую функцию (7), которая примет вид

$$T_{cut} = \sum_{i=1}^N (P_i + \Delta_i^*(s_i)) / (k \cdot V_{on}) + L_{off} (R^1) / V_{off} + N \cdot t_{pr}. \quad (38)$$

Для решения этой задачи можно воспользоваться математической моделью А.Г. Ченцова [9], которая позволяет, по сравнению с известными алгоритмами, учитывать дополнительные ограничения термической и гидроабразивной резки.

### Заключение

Основные результаты, полученные в данной работе:

1. Приведены ограничения и особенности термической и гидроабразивной резки, которые необходимо учитывать при решении поставленных задач.

2. Приведена формализация задач оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной резки листового материала.

3. По результатам исследований были получены поправочные коэффициенты для скорости рабочего хода режущего инструмента и целевая функция была записана с учетом этих коэффициентов.

4. Для решения этих задач можно воспользоваться моделью А.Г. Ченцова, которая позволяет учесть особенности термической и гидроабразивной резки.

В дальнейшем планируется расширить область исследования зависимости скорости обработки для другого типа материала для контуров прямоугольного типа, а также получить поправочные коэффициенты для контуров фигурного типа.

### Список литературы

1. Верхотуров М.А., Тарасенко П.Ю. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки // Вестник УГАТУ. Управление, ВТИИ. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2008. – Т. 10, № 2 (27). – С. 123–130.
2. Петунин А.А. Разработка САМ системы для машин резки листового материала как пример инновации // Инновационные информационные технологии: Теория и практика: междунар. научн. изд.: матер. Междунар. сем. (Карлсруе – Уфа – Дрезден, 8–13 апреля 2011 г.). – Уфа, 2011. – С. 47–50.
3. Петунин А.А. Две задачи маршрутизации режущего инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ // Интеллектуальные технологии обработки информации и управления: Труды второй международной конференции. – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т.1. – С. 215–220.
4. Таваева А.Ф. Определение условий эффективного применения специальных методов резки при разработке автоматических методов оптимизации маршрута инструмента // Интеллектуальные технологии обработки информации и управления: труды второй международной конференции. – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т.1. – С. 225–231.
5. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Об одном способе минимизации пути режущего инструмента для машин термической резки // Инженерная мысль машиностроения будущего: сборник материалов второй всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Екатеринбург, 2013. – С. 365–372.
6. Таваева А.Ф., Петунин А.А. К вопросу о разработке алгоритмов маршрутизации инструмента лазерных машин листовой резки с ЧПУ при использовании «цепной» техники резки // Информационные технологии и системы. научн. изд.: труды 3-й междунар. научн. конф. – Челябинск: ЧелГУ, 2014. – С. 45–51.

7. Таваева А.Ф., Петунин А.А. К вопросу оптимизации стоимостных параметров лазерной резки на машинах с ЧПУ // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: труды второй международной конференции. – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т.2. – С. 74–78.

8. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Определение поправочных коэффициентов для скорости рабочих переходов инструмента в целевой функции для задач оптимизации маршрута инструмента // Информационные технологии и системы. научн. изд.: труды 4-й междунар. научн. конф. – Челябинск: ЧелГУ, 2015. – С. 45–47.

9. Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2008. – 240 с.

### References

1. Verkhoturov M.A., Tarasenko P. Yu. Matematicheskoe obeshchenie zadachi optimizatsii puti rezhushchego instrumenta pri ploskom figurnom raskroe na osnove tsepoi rezki. Vestnik USATU. Upravlenie, VTIT. Ufa: USATU, 2008, Vol. 10, no. 2 (27), pp. 123–130.
2. Petunin A.A. Razrabotka CAM sistemy dlya mashin rezki listovogo materiala kak primer innovatsii. Materialy mezhdunarodnogo seminaru «Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii: Teoriya i praktika» (Int. Symp. «Innovative information technology: Theory and practice»). Ufa, 2011, pp. 47–50.
3. Petunin A.A. Dve zadachi marshrutizatsii rezhushchego instrumenta dlya mashin figurnoy listovoy rezki s CHPU. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference «Intelligent Technologies for Information Processing and Management». Ufa: USATU, 2014, T.1, pp. 215–220.
4. Tavaeva A.F. Opredelenie usloviy effektivnogo primeneniya specialnykh metodov rezki pri razrabotke avtomaticheskikh metodov optimizatsii marshruta instrumenta. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference «Intelligent Technologies for Information Processing and Management». Ufa: USATU, 2014, T.1, pp. 225–231.
5. Tavaeva A.F., Petunin A.A. Ob odnom sposobe minimizatsii puti rezhushchego instrumenta dlya mashin termicheskoi rezki. Sbornik materialov vtoroy vseros. molodezh. nauch.-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem. «Inzhenernaya mysl mashinostroeniya buduschego». Ekaterinburg, 2013, pp. 365–372.
6. Tavaeva A.F., Petunin A.A. K voprosy o razrabotke algoritmov marshrutizatsii instrumenta lazernykh mashin listovoy rezki s CHPU pri ispolzovanii «tsepoi» tekhniki rezki. Trudy 3 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Informatsionnye Tekhnologii i Sistemy» (Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Scient. Conf. «Informational Technologies and Systems»). Chelyabinsk: CHelSU, 2014, pp. 45–51.
7. Tavaeva A.F. Petunin A.A. K voprosy optimizatsii stoimostnykh parametrov lazernoj rezki na mashinakh s CHPU. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support». Ufa: USATU, 2014, V.2, pp. 74–78.
8. Tavaeva A.F., Petunin A.A. Opredelenie popravochnykh koefitsientov dlya skorosti rabochikh perekhodov instrumenta v tselevoi funktsii dla zadach oprimizatsii marshruta instrumenta. Trudy 4 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Informatsionnye Tekhnologii i Sistemy» (Proc. 4<sup>th</sup> Int. Scient. Conf. «Informational Technologies and Systems»). Chelyabinsk: CHelSU, 2015, pp. 45–47.
9. Chentsov A.G. Ekstremalnii zadachi marshrutizatsii i raspredeleniya zadaniy: voprosy teorii. M.: In-t kompyuternykh issledovaniy, 2008, pp. 240.

### Рецензенты:

Комиссаров А.П., д.т.н., профессор кафедры горных машин и комплексов, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург;

Кожушко Г.Г., д.т.н., профессор кафедры подъемно-транспортных машин, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург.