

УДК 519.863

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

## ТОЧНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ СТОИМОСТИ РЕЗКИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА НА МАШИНЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

<sup>2</sup>АО «ПО «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова»

*В статье рассматривается вопрос точного вычисления целевой функции в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента для машин листовой лазерной резки с числовым программным управлением (далее ЧПУ). В качестве целевой функции рассматривается стоимость лазерной резки, которая зависит от ряда числовых параметров. Вычисление этих параметров затруднено по ряду причин: необходимо учитывать тип используемого лазера в машине с ЧПУ, марку и толщину обрабатываемого материала, стоимость расходных материалов, расход и стоимость вспомогательного и лазерного газов, амортизацию оборудования и заработную плату обслуживающего персонала. В работе предлагается математическая модель точного вычисления целевой функции стоимости лазерной резки. На основании предложенной модели произведен расчет основных параметров для CO<sub>2</sub> лазерного комплекса VyStar3015, от которых зависит стоимость резки. На основании полученных формул для расчета основных стоимостных параметров можно вычислить длину дополнительного реза, допустимую при проектировании маршрута режущего инструмента с применением специальных способов резки с дополнительным резом. Таким образом, зная рассчитанную максимально допустимую длину дополнительного реза можно легко оценить эффективность и целесообразность применения специальных способов резки еще на этапе проектирования маршрута перемещения режущего инструмента. Во второй части статьи рассмотрен пример расчета стоимости лазерной резки раскройной карты, разработанной в САПР «СИРИУС». При проектировании управляющей программы маршрут перемещения режущего инструмента был построен для двух случаев: резка «по замкнутому контуру» и применение специальных способов резки. Анализ полученных результатов показал, что применение специальных способов резки позволяет минимизировать стоимость лазерной резки.*

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

**Введение.** Задача оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента на машинах листовой резки с ЧПУ является актуальной в инженерных приложениях, связанных с раскроем листового материала. В машиностроительном производстве и других отраслях промышленности машины лазерной резки с ЧПУ имеют широкое применение, которое обусловлено возможностью обработки многих видов материалов различной толщины, высокой скоростью резки, возможностью обработки контуров

различной сложности, адаптации к постоянным изменениям номенклатуры выпускаемой продукции.

Машины лазерной резки с ЧПУ работают по управляющим программам (далее УП). Разработка УП осуществляются с помощью САМ систем, которые предполагают предварительное геометрическое моделирование заготовок и разработку раскройной карты листового материала. На следующем этапе осуществляется процесс назначения маршрута перемещения режущего инструмента, что порождает актуальные на сегодняшний день оптимизационные задачи маршрутизации режущего инструмента [1].

В качестве одного из критериев оптимизации в задаче поиска оптимального маршрута режущего инструмента выделяют стоимость резки  $F_{cost}$ . Для расчета  $F_{cost}$  введем следующие обозначения:  $C_{on}$  – стоимость одного погонного метра реза с включенным режущим инструментом;  $C_{off}$  – стоимость одного погонного метра пути с выключенным режущим инструментом;  $C_{pt}$  – стоимость одной точки врезки;  $L_{off}$  – длина переходов с выключенным режущим инструментом (холостой ход);  $L_{on}$  – длина реза с включенным режущим инструментом;  $N_{pt}$  – количество точек врезок.  $F_{cost}$  рассчитывается по следующей формуле [2]:

$$F_{cost} = L_{on} \cdot C_{on} + L_{off} \cdot C_{off} + N_{pt} \cdot C_{pt} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Значения  $L_{on}$ ,  $L_{off}$  и  $N_{pt}$  определяются для каждой УП и зависят от способа резки, который был применен при назначении маршрута резки. Вычисление стоимостных параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  затруднено, поскольку они зависят от марки и толщины обрабатываемого материала, типа используемого лазера в машине с ЧПУ, стоимости расходных материалов, стоимости расхода технологического и лазерного (резонаторного) газов, амортизации оборудования и величины заработной платы обслуживающего персонала. Анализ существующих способов вычисления стоимости лазерной резки показал недостаточность исследований в этой области. В [3] производится расчет штучно-калькуляционного времени при лазерной обработке материалов. В работе [4] производится сравнительный анализ стоимости лазерной резки листовых материалов для Ст3 ( $\Delta=3-10\text{мм}$ ) с применением гидроабразивной, плазменной, кислородной и лазерной резки. В [5] выполнена оценка стоимости эксплуатации плазменных установок и  $\text{CO}_2$  лазеров. К стоимости эксплуатации авторы относят: стоимость энергетических затрат, затрат на расходы рабочих газов, стоимости расходных материалов и сервисного обслуживания установок. В работе

[2] приведена формализация задачи минимизации времени и стоимости резки для машин листовой резки с ЧПУ.

Следует отметить, что ни в одной из проанализированных работ не был рассмотрен вопрос вычисления основных числовых параметров на машинах листовой резки с ЧПУ, от которых зависит стоимость резки  $F_{cost}$ . Отсюда вытекает актуальность данной работы, которая направлена на построение математической модели точного вычисления стоимости лазерной резки. В свою очередь это позволит реально оценить стоимость лазерной резки для конкретного случая еще на этапе проектирования и точно построить маршрут режущего инструмента при условии, что  $F_{cost} \rightarrow \min$ .

**Материал и методы.** Проблема точного вычисления целевой функции при оптимизации маршрута резки на машине листовой лазерной резки с ЧПУ связана с поиском адекватных значений стоимости  $F_{cost}$ , вычисление которой зависит от параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$ .

Для расчета  $C_{on}$  введем следующие обозначения для стоимостных параметров, вычисляемых на 1 м рабочего хода инструмента:  $C_{расх}$  - стоимость расходных материалов (например, сопло, защитное стекло, газовые трубки);  $C_{mex}$  - стоимость технологического газа (азот или кислород в зависимости от обрабатываемого материала);  $C_{лаз}$  - стоимость лазерного газа (при работе на машине с ЧПУ на проточном газовом лазере),  $C_{э/э}^{on}$  - стоимость электроэнергии;  $C_{зн}^{on}$  - затраты, связанные с заработной платой сопровождающего персонала;  $C_A^{on}$  - амортизация оборудования. Тогда в общем виде:

$$C_{on} = C_{э/э}^{on} + C_{mex} + C_{лаз} + C_{расх} + C_{зн}^{on} + C_A^{on}. \quad (2)$$

Для вычисления значений  $C_{э/э}^{on}$ ,  $C_{mex}$ ,  $C_{лаз}$ ,  $C_{расх}$ ,  $C_{зн}^{on}$ ,  $C_A^{on}$  введем дополнительные обозначения:  $t_{on}$  - время, затрачиваемое на один метр рабочего хода инструмента, час;  $P_{on}$  - затраты электроэнергии за один час работы лазерного комплекса на рабочем ходе, кВт/ч;  $V_{mex}$  - расход технологического газа, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{лаз}$  - расход лазерного газа, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{э/э}$  - стоимость электроэнергии за 1 кВт;  $C_{лазМ^3}$  - стоимость 1м<sup>3</sup> лазерного газа;  $C_{mexМ^3}$  - стоимость 1м<sup>3</sup> технологического газа;  $C_{расхЕд}$  - стоимость единицы расходных материалов;  $t_{расхСрок}$  - срок службы расходных материалов;  $C_{зн}$  - стоимость 1ч работы обслуживающего персонала;  $A$  - амортизация за 1 час работы лазерного комплекса, руб;  $N$  - срок полезного использования оборудования (значение  $N$  можно взять из [6]), год;  $C_{оборуд}$

- первоначальная стоимость лазерного комплекса. Тогда  $C_{\text{э/э}}^{\text{on}}, C_{\text{mex}}, C_{\text{лаз}}, C_{\text{расх}}, C_{\text{зн}}^{\text{on}}, C_A^{\text{on}}$  вычислим по следующим формулам:

$$C_{\text{э/э}}^{\text{on}} = P_{\text{on}} \cdot t_{\text{on}} \cdot C_{\text{э/э}}. \quad (3)$$

$$\text{Аналогично } C_{\text{mex}} = V_{\text{mex}} \cdot C_{\text{mexM}^3} \cdot t_{\text{on}}; \quad (4)$$

$$C_{\text{лаз}} = V_{\text{лаз}} \cdot C_{\text{лаzM}^3} \cdot t_{\text{on}}; \quad (5)$$

$$C_{\text{расх}} = \frac{C_{\text{расхЕд}} \cdot t_{\text{on}}}{t_{\text{расхСрок}}}.$$

(6)

$$C_{\text{зн}}^{\text{on}} = C_{\text{зн}} \cdot t_{\text{on}}$$

(7)

$$C_A^{\text{on}} = \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{\text{оборуд}}}{1920} \cdot t_{\text{on}} \quad (8)$$

Параметр  $C_{\text{mex}}$  необходимо учитывать при расчете себестоимости резки только в тех случаях, когда применяется вспомогательный рабочий газ (кислород, азот в зависимости от типа обрабатываемого материала) для увеличения скорости резки, возможности обработки материалов более высоких толщин и для сокращения затрат электроэнергии. Расход газа зависит от диаметра используемых сопел и давления газа.

Для расчета  $C_{\text{off}}$  введем следующие обозначения параметров:  $P_{\text{off}}$  – затраты электроэнергии за один час работы лазерного комплекса на холостом ходе, кВт/ч;  $t_{\text{off}}$  – время, затрачиваемое на один метр холостого хода инструмента, час. Тогда по аналогии с (2)-(8):

$$C_{\text{off}} = P_{\text{off}} \cdot t_{\text{off}} \cdot C_{\text{э/э}} + C_{\text{зн}} \cdot t_{\text{off}} + \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{\text{оборуд}}}{1920} \cdot t_{\text{off}}. \quad (9)$$

Аналогично для расчета  $C_{\text{pt}}$  введем следующие обозначения для стоимостных параметров, вычисляемых на одну точку врезки:  $C_{\text{э/э}}^{\text{pt}}$  – стоимость электроэнергии;  $C_{\text{расх}}^{\text{pt}}$  – стоимость расходных материалов;  $C_{\text{лаз}}^{\text{pt}}$  – стоимость лазерного газа;  $C_{\text{mex}}^{\text{pt}}$  – стоимость технологического газа,  $C_{\text{зн}}^{\text{pt}}$  – затраты, связанные с заработной платой сопровождающего персонала;  $C_A^{\text{pt}}$  – амортизация оборудования. Тогда

$$C_{\text{pt}} = C_{\text{э/э}}^{\text{pt}} + C_{\text{расх}}^{\text{pt}} + C_{\text{лаз}}^{\text{pt}} + C_{\text{mex}}^{\text{pt}} + C_{\text{зн}}^{\text{pt}} + C_A^{\text{pt}}. \quad (10)$$

Для вычисления значений  $C_{\text{э/э}}^{pt}$ ,  $C_{\text{расх}}^{pt}$ ,  $C_{\text{лаз}}^{pt}$  и  $C_{\text{mex}}^{pt}$  введем дополнительные параметры:  $P_{pt}$  - затраты электроэнергии на одну точку врезки, кВт/ч;  $t_{pt}$  – время, затрачиваемое на одну точку врезки, час. Тогда

$$C_{\text{э/э}}^{pt} = P_{pt} \cdot t_{pt} \cdot C_{\text{э/э}}; \quad (11)$$

$$C_{\text{mex}}^{pt} = V_{\text{mex}} \cdot C_{\text{mex}M^3} \cdot t_{pt}; \quad (12)$$

$$C_{\text{лаз}}^{pt} = V_{\text{лаз}} \cdot C_{\text{лаз}M^3} \cdot t_{pt}; \quad (13)$$

$$C_{\text{расх}}^{pt} = \frac{C_{\text{расх}E\delta} \cdot t_{pt}}{t_{\text{расх}C\text{рок}}}.$$

(14)

$$C_{\text{зн}}^{pt} = C_{\text{зн}} \cdot t_{pt}$$

(15)

$$C_A^{pt} = \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{\text{оборуд}}}{1920} \cdot t_{pt} \quad (16)$$

При расчете стоимости одной точки врезки параметр  $C_{\text{лаз}}^{pt}$  необходимо учитывать только при обработке материала на проточном газовом лазере. Параметр  $C_{\text{mex}}$  необходимо учитывать при расчете себестоимости резки только в тех случаях, когда применяется вспомогательный рабочий газ. Тогда (1) можно записать в следующем виде:

$$F_{\text{cost}} = L_{\text{on}} \cdot (C_{\text{э/э}}^{\text{on}} + C_{\text{mex}} + C_{\text{лаз}} + C_{\text{расх}} + C_{\text{зн}}^{\text{on}} + C_A^{\text{on}}) + L_{\text{off}} \cdot C_{\text{off}} + \\ + N_{pt} \cdot (C_{\text{э/э}}^{pt} + C_{\text{расх}}^{pt} + C_{\text{лаз}}^{pt} + C_{\text{mex}}^{pt} + C_{\text{зн}}^{pt} + C_A^{pt})$$

(17)

К основным расходным материалам и запчастям для газового лазера можно отнести: поворотные зеркала, фокусирующие линзы, защитные стекла, сопла, юстировочные узлы, газовые трубки. К основным расходным материалам для волоконного лазера можно отнести: сопла, защитные стекла, фокусирующие линзы. А для случая применения твердотельных лазеров выделяют следующие основные расходные материалы и запчасти: лампы оптической накачки, защитные стекла, зеркала, квантрон, активный элемент. Следует отметить, что стоимость расходных материалов может изменяться в зависимости от фактических сроков службы расходных материалов, которые зависят от качества используемого газа, опыта персонала, эксплуатирующего лазерный станок. Следует отметить, что  $C_{\text{расх}E\delta}$  зависит от ценообразования, курса доллара (USD) и евро (EUR), а параметры  $C_{\text{э/э}}$ ,  $C_{\text{лаз}M^3}$  и  $C_{\text{mex}M^3}$  зависят от

цен, которые устанавливает поставщик услуг, поэтому при расчете  $F_{cost}$  для конкретных производственных задач, изменения цен целесообразно учитывать, используя изменяющиеся в зависимости от перечисленных факторов таблицы стоимостных параметров в MS Excel. В частности, была создана сводная таблица в MS Excel для расчета себестоимости лазерной резки для газового CO<sub>2</sub> лазерного комплекса ByStar 3015 для следующих материалов: нержавеющая сталь (на примере 12X18H10T) толщиной  $\Delta=1-10$  мм; углеродистая сталь (на примере Сталь 10кп)  $\Delta=1-15$  мм; алюминий и его сплавы (на примере Амг3М)  $\Delta=1-5$  мм.

Были определены значения основных стоимостных характеристик  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  с учетом всех перечисленных параметров, приведенных в (2)-(16). В таблице 1 приведены значения стоимости одного погонного метра лазерного реза при максимальной  $C_{on}^{max}$  и минимальной  $C_{on}^{min}$  возможной рабочей скорости перемещения режущего инструмента  $V_{on}$ . Следует отметить, что в зависимости от требуемого конечного качества получаемых с лазера заготовок выбирают минимально  $V_{on}^{min}$  или максимально  $V_{on}^{max}$  возможную скорость резки. Для каждого из рассматриваемых случаев  $V_{on}^{min} = const$  и  $V_{on}^{max} = const$ . В [7-9] было показано, что фактическая рабочая скорость  $V_{on}$  не является величиной постоянной, а зависит от различных технологических факторов и характеристик спроектированной управляющей программы. В [7-9] были получены корректирующие формулы для точного вычисления рабочей скорости режущего инструмента  $V_{on}$ , которые можно использовать при вычислении целевой функции  $F_{cost}$  в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента. Однако в этом случае вычисление основных стоимостных параметров следует выполнять для каждой конкретной производственной задачи.

Таблица 1 - Значения основных стоимостных параметров при вычислении целевой функции для газового CO<sub>2</sub> лазерного комплекса ByStar3015

Материал и толщина материала ( $\Delta$ )	$C_{on}^{max}$ , руб	$C_{on}^{min}$ , руб	$C_{off}$ , руб	$C_{pt}$ , руб
Сталь 10кп, $\Delta=1$ мм	5,3	7,5	0,42	0,7
Сталь 10кп, $\Delta=1,2$ мм	6,6	9,5	0,42	1,0
Сталь 10кп, $\Delta=1,5$ мм	6,6	9,5	0,42	1,1
Сталь 10кп, $\Delta=2$ мм	8,1	11,7	0,42	1,3
Сталь 10кп, $\Delta=2,5$ мм	9,7	14,0	0,42	1,5
Сталь 10кп, $\Delta=3$ мм	12,0	17,4	0,42	1,6

Сталь 10кп, Δ=3.5мм	13,3	19,0	0,42	1,6
Сталь 10кп, Δ=3.9мм	13,3	19,0	0,42	1,9
Сталь 10кп, Δ=4 мм	14,8	21,0	0,42	2,2
Сталь 10кп, Δ=5 мм	17,9	26,1	0,42	2,7
Сталь 10кп, Δ=8 мм	26,1	38,2	0,42	3,4
Сталь 10кп, Δ=10 мм	31,8	44,1	0,42	5,1
Сталь 10кп, Δ=15 мм	52,1	71,7	0,42	6,0
Амг3М, Δ=1мм	11,1	18,6	0,42	3,7
Амг3М, Δ=2мм	18,0	30,0	0,42	5,6
Амг3М, Δ=3мм	56,8	92,8	0,42	14,2
Амг3М, Δ=5мм	193,0	328,2	0,42	32,2
12Х18Н10Т, Δ=1 мм	14,9	24,9	0,42	2,5
12Х18Н10Т, Δ=1,5мм	18,7	31,4	0,42	3,8
12Х18Н10Т, Δ=2 мм	25,3	42,4	0,42	4,5
12Х18Н10Т, Δ=2,5мм	38,1	63,5	0,42	6,8
12Х18Н10Т, Δ=3 мм	46,4	76,1	0,42	8,6
12Х18Н10Т, Δ=4 мм	87,2	143,7	0,42	13,1
12Х18Н10Т, Δ=5 мм	122,6	198,1	0,42	18,9
12Х18Н10Т, Δ=6 мм	241,5	386,5	0,42	31,7
12Х18Н10Т, Δ=8 мм	475,5	856,0	0,42	42,2
12Х18Н10Т, Δ=10 мм	1038,7	2077,3	0,42	72,0

**Результаты.** Рассмотрим расчет стоимости лазерной резки на примере двух раскройных карт для следующих материалов: Амг3М, Δ = 5 мм; Сталь 10кп, Δ = 2 мм и 12Х18Н10Т, Δ= 6 мм.

В САПР «СИРИУС» [10] были сформированы раскройные карты для 43-х фигурных заготовок ( $n=43$ ) с суммарным числом контуров  $N=56$ . Были сформированы маршруты перемещения режущего инструмента с применением резки «по замкнутому контуру» (т.е. когда количество точек врезки равно количеству вырезаемых контуров  $N_{pt} = N$ ) (рисунок 1). Также был сформирован маршрут перемещения инструмента (рисунок 2) с применением (помимо резки «по замкнутому контуру») специальных способов резки, предложенных в [11]. Также использовался совмещенный рез и резка «змейкой».

Полученные результаты сведем в таблице 2. Введены новые параметры:  $F_{cost}^{max}$  - стоимость лазерной резки при максимальной допустимой рабочей скорости резки;  $F_{cost}^{min}$  - стоимость лазерной резки при минимальной допустимой рабочей скорости резки;  $F_{cost}^*$  - стоимость резки при условии, что  $V_{on}$  рассчитывается по формулам из [8] (при этом количество кадров УП  $n=147$ ). В [8] формулы для расчета  $V_{on}$  получены только для материалов Сталь 10кп и Амг3М, поэтому расчет  $F_{cost}^*$  произведем только для них.

Из таблицы 2 видно, что  $F_{cost}$  с применением специальных способов резки (рисунок 2) снижается до 14%, количество точек врезок резки сокращается на 55,4%,  $L_{off}$  сокращается на 41,55 %,  $L_{on}$  сокращается на 6% по сравнению с применением резки «по замкнутому контуру» (рисунок 1).

Таблица 2 - Пример расчета стоимости лазерной резки

Тип резки	$N_{pt}$ , шт	$L_{on}$ , м	$L_{off}$ , м	$F_{cost}^{max}$ , руб	$F_{cost}^{min}$ , руб	$F_{cost}^*$ , руб
Случай с применением стандартного способа резки (рис.1)	56	48,93	15,79	Амг3М, $\Delta = 5\text{мм}$		
				11256,8	17868,44	22044,55
				Сталь 10кп, $\Delta = 2\text{мм}$		
				475,45	651,35	481,68
				12X18H10T, $\Delta = 6\text{мм}$		
				13601,25	20692,29	-
Случай с применением специальных способов резки (рис.2)	25	46,04	9,23	Амг3М, $\Delta = 5\text{мм}$		
				9696,99	15918,12	19847,57
				Сталь 10кп, $\Delta = 2\text{мм}$		
				410,02	575,53	415,89
				12X18H10T, $\Delta = 6\text{мм}$		
				11917,19	18589,41	-

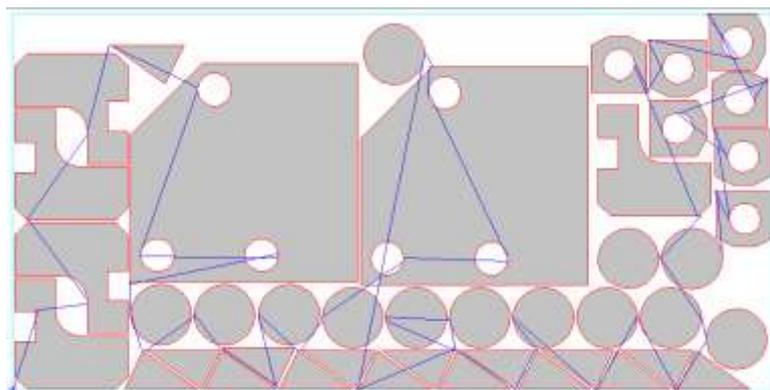


Рисунок 1 - Маршрут перемещения режущего инструмента с использованием стандартного способа резки

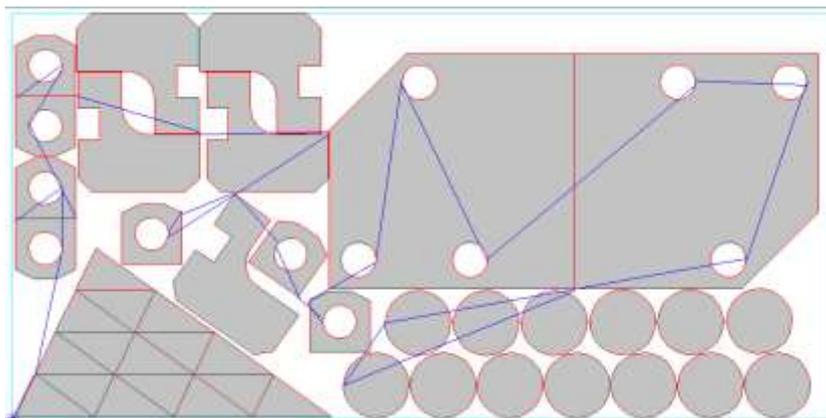


Рисунок 2 - Маршрут перемещения режущего инструмента с использованием специальных способов резки

При проектировании УП с использованием специальных способов резки с дополнительным резом (например, резка змейкой, «цепная» резка) возникает актуальная и не решенная на данный момент проблема расчета максимально допустимой длины дополнительных резов  $L_{\partial on}$  при переходе от одного контура к другому без выключения режущего инструмента при которой не снижается экономическая эффективность от применения специальных способов резки. Поэтому применение специальных способов резки целесообразно и эффективно только в том случае, если [12]:

$$L_{\partial on} \leq \frac{C_{pt}}{C_{on}} \quad (18)$$

Таким образом, зная значение  $L_{\partial on}$  и фактически получившуюся длину дополнительного реза на раскройной карте  $L_{\partial on}^{факт}$  можно на этапе проектирования УП оценить эффективность применения тех или иных специальных способов резки. В таблице 3 приведены вычисленные с помощью значений  $C_{pt}$  и  $C_{on}$  из таблицы 1 значения дополнительного реза при максимальной  $L_{\partial on}^{max}$  и минимальной  $L_{\partial on}^{min}$  возможной рабочей скорости перемещения режущего инструмента  $V_{on}$  для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса ByStar3015.

Таблица 3 - Значения длины дополнительного реза для специальных способов резки для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса ByStar 3015

Материал	Толщина материала, мм	$L_{\partial on}^{max}$ , м	$L_{\partial on}^{min}$ , м
Сталь 10кп	1	0,14	0,10
	1,2	0,15	0,10
	1,5	0,17	0,12
	2	0,16	0,11
	2,5	0,15	0,11
	3	0,13	0,09
	3,5	0,12	0,09
	3,9	0,14	0,10

Продолжение таблицы 3

Материал	Толщина материала, мм	$L_{don}^{max}$ , м	$L_{don}^{min}$ , м
Сталь 10кп	4	0,15	0,10
	5	0,15	0,11
	8	0,13	0,09
	10	0,16	0,12
	15	0,12	0,08
Амг3М	1	0,33	0,20
	2	0,31	0,19
	3	0,25	0,15
	5	0,17	0,10
12Х18Н10Т	1	0,17	0,10
	1,5	0,20	0,12
	2	0,18	0,11
	2,5	0,18	0,11
	3	0,19	0,11
	4	0,15	0,09
	5	0,15	0,10
	6	0,13	0,08
	8	0,09	0,05
10	0,07	0,03	

Для любого лазерного комплекса можно рассчитать  $L_{don}$ , получив до этого табличные значения для стоимостных параметров  $C_{pt}$  и  $C_{on}$ , рассчитанных по (2) и (10). Таким образом, можно легко оценить эффективность применения специальных способов резки с дополнительными резами на этапе проектирования УП и внести соответствующие корректировки, что позволит значительно упростить этап проектирования маршрута режущего инструмента и позволит получить максимальную выгоду от применения специальных способов резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру».

**Заключение.** На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложена математическая модель точного вычисления стоимостных параметров (2)-(16) целевой функции (1) и (17) в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента для машин лазерной резки с ЧПУ. Вычисление стоимостных параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  затруднено, поскольку необходимо учитывать множество факторов: тип используемого лазера в машине с ЧПУ, марку и толщину обрабатываемого материала, стоимость расходных материалов, которые для каждого типа машин с ЧПУ различны, расход и стоимость вспомогательного и лазерного газа,

- амортизацию оборудования и заработную плату обслуживающего персонала;
2. Получены числовые значения  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  при обработке материалов из углеродистой стали (на примере Сталь 10 кп), сплавов алюминия (на примере АМг3М) и нержавеющей стали (на примере 12Х18Н10Т) различной толщины для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса VyStar3015;
  3. Рассмотрены технологические примеры раскроя листового материала для АМг3М Δ=5 мм, Ст10кп Δ=2 мм и 12Х18Н10Т Δ=6 мм. Были сформированы раскройные карты и для них спроектирован маршрут перемещения режущего инструмента в САПР «СИРИУС», используя резку «по замкнутому контуру» и специальные способы резки. Приведенный пример показывает, что применение специальных способов резки позволяет сокращать стоимость лазерной резки. Для рассмотренных примеров был произведен расчет стоимости с учетом сложности обрабатываемых контуров. Результаты показывают, что применение формул для учета сложности обрабатываемых деталей увеличивает стоимость изготовления деталей до 48%;
  4. Предложена формула для расчета длины дополнительно реза  $L_{don}$  при переходе от одного контура к другому в случае применения специальных способов резки («цепная» резка и резка «змейкой»). В работе приведены значениями  $L_{don}$  для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса VyStar 3015.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петунин А.А. Разработка САМ системы для машин резки листового материала как пример инновации // Инновационные информационные технологии: Теория и практика: Материалы междунар. сем. – Уфа, 2011. - С.47-50.
2. Петунин А.А. Две задачи маршрутизации режущего инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ // Intelligent Technologies for Information Processing and Management: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference (Уфа, 10-12 ноября 2014 г.). – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014. - С. 215-220.
3. Конников Е.А., Куклина А.М. Специфика определения штучно-калькуляционного времени при расчете себестоимости производства изделий с применением технологии лазерной резки // Экономика и управление народным хозяйством. 2016. №2(30). С. 41-49.

4. Мильцин А.Н., Шабанов М.Л., Лысыч М.Н., Романов В.В. Современные методы резания листовых материалов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: материалы междунар. заочн. научн.-практич. конференции. Воронеж: ВГЛТА, 2015. Т.3. №2-1(13-1). С.83-87.
5. Шапарев А.В., Савина А.И. Технологическое и экономическое сравнение резки материалов плазмой и CO<sub>2</sub>-лазерами // Наука и современность. 2016. №3(9). С.181-189.
6. О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы: постановление Правительства РФ от 01.01.2002 №1 – 2002.
7. Tavaeva A.F., Petunin A.A. The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM'16): Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, 7911618. DOI: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911618/>.
8. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Некоторые вопросы оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №9. С. 147-154.
9. Петунин А.А., Таваева А.Ф. Об оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ при условии непостоянства скорости рабочего хода // Фундаментальные исследования. 2015. №6-1. С. 56-62.
10. Петунин А.А. Интегрированная САПР «СИРИУС» для автоматизации раскройно-заготовительного производства. Концепция. Опыт разработки и внедрения // Ресурсосберегающие технологии: математическое обеспечение оптимизационных задач в системах автоматизированного проектирования: Сб. докл. I Всеросс. научн. - практич. конф. по вопросам решения оптимизационных задач в промышленности. – СПб: ЦНИИТС, 2001. - С. 126-129.
11. Tavaeva A.F., Petunin A.A., Krotov V.I. About effectiveness of special cutting techniques application during development of automatic methods of tool path optimization applied to CNC thermal cutting machine // Computer Science and Information Technologies: Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference. – Ufa, UGATU, 2017. - P. 221-226.
12. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Вычисление стоимости лазерной резки в задаче оптимизации маршрута режущего инструмента на

машинах с ЧПУ // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №12. С. 194-202.

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

**THE ACCURATE CALCULATION OF PARTS TREATMENT COST FROM SHEET METAL ON THE CNC LASER CUTTING MACHINE IN PROBLEM OF TOOL ROUTING OPTIMIZATION**

<sup>1</sup>*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*

<sup>2</sup>*JSC « PA «Ural Optical and Mechanical Plant named after Mr. E.S. Yalamov»*

*The problem of objective function accurate calculation in issue of cutting tool route for CNC laser cutting machines is considered in this paper. The objective function is laser cutting cost depending on some parameters. The calculation of ones is complicated because of the type of laser in CNC machines, grade and thickness of work-in-process materials, cost of expendable materials, gas consumption and cost, amortization and wages of service personals should be considered. The mathematical model of laser cutting cost accurate calculation is presented. Based on proposed model the calculation of basic parameters is performed for CNC CO2 laser machine ByStar3015. The second part of paper considered example of laser cutting cost calculation for nesting. During develop of NC programs in CAD/CAM "SIRIUS" the cutting tool route is built for two cases: standard and special cutting techniques. Analysis of received results shows that application of special cutting technique minimizes the laser cutting cost.*

**Keywords:** thermal cutting, CNC laser cutting machines, optimization of tool route, laser cost, minimization of cutting cost, working speed.

**REFERENCES**

1. Petunin A.A. Razrabotka SAM sistemy dlya mashin rezki listovogo materiala kak primer innovatsii // Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii: Teoriya i praktika: Materialy mezhdunar. sem. – Ufa, 2011. - pp.47-50.
2. Petunin A.A. Dve zadachi marshrutizatsii rezhushchego instrumenta dlya mashin figurnoy listovoy rezki s ChPU // Intelligent Technologies for Information Processing and Management: Proceedings of 2nd International Conference (Ufa, 10-12 noyabrya 2014 g.). – Ufa: Izd-vo UGATU, 2014. - pp. 215-220.
3. Konnikov E.A., Kuklina A.M. Spetsifika opredeleniya shtuchno-kal'kulyatsionnogo vremeni pri raschete sebestoimosti proizvodstva izdeliy s primeneniem tekhnologii lazernoy rezki // Ekonomika i upravlenie narodnym khozyaystvom. 2016. No.2(30). pp. 41-49.
4. Mil'tsin A.N., Shabanov M.L., Lysych M.N., Romanov V.V. Sovremennye metody rezaniya listovykh materialov // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: materialy mezhdunar. zaochn. nauchn.-praktich. konferentsii. Voronezh: VGLTA, 2015. Vol.3. No.2-1(13-1). pp.83-87.

5. Shaparev A.V., Savina A.I. Tekhnologicheskoe i ekonomicheskoe sravnenie rezki materialov plazmoy i SO<sub>2</sub>-lazerami // Nauka i sovremennost'. 2016. No.3(9). pp.181-189.
6. O klassifikatsii osnovnykh sredstv, vključaemykh v amortizatsionnye grupy: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 01.01.2002 No.1 – 2002.
7. Tavaeva A.F., Petunin A.A. The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM'16): Proceedings of 2nd International Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, 7911618. DOI: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911618/>.
8. Tavaeva A.F., Petunin A.A. Nekotorye voprosy optimizatsii marshruta instrumenta dlya mashin figurnoy listovoy rezki s chislovym programmnyim upravleniem // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2017. No.9. pp. 147-154.
9. Petunin A.A., Tavaeva A.F. Ob optimizatsii marshruta instrumenta dlya mashin figurnoy listovoy rezki s ChPU pri uslovii nepostoyanstva skorosti rabocheho khoda // Fundamental'nye issledovaniya. 2015. No.6-1. pp. 56-62.
10. Petunin A.A. Integrirovannaya SAPR «SIRIUS» dlya avtomatizatsii raskroyno-zagotovitel'nogo proizvodstva. Kontseptsiya. Opyt razrabotki i vnedreniya // Resursosberegayushchie tekhnologii: matematicheskoe obespechenie optimizatsionnykh zadach v sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya: Sb. dokl. I Vseross. nauchn. - praktich. konf. po voprosam resheniya optimizatsionnykh zadach v promyshlennosti. – SPb: TsNIITS, 2001. - pp. 126-129.
11. Tavaeva A.F., Petunin A.A., Krotov V.I. About effectiveness of special cutting techniques application during development of automatic methods of tool path optimization applied to CNC thermal cutting machine // Computer Science and Information Technologies: Proceedings of 19th International Conference. – Ufa, UGATU, 2017. - pp. 221-226.
12. Tavaeva A.F., Petunin A.A. Vychislenie stoimosti lazernoy rezki v zadache optimizatsii marshruta rezhushchego instrumenta na mashinakh s ChPU // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2017. No.12. pp. 194-202.20.05.2017).