

УДК 519.863

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.34.3.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.007)

Применение мультиконтурной резки в алгоритмах построения кратчайшего пути режущего инструмента

А.Ф. Таваева^{1,2}

¹АО «ПО «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова», Екатеринбург, Российская Федерация

²ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается проблема маршрутизации режущего инструмента машин листовой резки с числовым программным управлением (далее по тексту ЧПУ). Даны классификация задач маршрутизации и описание алгоритмов решения. В работе предложен подход к решению задачи прерывистой резки (Intermittent Cutting Problem, ICP) с точки зрения применения мультиконтурной резки, когда несколько контуров вырезаются одним движением режущего инструмента. Предлагаемый в статье метод заключается в следующем: контуры деталей объединяются в «блоки», при этом вырезка контуров происходит с применением совмещенного реза с использованием зачастую одной точки врезки. В статье выделены три группы деталей (прямоугольные, треугольные и детали с наружным контуром типа трапеция), для которых применим предлагаемый метод. При этом допускается наличие отверстий и пазов внутри деталей. Детали изготавливаются из листового материала на технологическом оборудовании с ЧПУ. Приведены некоторые результаты численных экспериментов в сравнении с решением задачи с помощью алгоритма CCP-Relax, где применяется стандартная резка контуров. Расчет был выполнен для раскройных карт, взятых из открытой библиотеки тестовых примеров CPPLib.

Ключевые слова: оптимизация маршрута режущего инструмента, листовая резка, машины листовой резки с ЧПУ, мультиконтурная резка, совмещенный рез

Для цитирования: Таваева А.Ф. Применение мультиконтурной резки в алгоритмах построения кратчайшего пути режущего инструмента. // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=990> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.007

The multi-contour cutting application in algorithms of shortest cutting tool path generation

A.F. Tavaeva^{1,2}

¹ Joint-Stock Company «Production Association «Ural Optical and Mechanical Plant named after Mr. E.S. Yalamov», Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract: The cutting path problem for sheet cutting machines with computer numerical control (further - CNC) is considered in this article. The classification of routing problem is given and description of algorithms for solving this problem is given too. The method of Intermittent Cutting Problem is proposed. This method based on application of multi-contour cutting techniques, namely common cut (when several contours are cut by one motion of cutter). The proposed method is to be combined parts in «blocks» and cutting of contours is performed by common cut application usually with one piercing. The three classes of parts (rectangular, triangular and parts with outer contour type like trapezium) are highlighted for which the proposed method is applicable. At the same time presence of inner contours is allowed. The some results of computing experiments are given compared

with problem solution obtained by CCP-Relax algorithm (where the standard cutting technique is used). The calculation was performed for nesting maps from open library CPPLib.

Keywords: optimization of cutting tool path, sheet cutting, CNC sheet cutting equipment, multi-contour cutting, common cut.

For citation: Tavaeva A.F. The multi-contour cutting application in algorithms of shortest cutting tool path generation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=990> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.007 (In Russ).

Введение

В процессе разработки управляющих программ (далее по тексту УП) для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ при назначении траектории перемещения режущего инструмента возникает известная задача оптимизации маршрута резки. Целью этой задачи обычно является минимизация стоимости и / или времени процесса резки, связанного с обработкой требуемых контуров деталей из листового материала.

В качестве критериев оптимизации (целевых функций) в задаче оптимизации маршрута инструмента рассматриваются стоимость F_{cost} и время T_{cut} резки [1,2]:

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

$$T_{cut} = \frac{L_{on}}{V_{on}} + \frac{L_{off}}{V_{off}} + N_{pt} \cdot t_{pt}, \quad (2)$$

где L_{on} – длина пути перемещения режущего инструмента на рабочем ходе; L_{off} – длина пути перемещения режущего инструмента на холостом ходе; C_{on} – стоимость единицы пути режущего инструмента на рабочем ходе; C_{off} – стоимость единицы пути режущего инструмента на холостом ходе; N_{pt} – количество точек врезки; V_{on} – скорость рабочего хода режущего инструмента; V_{off} – скорость холостого хода режущего инструмента; t_{pt} – время, затрачиваемое на одну точку врезки; C_{pt} – стоимость одной точки врезки.

В настоящее время в научной литературе при описании алгоритмов решения задач маршрутизации рассматриваются следующие классы задач [3-5]:

- **Задача коммивояжера** (TSP, Traveling Salesman Problem). Режущий инструмент может врезаться и выходить из обрабатываемого контура только в одной заранее определенной точке контура, при этом контур должен быть полностью вырезан, перед тем как режущий инструмент перейдет к вырезке следующего контура.
- **Обобщенная задача коммивояжера** (GTSP, Generalized Traveling Salesman Problem). Детали вырезаются последовательно. Переход от одного контура к другому осуществляется только после окончательной вырезки текущего контура. Резка может начаться только в одной из заранее заданных точек на контуре.
- **Задача непрерывной резки** (CCP, Continuous Cutting Problem). Детали вырезаются последовательно, переход от текущей детали к следующей осуществляется только после окончательной вырезки текущей детали, т. е. используется стандартная резка

«по замкнутому контуру». Режущий инструмент может врезаться в контур в любой точке по периметру детали.

- **Задача резки с конечным набором точек** (ECP, EndPoint Cutting Problem). Резка может начаться только в одной из заранее заданных точек на контуре. В этой задаче предусмотрена техника частичной резки контуров.
- **Сегментная задача непрерывной резки** (SCCP, Segment Continuous Cutting Problem): вводится понятие сегмента как обобщение понятия контура; сегмент может быть частью контура или объединением нескольких контуров и / или их частей. Каждый сегмент вырезается целиком, от начала до конца.
- **Обобщенная сегментная задача непрерывной резки** (Generalized Segment Continuous Cutting Problem, GSCCP): подобна сегментной задаче непрерывной резки (SCCP), но разбивка на сегменты не задана заранее, и сама подлежит оптимизации;
- **Задача прерывистой резки** (ICP, Intermittent Cutting Problem). Данная задача представляет собой общий случай задачи маршрутизации, когда не накладывается никаких ограничений на выбор точек начала и конца резки, а также на последовательность резки контуров и их частей.

Разница между рассматриваемыми классами задачи обусловлена различными правилами выбора возможных точек врезки и способов резки. В большей части работ, посвященных проектированию маршрута инструмента для машин листовой резки с ЧПУ, описываются методы и соответствующие им алгоритмы, которые основаны на применении стандартной резки деталей «по замкнутому контуру». Этот метод предполагает вырезку граничных контуров деталей целиком и сводит задачу оптимальной маршрутизации к задаче минимизации только холостых перемещений режущего инструмента. В подавляющей части работ по проблеме исследования [6-12] используется дискретизация граничных контуров деталей, что позволяет применять различные математические модели дискретной оптимизации. Можно отметить только отдельные публикации, где оптимизационные алгоритмы ориентированы на поиск решений среди континуальных множеств [13-15]. В целом, следует отметить явную недостаточность исследований по вопросам применения специальных техник резки и методик их использования при проектировании маршрута резки в существующих системах автоматизированного проектирования УП (далее по тексту САПР УП).

В настоящее время помимо стандартной техники резки при проектировании маршрута резки существуют так называемые нестандартные техники резки. Прежде чем рассмотреть классификацию техник резки, введем следующее определение.

Определение 1. *Сегмент резки* $S = MM^*$ – это траектория перемещения режущего инструмента от точки врезки M до точки выключения инструмента M^* .

Используя понятие сегмента резки, все техники фигурной резки на машинах с ЧПУ можно разделить на 3 класса [2]:

1. Резка «по замкнутому контуру» (стандартная техника): в этом случае сегмент резки содержит ровно один замкнутый контур заготовки, который вырезается целиком (Рисунки 1а, 2а, 3а).
2. Мультисегментная резка контура: в этом случае для вырезки одного контура используются не менее двух сегментов резки (Рисунок 1б).

3. Мультиконтурная резка: резка предполагает вырезку нескольких контуров в одном сегменте (Рисунки 1в, 2б, 3б).

В данной статье рассматриваются вопросы применения мультиконтурной резки контуров с совмещенным резом в алгоритмах построения кратчайшего пути режущего инструмента.

Материалы и методы

Как уже было сказано выше, в основном при проектировании УП для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ применяется стандартная техника резки контуров, когда каждый контур вырезается полностью с использованием одной точки врезки, переход от одного контура к другому возможен только после окончательной вырезки предыдущего контура. Таким образом, при такой постановке задачи минимизация времени и стоимости резки возможна только с точки зрения минимизации холостого хода инструмента. В свою очередь, известно, что стоимость одной точки врезки и стоимость одного метра рабочего реза могут в десятки раз превышать стоимость одного метра холостого хода режущего инструмента [1,16]. Поэтому применение специальных техник резки при построении маршрута инструмента является актуальным вопросом при проектировании УП для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ.

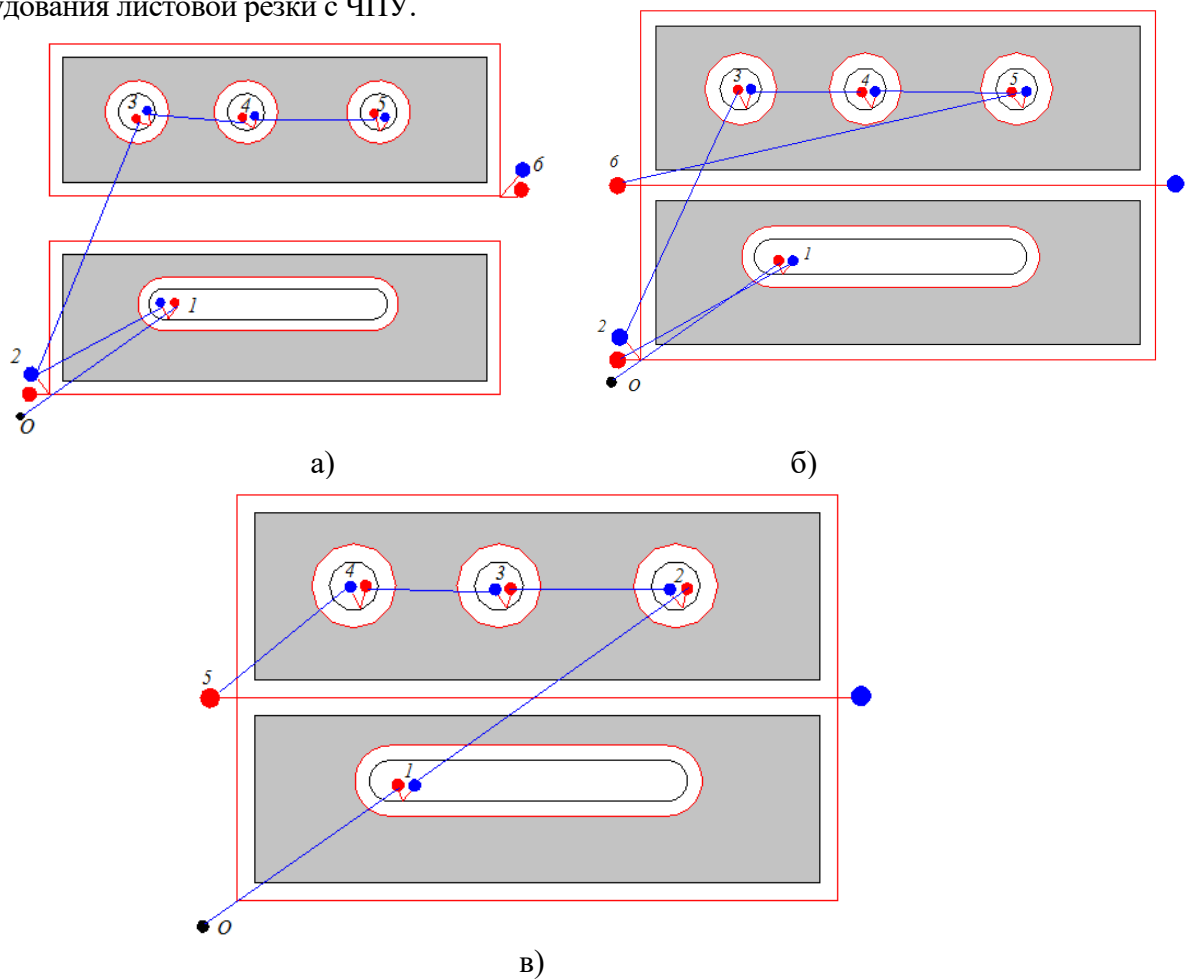


Рисунок 1 – Пример применения стандартной (а), мультисегментной (б) и мультиконтурной (в) резки для прямоугольных деталей

Figure 1 – The example of standard (a), multi-segment (б) and multi-contour (в) application for rectangle parts

В данной статье для трех классов контуров деталей (прямоугольных, треугольных и контуров типа трапеция) предлагаются методы построения маршрута резки с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом. При этом допускается наличие отверстий и окон внутри детали. Предлагаемый метод построения маршрута резки заключается в объединении контуров в группы (или «блоки»), и для каждого блока маршрут резки строится с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом.

На Рисунке 1в приведена схема построения маршрута резки для групп прямоугольных деталей с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом. На Рисунке 1а для сравнения приведена схема резки прямоугольных контуров стандартным методом, на Рисунке 1б – мультисегментная резка прямоугольных контуров.

Как видно из Рисунка 1в, в результате объединения наружных прямоугольных контуров в «блок» и вырезки двух наружных контуров с применением совмещенного реза сокращаются значения параметров L_{on} и N_{pt} по сравнению с Рисунками 1а,б.

На Рисунке 2 приведен пример вырезки треугольных контуров с использованием стандартной техники резки (Рисунок 2а) и с использованием метода, предлагаемого в данной статье (Рисунок 2б). Треугольные контуры объединены в «блоки» и вырезка контуров происходит с использованием совмещенного реза за одну точку врезки (Рисунок 2б). Следует отметить, что для реализации резки контуров за один сегмент их необходимо располагать таким образом, чтобы у любой вершины количество ребер было четным (за исключением случая наличия двух вершин с нечетным количеством ребер, в этом случае эти вершины будут являться точками входа и выхода режущего инструмента (см. Рисунок 2б)). На Рисунке 2б две вершины с нечетным количеством ребер, поэтому это будут точка врезки и точка выключения инструмента. Цифрами обозначена последовательность вырезки контуров.

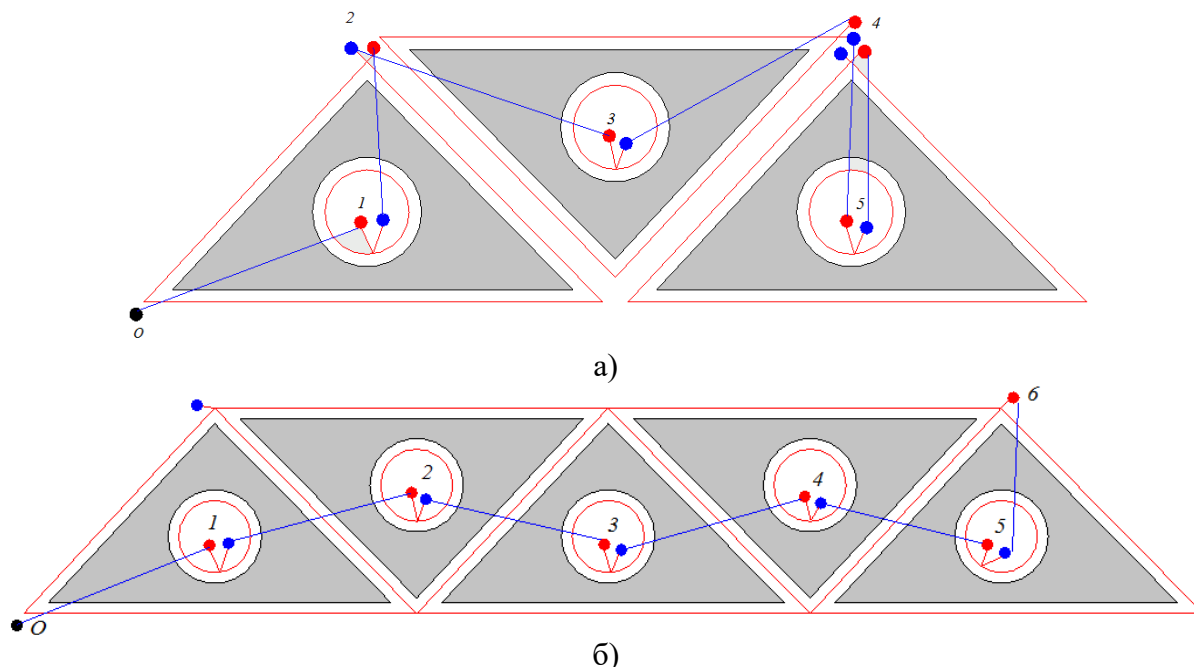


Рисунок 2 – Пример применения стандартной (а) и мультиконтурной (б) резки для треугольных деталей

Figure 2 – The example of standard (a) and multi-contour (b) cutting application for triangle parts

Как видно из Рисунка 2, в результате объединения контуров в «блок», содержащий пять деталей, значения параметров L_{on} и N_{pt} существенно уменьшаются по сравнению со стандартной техникой резки (Рисунок 2а).

В случае несоблюдения правила четности ребер у любой вершины, возникает необходимость в построении дополнительных резов на рабочем ходе непересекающихся с контурами деталей, как видно из Рисунка 3б. Однако при этом значение параметра L_{on} может увеличиваться на величину фактической длины дополнительных резов $L_{\partial on}^{\Sigma факт}$. При этом $L_{\partial on}^{\Sigma факт} < L_{\partial on}^{\Sigma}$. Поэтому в данном способе необходимо вычислять максимально допустимую длину дополнительных резов $L_{\partial on}^{\Sigma}$ при переходе от одного контура к другому без выключения режущего инструмента, при которой выгодно осуществлять переход между контурами на рабочем ходе по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». При этом $L_{\partial on}^{\Sigma}$ вычисляется по формуле:

$$L_{\partial on}^{\Sigma} = \frac{C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{\partial on}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{\partial on}} + C_{on} \cdot L_{on}^{совмещ}}{C_{on}}, \quad (3)$$

где $N_{pt}^{L_{\partial on}}$ – количество точек врезки, на которое уменьшается общее количество точек врезки N_{pt} за счет применения специальной техники резки; $L_{off}^{L_{\partial on}}$ – длина холостых перемещений режущего инструмента, на которое уменьшается значение параметра L_{off} за счет применения специальной техники резки, где $L_{on}^{совмещ}$ – общая длина совмещенных резов, остальные обозначения аналогичны обозначениям, принятым в (1).

На Рисунке 3б детали с наружным контуром типа трапеция объединены в «блок», вырезка контуров происходит с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом. На Рисунке 3а для сравнения приведена схема резки этих же контуров с применением стандартной техники резки.

В данной статье для трех классов контуров деталей (прямоугольных, треугольных и контуров типа трапеция) предлагаются методы построения маршрута резки с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом. При этом допускается наличие отверстий и окон внутри детали. Предлагаемый метод построения маршрута резки заключается в объединении контуров в группы (или «блоки») и для каждого блока маршрут резки строится с применением мультиконтурной резки с совмещенным резом.

Предложенный метод применения мультиконтурной резки и формирование групп однотипных заготовок на этапе проектирования раскроя листовых материалов на фигурные заготовки, среди которых присутствуют описанные выше классы контуров, можно интерпретировать как методы формирования наборов базовых сегментов для последующего решения задач оптимизации класса GSCCP средней и большой размерности.

Ниже рассмотрим численные эксперименты применения предложенного метода при построении маршрута инструмента по сравнению со стандартной техникой резки.

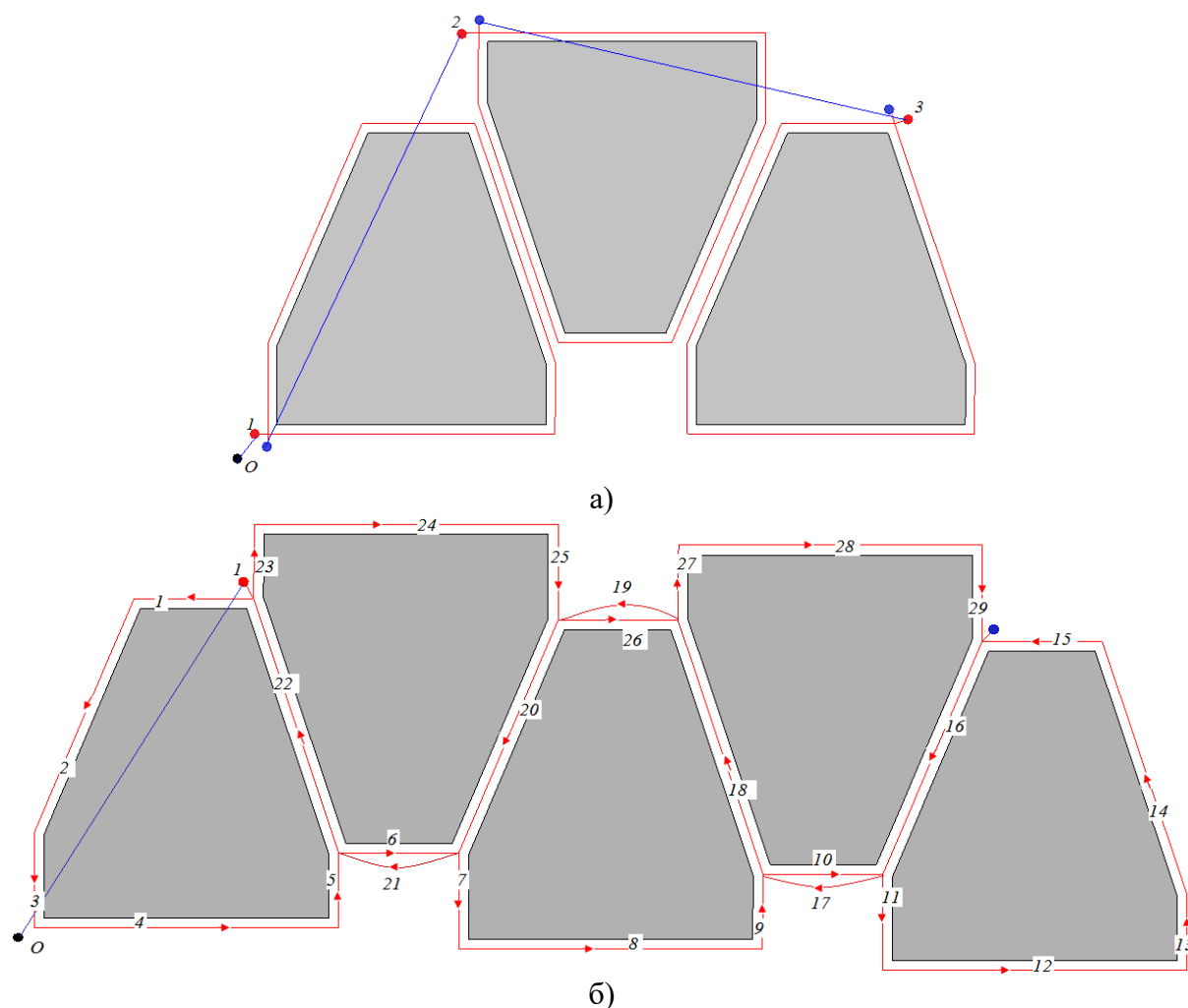


Рисунок 3 – Пример применения стандартной (а) и мультиконтурной (б) резки для деталей типа трапеция

Figure 3 – The example of standard (a) and multi-contour (б) cutting application for trapezoid type parts

Результаты

Оценка эффективности применения предложенной в статье мультиконтурной резки с совмещенным резом для выделенных групп деталей по сравнению со стандартной резкой была выполнена на примере двух раскройных карт, содержащих реальные детали. Примеры раскройных карт были взяты из открытой библиотеки тестовых примеров CPPLib [17] В качестве базы сравнения был взят алгоритм CCP-Relax для построения маршрута резки «по замкнутому контуру» [15]. На Рисунке 4 приведена раскройная карта, для которой построен маршрут с применением стандартной техники резки (Рисунок 4а) и с применением предложенной в статье мультиконтурной резки с совмещенным резом для рассмотренных классов деталей (Рисунок 4б).

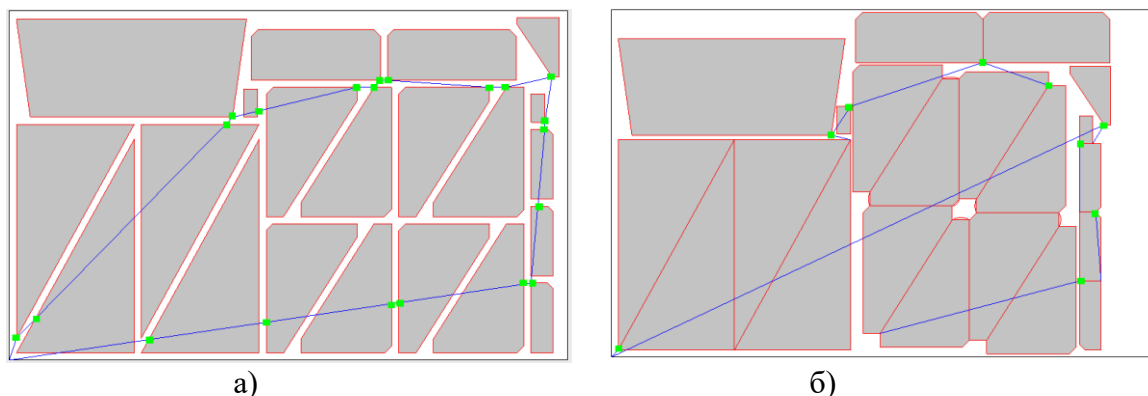


Рисунок 4 – Решение задачи маршрутизации для раскройной карты с помощью алгоритма CCP-Relax (а) и с точки зрения применения мультиконтурной резки с совмещенным резом (б)
 Figure 4 – Solving of optimization cutting path problem for nesting map using CCP-Relax algorithm (a) and using multi-contour cutting technique with common cut (b)

Результаты расчета значений основных параметров резки N_{pt} , L_{on} и L_{off} приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение значений параметров резки N_{pt} , L_{on} и L_{off} с точки зрения применения резки «по замкнутому контуру» и мультиконтурной резки с совмещенным резом
 Table 1 – The compare of cutting parameters N_{pt} , L_{on} и L_{off} values in terms of application of standard cutting and multi-contour cutting with common cut

	CCP-Relax	Мультиконтурная резка с совмещенным резом
Раскройная карта	Рисунок 4а	Рисунок 4б
N_{pt} , шт	21	9
L_{on} , м	10,9	8,5
L_{off} , м	2	1,7

Расчет стоимости резки F_{cost} для рассмотренных примеров выполнен с использованием методики, предложенной в работе [16]. Расчет стоимости выполнен на примере листового материала различной толщины ($\Delta=1-5$ мм) сплава АМг3М, результаты расчета приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение значений стоимости резки F_{cost} с точки зрения применения резки «по замкнутому контуру» и мультиконтурной резки с совмещенным резом

Table 2 – The compare of cutting cost F_{cost} values in terms of application of standard cutting and multi-contour cutting with common cut

	ССР-Relax	Мультиконтурная резка с совмещенным резом
Раскройная карта	Рисунок 4а	Рисунок 4б
АМг3М, $\Delta=1$ мм		
F_{cost} , руб	281,2	191,9
АМг3М, $\Delta=2$ мм		
F_{cost} , руб	444,7	305,9
АМг3М, $\Delta=3$ мм		
F_{cost} , руб	1310,0	916,9
АМг3М, $\Delta=5$ мм		
F_{cost} , руб	4254,7	3080,2

Из Таблиц 1 и 2 видно, что предложенный в статье метод построения маршрута резки и формирования групп однотипных деталей представляет собой эффективный метод построения маршрута режущего инструмента в САПР УП для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ.

Заключение

В статье предложен метод для построения маршрута резки деталей и формирования групп однотипных деталей с применением мультиконтурной резки контуров с совмещенным резом и ее реализация в САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ. Был произведен сравнительный анализ применения предложенной мультиконтурной резки и резки «по замкнутому контуру» с применением алгоритма ССР-Relax, приведены результаты численных экспериментов. Результаты показали, что применение предложенной мультиконтурной резки для построения маршрута резки позволяет уменьшать стоимость резки F_{cost} до 32 % по сравнению со стандартной техникой резки, которая повсеместно используется для построения маршрута резки в САПР УП для оборудования листовой резки с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА

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, ВТУТ*. 2008;2(27):123-130.
2. Petunin A.A. Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines. *AIP: proceedings inter. conf.* 2015. Доступно по: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85078881584&partnerID=8YFLogxK>. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.609 (дата обращения 10.07.2021).
3. Hoefl J., Palekar U. S. Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem. *IIE Transactions*. 1997;29(9). DOI: 10.1023/A:1018582320737.
4. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(5). DOI:

- 10.1007/s00170-016-8609-1.
5. Petunin A. A., Stylios C. Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(12). Доступно по: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84992362161&partnerID=8YFLogxK>. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.544 (дата обращения 10.07.2021).
 6. Ченцов А.Г. *Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории*. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; 2008.
 7. Ченцов А.Г., Хачай Д.М. Эффективный метод решения задачи обхода мегаполисов при ограничениях предшествования специального типа. *Proceedings 47th International Youth School -Conference «Modern Problems in Mathematics and its Applications»*. 2016;(1662):191-199.
 8. Petunin A.A, Chentsov A.A., Chentsov A.G., Chentsov P.A. Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints. *Automation and Remote Control*. 2017;78(4). DOI: 10.1134/S0005117917040087.
 9. Tamajidy M., Palsar S., Baharuding H., Hibs T., Arrifin M. Biogeography based optimization (BBO) algorithm to minimize non-productive time during hole-making process. *International Journal of Production Research*. 2015;53(6). DOI: 10.1080/00207543.2014.965356.
 10. Yun Y, Chung H., Moon C. Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2013;(65):137-147.
 11. Мурзакаев Р.Т., Шилов В.С., Бурылов А.В. Применение метаэвристических алгоритмов для минимизации длины холостого хода режущего инструмента. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2015;(14):123-136.
 12. Yang W., Zhao Y., Jie J., Wang W. An effective algorithm for tool path airtime optimization during leather cutting. *Advanced Material Research*. 2010:373-377. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.102-104.373.
 13. Veeramani S., Kumar D. Optimization of the nibbling operation of the NC turret punch press. *International Journal of Production Research*. 1998;36(7):1901-1916.
 14. Vicencio K., Davis B., Gentilini I. Multi-goal path planning based on the generalized Traveling Salesman Problem with neighborhoods. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942974.
 15. Petunin A. A., Polishchuk E.G., Ukolov, S.S. On the new algorithm for solving continuous cutting problem. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(13):2320-2325. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.552.
 16. Таваева А.Ф., Петунин А.А. Точное вычисление стоимости резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с ЧПУ в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;4(23). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/TavaevaPetunin_4_18_1.pdf. DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.022 (дата обращения 10.07.2021).
 17. Petunin A., Khalyavka A., Khachay M., Kudriavtsev A., Chentsov P., Polishchuk E., Ukolov S. Library of Sample Image Instances for the Cutting Path Problem. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021;(12665). DOI: 10.1007/978-3-030-68821-9_21.

REFERENCES

1. Verkhoturov M.A., Tarasenko P.Yu. Matematicheskoe obespechenie zadachi optimizatsii puti rezhushchego instrumenta pri ploskom figurnom raskroe na osnove tsepnoi rezki. Vestnik UGATU. Upravlenie, VTiT. 2008;2(27):123-130. (In Russ)
2. Petunin A.A. Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines. *AIP: proceedings inter. conf.* 2015. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85078881584&partnerID=8YFLogxK>. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.609 (accessed 10.07.2021).
3. Hoefl J., Palekar U. S. Heuristics for the plate-cutting traveling salesman problem. *IIE Transactions*. 1997;29(9). DOI: 10.1023/A:1018582320737.
4. Dewil R., Vansteenwegen P., Cattrysse D. A review of cutting path algorithms for laser cutters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(5). DOI: 10.1007/s00170-016-8609-1.
5. Petunin A. A., Stylios C. Optimization Models of Tool Path Problem for CNC Sheet Metal Cutting Machines. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(12). Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=84992362161&partnerID=8YFLogxK>. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.544 (accessed 10.07.2021).
6. Chentsov A.G. *Ekstremal'nye zadachi marshrutizatsii i raspredeleniya zadaniy: voprosy teorii*. M.; Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika»; 2008. (In Russ)
7. Chentsov A.G., Khachai D.M. Effektivnyi metod resheniya zadachi obkhoda megapolisov pri ogranicheniyakh predshestvovaniya spetsial'nogo tipa. Proceedings 47th International Youth School -Conference «Modern Problems in Mathematics and its Applications». 2016;(1662):191-199. (In Russ)
8. Petunin A.A., Chentsov A.A., Chentsov A.G., Chentsov P.A. Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints. *Automation and Remote Control*. 2017;78(4). DOI: 10.1134/S0005117917040087.
9. Tamajidy M., Paslar S., Baharuding H., Hibs T., Arrifin M. Biogeography based optimization (BBO) algorithm to minimize non-productive time during hole-making process. *International Journal of Production Research*. 2015;53(6). DOI: 10.1080/00207543.2014.965356.
10. Yun Y, Chung H., Moon C. Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2013;(65):137-147.
11. Murzakaev R.T., Shilov V.S., Burylov A.V. Primenenie metaevristicheskikh algoritmov dlya minimizatsii dliny kholostogo khoda rezhushchego instrumenta. Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2015;(14):123-136. (In Russ)
12. Yang W., Zhao Y., Jie J., Wang W. An effective algorithm for tool path airtime optimization during leather cutting. *Advanced Material Research*. 2010:373-377. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.102-104.373.
13. Veeramani S., Kumar D. Optimization of the nibbling operation of the NC turret punch press. *International Journal of Production Research*. 1998;36(7):1901-1916.
14. Vicencio K., Davis B., Gentilini I. Multi-goal path planning based on the generalized Traveling Salesman Problem with neighborhoods. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2014. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942974.
15. Petunin A. A., Polishchuk E.G., Ukolov, S.S. On the new algorithm for solving continuous cutting problem. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(13):2320-2325. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.552.

16. Tavaeva A.F., Petunin A.A. The accurate calculation of parts treatment cost from sheet metal on the CNC laser cutting machine in problem of tool routing optimization. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;4(23). Available at: https://moit.vivot.ru/wp-content/uploads/2018/10/TavaevaPetunin_4_18_1.pdf. DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.022 (accessed 10.07.2021). (In Russ)
17. Petunin A., Khalyavka A., Khachay M., Kudriavtsev A., Chentsov P., Polishchuk E., Ukolov S. Library of Sample Image Instances for the Cutting Path Problem. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021;(12665). DOI: 10.1007/978-3-030-68821-9_21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Таваева Анастасия Фидагилевна, кандидат технических наук, главный специалист АО «ПО «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова», м.н.с. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: tavaeva_a_f@bk.ru, a.f.tavaeva@urfu.ru

ORCID: [0000-0001-9770-4298](https://orcid.org/0000-0001-9770-4298)

Tavaeva Anastasiya Fidagilevna, PhD in engineering, main specialist Joint-Stock Company «Production Association «Ural Optical and Mechanical Plant named after Mr. E.S. Yalamov», j.r.s. Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 20.05.2021; одобрена после рецензирования 17.09.2021; принята к публикации 27.09.2021.

The article was submitted 20.05.2021; approved after reviewing 17.09.2021; accepted for publication 27.09.2021.