

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Институт новых материалов и технологий  
Кафедра «Информационные технологии и автоматизация проектирования»

На правах рукописи

Таваева Анастасия Фидагилевна

**Разработка методик расчета временных и стоимостных параметров процесса  
резки в системах автоматизированного проектирования управляющих  
программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ**

05.13.12 – Системы автоматизации  
проектирования (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Петунин Александр Александрович

Екатеринбург – 2020

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА<br>АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ<br>ПРОГРАММ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧПУ .....  | 17 |
| 1.1. Классификация техник листовой резки, применяемых в системах<br>автоматизированного проектирования УП для формирования траектории<br>перемещения инструмента .....                                 | 18 |
| 1.2. Формализация оптимизационной задачи проектирования маршрута резки<br>для машин листовой резки с ЧПУ .....   | 24 |
| 1.3. Классификация задач оптимальной маршрутизации инструмента для<br>машин листовой резки с ЧПУ .....   | 29 |
| 1.4. Анализ методов и алгоритмов для решения оптимизационной задачи<br>маршрутизации режущего инструмента при подготовке УП .....  | 32 |
| 1.4.1. Обзор методов решения для оптимизационной задачи маршрутизации<br>инструмента при проектировании УП на основе минимизации длины холостого<br>хода режущего инструмента .....                    | 34 |
| 1.4.2. Обзор методов для решения задачи проектирования маршрута резки на<br>основе минимизации длины рабочего хода режущего инструмента и количества<br>точек врезки .....                             | 39 |
| 1.5. Классификация систем автоматизированного проектирования<br>управляющих программ для оборудования термической резки с ЧПУ .....  | 44 |
| 1.6. Выводы по Главе 1 .....   | 47 |
| ГЛАВА 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ<br>ПРОГРАММ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ С ЧПУ .....   | 49 |
| 2.1 Точное вычисление стоимостных и временных параметров целевых<br>функций в задаче оптимизации маршрута резки при проектировании<br>управляющих программ для оборудования лазерной резки с ЧПУ ..... | 49 |
| 2.1.1 Вычисление фактического времени лазерной резки машины с ЧПУ .....  | 49 |
| 2.1.2 Методика точного расчета стоимости процесса лазерной резки на машине<br>с ЧПУ .....  | 60 |
| 2.2 Стратегии формирования маршрута резки с применением специальных<br>техник резки.....   | 68 |
| 2.2.1 Схемы проектирования маршрута режущего инструмента при резке<br>круглых заготовок .....  | 72 |
| 2.2.2 Схемы проектирования маршрута режущего инструмента при резке<br>многоугольных заготовок.....   | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.3 Выводы по Главе 2 .....   | 84  |
| ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ В ПОДСИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРШРУТА РЕЗКИ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ САПР УП .....         | 85  |
| 3.1. Требования к функциям подсистемы автоматизированного проектирования маршрута резки в САПР УП .....   | 85  |
| 3.2. Подсистема автоматизированного проектирования маршрута резки для оборудования термической резки с ЧПУ .....                                      | 87  |
| 3.2.1. Алгоритм построения маршрута резки для номенклатур типовых деталей с соблюдением технологических ограничений процесса термической резки .....  | 88  |
| 3.3. Расчет температурных полей в процессе термической резки заготовок ....   | 95  |
| 3.4. Модуль для расчета стоимости резки листового материала на оборудовании с ЧПУ и интеграция с универсальной САПР. Особенности и назначение .....   | 103 |
| 3.4.1. Выбор программной платформы и разработка алгоритма для расчета стоимости процесса резки на оборудовании с ЧПУ .....                            | 104 |
| 3.5. Выводы по Главе 3 .....  | 108 |
| ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ НА ПРАКТИКЕ .....  | 109 |
| 4.1 Пример проектирования управляющей программы в САПР «СИРИУС».....  | 109 |
| 4.2 Расчет экономической эффективности внедрения полученных результатов .....   | 119 |
| 4.3. Выводы по Главе 4 .....  | 124 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....   | 126 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....   | 129 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....   | 130 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Документы о внедрении результатов диссертационного исследования .....   | 144 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме диссертации.....  | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики зависимости рабочей скорости режущего инструмента от количества кадров в УП для лазерного CO <sub>2</sub> комплекса с ЧПУ ..... | 151 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты расчета стоимости резки листового материала на лазерном комплексе с ЧПУ .....  | 154 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В машиностроении и других отраслях промышленности в раскройно-заготовительном производстве большая часть продукции изготавливается из листового материала на технологическом оборудовании термической резки с числовым программным управлением (далее по тексту ЧПУ). К такому оборудованию относятся, в частности, машины лазерной, плазменной, кислородной резки. Машины лазерной листовой резки с ЧПУ имеют широкое применение, что обусловлено возможностью обработки многих видов материалов различной толщины, высокой скоростью резки, возможностью обработки контуров различной сложности и хорошего качества реза, адаптации к постоянным изменениям номенклатуры выпускаемой продукции. Как известно, применение систем автоматизированного проектирования (далее по тексту САПР), предназначенных для разработки управляющих программ (далее по тексту УП) для машин листовой резки с ЧПУ, обеспечивают автоматизацию процесса проектирования УП. Проектирование УП для технологического оборудования листовой резки состоит из нескольких этапов. Первый этап предполагает предварительное геометрическое моделирование заготовок и разработку раскройной карты листового материала. Описание геометрии заготовок выполняют с помощью САД систем (Computer-Aided Design). На этапе проектирования раскроя возникает известная задача оптимизации фигурного раскроя листового материала, которая с точки зрения геометрической оптимизации относится к классу трудно решаемых проблем раскроя-упаковки (Cutting & Packing), т.н. проблема «нестинга». На следующем этапе проектирования УП осуществляется процесс назначения траектории перемещения режущего инструмента (маршрута резки) для полученного на первом этапе варианта решения задачи «нестинга». В настоящее время для автоматизации процесса формирования маршрута резки чаще всего используются специализированные системы автоматизированного проектирования, относящиеся к классу САМ систем (Computer-Aided Manufacturing). На этом этапе возникают актуальные научно-практические задачи оптимизации маршрута

режущего инструмента. Целью этих задач обычно является минимизация стоимости и (или) времени процесса резки, связанного с обработкой требуемых контуров деталей из листового материала, за счет определения оптимальной последовательности вырезки контуров и выбора необходимых точек для термической врезки в листовом материале с учетом технологических ограничений процесса резки. В рамках данной диссертационной работы задачи раскроя-упаковки не рассматриваются за исключением связанной с проблемой «нестинга» задачи формирования на листовом материале групп типовых деталей, обеспечивающих решение задачи оптимальной маршрутизации инструмента при вырезке этих групп. Следует отметить, что современные специализированные CAD/CAM системы предоставляют базовый инструментарий для решения задач рационального раскроя материалов и подготовки УП для технологического оборудования листовой резки с ЧПУ. Вместе с тем разработчики систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ не уделяют должного внимания проблеме оптимизации маршрута резки. Существующее программное обеспечение САПР не гарантирует получение оптимальных траекторий перемещения инструмента при одновременном соблюдении технологических требований резки, обусловленных необходимостью уменьшения термических деформаций материала, которые могут приводить к существенным искажениям геометрии вырезаемых деталей. Прежде всего, отметим, что в настоящее время отсутствуют научно-обоснованные методики точного вычисления стоимостных и временных параметров целевых функций в задаче оптимизации построения маршрута резки при проектировании УП из-за сложности учета различных технологий и режимов резания, особенностей используемого оборудования с ЧПУ и эксплуатационных затрат. В частности, в существующих САПР значение скорости рабочего хода инструмента при расчете времени резки принимается величиной постоянной, однако, как показывает практика, фактическая скорость резки может меняться в зависимости от различных технологических факторов, а также характеристик спроектированной УП. В свою очередь, для расчета стоимости процесса резки на оборудовании

листовой лазерной резки с ЧПУ зачастую учитывается только длина рабочего хода инструмента, которая принимается равной суммарному периметру граничных контуров вырезаемых деталей и не учитываются другие параметры траектории перемещения инструмента, а также эксплуатационные характеристики процесса резки и особенности используемого оборудования.

Отметим также, что пользователи САПР, в основном, используют интерактивный режим проектирования УП. При этом при проектировании маршрута резки зачастую применяется стандартная техника резки «по замкнутому контуру» и путь инструмента строится только с точки зрения минимизации холостых переходов режущего инструмента. Однако этот параметр не единственный, который влияет на стоимость процесса резки. Известно, что наибольшее влияние на величину целевых функций стоимости и времени термической резки оказывают число точек врезки и длина перемещения режущего инструмента на рабочем ходе. Поэтому в настоящее время при проектировании УП наибольший интерес представляют специальные способы резки, которые направлены на уменьшение значений основных параметров резки (числа точек врезки, длины холостых и рабочих перемещений режущего инструмента), а не только длины холостых перемещений инструмента. При этом необходимо одновременно выполнять технологические ограничения процесса термической резки, соблюдение которых, как было отмечено выше, позволяет уменьшить искажения геометрических форм и размеров вырезаемых деталей.

Таким образом, задачи разработки методик для точного расчета стоимостных и временных параметров процесса резки, а также для построения маршрута резки с применением специальных техник резки в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ остаются нерешенными и определяют актуальность данной диссертационной работы. Сформулированные задачи по разработке научно-обоснованных методик для расчета стоимостных и временных параметров процесса резки, методик и алгоритмов проектирования маршрута резки с применением специальных способов резки при одновременном соблюдении

технологических ограничений термической резки, а также их программная реализация представляют общетеоретический и очевидный практический интерес для повышения эффективности систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ. Актуальность задачи возрастает и в связи с всё более широким распространением в промышленности лазерного оборудования с ЧПУ, которое позволяет получать детали с достаточной точностью и с необходимым качеством, и в связи с возрастающей конкуренцией в сфере оказания услуг по листовой резке.

**Степень разработанности темы исследования.** Методы проектирования технологических процессов раскроя, включая методы формирования маршрута резки, исследовались в работах, как зарубежных, так и отечественных ученых. Как отмечалось выше, разработка оптимизационных методов решения задачи «нестинга» не входит в круг рассматриваемых в диссертационной работе задач, тем не менее, следует упомянуть о значительном вкладе советских и российских исследователей в теорию оптимизации раскроя-упаковки. Работы в этой предметной области были начаты выдающимися учёными Залгаллером В.А. и Канторовичем Л.В. и продолжены в уфимской научной школе Мухачевой Э.А. и её учениками: Валеевой А.Ф., Верхотуровым М.А., Картаком В.М., Мартыновым В.В., Филипповой А.С., и др. Методологические и теоретические основы создания систем автоматизированного проектирования листового раскроя для задачи «нестинга» были заложены Гилем Н.И., Петуниным А.А., Стояном Ю.Г., Фроловским В.Д.

Разработкой алгоритмов для маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ занимались, в частности, следующие российские исследователи: Верхотуров М.А., Макаровских Т.А., Мурзакаев Р.Т., Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А., Фроловский В.Д., Хачай М. Ю. и др., а также зарубежные исследователи: Arkin E., Ascheuer N., Cattrysse D., Dewil R., Gambardella L., Hoefst J., Jing Y., Kim Y., Lee M., Sherif, S.U., Yang W. и др.

В большой части работ, посвященных проектированию маршрута инструмента для машин листовой резки с ЧПУ, описываются методы и соответствующие им алгоритмы, которые основаны на применении стандартной техники резки деталей («по замкнутому контуру»). Она предполагает вырезку граничных контуров деталей целиком и сводит задачу оптимальной маршрутизации к задаче минимизации только холостых перемещений режущего инструмента, что сильно ограничивает множество допустимых решений задачи. В подавляющей части работ по проблеме исследования (см., например, публикации Мурзакаева Р.Т., Ченцова А.Г., Arkin E., Ascheuer N., Cattrysse D., Dewil R., Hoef J., Jing Y., Lee M., Lin S., Yang W., Zhao Y. и многих других) 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.

Часть работ отечественных и зарубежных ученых Верхотурова М.А., Петунина А.А., Полищука Е.Г., Ченцова П.А., Dewil R., Han G., Kim Y. предлагает алгоритмы проектирования маршрута перемещения режущего инструмента, ориентированные на снижение температуры листового материала в процессе термической резки на оборудовании с ЧПУ и уменьшение геометрических искажений вырезаемых деталей.

В целом, следует отметить явную недостаточность исследований по вопросам применения нестандартных техник резки и методик их использования при проектировании маршрута резки в существующих системах автоматизированного проектирования УП. Остаётся также открытым вопрос точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки для оборудования термической резки с ЧПУ, поскольку, насколько нам известно, до настоящего времени исследований по этому вопросу проведено не было. Это касается как проведения исследований для определения поправочных коэффициентов для величины рабочей скорости перемещения режущего инструмента, так и методик расчета стоимости резки деталей на машинах

листовой резки с ЧПУ. Актуальность разработки этих методик усиливает и тот факт, что в России на предприятиях реального сектора экономики практически нигде не применяют научно-обоснованные методы расчета стоимости резки. Таким образом, разработка методик точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки для задач оптимизации маршрута инструмента, а также разработка методов проектирования маршрута инструмента с использованием специальных техник резки, являются актуальными задачами создания и применения систем автоматизированного проектирования УП для машин листовой резки с ЧПУ.

**Цель работы** заключается в исследовании и разработке методик расчета временных и стоимостных параметров процесса резки, а также методик проектирования маршрута резки для номенклатур типовых деталей в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать научно-обоснованную методику для расчета стоимостных параметров целевой функции в задаче оптимизации маршрута резки при проектировании УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ с учетом эксплуатационных затрат и особенностей используемого оборудования с ЧПУ;

- разработать методику для расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента с целью точного вычисления целевой функции времени резки в задаче оптимизации маршрута резки при проектировании УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ;

- разработать методики проектирования маршрута резки с применением специальных способов в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ для номенклатур типовых деталей в раскройно-заготовительном производстве;

- разработать алгоритмы и реализовать разработанные методики для построения маршрута резки в системах автоматизированного проектирования УП с использованием специальных способов резки при одновременном соблюдении технологических ограничений процесса термической резки;

- реализовать методику для расчета стоимости процесса резки на оборудовании лазерной резки с ЧПУ в виде отдельного модуля для расширения функциональных возможностей систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ;

- провести верификацию и апробацию разработанных методик и алгоритмов.

**Научная новизна результатов.** Автором разработаны методики, применение которых в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ позволит повысить эффективность их функционирования за счёт получения рациональных вариантов маршрута резки при уменьшении значений временных и стоимостных параметров процесса резки при одновременном снижении искажений геометрических форм и размеров выпускаемой продукции. Также разработанные методики точного вычисления стоимостных и временных параметров процесса резки могут применяться для вычисления целевых функций при построении оптимального маршрута резки при проектировании УП в САПР. Программная реализация этих методик позволяет расширить функциональные возможности универсальных систем автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ при решении задач оптимальной маршрутизации инструмента. В данной работе основные экспериментальные исследования были проведены для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Вместе с тем, результаты работы могут быть использованы и для другого типа оборудования листовой термической резки с ЧПУ с учетом особенностей конкретной технологии резки. Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Впервые разработана научно-обоснованная методика расчета стоимостных параметров в целевой функции стоимости в задаче оптимизации построения маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Получены табличные значения этих параметров для ряда марок материала различной толщины с целью использования в САПР УП для машин лазерной резки с ЧПУ;
2. Впервые получены формулы для расчета фактической рабочей скорости перемещения режущего инструмента в целевой функции времени резки в задаче оптимизации построения маршрута резки для лазерного оборудования с ЧПУ;
3. Разработаны новые методики построения маршрута перемещения режущего инструмента для некоторых номенклатур типовых деталей с использованием специальных техник резки для оборудования листовой резки с ЧПУ с целью уменьшения значений основных параметров резки (числа точек врезки, длины холостых и рабочих перемещений режущего инструмента). При этом одновременно соблюдаются условия технологичности и снижаются термические деформации, возникающие в процессе резки.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается:

1. в разработке методики для расчета параметров целевой функции стоимости в задаче оптимизации построения маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ и в полученных табличных значениях этих параметров для целого ряда марок материала различной толщины;
2. в разработке методики точного расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента для целевой функции времени резки в задаче оптимизации построения маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ и в полученных формулах для расчета фактической рабочей скорости на примере оборудования лазерной CO<sub>2</sub> резки с ЧПУ;

3. в разработке методик маршрутизации режущего инструмента при резке некоторых номенклатур типовых деталей на основе использования специальных техник резки оборудования листовой резки с ЧПУ, позволяющих уменьшить значения основных параметров резки при соблюдении технологических ограничений термической резки. Разработанные методики используются в производственном процессе при проектировании УП в САПР «СИРИУС», «BySoft» и «Tru Tops»;
4. в программной реализации разработанных методик в виде макропрограмм для построения маршрута резки для номенклатуры типовых деталей в САПР «СИРИУС»;
5. в разработке модуля для расчета стоимости процесса листовой лазерной резки и его интеграции с существующей САПР «СИРИУС».

Полученные результаты используются в образовательном процессе Уральского Федерального Университета (УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург), что подтверждается актом, приведенным в Приложении А.

Результаты диссертации в виде методик автоматизированного проектирования и программного обеспечения внедрены на предприятиях: ООО «Уралинтех», АО «ПО УОМЗ», ЗАО «РЦЛТ», что подтверждается соответствующими актами, приведенными в Приложении А.

**Методология и методы исследования.** Методологическую базу исследования составили фундаментальные и прикладные работы отечественных и зарубежных ученых в области автоматизированного проектирования маршрута резки для машин листовой резки с ЧПУ и в области разработки алгоритмов оптимальной маршрутной оптимизации. В качестве инструментов исследования использовались следующие методы: анализ, синтез, классификация, формализация, математические методы обработки данных. Формулы для вычисления фактических значений скорости рабочего хода режущего инструмента выведены с использованием полученных результатов

экспериментального исследования на оборудовании лазерной CO<sub>2</sub> резки с ЧПУ. Обработка результатов исследования выполнена средствами программы «Mathcad». Разработка методики для расчета параметров целевой функции стоимости резки выполнена на основании анализа особенностей технологического оборудования лазерной резки с ЧПУ и эксплуатационных затрат, связанных с процессом резки. Для оценки эффективности полученных результатов была проведена апробация разработанных технологий и методик на промышленных предприятиях.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методики вычисления стоимостных и временных параметров целевых функций в задаче оптимизации маршрута резки при автоматизированном проектировании УП для оборудования лазерной листовой резки с ЧПУ. Разработанные методики обеспечивают корректный результат вычисления целевых функций и поиска оптимального маршрута резки с учетом технологических особенностей оборудования термической резки, режимов резания и эксплуатационных затрат;
2. Методики и схемы построения маршрута резки в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ, основанные на применении специальных техник резки для определенных номенклатур деталей, которые изготавливаются из листового материала, и обеспечивающие сокращение времени и стоимости резки, а также уменьшение тепловых деформаций материала;
3. Элементы систем автоматизированного проектирования, которые позволяют повысить эффективность их функционирования и расширить их функциональные возможности при решении задач оптимальной маршрутизации инструмента для машин листовой резки с ЧПУ.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенными в ряде публикаций, полученными при использовании методик, алгоритмов и

программных средств, созданных при непосредственном участии соискателя. Достоверность полученных результатов подтверждается также решением практических задач при внедрении результатов диссертационного исследования на промышленных предприятиях Свердловской области и хорошим согласованием полученных результатов с экспериментальными данными. Основные положения диссертации были представлены на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в изданиях ВАК, Scopus, WoS, известны в научном сообществе и положительно оценены специалистами.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, в том числе:

- II Всероссийская молодежная научно-практическая конференция с международным участием «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2013);
- III Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2014);
- II Международная конференция «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления» (Уфа, 2014);
- II Международная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (Уфа, 2014);
- IV Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2015);
- 41<sup>я</sup> Международная конференция «Applications of Mathematics in Engineering and Economics» (AMEE'15) (Болгария, 2015);
- II Международная конференция «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (Челябинск, 2016);
- 11 Международная конференция «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (Екатеринбург, 2016);

- VI Международная конференция «Информационные Технологии и Системы» (Банное, Россия, 2017);
- III Международная конференция «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing» (Челябинск, 2017);
- 19 Международная конференция «Computer Science and Information Technologies» (Германия, 2017);
- Международная конференция «Mathematical optimization theory and operations research» (Екатеринбург, 2019);
- Международная научно-техническая конференция «International conference on industrial engineering» (Сочи, 2019);
- Международная конференция «International conference on rheology and modeling of materials» (Венгрия, 2019).

**Личный вклад автора** состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы, проведении аналитических расчетов на основе полученных результатов, а также в разработке соответствующих методик и элементов систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ. Все экспериментальные исследования на машине лазерной резки с ЧПУ и анализ их результатов, а также формулировка выводов, сделаны автором самостоятельно. В опубликованных совместных работах постановка и разработка алгоритмов для решения задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном активном участии соискателя.

**По теме диссертационной работы** опубликовано 18 научных работ, среди которых 4 статьи в научных журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 6 публикаций в научных журналах, индексируемые в базе данных WoS и Scopus, 8 работ опубликованы в других изданиях. Список публикаций по теме диссертации приведен в Приложении Б.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 164 с., в том числе 65 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 118 наименований.

Содержание диссертации соответствует п.1, 2 и 3 Паспорта специальности 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (по отраслям).

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ РЕЗКИ С ЧПУ**

Совершенствование процессов проектирования и технологической подготовки раскройно-заготовительного производства при автоматизированном проектировании УП для оборудования термической резки с ЧПУ зависит от оптимизации количественных и качественных факторов. Среди них можно выделить время и стоимость процесса резки. Применение средств вычислительной техники и информационных технологий для оптимизации этих факторов является перспективным и единственным методом, который обеспечивает конкурентоспособность предприятий, занимающихся обработкой листовых материалов на оборудовании с ЧПУ. В настоящее время в существующих системах автоматизированного проектирования УП для технологического оборудования термической резки с ЧПУ остаются нерешенными ряд задач, связанных с минимизацией стоимостных и временных параметров процесса резки при одновременном соблюдении условий технологичности. Возникает проблема сокращения термических деформаций материала в процессе резки, наличие которых может привести к короблению и искажению геометрических размеров вырезаемых заготовок.

Необходимо исследовать вопросы повышения эффективности функционирования систем для проектирования УП для оборудования термической резки. С этой целью необходимо рассмотреть постановку задачи оптимизации траектории перемещения режущего инструмента при проектировании УП, разработать и реализовать методики точного расчета стоимостных и временных параметров целевых функций, а также разработать алгоритмы построения маршрута резки с применением специальных способов резки при соблюдении условий технологичности.

Решение сформулированных задач обеспечит разработку методических и научных основ для повышения эффективности функционирования систем

автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ.

В работе проведенные исследования и полученные результаты относятся к исследованиям лазерной резки на машинах с ЧПУ, но при этом подразумевается, что результаты могут быть обобщены и на другие виды термической резки.

### **1.1. Классификация техник листовой резки, применяемых в системах автоматизированного проектирования УП для формирования траектории перемещения инструмента**

Проектирование УП для технологического оборудования термической резки предполагает предварительное геометрическое моделирование заготовок (в дальнейшем в работе термин «заготовка» будет использоваться как синоним термина «деталь», которая вырезается из листового материала) и разработку раскройной карты листового материала, при этом возникает задача фигурного раскроя или проблема «нестинга», которая относится к классу задач раскроя-упаковки (Cutting&Packing problem, C&P). Классификация этих задач приведена в работе [115]. Как было отмечено выше, разработка оптимизационных методов решения задачи «нестинга» не входит в круг рассматриваемых в диссертационной работе задач, тем не менее, следует упомянуть о значительном вкладе советских и российских исследователей в теорию оптимизации раскроя-упаковки. Как было отмечено выше, работы в этой предметной области были начаты выдающимися учёными Залгаллером В.А. и Канторовичем Л.В. [10] и продолжены в уфимской научной школе Мухачевой Э.А. и её учениками: Валеевой А.Ф., Верхотуровым М.А., Картаком В.М., Мартыновым В.В., Филипповой А.С., и др. [напр.,26,27]. Раскройная карта – графический файл, который содержит информацию о геометрии и расположении вырезаемых заготовок. При этом положение каждой заготовки, описываемой внешним замкнутым контуром и, возможно, одним или несколькими внутренними контурами, фиксировано и определено на этапе раскроя материала. На следующем этапе осуществляется процесс назначения маршрута перемещения режущего инструмента, что

порождает актуальную на сегодняшний день оптимизационную задачу поиска маршрута резки при обработке листового материала на оборудовании термической резки с ЧПУ. Эта проблема связана с тем, что существующие зарубежные и отечественные системы автоматизированного проектирования не гарантируют получение оптимальной траектории перемещений режущего инструмента при одновременном соблюдении технологических особенностей и ограничений процесса термической резки.

Рассмотрим технологические особенности термической резки. Для этого в системе автоматизированного проектирования УП пользователь, прежде всего, должен определить ширину реза в зависимости от типа обрабатываемого материала и его толщины, т.к. при термической обработке происходит «сгорание», «выметание» материала, поэтому при вырезке деталей необходимых размеров контур обрабатываемой детали и движение инструмента не совпадают. Инструмент перемещается по эквидистанте контура (рисунок 1.1). На втором этапе пользователю необходимо установить предварительную точку врезки в материал на определенном расстоянии от вырезаемого контура (в зависимости от типа термической резки, марки обрабатываемого материала и его толщины) перед процессом резки по контуру и точку выхода режущего инструмента (иногда применяется способ выключения режущего инструмента непосредственно на контуре). Это обусловлено «наплывом» материала на поверхность заготовки и дополнительными деформациями в процессе врезки. Точка врезки – это операция входа режущего инструмента в обрабатываемый материал. Также необходимо учесть *условие предшествования*, которое обусловлено особенностями машин портального типа [32,38,75,80]. Согласно условию предшествования если внешний контур имеет один или более внутренних контуров, которые представляют собой границы отверстий в деталях, то прежде чем будет начата вырезка внешнего контура, должны быть вырезаны все внутренние контуры. Для случая расположений деталей внутри отверстий, сначала должны быть вырезаны контура этих деталей, и только затем вырезаются контура отверстий. Это обусловлено тем, что после вырезки внешнего контура деталь может сместиться

на рабочем столе, что в свою очередь может привести к столкновению режущей головки и заготовки, тем самым повредив дорогостоящий инструмент. Проектирование маршрута резки заключается в выборе последовательности обрабатываемых контуров, точек врезки и выхода режущего инструмента для каждого контура (в случае резки стандартным способом «по замкнутому контуру»). На рисунке 1.1 цифрами представлена последовательность резки контуров согласно условию предшествования с применением стандартной техники резки «по замкнутому» контуру. В случае стандартной техники резки каждый замкнутый контур вырезается целиком, и после резки одного контура переход к следующей точке врезки происходит с выключенным инструментом на холостом ходе. Обозначения, принятые на рисунке 1.1, применимы для всех рисунков, приведенных в настоящей работе, которые касаются тех или иных схем резки заготовок.

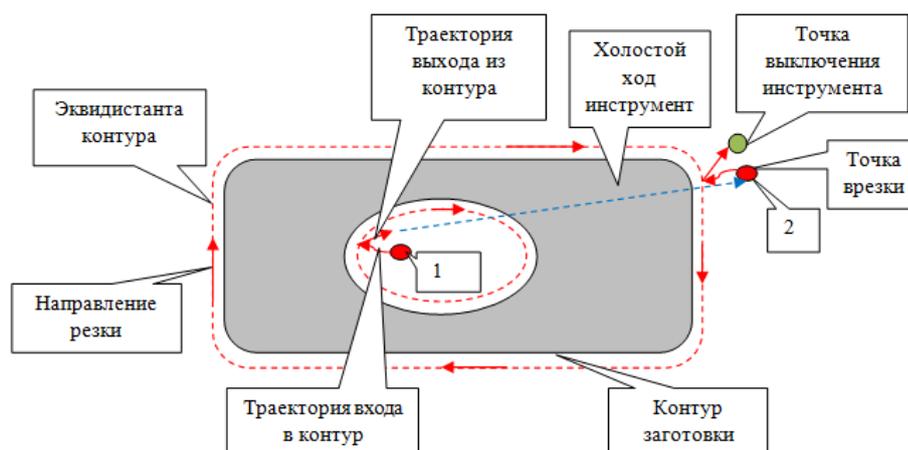


Рисунок 1.1 - Пример схемы резки заготовки «по замкнутому» контуру

Траектория перемещения режущего инструмента (маршрут резки) считается заданным, если заданы следующие параметры:

1. Точки врезки;
2. Точки выключения инструмента;
3. Траектория перемещения инструмента на рабочем ходе между точкой врезкой и точкой выключения инструмента;

4. Порядок резки (он определяет, в частности, холостые перемещения инструмента между точкой выключения инструмента и следующей точкой врезки).

Задача поиска оптимальной траектории перемещения режущего инструмента в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования термической листовой резки с ЧПУ является одной из наиболее важных задач, возникающих при проектировании УП.

Введем определения, касающиеся понятия маршрута резки [99].

**Определение 1.1.** *Сегмент резки*  $S = MM^*$  – это траектория перемещения режущего инструмента от точки врезки  $M$  до точки выключения инструмента  $M^*$ .

В настоящее время помимо стандартной техники резки «по замкнутому контуру» при проектировании маршрута резки существуют т.н. нестандартные техники резки. Используя понятие сегмента резки, все техники фигурной резки на машинах с ЧПУ можно разделить на 3 класса [34]:

1. *Резка «по замкнутому контуру» (стандартная техника):* в этом случае сегмент резки содержит ровно один замкнутый эквидистантный контур заготовки, который вырезается целиком (рисунок 1.1);
2. *Мультисегментная резка контура:* в этом случае для вырезки одного контура используются не менее двух сегментов резки (рисунок 1.4);
3. *Мультиконтурная резка:* резка предполагает вырезку нескольких контуров в одном сегменте (рисунок 1.2, 1.3).

«Цепная» резка заключается в вырезке нескольких контуров с использованием одной точки врезки [3]. Прежде чем режущий инструмент переходит к вырезанию следующего контура, текущий контур должен быть вырезан. На рисунке 1.2 показан пример схемы «цепной» резки двух заготовок, при этом резка внешних контуров обеих заготовок производится без выключения инструмента с использованием только одной точки врезки.

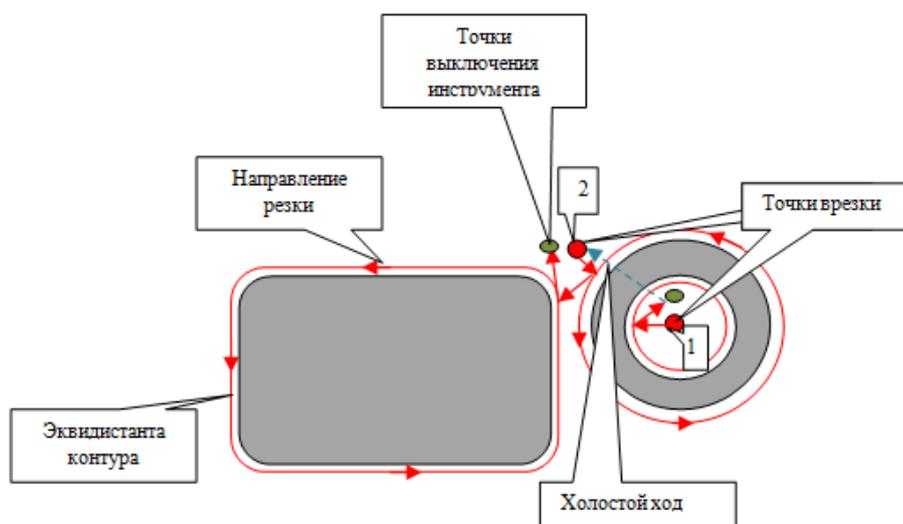


Рисунок 1.2 - Пример схемы резки трех контуров с применением «цепной» резки

Совмещенный рез (рисунок 1.3) используется при резке заготовок, которые содержат прямолинейные отрезки в контуре, и которые в процессе раскроя размещаются таким образом, что имеют общую границу по одному из таких прямолинейных отрезков. Общая прямолинейная граница позволяет размещать заготовки с половинным припуском на рез (т.е., на ширину реза), поскольку режется только один раз, что экономит материал и сокращает суммарную длину резки на величину совмещенного реза. На рисунке 1.3 цифрами 1-7 обозначена последовательность резки каждого ребра трапеции.

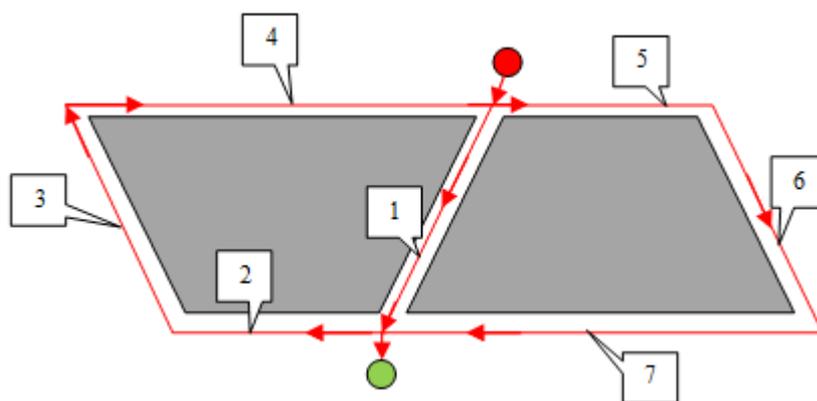


Рисунок 1.3 - Пример схемы резки двух заготовок с применением совмещенного реза

В некоторых случаях применение специальных способов резки позволяет сокращать термические деформации и коробление заготовок, которые возникают

в процессе термической резки листового материала на машинах с ЧПУ. С точки зрения сокращения термических деформаций, возникающих в процессе резки, пример на рисунке 1.4 показывает вырезку длинномерной заготовки с перемычкой. Техника резки «перемычка» предусматривает оставление не вырезанной части контура заготовки обычно, небольшого прямолинейного отрезка или нескольких отрезков, резка которых происходит после завершения вырезки оставшейся части контура [34]. Этот прием применяется с целью уменьшения деформаций материала при термической резке заготовок, склонных к термическим деформациям, в частности, длинномерных заготовок. В ряде случаев при резке одного контура может понадобиться несколько перемычек. Перемычки широко применяются также при резке «мелких» деталей на машинах с ЧПУ портального типа, поскольку они обеспечивают фиксацию детали в плоскости листа после завершения резки.

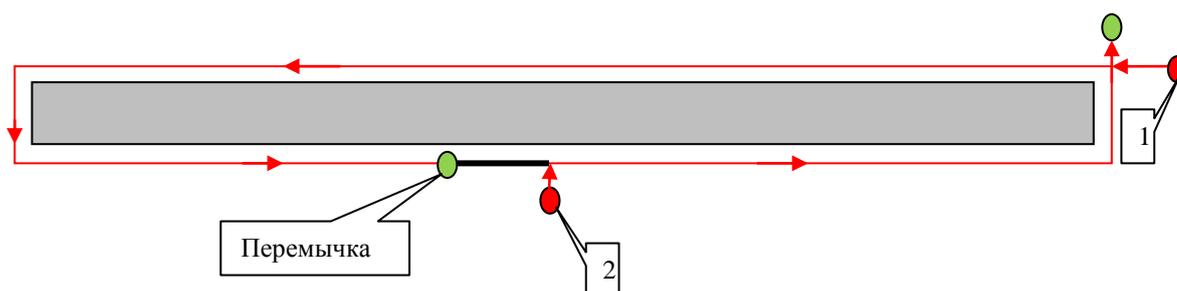


Рисунок 1.4 - Пример схемы резки длинномерной заготовки с использованием перемычки

На практике применяются и другие специальные способы резки, но все они являются разновидностями техник, относящихся к одному из определенных выше классов.

Как было сказано выше, в настоящее время пользователи САПР в основном используют интерактивный режим проектирования УП. При этом при проектировании маршрута резки зачастую применяется резка «по замкнутому контуру». В свою очередь, как показывает практика [46,48,109], использование специальных техник резки позволяет уменьшать значения основные параметров процесса резки. Наличие функций, обеспечивающих частичную резку контуров,

являются важнейшими инструментами в САПР, которые позволят повысить эффективность проектирования УП по сравнению с существующими алгоритмами построения траектории перемещения режущего инструмента. Следует отметить, что в существующих системах автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки алгоритмы для построения траектории перемещения режущего инструмента обычно ограничены и содержат недостаточный набор специальных техник резки при этом остается открытым вопрос технологичности получаемых решений. С целью получения заготовок с размерами и формой, не выходящими за пределы установленных допустимых значений, необходимо учитывать технологические особенности процесса резки и пытаться свести к минимуму тепловые деформации, возникающие в процессе термической резки.

## **1.2. Формализация оптимизационной задачи проектирования маршрута резки для машин листовой резки с ЧПУ**

Для формализации задачи оптимизации маршрута резки для машин листовой резки с ЧПУ введем следующие определения [38,95]. Пусть  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – двумерные геометрические объекты, представляющие собой односвязные или многосвязные области евклидовой плоскости  $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ , ограниченные одной или несколькими замкнутыми кривыми (которые являются граничными контурами)  $C_1, C_2, \dots, C_N$  ( $A_i, C_j \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}; i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, N}; N \geq n$ ). При этом объекты  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – геометрические модели плоских деталей. Пусть также определена область размещения объектов  $B$  ( $B \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}$ ), которая является геометрической моделью листового материала, из которого вырезаются детали. Пусть объекты  $A_i$  размещены в области  $B$ , при этом выполнено условие взаимного не пересечения объектов и другие условия, обусловленные технологическими требованиями резки деталей на конкретном технологическом оборудовании с ЧПУ. Вариант размещения объектов является допустимым вариантом раскроя листового материала для заданного набора  $n$  деталей.

Пример размещения в прямоугольной области 62 объектов ( $n=62$ ), описываемых 78 ( $N=78$ ) замкнутыми контурами с заданными расстояниями между ними, приведен на рисунке 1.5.

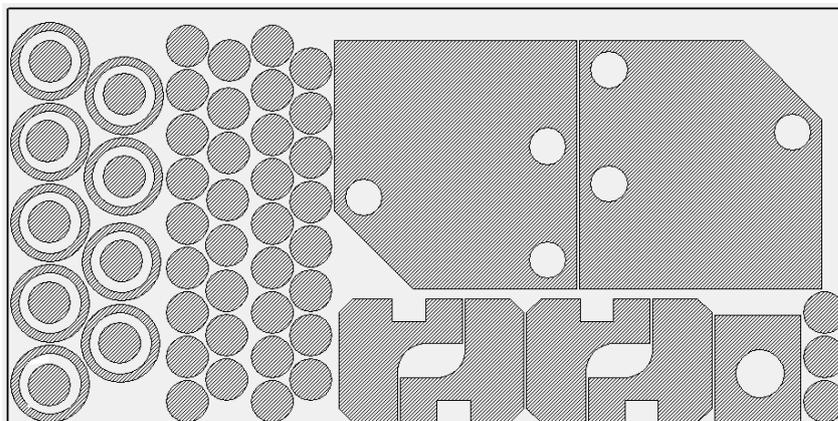


Рисунок 1.5 - Пример раскроя листа 3000x1500мм

Пусть  $K$  – количество сегментов, из которых состоит траектория перемещения режущего инструмента, тогда  $k$ -й сегмент  $S_k = M_k M_k^*$  ( $k \in \overline{1, K}$ ). Каждый сегмент может содержать один контур (в случае стандартной техники резки), два и более контуров (в случае мультиконтурной техники резки), либо часть контура (в случае мультисегментной техники резки).

Траектория перемещения режущего инструмента с точки зрения сегментов резки определяется кортежем  $R$  [38,95]:

$$R = (M_0, M_1, S_1, M_1^*, M_2, S_2, M_2^*, \dots, M_K, S_K, M_K^*, i_1, i_2, \dots, i_K), \quad (1.1)$$

где  $M_0$  – начальная точка положения инструмента,  $i_1, i_2, \dots, i_K$  – последовательность, в соответствии с которой вырезаются используемые сегменты резки  $S_1, S_2, \dots, S_K$ . Линейное перемещение инструмента на холостом ходе между точкой выключения инструмента и следующей точкой врезки однозначно определяется этой последовательностью. Если применить комбинаторную терминологию, то последовательность однозначно задается перестановкой порядка  $K$ , т.е. упорядоченным набором натуральных чисел от 1 до  $K$  (биекцией на множестве  $\overline{1, K}$ ), которая числу  $k \in \overline{1, K}$  ставит в соответствие элемент  $i_k$  из набора.

На рисунке 1.6 показана схема одного из возможных маршрутов резки для примера, приведенного на рисунке 1.5. Маршрут резки содержит тридцать шесть (36) сегментов. Для резки внешних контуров десяти групп деталей с точками врезки  $M_{11}$  (пять деталей в группе),  $M_{20}$  (четыре детали в группе),  $M_{21}$  и  $M_{23}$  (девять деталей в группе),  $M_{22}$  и  $M_{24}$  (восемь деталей в группе),  $M_{25}$  и  $M_{26}$  (две детали в группе),  $M_{33}$  (две детали в группе) и  $M_{36}$  (три детали в группе) была использована мультиконтурная резка (указанные группы деталей выделены зеленым цветом). Все остальные контуры вырезаны с применением стандартной техники резки. Последовательность резки сегментов соответствует номерам точек врезки  $M_r$  ( $r=1,2,\dots,36$ ).

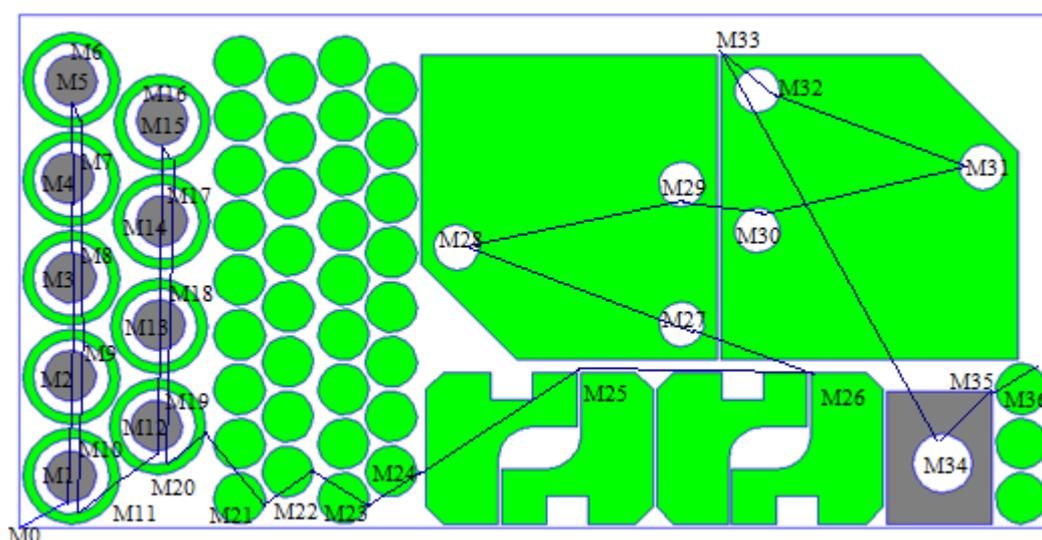


Рисунок 1.6 - Пример маршрута резки

Следует отметить, что на рисунке 1.6 визуализация маршрута резки осуществлена точно по граничным контурам деталей, а не по их эквидистантным контурам. Это связано с тем, что в большинстве САПР УП программирование движения инструмента осуществляется по граничным контурам деталей, а вычисление реальной траектории производится либо системой ЧПУ, либо постпроцессором, который конвертирует информацию о маршруте резки из внутреннего формата системы в формат команд конкретного оборудования с ЧПУ [38].

В качестве критерия оптимизации (целевой функции) часто в задаче оптимизации маршрута резки рассматривается общее время резки  $T_{cut}$ . При листовой резке на технологическом оборудовании с ЧПУ  $T_{cut}$  рассчитывается по следующей формуле (см., например, [32]):

$$T_{cut} = \frac{L_{on}}{V_{on}} + \frac{L_{off}}{V_{off}} + N_{pt} \cdot t_{pt}, \quad (1.2)$$

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

Следует отметить, что значение скорости рабочего хода инструмента программируется при разработке УП и предполагается, что значение  $V_{on}$  в (1.2) является постоянной величиной. Однако, как показывает практика, фактическая скорость резки может меняться в зависимости от различных технологических факторов и параметров спроектированной УП. В свою очередь проектируется некорректная УП, которая не учитывает технологические особенности используемого оборудования с ЧПУ. Это диктует необходимость проведения исследований для определения поправочных коэффициентов для величины  $V_{on}$  с целью точного вычисления целевой функции  $T_{cut}$  и корректного проектирования УП. В Главе 2 будут приведены результаты такого исследования применительно к лазерной резке для определенного класса материалов и толщин.

Экономической характеристикой качества разработанной УП является стоимость резки деталей на технологическом оборудовании с ЧПУ. Этот показатель включает в себя произведенные во время обработки листового материала затраты на электроэнергию, расходные материалы, расход газа, обслуживание оборудования с ЧПУ и другие эксплуатационные затраты.

Показатель стоимости резки можно определить по следующей формуле (см., например, [3, 32]):

$$F_{\text{cost}} = L_{\text{on}} \cdot C_{\text{on}} + L_{\text{off}} \cdot C_{\text{off}} + N_{\text{pt}} \cdot C_{\text{pt}}, \quad (1.3)$$

где  $L_{\text{on}}$ ,  $L_{\text{off}}$  и  $N_{\text{pt}}$  имеют тот же смысл, что и в (1.2),  $C_{\text{on}}$  - стоимость единицы пути режущего инструмента на рабочем ходе;  $C_{\text{off}}$  - стоимость единицы пути режущего инструмента на холостом ходе;  $C_{\text{pt}}$  - стоимость одной точки врезки.

Возникают трудности в вычислении основных параметров  $C_{\text{on}}$ ,  $C_{\text{off}}$  и  $C_{\text{pt}}$ , которые зависят от многих факторов. Для машин термической резки с ЧПУ параметры  $C_{\text{on}}$ ,  $C_{\text{off}}$ ,  $C_{\text{pt}}$  зависят от эксплуатационных затрат, связанных с типом используемого оборудования с ЧПУ, маркой и толщиной обрабатываемого материала, стоимостью расходных материалов, амортизацией оборудования и величиной заработной платы обслуживающего персонала. Зависимость  $C_{\text{on}}$ ,  $C_{\text{off}}$ ,  $C_{\text{pt}}$  от выделенных параметров определяется аналитически, либо табличными функциями. Зачастую стоимость резки рассчитывается на основании специальных нормативов, не зависящих от величин  $L_{\text{on}}$ ,  $L_{\text{off}}$  и  $N_{\text{pt}}$ . Однако в настоящее время на многих предприятиях для определения стоимости резки учитывается только длина рабочего хода инструмента  $L_{\text{on}}$ , которая принимается равной суммарному периметру граничных контуров вырезаемых деталей, что, естественно, приводит к неадекватной оценке стоимости процесса резки.

Следует отметить, что задача правильного определения величин  $C_{\text{on}}$ ,  $C_{\text{off}}$ ,  $C_{\text{pt}}$  для конкретного технологического оборудования и конкретного материала сама по себе является малоисследованной проблемой. Например, в [15] производится расчет штучно-калькуляционного времени при лазерной обработке материалов. В работе [23] производится сравнительный анализ стоимости лазерной резки листовых материалов для Ст3 ( $\Delta=3...10\text{мм}$ ) с применением гидроабразивной, плазменной, кислородной и лазерной резки. В [44]

рассматривается стоимостный критерий комплексной оптимизации в задаче раскроя-упаковки. В [62] выполнена оценка стоимости эксплуатации плазменных установок и CO<sub>2</sub> лазеров. К стоимости эксплуатации авторы относят: стоимость энергетических затрат, затрат на расходы рабочих газов, стоимости расходных материалов и сервисного обслуживания установок. Однако, как показал анализ, в настоящее время не существует методик для точного вычисления стоимостных параметров процесса резки для оборудования термической листовой резки с ЧПУ. В Главе 2 будет предложена методика расчета стоимостных параметров  $C_{on}, C_{off}, C_{pt}$  применительно к оборудованию лазерной резки с ЧПУ.

Значения целевых функций (1.2) и (1.3) однозначно определяются маршрутом резки, задаваемым (1.1) [38]. Тогда сформулированные задачи оптимизации маршрута перемещения инструмента для машин листовой резки с ЧПУ можно представить в самом общем виде как задачу минимизации некоторой числовой функции  $F$ , заданной на множестве  $G$  допустимых кортежей  $R$  [38,95]:

$$F(R) \rightarrow \min_{R \in G} .$$

### 1.3. Классификация задач оптимальной маршрутизации инструмента для машин листовой резки с ЧПУ

В научной литературе при описании алгоритмов решения задач маршрутизации рассматриваются следующие классы задач [75,86]:

1. *Задача коммивояжера* (в англоязычной литературе 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;
2. *Обобщенная задача коммивояжера* (в англоязычной литературе 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;

3. *Задача непрерывной резки* (в англоязычной литературе 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;

4. *Задача резки с конечным набором точек* (в англоязычной литературе ECP, EndPoint Cutting Problem). Резка может начаться только в одной из заранее заданных точек на контуре. В этой задаче предусмотрена техника частичной резки контуров;

5. *Задача произвольной резки* (в англоязычной литературе 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. Например, для модели CCP точка входа в контур и соответствующая ей точка врезки выбирается из бесконечного числа возможных точек врезки на контуре детали. Задачи ECP и ICP отличаются от остальных возможностью применения частичной резки контура. В результате возможно применение специальных техник резки.

Введем определение базового сегмента резки [95].

**Определение 1.2.** *Базовый сегмент резки  $B^S$  для сегмента  $S = MM^*$  - часть траектории сегмента резки, которая не содержит траекторию входа в контур и выхода из него.*

Основываясь на концепции базового сегмента в [95] были предложены еще два класса оптимизационных задач назначения маршрута инструмента. Задача с фиксированным числом  $K$  сегментов резки (и базовых сегментов резки

$B^{S_k}, k \in \overline{1, K}$ ) – в англоязычной литературе SCCP, Segment Continuous Cutting Problem. Следует отметить, что если все граничные контура деталей  $C_1, C_2, \dots, C_N$  базовые сегменты  $B^{S_k}, k \in \overline{1, K}$  и  $N = K$ , тогда SCCP эквивалентна CCP. Предположим, что для исходной задачи маршрутизации определен конечный набор базовых сегментов резки размерностью  $T$ , что соответствует ансамблю задач  $\{SCCP_i, i \in \overline{1, T}\}$ . В свою очередь Generalized SCCP (GSCCP) есть  $\{SCCP_i, i \in \overline{1, T}\}$ , где GSCCP – это обобщенная задача с фиксированным числом  $K$  сегментов резки.

Фактически SCCP и GSCCP являются подклассами ICP, содержащими все задачи с конечным набором базовых сегментов резки. Таким образом, в классе ICP выбран большой подкласс задач маршрутизации, для которых можно разработать эффективные алгоритмы оптимизации. На рисунке 1.7 приведена расширенная классификация этих задач [38].

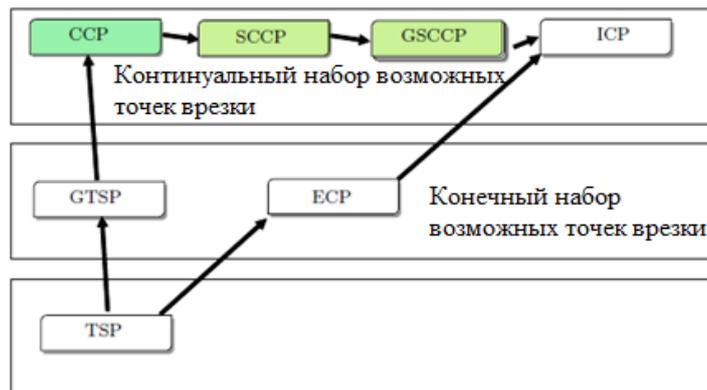


Рисунок 1.7 – Расширенная классификация задач маршрутизации инструмента для машин листовой резки

Если при проектировании УП применять так называемую резку «по замкнутому» контуру (рисунок 1.1), то данная техника резки реализуется в моделях TSP, GTSP и CCP. В случае применения специальной техники резки (например, совмещенный рез), для которой допускается частичная резка контура и при этом точка врезки выбирается из дискретного множества точек на контуре, рассматривается модель ECP. В свою очередь класс ICP является обобщенной формой задачи маршрутизации инструмента, для которого нет ограничений на применение специальных техник резки и выбор точек врезки. В настоящее время

для задач ИСР отсутствуют эффективные алгоритмы оптимизации. Одним из подходов к решению задач данного класса, как отмечено выше, является формирование разного набора базовых сегментов и применение разных алгоритмов оптимизации. Некоторые способы формирования такого рода сегментов для ряда типовых деталей будут показаны в Главе 2.

#### **1.4. Анализ методов и алгоритмов для решения оптимизационной задачи маршрутизации режущего инструмента при подготовке УП**

Задача оптимизации траектории перемещения режущего инструмента для оборудования термической резки с ЧПУ в случае использования конечного набора возможных точек врезки и возможных точек входа инструмента в граничные контуры деталей является задачей комбинаторной оптимизации и относится к классу NP-трудных задач. Для ее решения применимы точные и приближенные алгоритмы. Полный перебор возможных решений поставленной оптимизационной задачи хотя и позволяет найти глобальный оптимум, но требует колоссального времени вычисления, даже при небольшой размерности задачи. Предлагались такие точные методы решения этой задачи, как динамическое программирование (далее по тексту ДП) [31,37,42,55-59,61,73,74], метод «ветвей и границ» [65]. Как известно, применение этих алгоритмов для получения точного решения возможно только для задач небольшой размерности. Естественным подходом к решению таких задач является применение приближенных алгоритмов, к которым в частности относятся метаэвристические алгоритмы и их комбинации, например [16,81,94,118], а также комбинации точных и приближенных алгоритмов [9,113,117]. В [29] выделено 4 группы метаэвристических методов: эволюционные алгоритмы; методы «роевого» интеллекта; методы, имитирующие физические процессы и мультистартовые алгоритмы. Разработчики алгоритмов маршрутной оптимизации инструмента использовали, например, генетические алгоритмы [88,91,105], метод муравьиной колонии [82,102], алгоритм колонии пчел [11], алгоритм имитации отжига [25,84]. При постановке задачи минимизации времени и стоимости резки в терминах теории графов план раскроя можно представить в

качестве плоского графа, а маршрут режущего инструмента в частном случае как последовательность эйлеровых цепей, охватывающих граф, см. например [17,18,19]. Обзор некоторых алгоритмов решения задач TSP, GTSP, CCP, ECP и ICP приведен в работе [75].

Как следует из (1.2) и (1.3), минимизацию целевых функций стоимости и времени процесса резки можно произвести, оптимизируя следующие параметры:  $L_{on}$ ,  $L_{off}$  и  $N_{pt}$ .

Основная часть литературы по теме диссертационного исследования рассматривает оптимизацию маршрута резки путем минимизации только  $L_{off}$ . Вместе с тем, как показывает практика, наибольшее влияние на стоимость и время термической резки оказывают параметры:  $L_{on}$  и  $N_{pt}$ . В зависимости от марки и толщины обрабатываемого материала  $C_{pt}$  может достигать до 30% от  $C_{on}$  и в десятки раз превышать  $C_{off}$  [3,50]. В свою очередь  $C_{on}$  может также в сотни раз превышать  $C_{off}$  в зависимости от марки и толщины обрабатываемого материала. Поэтому наибольший интерес представляют методы решения поставленной задачи, направленные на достижение большей экономии по сравнению с обычной минимизацией  $L_{off}$ . Таким образом, к основным методам решения задачи оптимизации маршрута листовой резки при подготовке УП в САМ системах можно отнести следующие:

- методы, направленные на минимизацию только длины перемещения режущего инструмента на холостом ходе  $L_{off}$ ;
- методы, направленные на минимизацию числа точек врезки  $N_{pt}$ ;
- комбинированные методы, направленные на минимизацию длины перемещения инструмента на рабочем ходе  $L_{on}$ , на холостом ходе  $L_{off}$  и числа точек врезки  $N_{pt}$ .

В задачах типа GTSP, TSP, CCP предполагается оптимизация только длины холостых перемещений режущего инструмента. В задачах типа ICP, ECP, SCCP,

GSCCP за счет возможности применения специальных способов резки и резки по сегментам (например, совмещенный рез, резка «змейкой») предполагается оптимизация длины холостых  $L_{off}$  и рабочих  $L_{on}$  перемещений режущего инструмента и числа точек врезки  $N_{pt}$ .

#### **1.4.1. Обзор методов решения для оптимизационной задачи маршрутизации инструмента при проектировании УП на основе минимизации длины холостого хода режущего инструмента**

В настоящее время в большинстве научных работ зарубежных и отечественных ученых оптимизационная задача маршрутизации режущего инструмента на машинах листовой резки с ЧПУ связана с минимизацией длины холостого хода режущего инструмента  $L_{off}$ . При решении поставленной задачи используется стандартная техника резки «по замкнутому контуру», для которой количество точек врезки равно количеству вырезаемых контуров.

Задача маршрутизации инструмента на машине листовой резки с ЧПУ с одной фиксированной точкой врезки и точкой выхода режущего инструмента (при этом резка осуществляется «по замкнутому контуру») эквивалентна известной задаче коммивояжера TSP с выполнением условия предшествования. При сведении поставленной задачи к TSP оптимизация маршрута возможна за счет минимизации  $L_{off}$ . В работах [20,21,22] приведен обстоятельный обзор, описаны точные и приближенные алгоритмы решения задачи TSP. Для решения задачи TSP с выполнением условия предшествования был предложен алгоритм, основанный на принципе «муравьиная колония» [103]. В работе [118] предложен генетический алгоритм для решения аналогичной задачи. В работе [106] рассмотрен алгоритм для решения задачи минимизации времени на холостые перемещения инструмента при механообработке.

Можно отметить работу [25], в которой для решения поставленной задачи GTSP были выбраны три метаэвристических алгоритма: метод имитации отжига (SA - Simulated Annealing), метод пороговой допустимости (TA - Threshold Accepting),

алгоритм всемирного потопа (GD - Great Deluge Algorithm). Результаты показали, что при использовании GD разработанный алгоритм построил кратчайший путь перемещения режущего инструмента за меньшее время. Предложена методика формирования маршрута режущего инструмента с использованием стандартного способа резки в интерактивном и автоматическом режимах с помощью применения алгоритма всемирного потопа [1], эффективность которого была продемонстрирована в [24,25]. Для повышения быстродействия алгоритма всемирного потопа было предложено распараллеливание процесса решения [43]. Рассмотрена задача формирования маршрута режущего инструмента с учетом технологических особенностей станков лазерной и гидроабразивной резки [53]. Задача рассматривается для стандартной техники резки. Критерием минимизации в данной постановке является длина холостого хода инструмента. На основании сформированного множества точек врезок и выключения инструмента с учетом особенностей выбранного станка с помощью жадного алгоритма генерируется начальная последовательность резки контуров. На последнем этапе минимизируется длина холостых переходов режущего инструмента с помощью двух метаэвристик – алгоритм всемирного потопа и метод пороговой допустимости. Из полученных маршрутов в качестве результата выбирается лучший.

Среди точных алгоритмов для решения задачи минимизации  $L_{off}$  можно отметить алгоритм, основанный на методе ветвей и границ [65]. К другому точному алгоритму для решения этой задачи с использованием стандартной техники резки контуров можно отнести алгоритм, основанный на методах ДП [37]. Рассматриваемая задача сводится к так называемому усложненному аналогу обобщенной задачи коммивояжера (GTSP) с выполнением условий предшествования, а точнее, к задаче о последовательном обходе мегаполисов, например в работах [37,61,63]. Вариант широко понимаемого ДП приведен в [31,42,55-59]. Для решения практических задач большой размерности предложен эвристический алгоритм. Был проведен сравнительный анализ получаемых результатов с применением эвристического алгоритма и метода ДП с целью

тестирования целесообразности использования эвристического алгоритма для задач большой размерности, характерных для листовой резки на станках с ЧПУ [69-72]. Для улучшения результатов работы приближенных алгоритмов в задаче маршрутизации инструмента большой размерности могут применяться локальные вставки, построенные с помощью ДП, так называемые «беллмановские» вставки [97]. Следует отметить работы [60,72], в которых при построении маршрута инструмента учтены условия отвода тепла в процессе резки, связанные с жесткостью листа и деталей [35].

В работе [67] рассмотрена задача минимизации холостых переходов режущего инструмента как обобщенную задачу коммивояжера GTSP с условием предшествования. Авторы предлагают алгоритм для решения поставленной задачи, который состоит из двух этапов. На первом этапе обобщенная задача GTSP сводится к задаче коммивояжера TSP, а на втором этапе задача решается либо с помощью алгоритма [85], когда не учитываются условия предшествования, и с помощью точного алгоритма ветвей и границ [65] для задачи с выполнением условия предшествования.

Среди алгоритмов, основанных на комбинации точных и приближенных алгоритмов для решения задачи GTSP, можно отметить работу [117], в которой рассматривается вопрос минимизации холостых перемещений инструмента при производстве кожаных изделий с учетом условий предшествования. Предложен комбинированный алгоритм решения задачи, который основан на совмещении метаэвристических алгоритмов (генетический алгоритм и алгоритм имитации отжига) и метода ДП. Совмещенные метаэвристические алгоритмы применяются для определения последовательности обработки контуров, с помощью ДП вычисляют расположение точек врезок. Аналогичный подход к решению задачи маршрутизации режущего инструмента был предложен при раскрое одежды [87]. Отличительная особенность предложенного алгоритма обусловлена применением метода решения поставленной задачи, основанного на применении алгоритма «муравьиной колонии» для определения последовательности обрабатываемых контуров. Однако

сравнительного анализа предложенных методов решения поставленной задачи проведено не было.

В процессе термической резки возникают термические деформации, которые необходимо учитывать для получения заготовок требуемой формы и размеров. Рассмотрен способ решения оптимизационной задачи GTSP с учетом распределения температурных полей в процессе резки [88] с использованием генетического алгоритма. Температура в начале врезки зависит от температуры, которая сохраняется в материале от предыдущего обработанного контура. При этом температура во всех точках врезки должна быть ниже критической, возникающей в материале после резки контуров деталей. С помощью генетического алгоритма находится первое решение, после чего определяется температура в каждой точке врезки. Если температура превысит некоторое пороговое значение, то текущая деталь пропускается и будет учтена при построении маршрута позже. Этот процесс повторяется, пока не будет найден допустимый оптимальный маршрут.

В работе [83] рассмотрен вопрос вычисления распределения температуры при лазерной резке контуров с помощью конечно-разностной модели. Построена аналитическая модель изменения температуры в процессе резки. Полученные результаты могут быть применены при оптимизации назначения маршрута режущего инструмента с целью улучшения качества резки в процессе автоматического раскроя. Используя результаты, полученные в [83], при решении задачи оптимизации маршрутизации инструмента, которая сводится к GTSP с выполнением условия предшествования, находится маршрут с помощью алгоритма, построенного на основе метода имитации отжига [84]. Среди отечественных работ следует отметить работу [96], в которой разработана математическая модель для вычисления температурных полей в процессе термической резки листовых материалов с учетом технологических особенностей процесса резки. В работе [6], в которой рассмотрена задача построения пути режущего инструмента с учетом термических воздействий на материал, предложен алгоритм построения пути режущего инструмента с целью минимизации пути холостого хода с учетом термического фактора. Анализ результатов показал, что предложенный алгоритм позволяет сокращать количество

локальных перегревов материала, однако в данном случае длина пути холостого хода возрастает в 2,4 раза по сравнению с алгоритмом кратчайшего пути.

Задача оптимизации маршрута резки, когда точка входа в контур и соответствующая ей точка врезки выбирается из континуального числа возможных точек врезки (в произвольной точке на контуре детали), относится к классу задач ССР [64,112]. Для решения задачи ССР был предложен алгоритм [86] с помощью определения последовательности деталей, используя алгоритм [92], точки врезки определяются с помощью метода Лагранжевых релаксаций. В случае процесса высечки на револьверном дыропробивном прессе были предложены соответствующий алгоритм для решения задачи ССР [111]. Задача оптимизации рассматривается как ССР, которую можно решать, альтернативно решая задачу определения последовательности деталей на основе выбранных точек врезки и задачу определения точек врезки на основании выбранной последовательности обхода деталей.

Решение задачи ССР, используя двухэтапный генетический алгоритм оптимизации расположения точек врезки и последовательности обхода деталей, предложено в работе [89]. При этом условия предшествования не учитываются. Среди последних алгоритмов для решения задачи ССР следует отметить новый эвристический метод, основанный на локальной оптимизации [101].

Таким образом, анализ существующих методов для решения задач маршрутизации инструмента на машинах листовой резки с ЧПУ показал, что большая часть из всех приведенных в обзоре работ направлена на минимизацию  $L_{off}$ , при этом в большинстве алгоритмов при построении маршрута резки не соблюдаются технологические ограничения процесса термической резки. В то же время, наибольший интерес представляют методы решения поставленной задачи, направленные на оптимизацию параметров  $L_{on}$  и  $N_{pt}$ , которые будут рассмотрены в §1.4.2.

#### **1.4.2. Обзор методов для решения задачи проектирования маршрута резки на основе минимизации длины рабочего хода режущего инструмента и количества точек врезки**

Наибольший интерес для минимизации временных и стоимостных характеристик резки при проектировании УП представляют сложные методы, которые позволяют достичь большей экономии в процессе резки по сравнению с обычной оптимизацией пути холостого хода.

Следует отметить работу [93], в которой рассмотрен вопрос сокращения количества точек врезки при термической резке заготовок из листового материала с точки зрения теории графов. Авторы показали, что количество точек врезки зависит от степени вершины графа, и предложили алгоритм, который строит дополнительные ребра между вершинами нечетной степени графа. В предложенном способе обхода вершин графа рассмотрено применение резки заготовок с помощью совмещенного реза. Следует отметить, что в отмеченной работе не учитывалось выполнение условия предшествования. Для решения частного случая задачи маршрутизации в эйлеровом графе при обработке деталей на машине с ЧПУ с использованием совмещенного реза был предложен алгоритм, приведенный в работах [17, 18]. Однако, поскольку в предлагаемом алгоритме не содержится геометрической информации о вырезаемых заготовках, то получаемые решения не гарантируют рациональных вариантов маршрута резки, допустимых с точки зрения соблюдения технологии резки на машине с ЧПУ.

Для решения задачи ЕСР были предложены различные алгоритмы. Так задача оптимизации маршрута резки с возможностью прерывания рабочего хода режущего инструмента рассмотрена в работе [113]. При обработке одного контура переход к другому возможен при неокончательной вырезке текущего контура с прерыванием, окончательную вырезку которого можно будет завершить позже. Для решения поставленной задачи авторы предлагают два метода. Первый основан на генетическом алгоритме, второй – на методах целочисленного программирования. В свою очередь при решении задачи оптимизации маршрута резки применение алгоритмов на основе целочисленного программирования

целесообразно применять только для задач небольшой размерности, в свою очередь генетический алгоритм применим для реальных производственных задач.

Еще один подход к решению задачи ЕСР рассмотрен в работе [104], однако не учитываются условия предшествования. Для решения поставленной задачи использовался алгоритм, основанный на методе имитации отжига. Авторы сравнили полученное решение с решениями, полученными с помощью генетического алгоритма [116] и с помощью алгоритма [114], основанного на методе «муравьиная колония». Сравнительный анализ показал, что предложенный алгоритм снижает до 55% время на холостые переходы, однако не учитывается, что в предложенном алгоритме допускались прерывания при обработке контуров в отличие от [116] и [114], в которых вырезка заготовок осуществлялась «по замкнутому контуру».

Для решения оптимизационной задачи маршрутизации режущего инструмента для лазерных машин листовой резки с ЧПУ был предложен алгоритм поиска с запретами [79]. В рассматриваемой работе минимизируется общее время резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с ЧПУ. Задача сводится к ЕСР с выполнением условия предшествования. Маршрут режущего инструмента предполагает вырезку контуров с прерыванием на рабочем ходе, что в свою очередь в зависимости от технологических особенностей каждого конкретного раскройного плана может приводить к значительному сокращению общего времени обработки заготовок. Также авторы при построении маршрута перемещения режущего инструмента предполагают применение совмещенного реза. Для решения поставленной задачи были учтены затраты на точки врезки, предварительныерезы и затраты, связанные с обработкой острых углов, однако предложенный алгоритм строит маршрут перемещения режущего инструмента за вычислительное время, которое не применимо в реальных производственных условиях. Авторы отметили, что в задачах ЕСР и ІСР за счет применения совмещенного реза сокращаются расход материала, количество точек врезки, длина рабочих и холостых переходов режущего инструмента [76]. Для построения траектории перемещения режущего инструмента предложены специальные

улучшенные эвристические методы, которые основаны на том, что затраты на точки врезки в зависимости от марки обрабатываемого материала и его толщины превосходят остальные затраты, возникающие при лазерной резке, и точки врезки фиксируют порядок и направление вырезки контуров [76,77]. Был проведен сравнительный анализ применения предложенных эвристик с современными CAD/CAM пакетами. Результаты показали, что предложенные методы генерируют маршрут перемещения режущего инструмента значительно лучшего качества, чем маршруты, получаемые в современных CAD/CAM пакетах за то же самое вычислительное время. Следует отметить исследование [90], в котором авторы провели анализ методов обнаружения накопленного тепла в листовом материале в процессе лазерной резки, а также отметили то, как эти методы могут быть интегрированы в подходы, которые позволяют уменьшать температуру в процессе термической резки.

Фроловский В.Д. рассмотрел задачу оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента для машин термической резки с ЧПУ при автоматизированном проектировании УП [54]. При этом автор под траекторией маршрута инструмента рассматривает переходы на рабочем (учитываются и внешние и внутренние контура) и холостом ходе режущего инструмента, дополнительные резы. Предложенный алгоритм решения поставленной задачи основан на выделении групп деталей, построении локально-оптимальных маршрутов, которые связывают отдельные детали в группе и при этом каждая группа деталей может быть вырезана с одной точкой врезки, и проектировании маршрута перемещения режущего инструмента на холостом ходе. Выделение групп деталей осуществляется по результатам  $n$ -кратного группирования или с помощью построения матрицы смежности деталей и достижимости элементов контура. В данном случае будет снижаться только количество точек врезки, при этом увеличиваться перемещения режущего инструмента на рабочем ходе. Последний этап решения задачи (оптимизация маршрутизации резака на холостом ходе) сводится к задаче коммивояжера TSP. При этом автор отмечает, что применение точных алгоритмов типа «ветвей и границ» целесообразно только для

задач малой и средней размерности (50 деталей на одной карте раскроя), а для задач большой размерности имеет смысл применять метаэвристические алгоритмы, например, метод муравьиной колонии [7,8], генетический алгоритм [39-41].

Верхотуров М.А., Тарасенко П.Ю. рассмотрели задачу оптимизации пути режущего инструмента при фигурном раскрое листового материала [3]. Отмечены три основных специальных способов резки («цепная» резка, совмещенный рез и «мосты»), применение которых может приводить к снижению стоимости резки в зависимости от типа обрабатываемого материала, его толщины, типа станка. В рамках [3] для решения задачи использовалась «цепная» резка. Задача оптимизации пути режущего инструмента была разделена на две подзадачи: минимизация холостого хода режущего инструмента  $L_{off}$  и оптимизации соотношения количества точек врезок  $N_{pt}$  и длины пути режущего инструмента на рабочем ходе  $L_{on}$ . Первую подзадачу в рамках исследования решали с использованием готовых решений, полученных с помощью алгоритмов GRASP, «муравьиная система» и «муравьиная колония» [2,4,5]. При этом точки врезки выбраны заранее. Для решения второй подзадачи в [3] был предложен алгоритм для оптимизации соотношения количества точек врезок и длины пути режущего инструмента. Вычислительный эксперимент для случая обработки листового материала на машине гидроабразивной резки с ЧПУ показал, что средний выигрыш при оптимизации маршрута режущего инструмента с помощью «цепной» резки составляет 4.5% по сравнению с оптимизацией без «цепной» резки.

Файзрахманов Р.А., Мурзакаев Р.Т. и др. сформировали задачу оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента на машинах с ЧПУ и предложили математическую модель минимизации общего времени резки с учетом стандартной и нестандартной техник резки (на примере «цепной резки» и совмещенного реза) [52]. При решении поставленной задачи выделены два основных этапа. На первом этапе строится матрица условий предшествования, и

определяются участки контуров, для которых будет применен совмещенный рез. На втором этапе формируется множество возможных допустимых точек врезки и выключения инструмента, далее минимизируется общее время резки, оптимизируя соотношение времени, затрачиваемом на рабочие и холостые переходы инструмента, и количество точек врезки. Для формирования маршрута был использован алгоритм «всемирного потопа». Анализ предложенного алгоритма был проверен для станка гидроабразивной резки с ЧПУ и показал, что применение техники совмещенного реза существенно сокращает стоимость раскроя листового материала.

Для решения задачи GSCCP показан подход [95], основанный на дискретизации задачи GSCCP и сведении ее к задаче о последовательном обходе мегаполисов, в которой используется математическая модель Ченцова А.Г., описанная, например, в работе [68]. Описанный подход [95] позволяет решать задачи из наиболее сложного класса задач маршрутизации траектории инструмента – ICP. Важной особенностью подхода является возможность для одной задачи оптимизации формировать разные наборы базовых сегментов и применять разные алгоритмы оптимизации, используя как дискретные, так и непрерывные модели. В монографии [38] подробно описаны подходы для решения задач маршрутизации.

Анализ существующих методов и алгоритмов для решения задачи оптимизации маршрута резки показывает, что подавляющая часть алгоритмов решает данную задачу с точки зрения минимизации времени резки. При этом все алгоритмы решают задачу при условии, что  $V_{on}$  величина постоянная. Однако, как показывает практика, фактическое значение  $V_{on}$  может меняться в зависимости от различных технологических факторов, а также характеристик спроектированной УП. В свою очередь, целевая функция стоимости резки не рассматривается из-за сложности и отсутствия методики вычисления стоимостных параметров  $C_{on}, C_{off}, C_{pt}$ . Все это диктует необходимость в проведении исследований и разработке научно-обоснованных методик точного

вычисления стоимостных и временных параметров целевых функций в задачах оптимизации построения маршрута резки при проектировании УП.

Также следует отметить, что подавляющая часть рассмотренных выше алгоритмов не учитывает возможные термические деформации материала, при этом маршрут режущего инструмента строится, в основном, с помощью резки «по замкнутому контуру». Вместе с тем, как показывает практика, для повышения эффективности методов для проектирования маршрута резки наиболее перспективным направлением является сокращение стоимости резки за счет использования специальных способов резки при соблюдении необходимых технологических требований. Для этой цели целесообразно применять как полностью автоматические, так и полуавтоматические методы, позволяющие решать задачи оптимизации маршрута резки в системах автоматизированного проектирования УП.

Таким образом, целесообразно оптимизировать не только длину холостых перемещений инструмента, но и параметры  $N_{pt}, L_{on}$ . Поскольку способы объединения однотипных деталей в группы при формировании раскройных карт с последующим применением специальных техник для резки каждой группы является эффективным, поэтому вопрос разработки специальных способов резки для типовых деталей также является актуальным на сегодняшний день. Решение отмеченных вопросов будет рассмотрено в Главе 2. Следует отметить, что реализация данного подхода в автоматическом режиме для произвольной номенклатуры деталей пока не представляется возможной.

### **1.5. Классификация систем автоматизированного проектирования управляющих программ для оборудования термической резки с ЧПУ**

В настоящее время можно выделить две основные группы систем автоматизированного проектирования УП для оборудования термической листовой резки с ЧПУ:

- Узкоспециализированные системы, которые поставляются совместно с технологическим оборудованием;
- Универсальные САПР.

К узкоспециализированным системам относятся САПР, которые поставляются совместно с конкретным технологическим оборудованием. Разработка УП с помощью таких систем возможна только для конкретного оборудования. На Российских предприятиях наиболее распространены следующие зарубежные поставщики оборудования листообработки с ЧПУ: швейцарская компания Bystronic с CAD/CAM системой – BySoft [66], германская компания TRUMPF с программным обеспечением TruTops [14], японский концерн Amada, который поставляет совместно со станками с ЧПУ программное обеспечение для лазерной резки, сварки, гибки и штамповки [13]. Особенностью таких систем является возможность разработки УП с учетом особенностей конкретного технологического оборудования с интеграцией не только процесса разработки УП для термической резки, но и для процессов гибки, сварки, вырубки в рамках парка оборудования листообработки конкретного производителя. Как правило, время разработки УП в узкоспециализированных САПР меньше по сравнению с универсальными САПР, что является немаловажным фактором в мелкосерийном и единичном производстве. Основным недостатком таких систем является невозможность или сложность их адаптации к технологическому оборудованию другого производителя.

Ко второй группе относятся универсальные САПР, которые позволяют производить разработку УП не для конкретного технологического оборудования. В некоторых универсальных САПР помимо модулей плоского моделирования и разработки УП появляется возможность объемного моделирования, оформления конструкторской документации, в них можно проводить инженерные расчеты (например, прочностные, температурные). Среди отечественных универсальных САПР можно выделить, например, T-Flex[51], Adem [12].

Совершенствование систем автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ в раскройно-заготовительном

производстве, на наш взгляд, должно происходить в направлении создания систем последней группы, что позволит охватить широкий спектр технологического оборудования и технологий резки. Для расширения возможностей и создания широко универсальных систем можно создавать отдельные модули, задачей которых будет решение специализированных вопросов автоматизированного проектирования процессов для получения заготовок с применением, например, таких технологий листовой обработки, как термическая резка и гибка.

Следует отметить, что существующие системы автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ не позволяют решить многие оптимизационные задачи. При этом при подготовке УП пользователям САПР приходится прибегать к интерактивным методам проектирования, т.к. существующие алгоритмы подготовки УП, реализованные в автоматическом режиме проектирования, обычно не позволяют генерировать оптимальные УП при одновременном соблюдении технологических ограничений процесса термической резки. Поэтому в настоящее время существует проблема разработки методик и алгоритмов построения траектории перемещения инструмента с применением специальных техник резки, которые бы обеспечивали минимизацию целевых функций стоимости и времени резки на технологическом оборудовании с ЧПУ. При этом предлагается объединять однотипные детали в «блоки» и реализацию специальных техник резки осуществлять для каждого «блока» с учетом технологических ограничений процесса резки, после чего осуществлять оптимизацию холостых перемещений режущего инструмента известными алгоритмами, описанными выше. Также следует отметить, что в настоящее время при построении целевых функций времени и стоимости резки, которые рассматриваются в качестве критериев оптимизации маршрута резки, не учитываются технологические особенности используемого оборудования с ЧПУ, а также различные эксплуатационные расходы. В конечном итоге это приводит к некорректному построению маршрута резки, а, следовательно, и некорректному проектированию УП. Таким образом, решение поставленных в диссертационной работе задач позволит повысить эффективность функционирования систем

автоматизированного проектирования УП для машин листовой термической резки с ЧПУ и усовершенствовать процесс подготовки УП.

### 1.6. Выводы по Главе 1

Анализ состояния вопросов автоматизации технологической подготовки УП для оборудования листовой термической резки с ЧПУ и применения существующих систем автоматизированного проектирования для оптимизации маршрута инструмента позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработка методик и алгоритмов, позволяющих в автоматическом режиме оптимизировать параметры процесса резки заготовок из листового материала на оборудовании термической резки с применением специальных техник резки при одновременном выполнении технологических ограничений, остается актуальной задачей раскройно-заготовительного производства;
2. Повышение эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования УП для машин листовой термической резки с ЧПУ и усовершенствование процесса подготовки УП связано с решением следующих задач:
  - Необходимо разработать научно-обоснованную методику расчета стоимостных параметров процесса резки в целевой функции  $F_{cost}$  для оборудования лазерной резки с ЧПУ;
  - Необходимо разработать методику точного расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента с целью точного вычисления целевой функции времени резки;
  - Необходимо разработать алгоритмы проектирования маршрута резки с применением специальных способов резки для некоторых номенклатур типовых деталей в раскройно-заготовительном производстве при одновременном соблюдении технологических особенностей и ограничений процесса термической резки;

- Необходимо реализовать разработанные методики и алгоритмы для автоматизированного проектирования УП в существующих САПР;
- Необходимо провести верификацию и апробацию разработанных методик и алгоритмов на практике при проектировании технологических процессов раскройно-заготовительного производства для предприятий реального сектора экономики.

## **ГЛАВА 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ С ЧПУ**

### **2.1 Точное вычисление стоимостных и временных параметров целевых функций в задаче оптимизации маршрута резки при проектировании управляющих программ для оборудования лазерной резки с ЧПУ**

Как было отмечено в Главе 1, для задачи оптимизации маршрута резки проблема точного вычисления целевых функций является малоисследованной. Как показывает практика, точное вычисление основных оптимизационных характеристик влияет на конечную стоимость процесса резки и результат проектирования УП. С этой целью ниже будут предложены методики точного вычисления целевых функций стоимости и времени лазерной резки при формировании маршрута резки в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования с ЧПУ.

#### **2.1.1 Вычисление фактического времени лазерной резки машины с ЧПУ**

Неточность вычисления фактического времени резки  $T_{cut}$  связана с тем, что значение скорости перемещения режущего инструмента на рабочем ходе  $V_{on}$  для оборудования с ЧПУ, программируемое в УП как константа, фактически таковым не является и может меняться в зависимости от различных технологических факторов, а также характеристик спроектированной УП [100,107]. По этой причине возникает проблема вычисления фактического времени резки машины с ЧПУ. Для точного расчета фактических значений параметра  $V_{on}$  должны быть вычислены корректирующие коэффициенты. Очевидно, что они будут отличаться для различной толщины и марки обрабатываемого материала. Как было отмечено выше, вопрос точного вычисления значений  $V_{on}$  остается открытым на сегодняшний день. Для вычисления фактических значений  $V_{on}$  автором диссертационной работы было проведено исследование на определение факторов

и параметров, которые могут оказывать влияние на значение рабочей скорости перемещения режущего инструмента при лазерной резке листового материала на оборудовании с ЧПУ. Сформулируем гипотезы для определения этих факторов:

1. Гипотеза 1: Фактическое значение рабочей скорости  $V_{on}$  зависит от изменения температуры материала в процессе резки;
2. Гипотеза 2: Фактическое значение рабочей скорости  $V_{on}$  зависит от геометрической сложности контура детали;
3. Гипотеза 3: Фактическое значение рабочей скорости  $V_{on}$  зависит от количества кадров УП.

Для проверки предложенных гипотез были проведены исследования на примере резки листового материала на технологическом оборудовании CO<sub>2</sub> лазерной резки с ЧПУ, результаты которых будут приведены ниже.

### **Гипотеза 1. Влияние изменения температуры в процессе резки на значение $V_{on}$**

Для проверки *гипотезы 1* было проведено исследование на определение влияния изменения температуры в процессе лазерной резки на значение параметра  $V_{on}$ . С этой целью для одинаковых раскройных карт точки врезки и направление обхода контуров выбирались с точки зрения выполнения (рисунок 2.1а) и не выполнения (рисунок 2.1б) правила «жесткости заготовки» [35]. В приведенном примере количество заготовок  $n = 7$ , количество контуров  $N = 8$ .

На рисунке 2.1 цифрами от 1 до 8 обозначена последовательность резки контуров. Красным цветом обозначена траектория перемещения режущего инструмента на рабочем ходе, синим – на холостом ходе.

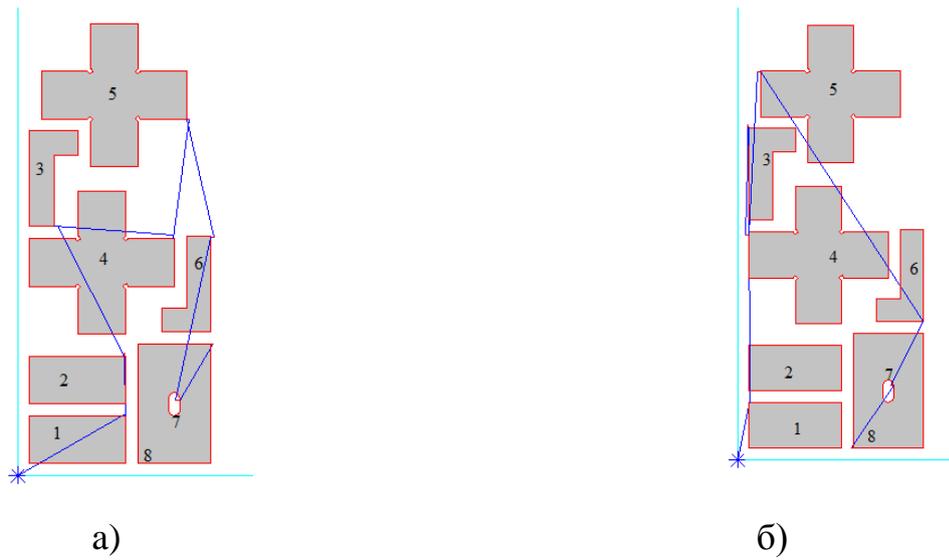


Рисунок 2.1 - Построение маршрута режущего инструмента для раскройной карты при соблюдении правил «жесткости» (а) и без соблюдения правил «жесткости» (б)

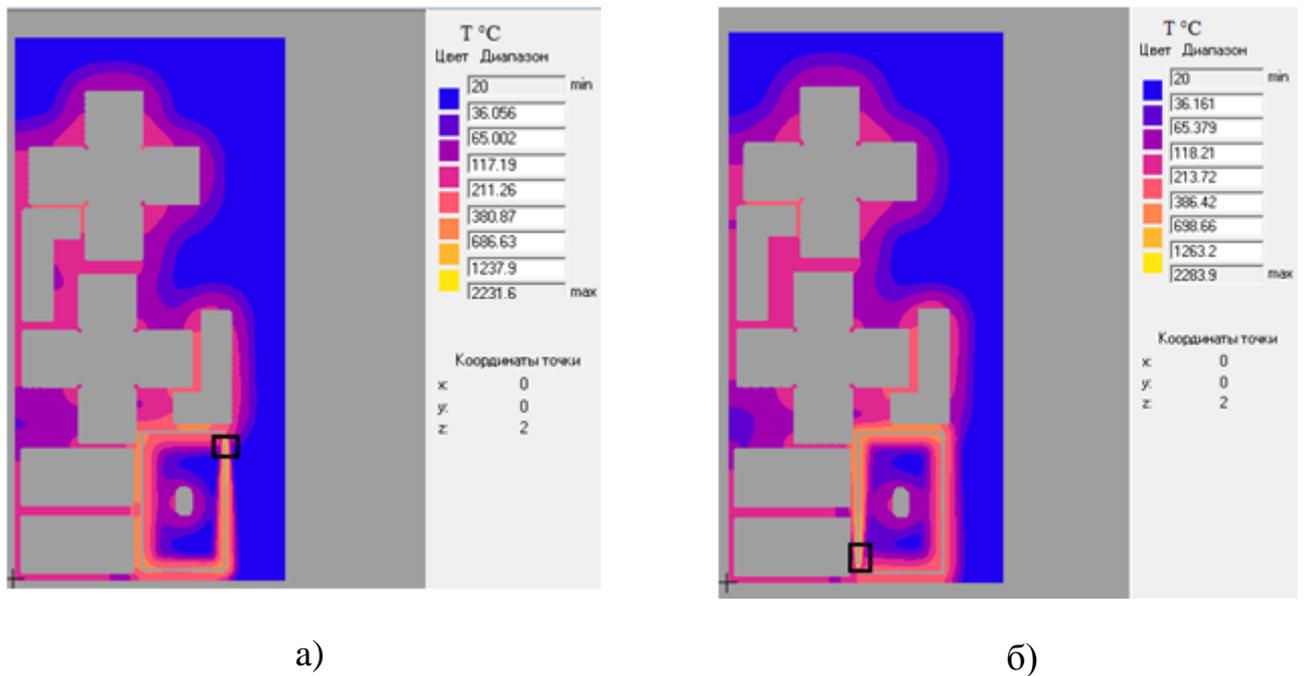


Рисунок 2.2 – Расчет температурных полей в процессе резки раскройной карты с учетом правил «жесткости» (а) и без учета правил «жесткости» (б)

Вычисление температурных полей в процессе резки выполнено на примере обработки углеродистой стали Ст3, толщиной  $\Delta=2$  мм на оборудовании лазерной резки с ЧПУ с помощью САЕ “RAPID” [30]. Результаты расчета приведены на рисунке 2.2а, б для раскройных карт на рисунке 2.1а, б соответственно. Расчет температурных полей показал, что средняя температура в выбранной зоне (черный прямоугольник на рисунке 2.2а, б) в области завершения резки 8 контура составляет  $492.2^{\circ}\text{C}$  для случая на рисунке 2.2а, и  $556.3^{\circ}\text{C}$  для случая на рисунке 2.2б, что на 11 % выше, чем средняя температура для той же области в случае на рисунке 2.2а. Таким образом, наблюдается изменение температурных полей в материале в процессе лазерной резки.

Для определения влияния изменения температуры в процессе резки на значение параметра  $V_{on}$  был произведен замер реального времени резки для рассмотренных раскройных карт (рисунок 2.1а,б) на оборудовании лазерной  $\text{CO}_2$  резки с ЧПУ. Время резки заготовок для случая на рисунке 2.1а составило 36,8 с, для случая на рисунке 2.1б – 36,2 с. В свою очередь фактическое значение средней скорости перемещения режущего инструмента для случая на рисунке 2.1а составило  $V_{on}^a = 0.0331$  м/с и  $V_{on}^b = 0.0326$  м/с для случая на рисунке 2.1б. Как можно увидеть, отклонение значений  $V_{on}^a$  от  $V_{on}^b$  составляет 1,5%. Аналогичные исследования были проведены для других заготовок, марок и толщин обрабатываемых материалов при резке листового материала в реальном производственном процессе по 50 разработанным УП. Отклонение значений параметров  $V_{on}^a$  от  $V_{on}^b$  в среднем составило 1,8-2,5%. Следовательно, можно сделать вывод, что проведенные исследования *не подтверждают* гипотезу о влиянии изменений температуры материала в процессе резки на значение параметра  $V_{on}$ .

## Гипотезы 2 и 3. Влияние сложности обрабатываемых контуров и количества кадров на значение параметра $V_{оп}$

Управляющая программа представляет собой совокупность команд на языке программирования, которая соответствует заданному алгоритму функционирования станка по обработке конкретной заготовки.

**Определение 2.1.** *Кадр* - это составная часть УП, вводимая и обрабатываемая как единое целое и содержащая не менее одной команды. В каждом кадре записывается вся информация, необходимая для выполнения одного элементарного действия станка.

Как показывает практика, УП может содержать большое количество кадров, в основном, это связано с тем, что контуры со сложной геометрией (например, сплайны) при конвертации из CAD - системы в CAM - модуль из-за разницы в геометрических форматах файлов разбиваются на большое число геометрических примитивов (например, на отрезки прямых и дуги окружностей), т.е. аппроксимируются более простыми геометрическими примитивами. Разница в форматах, в свою очередь, вызвана тем, что практически все системы ЧПУ оснащаются только линейными и круговыми интерполяторами. Как правило, аппроксимация сложной геометрии сводится именно к линейной аппроксимации. Иногда конвертеры CAD файлов аппроксимируют отрезками прямых даже дуги окружностей, хотя в этом нет необходимости, если система ЧПУ поддерживает круговую интерполяцию. В данном случае возникает необходимость проверки гипотез 2 и 3.

*Гипотеза 2* заключается в следующем. Рассмотрим пример двух контуров 1 и 2, для обоих случаев количество кадров одинаково ( $N_{кадров}^1 = N_{кадров}^2$ ), длина эквидистантного контура для них также одинакова ( $L_1 = L_2$ ), разница заключается в геометрической сложности контуров. На рисунке 2.3 приведен пример резки двух контуров, для обоих контуров  $N_{кадров}^1 = N_{кадров}^2 = 23$  и  $L_1 = L_2 = 0.37$  м.

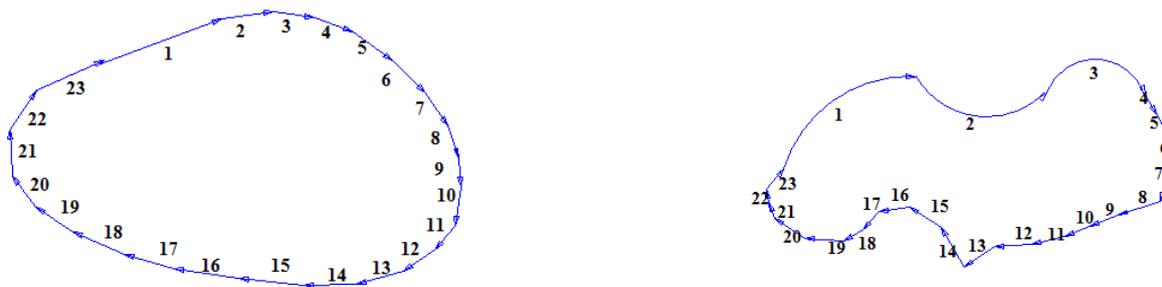


Рисунок 2.3 - Пример двух заготовок с одинаковой длиной и количеством кадров, но с разной геометрией контуров

Был проведен ряд исследований при резке листового материала в реальном производственном процессе по 50 разработанным УП для определения вопроса о влиянии сложности обрабатываемых контуров на скорость резки. Результаты показали, что скорость резки заготовок с одинаковым количеством кадров и длиной, но с разной геометрией контура практически остается неизменной, величина отклонения не превышает 3%. Таким образом, проведенные исследования *не подтверждают* гипотезу о влиянии геометрической сложности контура детали на значение параметра  $V_{on}$ .

Для проверки *гипотезы 3*, которая заключается в предположении о влиянии количества кадров УП на значение рабочей скорости перемещения режущего инструмента, был проведен ряд исследований для следующих марок и сплавов при обработке листовых материалов на лазерном  $CO_2$  комплексе с ЧПУ: 10кп ( $\Delta=1-10\text{мм}$ ) и АМгЗМ ( $\Delta=1-5\text{мм}$ ). Для проведения исследования было разработано по 200 УП с числом кадров  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) от 10 до 5000 для каждой толщины ( $\Delta=1\text{мм}$ ,  $\Delta=2\text{мм}$ ,  $\Delta=3\text{мм}$ ,  $\Delta=3,5\text{мм}$ ,  $\Delta=4\text{мм}$ ,  $\Delta=8\text{мм}$  и  $\Delta=10\text{мм}$ ) листового материала 10кп и по 180 УП для листового материала АМгЗМ для каждой толщины ( $\Delta=1\text{мм}$ ,  $\Delta=2\text{мм}$ ,  $\Delta=3\text{мм}$ ,  $\Delta=5\text{мм}$ ) с числом кадров  $n$  ( $n \in \mathbb{N}$ ) от 10 до 2000. После чего были проведены замеры реального времени резки раскройного плана по разработанным УП и получены экспериментальные данные. Анализ полученных данных показал, что при увеличении числа кадров в УП при резке разных наборов заготовок значения фактической средней скорости  $V_{on}$  падает [100,107]. Следовательно,

проведенные исследования подтвердили гипотезу 3, и возникает задача определения аналитических зависимостей фактических значений рабочей скорости перемещения режущего инструмента от параметров спроектированной УП.

Функциональная зависимость  $V_{on}$  должна определяться аналитически для обеспечения точности вычисления целевой функции времени при оптимизации маршрута резки. Алгоритмизация вычисления целевой функции (1.2) на основе научно-обоснованного определения параметров функций является необходимым условием для разработки алгоритмов оптимизации маршрута инструмента по времени резки. Маршрут инструмента будет оптимальным, если адекватно вычисляется целевая функция, а для этого необходимо знать точные значения параметров, входящих в нее.

Ниже приведены практические результаты по определению зависимости скорости рабочего хода инструмента от количества кадров УП [100,107]. На основании полученных результатов можно точно вычислить целевую функцию и построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента.

Статистический материал был обработан в программе «Mathcad» и с помощью метода наименьших квадратов были построены аппроксимирующие функции для зависимости фактических значений скорости рабочего хода инструмента  $V_{on}$  от количества кадров  $n$  в спроектированной УП. По результатам эксперимента были сделаны следующие выводы. Фактическая средняя скорость рабочего хода режущего инструмента  $V_{факт}$  является монотонно убывающей функцией от числа кадров УП (рисунки 2.4, 2.5 и в Приложении В). В проведенных экспериментах снижение средней фактической скорости режущего инструмента по сравнению с заданным в УП значением доходило до 70%.

Для изложения результатов экспериментального исследования введём следующие обозначения: пусть  $r$  – общее число замеров реального времени обработки листового материала по разработанным УП, при этом общее количество разработанных УП равно  $r$  ( $i \in \overline{1, r}$ );  $n_i$  – число кадров в  $i$ -ой УП;

$V_{факт}^i$  – значение фактической средней скорости перемещения режущего инструмента на рабочем ходе при резке листового материала по  $i$ -ой УП;

$\sum_{i=1}^r \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^r (V_{факт}^i - V_{он}(n_i))^2$  – сумма квадратов отклонений между наблюдаемыми

фактическими величинами и соответствующими им расчетными величинами, где

$V_{он}(n_i)$  – значение расчетной аппроксимирующей функции с числом кадров  $n_i$ .

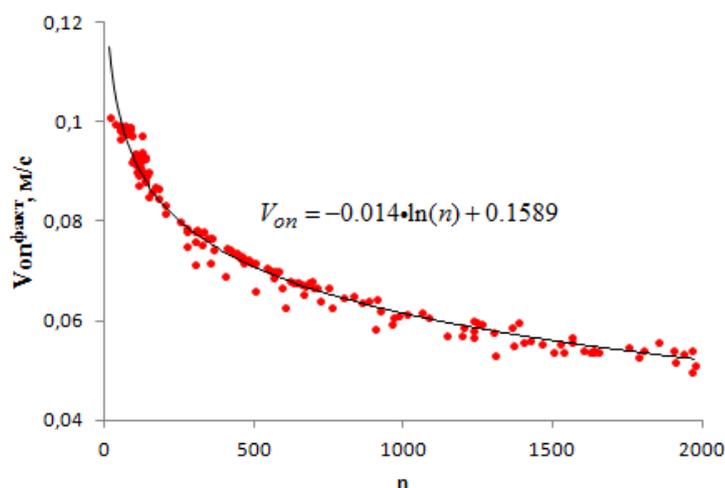


Рисунок 2.4 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для  
АМГЗМ,  $\Delta=1$ мм

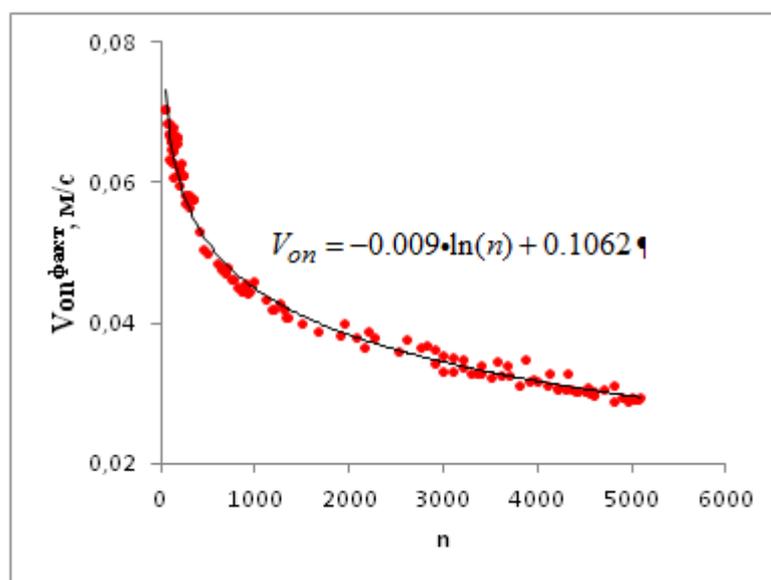


Рисунок 2.5 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для  
10кп,  $\Delta=3$ мм

При аппроксимации точечных графиков зависимости фактической скорости перемещения режущего инструмента на рабочем ходе от числа кадров в УП аппроксимируемыми кривыми в «Mathcad» для всех значений исследуемых марок материала и толщин было установлено, что значения  $\sum_{i=1}^r \varepsilon_i^2 \rightarrow 0$  достигаются при аппроксимации экспериментальных данных логарифмической функцией. Были получены функциональные зависимости для вычисления уточненных значений рабочей скорости перемещения режущего инструмента от количества кадров  $n$  в спроектированной УП, при этом  $\{n \in \mathbb{N} | 10 \leq n \leq 5000\}$  для листового материала марки 10кп ( $\Delta=1-10$  мм) и  $\{n \in \mathbb{N} | 10 \leq n \leq 2000\}$  для листового материала АМгЗМ ( $\Delta=1-5$  мм). Обобщенные результаты для всех исследованных марок материала и толщин приведены в таблице 2.1.

При использовании материала других марок необходимо проведение дополнительных исследований, либо использование имеющихся данных по материалу с близкими физическими свойствами.

В Приложении В приведены графики зависимости фактической рабочей скорости режущего инструмента от количества кадров в УП при обработке листового материала марки АМгЗМ ( $\Delta=2-5$ мм) и 10кп ( $\Delta=1-10$ мм) на лазерном СО<sub>2</sub> комплексе с ЧПУ. Была выполнена оценка адекватности полученных формул (таблица 2.1) по сравнению с реальными значениями  $V_{on}$  для произвольных 50 УП в производственном процессе при обработке листовых материалов АМгЗМ ( $\Delta=2-5$ мм) и 10кп ( $\Delta=1-10$ мм) на лазерном СО<sub>2</sub> комплексе с ЧПУ. При этом анализ результатов показал, что относительные отклонения реальных значений от рассчитанных по формулам из таблицы 2.1 не превышают 5-8 %.

Таблица 2.1 - Обобщенная таблица формул для вычисления значений фактической рабочей скорости инструмента на лазерном CO<sub>2</sub> комплексе с ЧПУ

| Материал и толщина материала ( $\Delta$ , мм) | Значение $V_{on}$ , заданное в УП, м/с | Формула для вычисления значений фактической $V_{on}$ в зависимости от количества кадров $n$ в УП |
|---|--|--|
| 10кп, $\Delta=1$                              | 0,13                                   | $V_{on} = -0.025 \cdot \ln(n) + 0.25$  |
| 10кп, $\Delta=2$                              | 0,0975                                 | $V_{on} = -0.015 \cdot \ln(n) + 0.1711$  |
| 10кп, $\Delta=3$                              | 0,06                                   | $V_{on} = -0.009 \cdot \ln(n) + 0.1062$  |
| 10кп, $\Delta=3.5$                            | 0,042                                  | $V_{on} = -0.006 \cdot \ln(n) + 0.0759$  |
| 10кп, $\Delta=4$                              | 0,04                                   | $V_{on} = -0.006 \cdot \ln(n) + 0.0709$  |
| 10кп, $\Delta=8$                              | 0,027                                  | $V_{on} = -0.003 \cdot \ln(n) + 0.0443$  |
| 10кп, $\Delta=10$                             | 0,023                                  | $V_{on} = -0.002 \cdot \ln(n) + 0.0359$  |
| АМг3М, $\Delta=1$                             | 0,1                                    | $V_{on} = -0.014 \cdot \ln(n) + 0.1589$  |
| АМг3М, $\Delta=2$                             | 0,048                                  | $V_{on} = -0.004 \cdot \ln(n) + 0.0641$  |
| АМг3М, $\Delta=3$                             | 0,025                                  | $V_{on} = -0.001 \cdot \ln(n) + 0.0315$  |
| АМг3М, $\Delta=5$                             | 0,015                                  | $V_{on} = -7 \cdot 10^{-4} \cdot \ln(n) + 0.0182$  |

Рассмотрим пример оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента по времени резки (1.2) при резке 15 фигурных заготовок (материал АМг3М  $\Delta=1$ мм). Раскройная карта (рисунок 2.6) содержит 15 заготовок двух типоразмеров, при этом количество граничных контуров заготовок равно 19. Каждый контур на рисунке 2.6 вырезается с помощью резки «по замкнутому контуру». С целью сокращения множества допустимых решений задачи множество возможных точек врезки было ограничено конечным множеством, состоящим из 55 точек (обозначены квадратами зеленого цвета; соответствующие точки выключения инструмента обозначены крестиками). Таким образом, рассматривается задача GTSP. Для решения задачи был использован алгоритм на основе динамического программирования, приведенный в [69]. Предложенные формулы для вычисления фактического значения параметра  $V_{on}$  использованы в САПР «СИРИУС» для оптимизации маршрута инструмента в автоматическом режиме по времени резки  $T_{cut}$  с использованием точного и эвристического алгоритмов, описанных, например, в [69]. УП резки для примера на рисунке 2.6

содержат 120 команд или кадров (т.е.  $n=120$ ). Скорость рабочего хода инструмента, заданная в УП,  $V_{on} = 0.1\text{ м/с}$ .

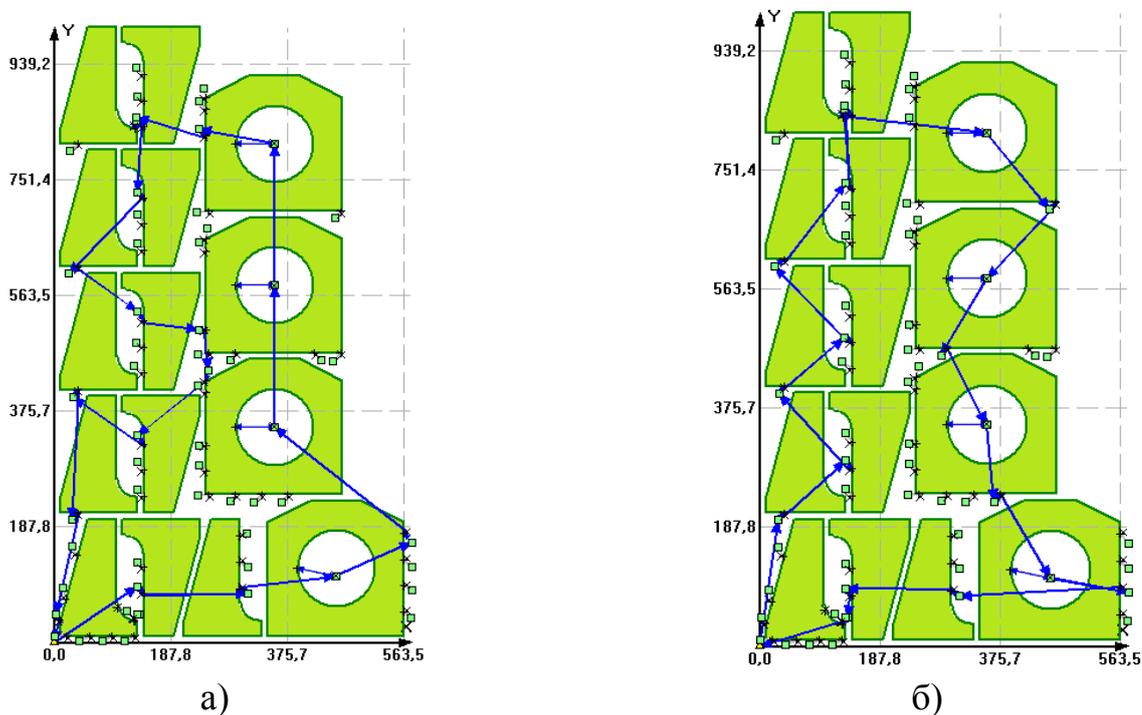


Рисунок 2.6 - Раскройная карта и оптимальный по времени маршрут перемещения режущего инструмента для 15 заготовок (материал АМГ3М  $\Delta=1\text{ мм}$ ) при условии, что  $V_{on} = const = 0.1\text{ м/с}$  (а) и  $V_{on}(n) = -0.014 \cdot \ln(n) + 0.1589$  (б)

На рисунке 2.6а показан маршрут резки (перемещение инструмента на холостом ходе показаны стрелками синего цвета), для которого значение целевой функции (1.2) при  $V_{on} = 0.1\text{ м/с}$  составляет  $T_{cut} = 126.27\text{ с}$ . Однако фактическое время резки по управляющей программе, составленной для этого маршрута, оказалось значительно больше. В свою очередь для оптимального маршрута резки (рисунок 2.6 б) значение времени резки составило  $T_{cut} = 141.38\text{ с}$ . Таким образом, точное вычисление целевой функции для данного примера обеспечило не только точное вычисления значения экстремума целевой функции, но и другой (правильный) результат поиска оптимального маршрута резки с учетом количества кадров в спроектированной УП. Этот пример иллюстрирует необходимость получения таблиц типа таблица 2.1 при решении конкретных

оптимизационных задач маршрутизации инструмента для машин листовой резки с ЧПУ.

### 2.1.2 Методика точного расчета стоимости процесса лазерной резки на машине с ЧПУ

Важнейшей экономической характеристикой качества разработанной УП является стоимость резки деталей на машине с ЧПУ. Это сложный интегрированный показатель, который включает в себя произведённые во время резки затраты на электроэнергию и расходные материалы, на обслуживание машины с ЧПУ, а также другие эксплуатационные затраты. Отметим, что стоимость резки не всегда пропорциональна времени резки, поскольку зависит еще и от различных режимов резки и используемой технологии резки. Отсюда возникает актуальная на сегодняшний день проблема точного вычисления целевой функции стоимости резки при проектировании УП, которая связана с поиском адекватных значений стоимостных параметров в формуле (1.3):

$$F_{cost} = L_{on} \cdot C_{on} + L_{off} \cdot C_{off} + N_{pt} \cdot C_{pt}.$$

В целевой функции (1.3) вычисление параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  затруднено, поскольку они зависят от марки и толщины обрабатываемого материала, типа используемого технологического оборудования с ЧПУ, стоимости расходных материалов, стоимости расхода технологических материалов, амортизации оборудования и величины заработной платы обслуживающего персонала. Функциональная зависимость  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  от перечисленных параметров может задаваться либо табличными функциями, либо аналитически. Ниже предложим методику вычисления стоимостных параметров лазерной резки в целевой функции  $F_{cost}$  (1.3) для оборудования с ЧПУ [45,50].

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);

$C_{тех}$  - стоимость технологического газа (азот или кислород в зависимости от типа 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  $C_{он}$  вычислим по следующей формуле:

$$C_{он} = C_{э/э}^{on} + C_{тех} + C_{лаз} + C_{расх} + C_{зн}^{on} + C_A^{on}. \quad (2.1)$$

Для вычисления значений  $C_{э/э}^{on}$ ,  $C_{тех}$ ,  $C_{лаз}$ ,  $C_{расх}$ ,  $C_{зн}^{on}$ ,  $C_A^{on}$  введем дополнительные обозначения:

$t_{он}$  – время, затрачиваемое на один метр рабочего хода инструмента, ч;

$P_{он}$  – затраты электроэнергии за один час работы лазерного комплекса на рабочем ходе, кВт/ч;

$V_{тех}^{on}$  – расход технологического газа на один метр рабочего хода, м<sup>3</sup>/ч;

$V_{лаз}^{on}$  – расход лазерного газа на один метр рабочего хода, м<sup>3</sup>/ч;

$C_{э/э}$  - стоимость электроэнергии за 1 кВт;

$C_{лазM^3}$  - стоимость 1м<sup>3</sup> лазерного газа;

$C_{техM^3}$  - стоимость 1м<sup>3</sup> технологического газа;

$C_{расхEδ}$  - стоимость единицы расходных материалов;

$t_{расхCрок}$  - срок службы расходных материалов;

$C_{зн}$  - стоимость 1ч работы обслуживающего персонала;

$N$  – срок полезного использования оборудования [28];

$n$  – количество рабочих смен в году;

$t_{смены}$  - длительность рабочей смены, ч;

$C_{оборуд}$  - первоначальная стоимость оборудования.

Тогда  $C_{э/э}^{on}$ ,  $C_{тех}$ ,  $C_{лаз}$ ,  $C_{расх}$ ,  $C_{зн}^{on}$ ,  $C_A^{on}$  вычислим по следующим формулам:

$$C_{э/э}^{on} = P_{on} \cdot t_{on} \cdot C_{э/э}.$$

$$\text{Аналогично } C_{тех} = V_{тех}^{on} \cdot C_{техM^3} \cdot t_{on};$$

$$C_{лаз} = V_{лаз}^{on} \cdot C_{лаzM^3} \cdot t_{on};$$

$$C_{расх} = \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхEд}^i}{t_{расхСрок}^i} \cdot t_{on} \quad (i - \text{тип расходного материала});$$

$$C_{зн}^{on} = \sum_{x=1}^X C_{зн}^x \cdot t_{on} \quad (x - \text{количество обслуживающего персонала});$$

$$C_A^{on} = \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}} \cdot t_{on}.$$

Параметр  $C_{тех}$  необходимо учитывать при расчете стоимости резки только в тех случаях, когда применяется вспомогательный рабочий газ (например, кислород или азот в зависимости от типа обрабатываемого материала) для увеличения скорости резки, возможности обработки материалов более высоких толщин и для сокращения затрат электроэнергии. В остальных случаях принимать  $C_{тех} = 0$ . Параметр  $C_{лаз}$  необходимо учитывать только при обработке материала на проточном газовом лазере, в противном случае  $C_{лаз} = 0$ . Расход газа зависит от диаметра используемого сопла и давления газа.

Таким образом, формулу (2.1) в общем виде можно записать в следующем виде:

$$C_{on} = t_{on} \cdot \left( P_{on} \cdot C_{э/э} + V_{тех}^{on} \cdot C_{техM^3} + V_{лаз}^{on} \cdot C_{лаzM^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхEд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{зн}^x + \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}} \right). \quad (2.2)$$

Множитель  $(P_{on} \cdot C_{э/э} + V_{тех}^{on} \cdot C_{техM^3} + V_{лаз}^{on} \cdot C_{лазM^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхЕд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{зн}^x + \frac{(\frac{1}{N}) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}})$

обозначим:

$$C_{on}^{лаз} = P_{on} \cdot C_{э/э} + V_{тех}^{on} \cdot C_{техM^3} + V_{лаз}^{on} \cdot C_{лазM^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхЕд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{зн}^x + \frac{(\frac{1}{N}) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}.$$

Тогда (2.2) с учетом принятых обозначений можно записать в следующем виде:

$$C_{on} = C_{on}^{лаз} \cdot t_{on}. \quad (2.3)$$

Для расчета  $C_{off}$  введем следующие обозначения параметров:

$P_{off}$  – затраты электроэнергии за один час работы лазерного комплекса на холостом ходе, кВт/ч;

$t_{off}$  – время, затрачиваемое на один метр холостого хода инструмента, ч.

Тогда

$$C_{off} = t_{off} \cdot C_{off}^{лаз}. \quad (2.4)$$

При этом  $C_{off}^{лаз} = P_{off} \cdot C_{э/э} + \sum_{x=1}^X C_{зн}^x + \frac{(\frac{1}{N}) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}.$

Аналогично для расчета  $C_{pt}$  введем следующие обозначения для стоимостных параметров, вычисляемых на одну точку врезки:

$C_{э/э}^{pt}$  - стоимость электроэнергии;

$C_{расх}^{pt}$  - стоимость расходных материалов;

$C_{лаз}^{pt}$  – стоимость лазерного газа;

$C_{тех}^{pt}$  - стоимость технологического газа,

$C_{зн}^{pt}$  - затраты, связанные с заработной платой сопровождающего персонала;

$C_A^{pt}$  - амортизация оборудования.

Тогда  $C_{pt}$  можно вычислить по следующей формуле:

$$C_{pt} = C_{\text{э/э}}^{pt} + C_{\text{расх}}^{pt} + C_{\text{лаз}}^{pt} + C_{\text{тех}}^{pt} + C_{\text{зн}}^{pt} + C_A^{pt}. \quad (2.5)$$

Для вычисления значений  $C_{\text{э/э}}^{pt}$ ,  $C_{\text{расх}}^{pt}$ ,  $C_{\text{лаз}}^{pt}$  и  $C_{\text{тех}}^{pt}$  введем дополнительные параметры:

$P_{pt}$  - затраты электроэнергии на одну точку резки, кВт/ч;

$t_{pt}$  - время, затрачиваемое на одну точку резки, ч;

$V_{\text{тех}}^{pt}$  - расход технологического газа на одну точку резки, м<sup>3</sup>/ч;

$V_{\text{лаз}}^{pt}$  - расход лазерного газа на одну точку резки, м<sup>3</sup>/ч.

Тогда

$$C_{\text{э/э}}^{pt} = P_{pt} \cdot t_{pt} \cdot C_{\text{э/э}};$$

$$C_{\text{тех}}^{pt} = V_{\text{тех}}^{pt} \cdot C_{\text{тех}} \cdot t_{pt};$$

$$C_{\text{лаз}}^{pt} = V_{\text{лаз}}^{pt} \cdot C_{\text{лаз}} \cdot t_{pt};$$

$$C_{\text{расх}}^{pt} = \sum_{i=1}^I \frac{C_{\text{расх}}^i \cdot E_d}{t_{\text{расх}}^i \cdot C_{\text{рок}}} \cdot t_{pt};$$

$$C_{\text{зн}}^{pt} = \sum_{x=1}^X C_{\text{зн}}^x \cdot t_{pt};$$

$$C_A^{pt} = \frac{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot C_{\text{оборуд}}}{n \cdot t_{\text{смены}}} \cdot t_{pt}.$$

При расчете стоимости одной точки резки параметр  $C_{\text{лаз}}^{pt}$  необходимо учитывать только при обработке материала на проточном газовом лазере.

Параметр  $C_{\text{тех}}^{pt}$  необходимо учитывать при расчете себестоимости резки только в тех случаях, когда применяется вспомогательный технологический газ.

Таким образом, формулу (2.5) с учетом принятых обозначений в общем виде можно записать в следующем виде:

$$C_{pt} = t_{pt} \cdot C_{pt}^{лаз}. \quad (2.6)$$

В свою очередь  $C_{pt}^{лаз}$  вычисляем по формуле:

$$C_{pt}^{лаз} = P_{pt} \cdot C_{э/э} + V_{mex}^{pt} \cdot C_{mexM^3} + V_{лаз}^{pt} \cdot C_{лазM^3} + \sum_{i=1}^I \frac{C_{расхЕд}^i}{t_{расхСрок}^i} + \sum_{x=1}^X C_{зн}^x + \frac{(\frac{1}{N}) \cdot C_{оборуд}}{n \cdot t_{смены}}.$$

Тогда (1.3), используя формулы (2.3), (2.4) и (2.6) можно записать в следующем виде:

$$F_{cost} = L_{on} \cdot t_{on} \cdot C_{on}^{лаз} + L_{off} \cdot t_{off} \cdot C_{off}^{лаз} + C_{pt}^{лаз} \cdot t_{pt} \cdot N_{pt}.$$

В настоящее время на отечественных промышленных предприятиях в основном применяют следующие комплексы лазерной резки с ЧПУ: газовые, оптоволоконные и твердотельные. К основным расходным материалам и запчастям для газового лазера, в частности CO<sub>2</sub> лазерных комплексов, 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. Также параметр  $C_{расхЕд}$  зависит от ценообразования, курса доллара (USD) и евро (EUR), в свою очередь параметры  $C_{э/э}$ ,  $C_{лазM^3}$  и  $C_{mexM^3}$  зависят от цен, которые устанавливает поставщик услуг, поэтому при расчете  $F_{cost}$  для конкретных производственных задач необходимо учитывать изменения цен на расходные и технологические материалы. Предложенная методика расчета  $F_{cost}$  может быть применена для

разного типа оборудования лазерной листовой резки с ЧПУ, только необходимо учитывать технологические и конструктивные особенности каждого станка. Разработанная методика используется на промышленных предприятиях Свердловской области для расчета реальной себестоимости выпускаемой продукции при обработке листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ.

Рассмотрим реализацию разработанной методики на примере расчета значений стоимостных параметров (таблица 2.2) для CO<sub>2</sub> лазерного комплекса с ЧПУ (с выходной мощностью 3кВт) для следующих материалов:

- нержавеющая сталь (на примере 12Х18Н10Т) толщиной  $\Delta=1-10$ мм;
- углеродистая сталь (на примере 10кп) толщиной  $\Delta=1-15$ мм;
- алюминий и его сплавы (на примере АМг3М) толщиной  $\Delta=1-5$ мм.

Значения основных стоимостных параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$  вычислены по формулам (2.1)-(2.6). В таблице 2.2 приведены значения стоимости одного погонного метра лазерного реза при максимальной  $C_{on}^{max}$  и минимальной  $C_{on}^{min}$  возможной рабочей скорости перемещения режущего инструмента  $V_{on}$  в зависимости от требуемого качества изготовления деталей. Для каждого из рассматриваемых случаев  $V_{on} = const$ .

При вычислении целевой функции  $F_{cost}$  в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента, возникающей при проектировании УП, можно учесть тот факт, что фактическая рабочая скорость  $V_{on}$  не является величиной постоянной, а зависит от различных технологических факторов и характеристик спроектированной УП. Для этой цели следует использовать полученные в §2.1.1 корректирующие функции для расчета фактического значения  $V_{on}$ . Однако в этом случае вычисление основных стоимостных параметров следует выполнять для каждой конкретной производственной задачи.

Таблица 2.2 - Значения основных стоимостных параметров при вычислении целевой функции для CO<sub>2</sub> лазерного комплекса с ЧПУ

| Материал и толщина материала( $\Delta$ ) | $C_{on}^{max}$ , руб | $C_{on}^{min}$ , руб | $C_{off}$ , руб | $C_{pt}$ , руб |
|--|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 10кп, $\Delta=1$ мм                      | 5,3                  | 7,5                  | 0,42            | 0,7            |
| 10кп, $\Delta=1,2$ мм                    | 6,6                  | 9,5                  |                 | 1,0            |
| 10кп, $\Delta=1,5$ мм                    | 6,6                  | 9,5                  |                 | 1,1            |
| 10кп, $\Delta=2$ мм                      | 8,1                  | 11,7                 |                 | 1,3            |
| 10кп, $\Delta=2,5$ мм                    | 9,7                  | 14,0                 |                 | 1,5            |
| 10кп, $\Delta=3$ мм                      | 12,0                 | 17,4                 |                 | 1,6            |
| 10кп, $\Delta=3.5$ мм                    | 13,3                 | 19,0                 |                 | 1,6            |
| 10кп, $\Delta=3.9$ мм                    | 13,3                 | 19,0                 |                 | 1,9            |
| 10кп, $\Delta=4$ мм                      | 14,8                 | 21,0                 |                 | 2,2            |
| 10кп, $\Delta=5$ мм                      | 17,9                 | 26,1                 |                 | 2,7            |
| 10кп, $\Delta=8$ мм                      | 26,1                 | 38,2                 |                 | 3,4            |
| 10кп, $\Delta=10$ мм                     | 31,8                 | 44,1                 |                 | 5,1            |
| 10кп, $\Delta=15$ мм                     | 52,1                 | 71,7                 |                 | 6,0            |
| АМГ3М, $\Delta=1$ мм                     | 11,1                 | 18,6                 |                 | 3,7            |
| АМГ3М, $\Delta=2$ мм                     | 18,0                 | 30,0                 |                 | 5,6            |
| АМГ3М, $\Delta=3$ мм                     | 56,8                 | 92,8                 |                 | 14,2           |
| АМГ3М, $\Delta=5$ мм                     | 193,0                | 328,2                |                 | 32,2           |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=1$ мм                 | 14,9                 | 24,9                 |                 | 2,5            |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=1,5$ мм               | 18,7                 | 31,4                 |                 | 3,8            |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=2$ мм                 | 25,3                 | 42,4                 |                 | 4,5            |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=2,5$ мм               | 38,1                 | 63,5                 |                 | 6,8            |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=3$ мм                 | 46,4                 | 76,1                 |                 | 8,6            |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=4$ мм                 | 87,2                 | 143,7                |                 | 13,1           |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=5$ мм                 | 122,6                | 198,1                |                 | 18,9           |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=6$ мм                 | 241,5                | 386,5                |                 | 31,7           |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=8$ мм                 | 475,5                | 856,0                |                 | 42,2           |
| 12Х18Н10Т, $\Delta=10$ мм                | 1038,7               | 2077,3               |                 | 72,0           |

Изложенная методика является универсальной для машин лазерной резки с ЧПУ, которая может применяться для вычисления значений целевой функции стоимости процесса резки, а также для создания таблиц стоимостных параметров для разного лазерного оборудования с ЧПУ, для разных марок обрабатываемых

материалов и толщин. Аналогичный подход следует использовать и при расчете стоимостных параметров целевой функции  $F_{cost}$  для другого технологического оборудования листовой резки с ЧПУ, при этом необходимо учитывать конструктивные и технологические особенности конкретного оборудования. Изложенная методика была реализована в виде программы для расчета стоимостных параметров и конечной стоимости процесса резки листового материала на оборудовании с ЧПУ. Разработанная программа может быть использована в качестве отдельного модуля, не зависящего от конкретной САПР, но также может быть интегрирована в существующие САПР в виде модуля, который позволяет расширять функциональные возможности системы.

## **2.2 Стратегии формирования маршрута резки с применением специальных техник резки**

Стратегия проектирования УП в случае, когда приоритетными критериями оптимизации УП являются стоимость и время резки, значительно отличаются по сравнению с оптимизацией только холостых перемещений режущего инструмента на холостом ходе. Основными параметрами, влияющими на время и стоимость резки, являются  $L_{off}$ ,  $L_{on}$  и  $N_{pt}$ . Как было сказано в Главе 1, наибольший интерес представляют параметры  $L_{on}$  и  $N_{pt}$ , уменьшение значений которых приводит к значительному уменьшению общего времени и стоимости процесса резки, что достигается в результате применения специальных техник резки (совмещенный рез, резка змейкой, «цепная» резка). В работах [46,48] автором диссертационной работы был проведен сравнительный анализ целесообразности применения «цепной» резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру».

Автором диссертационной работы разработаны специальные методы резки для групп типовых деталей, которые являются комбинациями вышеописанных специальных способов резки и позволяют значительно уменьшать общее время и стоимость процесса резки на машине с ЧПУ по сравнению с резкой «по замкнутому контуру» [49,108,109]. Разработанные методы будут описаны ниже.

Предлагаемые методы применимы для групп часто встречающихся геометрических типов деталей, изготавливаемых из листового материала на оборудовании с ЧПУ, на машиностроительных предприятиях в раскройно-заготовительном производстве. Эти методы целесообразно реализовать в виде специальных функций, которые позволят расширить штатные возможности систем автоматизированного проектирования УП при построении маршрута резки.

При использовании специальных техник резки необходимо одновременно учитывать соотношения значений параметров целевых функций стоимости и времени резки, к которым относятся  $L_{on}$ ,  $L_{off}$  и  $N_{pt}$ . Например, при использовании «цепной» резки за счет перехода от одного контура к другому без выключения режущего инструмента сокращается количество точек врезок и длина холостого хода, однако увеличивается значение параметра  $L_{on}$ .

В случае применения специальных техник резки с дополнительными резами без выключения режущего инструмента (например, «цепная» резка, резка змейкой) введем понятие  $L_{\partial on}$  - допустимая длина дополнительного реза при переходе от одного контура к другому на рабочем ходе. Введем также дополнительные параметры:  $L_{\partial on}^{\Sigma}$  - максимально допустимая общая длина всех дополнительных резов на раскройной карте при переходе от одного контура к другому без выключения режущего инструмента;  $N_{pt}^{L_{\partial on}}$  - количество точек врезки, на которое сокращается общее количество точек врезки  $N_{pt}$  за счет применения специальной техники резки с дополнительными резами без совмещенного реза. Значение параметра  $L_{off}$  сокращается на величину  $L_{off}^{L_{\partial on}}$  за счет применения специальной техники резки. Таким образом, максимальная стоимость длины пути между контурами при которой выгодно производить переход без выключения режущего инструмента должна удовлетворять неравенству:

$$C_{on} \cdot L_{\partial on}^{\Sigma} \leq C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{\partial on}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{\partial on}}.$$

Отсюда в свою очередь максимальная допустимая общая длина всех дополнительных резов, при которой выгодно осуществлять переход между контурами на рабочем ходе по сравнению с резкой «по замкнутому контуру», должна вычисляться по формуле:

$$L_{\partial on}^{\Sigma} = \frac{C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{\partial on}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{\partial on}}}{C_{on}}. \quad (2.7)$$

При этом фактическая суммарная длина дополнительных резов на раскройной карте  $L_{\partial on}^{\Sigma \text{ факт}}$  должна удовлетворять неравенству  $L_{\partial on}^{\Sigma \text{ факт}} < L_{\partial on}^{\Sigma}$ .

Рассмотрим случай вырезки двух контуров с использованием «цепной» техники резки (рисунок 1.2, Глава 1), в этом случае будет использован один дополнительный рез, тогда  $L_{\partial on}^{\Sigma}$  можно обозначить, как  $L_{\partial on}^{\Sigma} = L_{\partial on}$ . Как показывает практика, в результате применения «цепной» техники резки наблюдается незначительное снижение  $L_{off}$ . В свою очередь значение  $C_{off}$  по сравнению со значениями параметров  $C_{on}$  и  $C_{pt}$  незначительно, поэтому примем, что  $C_{off} \cdot L_{off}^{L_{\partial on}} \rightarrow 0$ . Также в рассматриваемом примере  $N_{pt}^{L_{\partial on}} = 1$ . Тогда для случая с одним дополнительным резом формула (2.7) примет следующий вид:

$$L_{\partial on} = \frac{C_{pt}}{C_{on}}. \quad (2.8)$$

Таким образом, уменьшение стоимости резки от применения специального способа резки с дополнительным резом (например, «цепная» резка) будет только при условии, что фактическая длина дополнительного реза  $L_{\partial on}^{\text{факт}}$  удовлетворяет неравенству  $L_{\partial on}^{\text{факт}} < L_{\partial on}$ .

В [50] был произведен расчет  $L_{\partial on}$  для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса листовой резки с ЧПУ для наиболее часто обрабатываемых материалов. Значения  $L_{\partial on}$  приведены в таблице 2.3, рассчитанные по (2.8). В таблице 2.3 приведены значения дополнительного реза при максимальной  $L_{\partial on}^{\max}$  и минимальной  $L_{\partial on}^{\min}$

возможной рабочей скорости перемещения режущего инструмента  $V_{on}$  .  
Соответствующая скорость инструмента выбирается в зависимости от требуемого качества получаемых деталей в результате обработки

Таблица 2.3 - Значения длины дополнительного реза  $L_{доп}$  для лазерного  $CO_2$  комплекса с ЧПУ

| Материал  | Толщина материала, мм | $L_{доп}^{max}$ , м | $L_{доп}^{min}$ , м |
|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 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                |
|           | 4                     | 0,15                | 0,10                |
|           | 5                     | 0,15                | 0,11                |
|           | 8                     | 0,13                | 0,09                |
|           | 10                    | 0,16                | 0,12                |
| 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                |                     |

В случае использования специальных техник резки с совмещенным резом значение  $L_{\text{дон}}^{\Sigma}$  должно вычисляться по формуле:

$$L_{\text{дон}}^{\Sigma} = \frac{C_{pt} \cdot N_{pt}^{L_{\text{дон}}} + C_{off} \cdot L_{off}^{L_{\text{дон}}} + C_{on} \cdot L_{on}^{совмещ}}{C_{on}}. \quad (2.9)$$

Обозначения параметров аналогичны как для условия (2.7), вводится дополнительный параметр  $L_{on}^{совмещ}$  - общая длина совмещенных резов.

При решении задач нерегулярного фигурного раскроя на практике часто используется прием объединения фигурных объектов (заготовок) в группу или «блок». Под «блоком» в этом случае понимается набор заготовок, положения которых зафиксированы относительно друг друга. При размещении такой «блок» ведет себя как одна заготовка, то есть все преобразования по перемещению/вращению производятся одновременно со всеми деталями, входящими в «блок». Например, все одинаковые прямоугольные треугольники целесообразно объединять парами в группу, имеющую форму прямоугольника, с размерами, равными катетам треугольника. «Блоки», в основном, состояются из однотипных заготовок, но могут содержать и заготовки различной конфигурации. Объединение в «блоки» актуально в нашем случае, специальная техника резки будет реализована внутри блока однотипных заготовок с одной точкой врезки за один базовый сегмент резки с учетом технологических ограничений процесса термической резки. Ниже в §2.2.1 будет предложен метода резки для круглых заготовок, в §2.2.2 – для многоугольных заготовок.

### **2.2.1 Схемы проектирования маршрута режущего инструмента при резке круглых заготовок**

Среди часто встречающихся геометрических типов деталей, изготавливаемых из листового материала в машиностроительном производстве, можно выделить заготовки, имеющие внешний контур (или части внешнего контура) круглой формы, примеры которых приведен на рисунке 2.7. При этом по контуру допускаются различные вырезы/пазы и допускается наличие внутренних

контуров. На основании стратегии, объединения однотипных заготовок в группы, предлагаем специальный способ резки круглых заготовок с уменьшением значений параметров  $N_{pt}$ ,  $L_{off}$  и в случае без дополнительного реза незначительным уменьшением значения  $L_{on}$  при одновременном снижении  $F_{cost}$ .

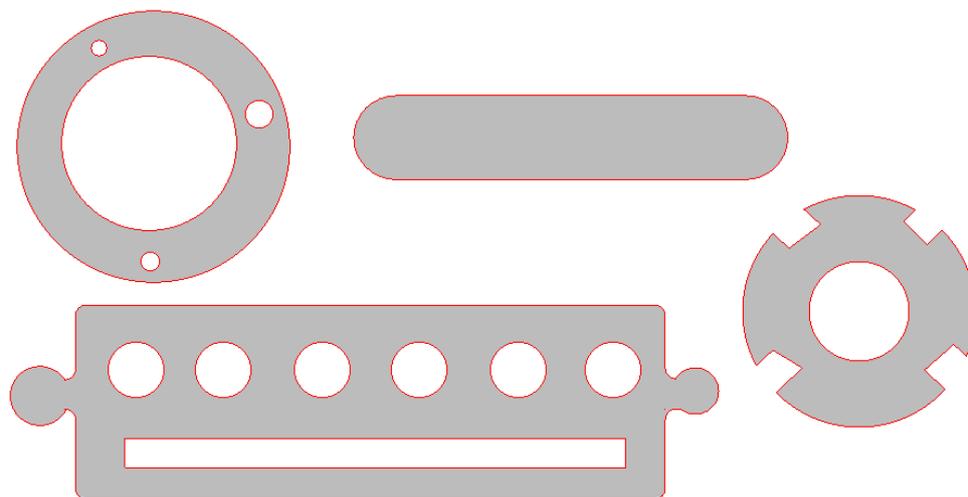


Рисунок 2.7. – Примеры заготовок, для которых применим предлагаемый способ резки

На рисунке 2.8 приведена схема резки трех круглых заготовок с помощью резки «по замкнутому контуру» с тремя сегментами резки и с тремя точками врезки, обозначенными цифрами 1-3.

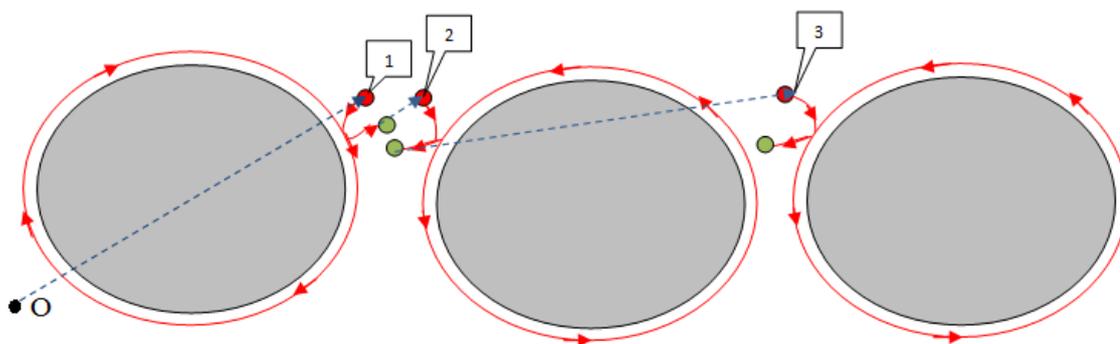


Рисунок 2.8 - Пример схемы резки трех круглых заготовок «по замкнутому» контуру

На рисунке 2.9 – с помощью разработанной методики резки с одной точкой врезки без дополнительного реза за один базовый сегмент резки. На обоих рисунках т.О – нулевая точка начала маршрута. На рисунке 2.9 цифрами от 1 до 5 показана последовательность резки контуров за один сегмент. После врезания в

материал режущий инструмент на рабочем ходе переходит к вырезке участка под номером 1 первого контура, затем без дополнительного реза режущий инструмент переходит ко второму контуру и вырезает участок контура под номером 2 и т.д. В конце режущий инструмент завершает вырезку трех контуров с одной точкой врезки по пятому участку первого контура и переходит к точке выключения.

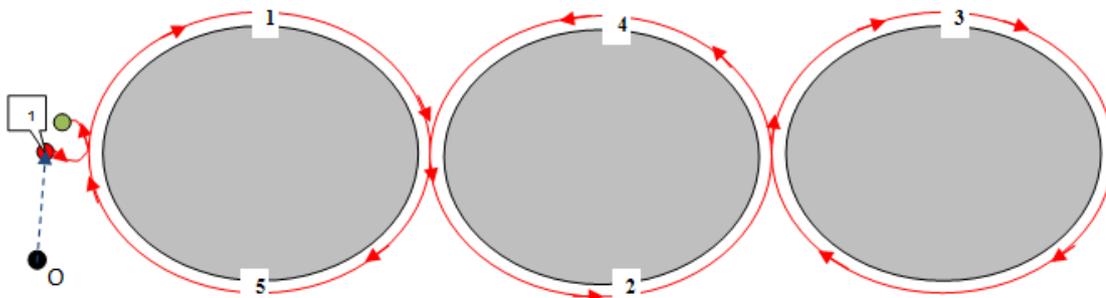


Рисунок 2.9 - Пример схемы резки трех круглых заготовок с применением специальной техники резки без дополнительного реза

Следует обратить внимание, что в рассматриваемом способе резки (рисунок 2.9) инструмент переходит от одного контура к другому на рабочем ходе без дополнительных резов, за счет чего уменьшаются значения основных параметров резки  $N_{pt}$ ,  $L_{off}$ . Уменьшение значения параметра  $L_{on}$  происходит за счет того, что уменьшается количество траекторий входа в контур и выхода из него. Однако в результате применения предложенного метода резки при обработке круглых заготовок в месте «стыковки» контуров возможно образование «ступеньки» (рисунок 2.10), что в некоторых случаях может привести к искажению конечной геометрии и требуемых размеров заготовки.

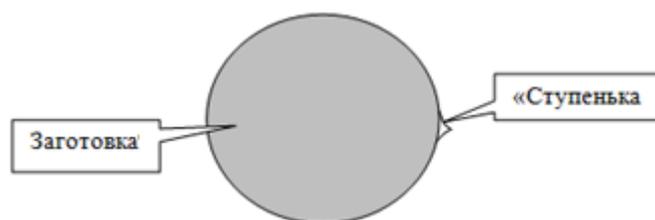


Рисунок 2.10 - Возможная «ступенька» при обработке круглых заготовок с помощью специального метода резки

Как показывает практика при обработке круглых заготовок на машине лазерной листовой резки с ЧПУ размеры «ступеньки» незначительны (достигают десятых-сотых долей мм) и ее размеры либо попадают в требуемое поле допуска для соответствующего размера, либо ее можно «зачистить» с помощью дополнительной обработки без искажения геометрии и требуемых размеров детали. Также следует отметить, что часто детали, получаемые после лазерной обработки, являются заготовками для дальнейших переделов с припусками на требуемые размеры чертежа, поэтому допускаются незначительные дефекты, обработка которых в дальнейшем не приведет к искажению требуемых размеров и форм конечной детали.

При размещении круглых заготовок в один ряд вдоль любой оси листового материала возможно сокращение количества точек врезок до  $N_{pt} = 1$  и сведение  $L_{off} \rightarrow 0$ , если не считать перемещения режущего инструмента на холостом ходе до точки врезки для текущего ряда круглых заготовок и от точки выключения режущего инструмента до следующей точки врезки или нулевой точки. В случае размещения круглых заготовок в  $p$  рядов при использовании предложенного способа резки  $N_{pt} = p$ .

Предложенный метод резки круглых заготовок (рисунок 2.9) в основном применим для заготовок, которые можно объединить в один блок и применить предложенную специальную технику резки без дополнительного реза. Однако на практике возникают случаи вырезки круглых заготовок специальным способом с дополнительным резом (рисунок 2.11). Например, в реальном производственном процессе возникает задача вырезки круглых заготовок разного габаритного размера. Также при построении маршрута перемещения режущего инструмента на машинах термической резки с ЧПУ необходимо выполнение технологических ограничений термической резки. В частности, в случае выполнения условий сокращения термических деформаций [35] вырезку заготовок с применением разработанной специальной техники резки для круглых заготовок необходимо выполнять без изменения обхода контуров. С этой целью может быть применим

способ с дополнительным резом (рисунок 2.11) во избежание повышения температуры в процессе резки контуров в месте стыка деталей из-за острого угла при переходе от одного контура к другому без изменения направления обхода и во избежание образования выступа (рисунок 2.10). Вырезка контуров осуществляется аналогично способу, приведенному выше (рисунок 2.9), однако при переходе от одного контура к другому при необходимости возможен дополнительный рез (при наличии деталей значительно отличающихся по размерам и смещении друг относительно друга). В свою очередь это может привести к увеличению  $L_{он}$  на величину фактической длины дополнительных резов  $L_{дон}^{\sum факт}$ . Поэтому в данном способе необходимо вычислять максимально допустимую длину дополнительного реза  $L_{дон}^{\sum}$ , при этом  $L_{дон}^{\sum факт} < L_{дон}^{\sum}$ . На рисунке 2.11 красными стрелками показан спроектированный путь перемещения инструмента на рабочем ходе при прямом обходе контуров, фиолетовым – обратный ход режущего инструмента при завершении вырезки трех деталей с применением специальной техники резки. Согласно предложенному методу режущий инструмент после врезания в материал обходит по часовой стрелки первый участок контура под номером 1, после чего меняя направление обхода против часовой стрелки совершает дополнительный рез и переходит к вырезке участка под номером 2 второго контура по часовой стрелке и т.д. Пока режущий инструмент не завершит вырезку полного контура с номером 3, после чего режущая головка совершает обратный обход оставшихся не вырезанных отрезков контуров под номерами 4 и 5 за один сегмент резки. Таким образом, можно вырезать заготовки разных размеров, объединенных в блоки и внутри каждого блока реализовать вырезку нескольких контуров с помощью одной точки врезки. При этом дополнительный рез следует выполнять по дуге.

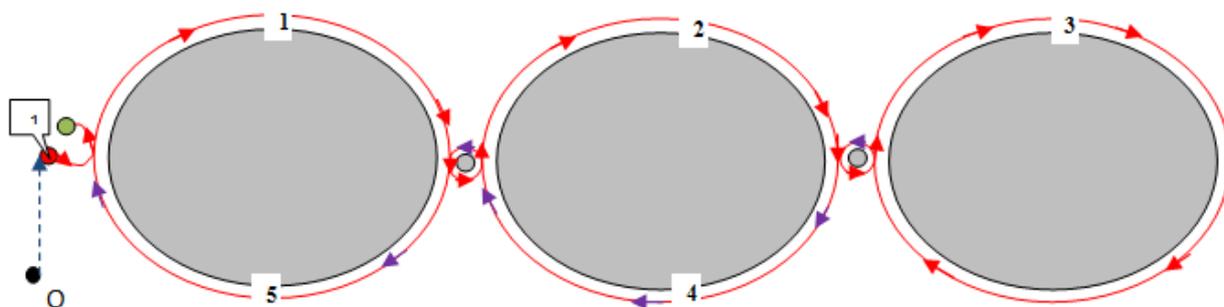


Рисунок 2.11 - Пример схемы резки трех круглых заготовок с применением специальной техники резки с дополнительным резом

В Главе 3 будет описан алгоритм построения маршрута резки при выполнении условий технологичности, основанный на разработанном способе резки круглых заготовок. Данный алгоритм реализован в САПР «СИРИУС» в виде специальной функции для автоматического построения маршрута резки и используется в интерактивном режиме в САПР BySoft при подготовке УП для лазерного комплекса с ЧПУ. Расчет эффективности применения данного способа резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру» будет приведен в Главе 4.

### 2.2.2 Схемы проектирования маршрута режущего инструмента при резке многоугольных заготовок

В машиностроительной отрасли в раскройно-заготовительном производстве при раскрое листового материала к наиболее часто встречающимся геометрическим типам заготовок помимо заготовок круглой формы относятся также многоугольные заготовки с отверстиями различной формы и возможными вырезами/пазами по контуру заготовки. В отдельную группу можно отнести треугольные и прямоугольные заготовки. Следует отметить, что прямоугольные заготовки целесообразно обрабатывать с помощью совмещенного реза, для случая длинных полос – резка с перемычкой. Касательно остальных многоугольных (в т.ч. треугольных) заготовок применение только одного совмещенного реза не эффективно, т.к. обычно с помощью одной точки врезки удается вырезать обычно две заготовки. Также не эффективны известные мультиконтурные способы резки (например, «цепная» резка или змейкой), т.к. применение выделенных способов приводит к сокращению количества точек врезки, но значение параметра  $L_{on}$  в

лучшем случае остается постоянным или увеличивается. Поэтому возникает необходимость в разработке новых специальных способов резки для выделенной группы заготовок, которые в какой-то степени объединяют известные способы резки.

В отдельную группу выделим треугольные заготовки, для резки которых применим мультиконтурную резку, объединяющую совмещенный рез и резку змейкой. На рисунке 2.12 приведена схема резки шести треугольных заготовок одного размера с помощью резки «по замкнутому контуру» при этом  $N_{pt} = 6$ , цифрами 1-6 обозначена последовательность резки.

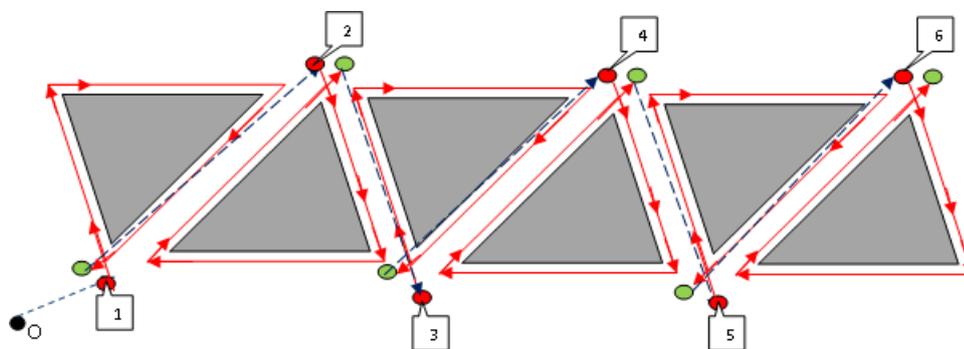


Рисунок 2.12 - Схема резки шести треугольных заготовок с помощью резки «по замкнутому контуру»

На рисунке 2.13 приведена схема резки тех же шести треугольных заготовок с использованием предлагаемой специальной техники резки, при этом  $N_{pt} = 1$ .

На рисунке 2.13 цифрами 1-13 обозначена последовательность резки контуров за один базовый сегмент. После врезания в материал режущий инструмент на рабочем ходе переходит к вырезке участка под номером 1 первого контура, затем без дополнительного реза режущая головка переходит ко второму контуру и вырезает участок под номером 2 и т.д. В конце режущий инструмент завершает вырезку шести контуров за один базовый сегмент резки по 13 отрезку и переходит к точке выключения инструмента. Следует обратить внимание, что в рассматриваемом способе резки инструмент переходит от одного контура к другому на рабочем ходе с совмещенным резом без выключения режущего

инструмента, за счет чего уменьшается количество точек врезки  $N_{pt}$ , длина перемещений инструмента на рабочем  $L_{on}$  и холостом  $L_{off}$  ходе.

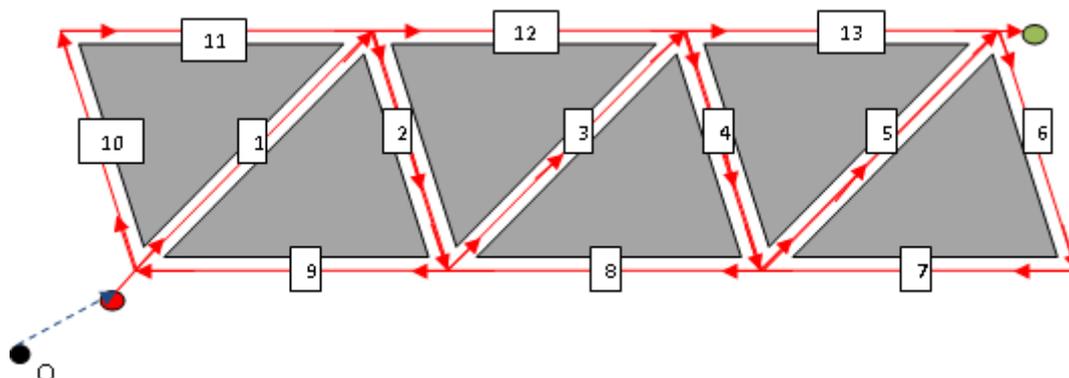


Рисунок 2.13 - Схема резки шести треугольных заготовок с помощью специального способа резки

Способ резки, предложенный на рисунке 2.13, применим для групп треугольных заготовок одного типоразмера, расположенных в ряд. Также с помощью предложенного способа резки вырезку заготовок, расположенных в несколько рядов, можно выполнять за один базовый сегмент резки (пример раскройных карт приведен в Приложении Г), либо можно спроектировать маршрут режущего инструмента без холостого хода, способом, приведенным на рисунке 2.14. Основное условие непрерывной резки нескольких заготовок заключается в том, что общее количество пересекающихся ребер заготовки у любой вершины должно быть четным. Или с точки зрения теории графов у каждой вершины должно быть четное количество ребер (т.н. эйлеров граф). В противном случае непрерывную резку заготовок с помощью одной точки врезки не осуществить без дополнительных резов (при наличии вершин с нечетным количеством ребер больше двух).

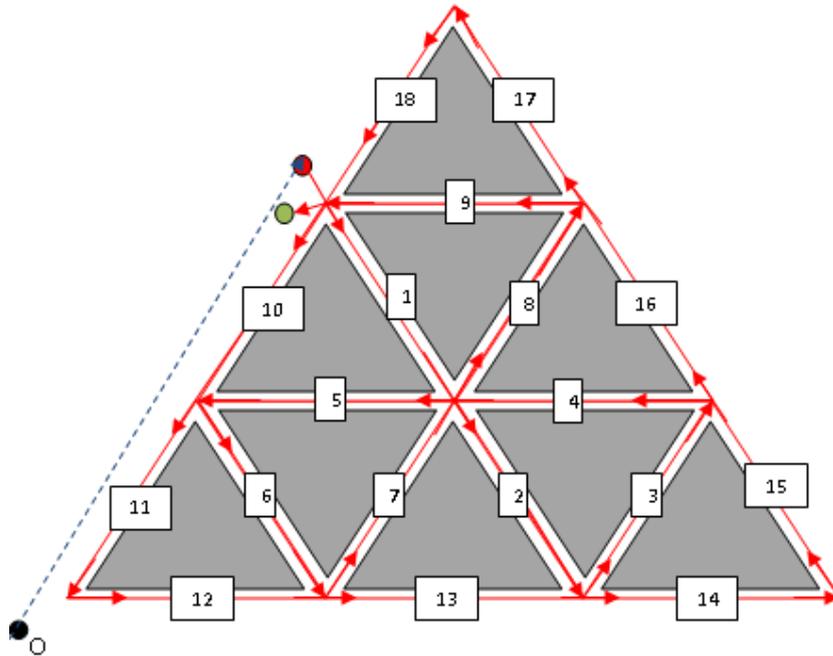


Рисунок 2.14 - Схема резки девяти треугольных заготовок с помощью мультиконтурной резки

На рисунке 2.14 цифрами от 1 до 18 обозначена последовательность резки контуров за один базовый сегмент. Таким образом, после врезания в материал режущий инструмент на рабочем ходе переходит к вырезке участка под номером 1 первого контура, затем без дополнительного реза и выключения режущий инструмент переходит ко второму контуру и вырезает участок под номером 2 и т.д. В конце режущий инструмент завершает вырезку девяти контуров с одной точкой врезки по 18 отрезку и переходит к точке выключения инструмента. В рассматриваемом способе резка контуров осуществляется с применением совмещенного реза и без выключения режущего инструмента. За счет этого сокращается количество точек врезки до  $N_{pt} = 1$ , длина перемещений инструмента на рабочем ходе  $L_{on}$  за счет совмещенного реза, при этом  $L_{off} \rightarrow 0$ . Холостой переход осуществляется только при переходе режущего инструмента от нулевой точки до точки врезки и от точки выключения инструмента до нулевой точки. Способом, приведенным на рисунке 2.14, можно размещать большое количество заготовок одного типоразмера, при этом  $N_{pt} = 1$  и  $L_{off} \rightarrow 0$ .

Предложенные на рисунках 2.13 и 2.14 методы резки относятся к мультиконтурной резке и применимы для любых треугольников. Обработку пятиугольных заготовок из листового материала на машине лазерной резки с ЧПУ также можно осуществить предложенным методом, приведенном на рисунке 2.13 с помощью мультиконтурной резки, объединяющей совмещенный рез и резку змейкой. На рисунке 2.15 для сравнения приведена схема резки «по замкнутому» контуру шести пятиугольных заготовок при этом  $N_{pt} = 6$ .

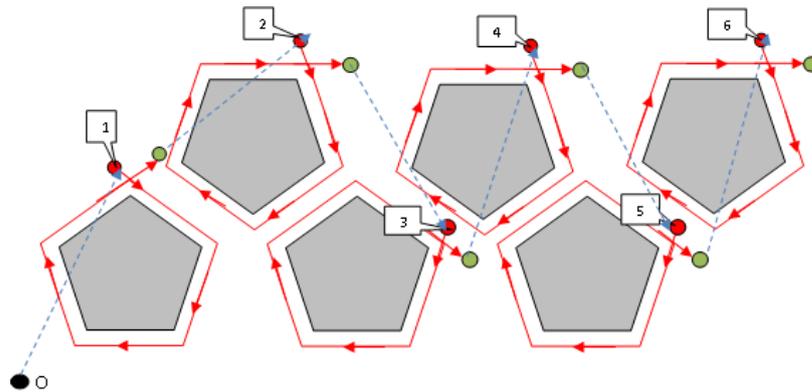


Рисунок 2.15 - Схема резки «по замкнутому контуру» шести пятиугольных заготовок

На рисунке 2.16 – схема резки тех же пятиугольных заготовок с применением предлагаемой специальной техники резки.

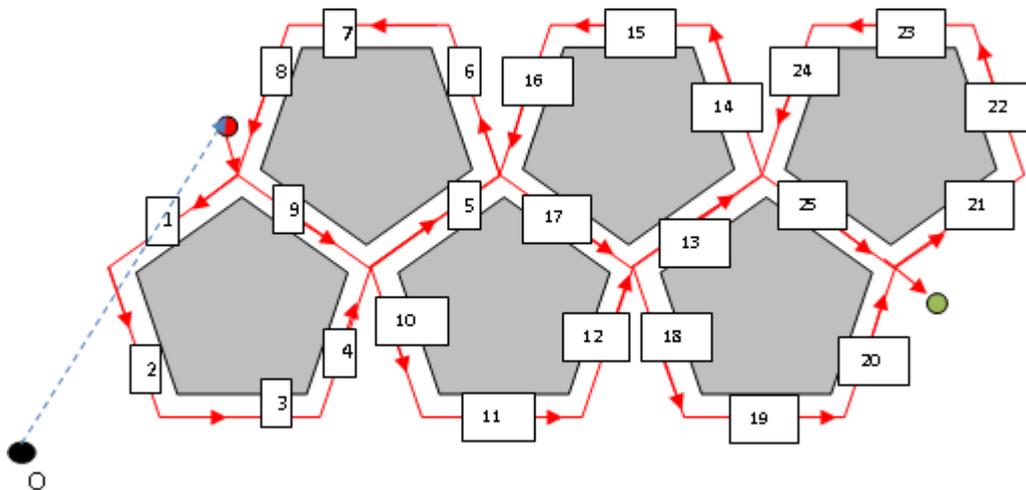


Рисунок 2.16 - Схема резки шести пятиугольных заготовок с мультиконтурной резки

С помощью схемы, приведенной на рисунке 2.16 можно осуществлять резку по ребрам многоугольников, соблюдая последовательность и направление резки

каждого ребра. Инструмент перемещается на холостом ходе от начальной точки положения инструмента  $t.O$  до точки врезки, после чего осуществляется непрерывная резка всех ребер, начиная с 1, без дополнительных резов за один базовый сегмент. После того как режущий инструмент частично вырежет первый контур по 4 ребрам (с 1 по 4) переходит к 5 ребру и начинает вырезать второй контур последовательно вырезая с 6 по 9 ребра. При вырезке 9 ребра будут окончательно вырезаны первый и второй контура. Аналогично можно вырезать оставшиеся контура, после чего инструмент переходит в точку выключения инструмента. Как видно из рисунка 2.16, за счет применения совмещенного реза сокращается  $L_{on}$ , за счет отсутствия холостых переходов  $L_{off} \rightarrow 0$ , в свою очередь  $N_{pt} = 1$  в результате резки без выключения режущего инструмента. При этом одновременно уменьшаются значения общего времени и стоимости процесса резки заготовок из листового материала на машинах термической резки с ЧПУ. Предложенный способ резки применим для любых выпуклых пятиугольников, по наружному контуру допускаются пазы/вырезы, также допускаются отверстия и окна внутри заготовок.

В общем виде предложенные методы применимы и для других заготовок, при выполнении условия четности ребер, в противном случае необходимо вводить дополнительные резы без пересечений с контурами заготовок. В случае обработки четырехугольных заготовок целесообразно применять совмещенный рез, либо технологию, предложенную на рисунке 2.16, при условии, что общее количество ребер будет четным (за исключением двух вершин, которые будут являться точками входа и выхода режущего инструмента, например, рисунок 2.13 и 2.16). В последнем случае по сравнению с обычным совмещенным резом значения параметров  $L_{on}$ ,  $N_{pt}$  и  $L_{off}$  при использовании разработанного способа резки будут, как показывает практика, ниже.

В общем случае при резке многоугольных заготовок, когда количество пересекающихся ребер больше, чем у двух вершин нечетно, то предложенный способ резки реализуем с дополнительными резами без пересечений с контурами

заготовок, либо с добавлением точек врезки. По причине наличия дополнительных резов рабочая длина перемещения режущего инструмента может увеличиваться по сравнению с  $L_{on}$ , полученной в результате применения резки «по замкнутому контуру», поэтому актуален вопрос проверки выполнения условия  $L_{дон}^{\Sigma факт} < L_{дон}^{\Sigma}$ . Рассмотрим схему мультиконтурной резки с дополнительным резом для следующих заготовок (рисунок 2.17). На рисунке 2.17 для 8 вершин количество пересекающихся ребер заготовок нечетно, поэтому резка контуров возможна только с дополнительными резами на участках, которые введены на участках 5, 9 и 21 на рисунке 2.17. Цифрами 1-22 обозначена последовательность обхода ребер пяти заготовок. Режущий инструмент на холостом ходе переходит из начальной т.О в точку врезки, после чего осуществляется частичная вырезка первого контура по ребрам 1-4, затем вырезается ребро 5 второй заготовки и т.д. пока окончательно не будут вырезаны ребра 6-22. В результате применения предложенного на рисунке 2.17 специального метода резки  $N_{pt} = 1$  и  $L_{off} \rightarrow 0$ .

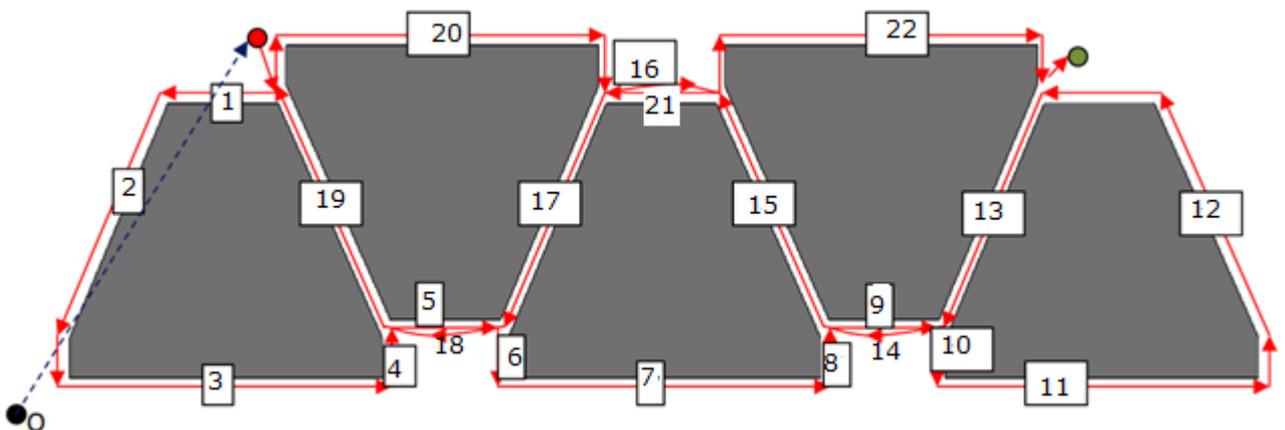


Рисунок 2.17 - Схема резки пяти заготовок с помощью мультиконтурной резки с дополнительным резом

В Главе 3 будет приведен алгоритм построения маршрута резки с применением вышеописанного способа. Данный алгоритм реализован в САПР «СИРИУС» в виде специальной функции для построения маршрута резки и используется в интерактивном режиме в САПР BySoft при подготовке УП для лазерного комплекса с ЧПУ. В Главе 4 будет приведен результат расчета

экономической эффективности предложенного специального способа для построения маршрута резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру».

Следует отметить, что предложенные способы применения специальных техник резки и формирования групп однотипных деталей на этапе проектирования раскроя листового материала на фигурные заготовки, среди которых присутствуют заготовки с геометрическими типами, рассмотренными выше, можно интерпретировать как методы формирования наборов базовых сегментов для последующего решения задачи оптимизации класса GSCCP.

### 2.3 Выводы по Главе 2

1. Впервые разработана научно-обоснованная методика точного расчета стоимостных параметров в целевой функции стоимости процесса резки на примере машины лазерной резки с ЧПУ;
2. Впервые получены формулы для вычисления фактических значений параметра  $V_{on}$  для точного вычисления целевой функции времени резки в задаче оптимизации траектории перемещения режущего инструмента для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Полученные формулы использованы в САПР «СИРИУС» для оптимизации маршрута инструмента в автоматическом режиме по времени резки  $T_{cut}$  с использованием точного и эвристического алгоритмов;
3. Разработаны специальные способы резки, применяемые при формировании маршрута резки в процессе проектирования УП для некоторых номенклатур типовых деталей, изготавливаемых из листового материала, реализация которых при проектировании УП позволяет значительно уменьшать значения основных параметров резки по сравнению со стандартной резкой «по замкнутому контуру».

### **ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ В ПОДСИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРШРУТА РЕЗКИ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ САПР УП**

Как было отмечено в §1.5, для автоматизации проектирования УП применяются как универсальные системы автоматизированного проектирования, так и узкоспециализированные. Универсальные САПР, к которым относится, в частности, САПР «СИРИУС», предназначенная для автоматизированного проектирования раскроя и проектирования УП для машины листовой резки с ЧПУ, ориентированы на применение для технологического оборудования разных производителей. В этой главе будет описана программная реализация разработанных в Главе 2 методик и алгоритмов маршрутной оптимизации инструмента для машин термической резки разных типов, позволяющая повысить эффективность функционирования САПР «СИРИУС» и расширить её функциональные возможности.

#### **3.1. Требования к функциям подсистемы автоматизированного проектирования маршрута резки в САПР УП**

С помощью подсистемы построения маршрута резки в составе САПР УП для оборудования термической резки с ЧПУ должна решаться задача проектирования маршрута резки в автоматическом, полуавтоматическом или интерактивном режиме с соблюдением условий технологичности и возможностью управления стоимостью резки. Важным моментом в подсистеме является обеспечение возможности применения специальных техник резки. Как показали результаты диссертационного исследования, приведенные в Главе 2, наибольший интерес представляют комбинированные методы, реализация которых позволяет сокращать значение  $F_{cost}$  при выполнении условий технологичности. Возникает необходимость в формировании групп деталей для вырезки с использованием одной точки врезки с применением специального способа резки.

Рассмотрим основные требования к подсистеме автоматизированного проектирования маршрута резки при подготовке УП для технологического оборудования термической резки с ЧПУ:

1. Подсистема предназначена для назначения оптимальной траектории перемещения режущего инструмента по заданной раскройной карте;
2. При назначении маршрута резки необходимо обеспечить соблюдение технологических требований и ограничений процесса термической резки;
3. Интерактивный режим должен включать в себя набор команд и инструментальных средств для обеспечения пользователю возможности максимальной свободы принятия решений. В интерактивный режим проектирования маршрута резки должны входить следующие функции:
  - Определение начального и конечного положения режущего инструмента;
  - Задание ширины реза для выбранного режущего инструмента;
  - Включение/выключение режущего инструмента;
  - Задание величины рабочей и холостой скорости перемещения режущего инструмента;
  - Выбор типа и длины подхода к контуру и выхода из него;
  - Реализация резки контуров «по замкнутому контуру»;
  - Реализация резки контуров с применением специальных техник резки (например, совмещенный рез, «цепная» резка, резка с перемычкой, комбинированные способы резки);
  - Автоматические режимы описания маршрута резки с соблюдением технологических требований и ограничений процесса термической резки;
  - Полуавтоматический режим описания маршрута резки с соблюдением технологических требований и ограничений процесса термической резки;

- Средства редактирования готовой последовательности резки с целью обеспечения корректировки в любом месте программы;
  - Возможность корректировки параметров резки.
4. Команды назначения маршрута резки должны быть малооперационными;
  5. В подсистеме должны быть инструментальные средства для редактирования спроектированной последовательности команд обработки;
  6. В подсистеме реализация способов резки (как резки «по замкнутому контуру», так резка с применением специальных способов) должны быть осуществлены в виде макропрограмм в автоматическом, интерактивном и полуавтоматическом режиме. При этом должна быть реализована возможность пользователю самому программировать необходимые макропрограммы.

Реализация предложенных требований в существующих системах автоматизированного проектирования УП или во вновь разрабатываемых системах позволит решить ряд актуальных проблем и позволит усовершенствовать процесс проектирования маршрута резки при подготовке УП.

### **3.2. Подсистема автоматизированного проектирования маршрута резки для оборудования термической резки с ЧПУ**

Построение маршрута резки в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ может происходить в автоматическом или интерактивном режиме. Как было отмечено в Главе 1, в настоящее время отсутствуют алгоритмы автоматической генерации оптимальных УП, отвечающих требованиям термической резки. Для улучшения получаемых решений в подсистеме проектирования маршрута резки могут быть реализованы макропрограммы с реализацией специальных техник резки для некоторых номенклатур типовых деталей с учетом соблюдения особенностей и ограничений термической резки. Таким образом, можно формировать набор

базовых сегментов для последующего решения задачи оптимизации маршрута резки.

### 3.2.1. Алгоритм построения маршрута резки для номенклатур типовых деталей с соблюдением технологических ограничений процесса термической резки

Для разработанных в Главе 2 специальных техник резки для круглых и многоугольных заготовок предложен алгоритм построения маршрута резки с соблюдением технологических ограничений процесса термической резки (рисунок 3.1).

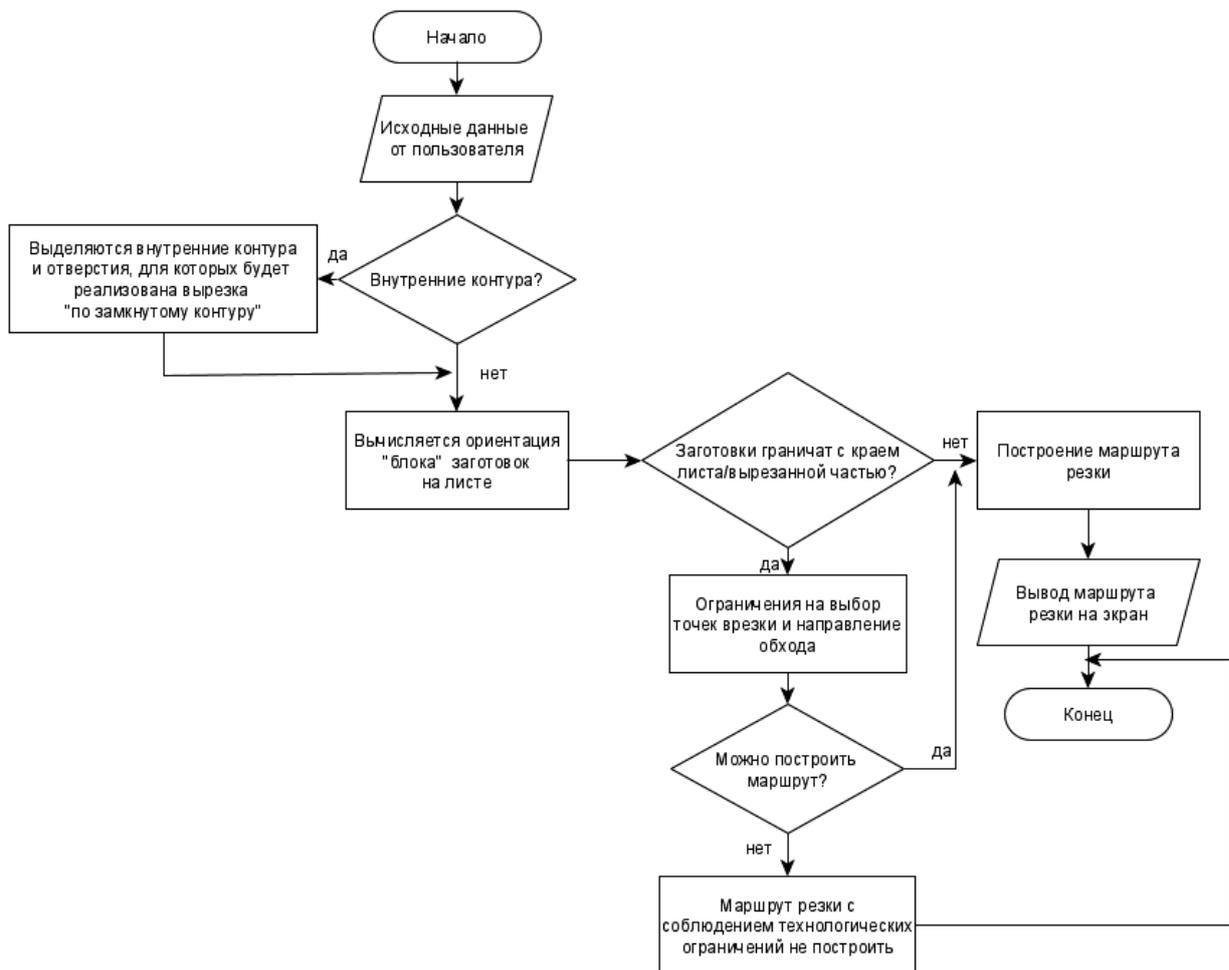


Рисунок 3.1 – Алгоритм построения маршрута резки с применением специальных техник резки

Рассмотрим каждый этап формирования траектории режущего инструмента:

**Шаг 1.** Получаем исходные данные от пользователя. Выбор требуемых контуров (с помощью нитевого прямоугольника), для которых будет применена специальная резка, либо «резка по замкнутому контуру» (для случая внутренних контуров и заготовок, расположенных внутри).

**Шаг 2.** На основании полученных данных

- определяется блок и количество деталей в блоке, для которых будет применена специальная резка;
- происходит проверка на наличие внутренних контуров, отверстий и деталей внутри них.

В случае наличия отверстий и деталей внутри них (рисунок 3.2), то для них при построении маршрута перемещения инструмента будет реализована резка «по замкнутому контуру». На примере, приведенном на рисунке 3.2, прежде чем вырезать внешний контур колец необходимо выполнить условие предшествования. Таким образом, сначала вырезаются контура с точками врезки  $M_1 - M_{10}$  с применением резки «по замкнутому контуру», затем вырезаются внешние контура колец без выключения режущего инструмента с точкой врезки  $M_{11}$ , аналогично для второго блока круглых заготовок – на холостом ходе режущий инструмент подходит к точке врезки  $M_{12}$  и вырезаются контура с точками врезки  $M_{12} - M_{19}$ , после чего вырезаются внешние контура без выключения режущего инструмента с точкой врезки  $M_{20}$ . Следующие три группы заготовок с точками врезки  $M_{21} - M_{24}$  вырезаются без выключения режущего инструмента с помощью разработанного в Главе 2 способа резки. Оставшиеся контура можно вырезать либо с помощью резки «по замкнутому» контуру, либо можно применить другие макропрограммы, например, с реализацией совмещенного реза или «змейки». Тогда контура с точками врезки  $M_{25}$  и  $M_{26}$  вырезаются с помощью «змейки», оставшиеся внутренние контура с точками врезки  $M_{27} - M_{32}$  вырезаются «по замкнутому контуру», в свою очередь контура с

точками врезки  $M_{33}$  и  $M_{36}$  – с помощью совмещенного реза. Далее переходим к шагу 3.

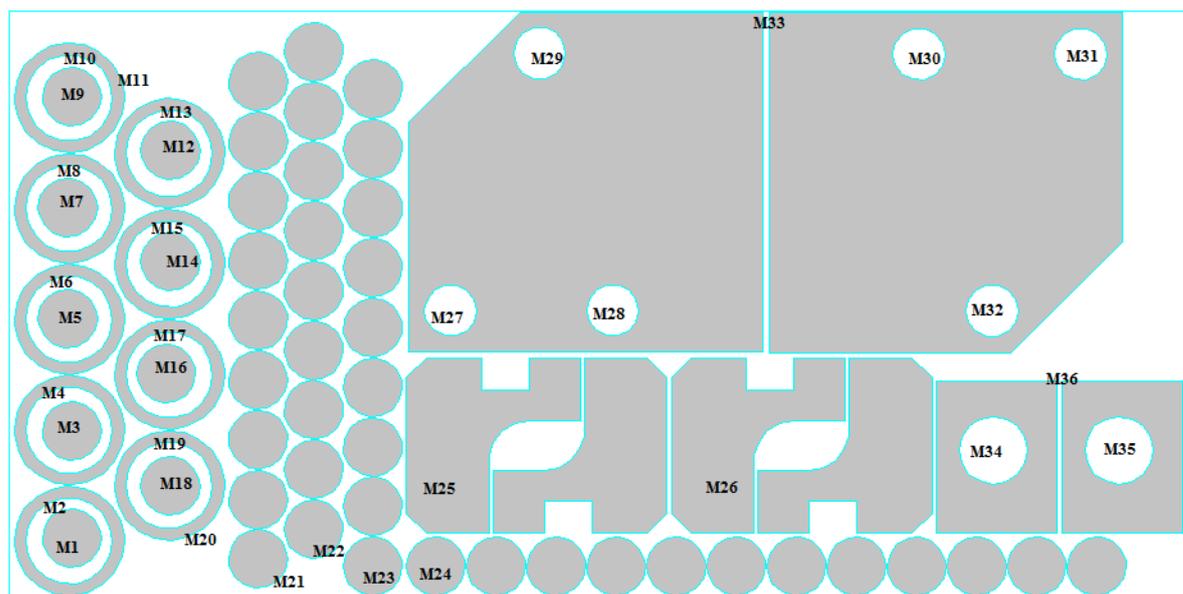


Рисунок 3.2 - Пример порядка резки заготовок при наличии отверстий и деталей внутри них

**Шаг 3.** Вычисляется ориентация блока и контуров относительно листа, исходя из полученных данных (горизонтальная/вертикальная, расположение рядом с краем листа или с «жесткой» частью листа). В зависимости от их ориентации направление резки и расположение точек врезки будут различны.

**Шаг 4.** На этом этапе выбираются точки врезки автоматически при выполнении условия «жесткости» заготовки и материала с целью сокращения температуры (в свою очередь будет снижаться неравномерность температурных полей) в процессе резки листового материала на машине термической резки с ЧПУ, что в свою очередь может привести к снижению термических деформаций в процессе резки. Основным правилом, которое легло в основу алгоритма выбора точек врезок с учетом сокращения термических деформаций, является правило «жесткости заготовки» [35]. Это правило заключается в следующем. При резке контура точка врезки выбирается таким образом, чтобы после врезки сначала вырезалась часть контура, которая граничит с вырезанной частью или с краем листа, а заканчивалась резка по участку контура, который граничит с

невыврезанной частью листа. На рисунке 3.3 приведен пример выбора точек врезки для круглых заготовок с учетом «жесткости заготовки».

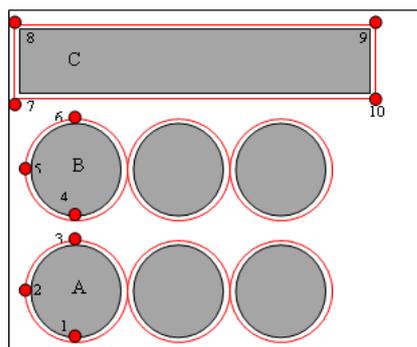


Рисунок 3.3 - Выбор точек врезки с учетом сокращения термических деформаций

На рисунке 3.3 круглые детали объединены в два блока *A* и *B*, пусть для каждого блока реализована резка специальным способом резки с одной точкой врезки. При этом пусть резка осуществляется слева направо, снизу вверх. Т.е. при вырезке блока *A*, который содержит три круглых контура, блок *B* и контур *C* еще не вырезаны. Рассмотрим три возможные точки врезки для блока *A*. Точки врезки 1 и 2 являются недопустимыми, т.к. завершение резки происходит по участкам контура, которые граничат с краем листа, заготовка будет получать максимально нагревание из-за малой площади остатка в области завершения резки, что в свою очередь может привести к короблению и искажению требуемых размеров заготовки. Точка 3 является допустимой, при этом резку лучше осуществлять против часовой стрелки. При выборе точек врезки для блока *B* точки 4 и 5 являются недопустимыми, т.к. завершение резки будет осуществляться по участкам, граничащим с вырезанной частью листа для точки 4 и краем листа для точки 5. Допустимой является точка 6, резка против часовой резки. Для контура *C* точки 7 и 8 – недопустимы, точка 9 допустима при обходе контура против часовой стрелки, точка 10 допустима при обходе контура по часовой стрелке. После автоматического выбора и расчета положения точек врезок переходим к шагу 5.

**Шаг 5.** На этом шаге в зависимости от ориентации блока и контуров относительно листа и от местоположения точек врезок назначается направление обхода вырезки контуров с соблюдением правил «жесткости заготовки» [35].

**Шаг 6.** Строится маршрут перемещения режущего инструмента для блока деталей за один базовый сегмент при выполнении технологических ограничений процесса термической резки с использованием специальной техники резки.

Алгоритм, приведенный на рисунке 3.1, реализован в виде специальных функций (макропрограмм) «АвтоКруг» и «МногоугР» в подсистеме формирования маршрута резки, расширяющие штатные возможности системы автоматизированного проектирования УП. В основу разработанных макропрограмм легли предложенные автором диссертационной работы специальные техники резки для типовых деталей, приведенные в Главе 2. Макропрограммы формирование маршрута резки написаны на специальном алгоритмическом языке С-- интерпретирующего типа в САПР «СИРИУС». При этом при формировании маршрута резки соблюдаются технологические ограничения процесса термической резки и уменьшаются значения основных параметров резки на машине с ЧПУ.

Отметим, что САПР «СИРИУС» (Система Интерактивного Раскроя И Управления Станками) – универсальная САПР, предназначенная для автоматизации раскройно-заготовительного производства в результате решения задач плоского раскроя-упаковки и проектирования УП при обработке листовых материалов на различном технологическом оборудовании с ЧПУ [33]. Для сформированной раскройной карты пользователь с помощью одной или нескольких макропрограмм проектирует маршрут перемещения режущего инструмента с учетом особенностей и ограничений процесса резки на оборудовании термической резки с ЧПУ, после чего формируется УП. Интерфейс подсистемы формирования маршрута резки в САПР «СИРИУС» с выбором необходимой макропрограммы в окне «Маршрут резки» приведен на рисунке 3.4.

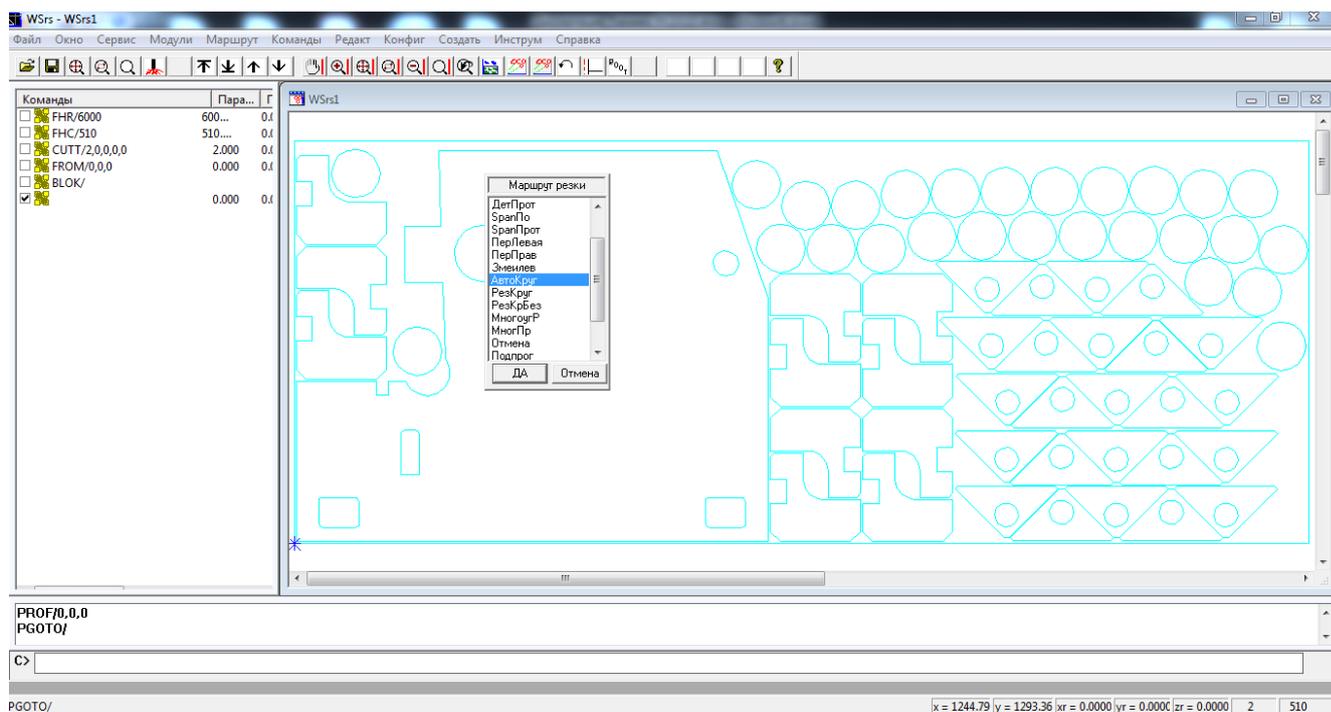


Рисунок 3.4 – Интерфейс подсистемы проектирования маршрута резки в САПР «СИРИУС» с выбором макропрограммы

На рисунке 3.5 приведен пример построения маршрута резки в САПР «СИРИУС». При этом для круглых заготовок маршрут резки строился в автоматическом режиме с помощью макропрограммы «АвтоКруг». На рисунке 3.5 заготовки, для которых построен маршрут резки с помощью этой макропрограммы, обозначены желтым цветом. Для этого было выделено 7 блоков круглых заготовок, для каждого вырезка наружных контуров реализована за один базовый сегмент резки с одной точкой врезки  $M_{11}$ ,  $M_{20}$ ,  $M_{31}$ ,  $M_{36}$ -  $M_{39}$ .

Следует отметить, что для кольцевых заготовок вырезка заготовок, которые расположены внутри колец (с точками врезки  $M_1$ ,  $M_3$ ,  $M_5$ ,  $M_7$ ,  $M_9$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{14}$ ,  $M_{16}$ ,  $M_{18}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{25}$ ,  $M_{27}$ ,  $M_{29}$ ), и внутренние контура колец ( $M_2$ ,  $M_4$ ,  $M_6$ ,  $M_8$ ,  $M_{10}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{15}$ ,  $M_{17}$ ,  $M_{19}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{24}$ ,  $M_{26}$ ,  $M_{28}$ ,  $M_{30}$ ) происходила по «замкнутому контуру» с выполнением условия предшествования. Для контуров, выделенных голубым цветом, с точками врезки  $M_{32}$  -  $M_{35}$  вырезка осуществлена специальным способом «змейкой», для зеленых контуров с точкой врезки  $M_{46}$  вырезка наружных контуров осуществлена с применением совмещенного реза, при этом внутренние контура с точками врезки  $M_{44}$  и  $M_{45}$  вырезаны «по замкнутому контуру». Для

серой заготовки с точкой врезки  $M_{43}$  вырезка наружного контура и внутренних контуров с точками врезки  $M_{40} - M_{42}$  осуществлена также «по замкнутому контуру».

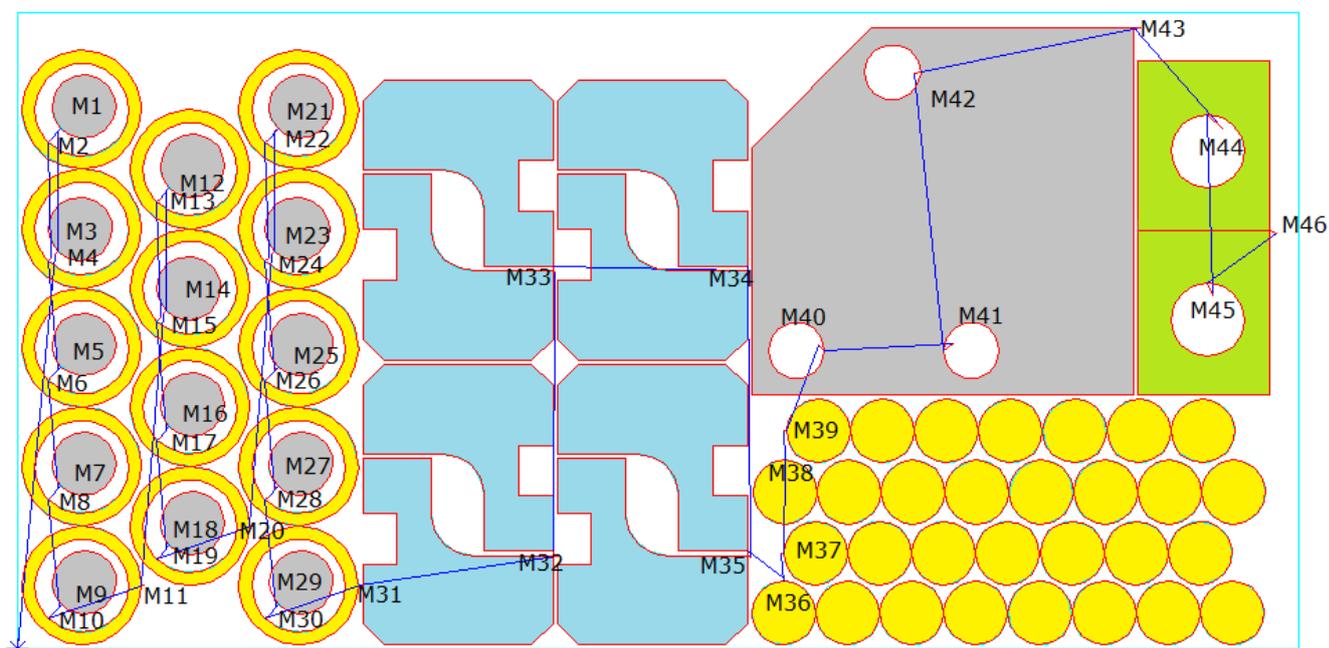


Рисунок 3.5 – Пример построения маршрута резки для раскройной карты с применением макропрограммы «АвтоКруг»

Таким образом, используя макропрограммы, которые позволяют строить маршрут перемещения режущего инструмента для определенных групп заготовок с применением специальных техник резки и с соблюдением технологических ограничений, можно улучшить существующие решения по получению оптимальных маршрутов резки для оборудования термической резки с ЧПУ. Полученные решения отвечают технологическим ограничениям и особенностям процесса термической резки, при этом позволяют снижать значения временных и стоимостных параметров процесса резки. После построения маршрута резки с применением специальных техник резки для определенных групп заготовок на следующем этапе можно производить оптимизацию маршрута резки. Приведенный алгоритм (рисунок 3.1) может быть применен для других специальных способов резки с учетом особенностей конкретного способа. В §3.3. будет приведен расчет температурных полей, возникающих в процессе термической резки на оборудовании лазерной резки с ЧПУ, для оценки

адекватности разработанных методов резки с точки зрения соблюдения технологических ограничений.

### **3.3. Расчет температурных полей в процессе термической резки заготовок**

В процессе термической резки заготовок из листового материала на машинах с ЧПУ возникают термические деформации, которые обусловлены неравномерностью температурных полей в процессе резки. При разработке алгоритмов для построения маршрута перемещения режущего инструмента имеет большое значение соблюдение необходимых технологических требований термической резки для получения деталей требуемых размеров и соответствующего качества. Известны эвристические подходы (правила) к сокращению тепловых деформаций в процессе термической резки, которые описаны, например, в [35]. Они были реализованы в подсистеме автоматизированного проектирования УП в САПР «СИРИУС» при формировании маршрута резки для описанной выше номенклатуры типовых заготовок.

С целью анализа целесообразности применения эмпирического правила «жесткости заготовки» с точки зрения сокращения термических деформаций при проектировании маршрута перемещения режущего инструмента был произведен расчет температурных полей в процессе лазерной резки заготовок по спроектированным УП. Для расчета была использована САЕ система «RAPID» [30]

Рассмотрим результаты расчета распределения тепловых полей в процессе термической резки круглых заготовок с применением специальных техник резки, описанных выше. На рисунке 3.6 приведена раскройная карта для вырезки 88 контуров, расположенных в 8 рядов. Для этой раскройной карты необходимо построить маршрут перемещения режущего инструмента при обработке требуемых контуров. На рисунке 3.6 показаны: порядок обхода контуров, расположение выбранных точек врезки для каждого блока контура, направление движения инструмента на холостом ходе. Направление обхода контуров для всех блоков – против часовой стрелки.

Расчет распределения тепловых полей производился для двух случаев:

1. При выборе точек врезки и направления обхода контуров соблюдается правило «жесткости заготовки» (рисунок 3.6, блок с точкой врезки 1);
2. При выборе точек врезки и направления обхода контуров *не* соблюдается правило «жесткости заготовки» (рисунок 3.6, блок с точками врезки 2-8);

При этом для каждого ряда реализована резка с одной точкой врезки, переход от одного ряда к другому осуществляется на холостом ходе.

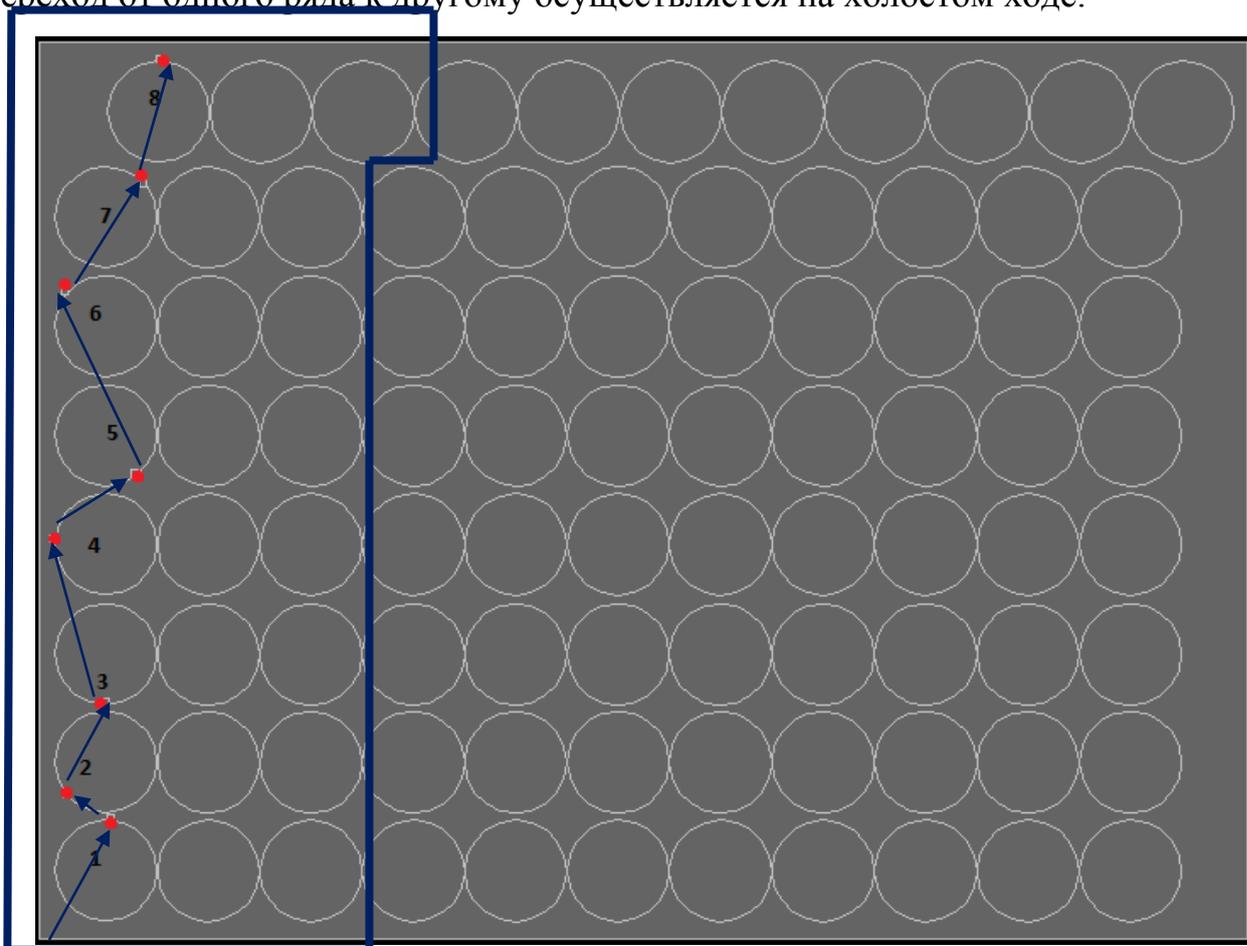


Рисунок 3.6 - Схема маршрута перемещения режущего инструмента

В [110] приводятся результаты проведенных расчетов. Расчет производился на примере лазерной резки листового материала АМгЗМ  $\Delta=1, 3$  и  $5$  мм.

Для расчета температурных полей в процессе лазерной резки в САЕ «RAPID» задаем контуры и последовательность их резки, выбираем точки врезки, направление обхода контуров. Выбираем толщину и марку обрабатываемого материала. Для расчета температурных полей необходимо задать  $V_{on}$ ,  $V_{off}$  и мощность  $P$ . В таблице 3.1 записаны значения основных параметров, влияющих

на расчет температурных полей в процессе резки на 3кВт CO<sub>2</sub> лазерном комплексе.

Для расчета тепловых полей в САЕ «RAPID» используем раскройную карту, приведенную на рисунке 3.6, расположение точек врезки, направление обхода контуров и последовательность резки задаются так, как описано выше. Для выбранного материала и его толщины задаем значение основных параметров согласно таблице 3.1. В САЕ «RAPID» были рассчитаны температурные поля при последовательной резке контуров. После проведенных расчетов система позволяет просматривать изменение температурных полей в процессе резки.

Таблица 3.1 - Значение основных параметров, влияющих на расчет тепловых полей

| Марка и толщина | $V_{on}$ , мм/с | $V_{off}$ , мм/с | Р, Вт |
|-----------------|-----------------|------------------|-------|
| АМГ3М, Δ=1 мм   | 100             | 830              | 2100  |
| АМГ3М, Δ=3 мм   | 32              |                  | 2500  |
| АМГ3М, Δ=5 мм   | 17              |                  | 2900  |

Ниже показаны результаты расчета температурных полей в области завершения резки контуров, отличающихся только выбором точки врезки согласно рисунку 3.6 для АМГ3М, Δ=5 мм. На рисунке 3.7 приведен результат расчета температурных полей в области точки врезки и в процессе резки трех первых заготовок в блоке. При этом маршрут и направление резки, выбор точки врезки для первого блока спроектированы автоматически с помощью разработанной макропрограммы для круглых заготовок при выполнении технологических ограничений термической резки. При этом точка врезки выбрана согласно условию «жесткости», т.е. резка заканчивается вблизи не вырезанной части листа. Как показал расчет, средняя температура в выделенном окне вокруг области завершения резки первого блока составила  $T_{cp} = 443,27^{\circ}C$ .

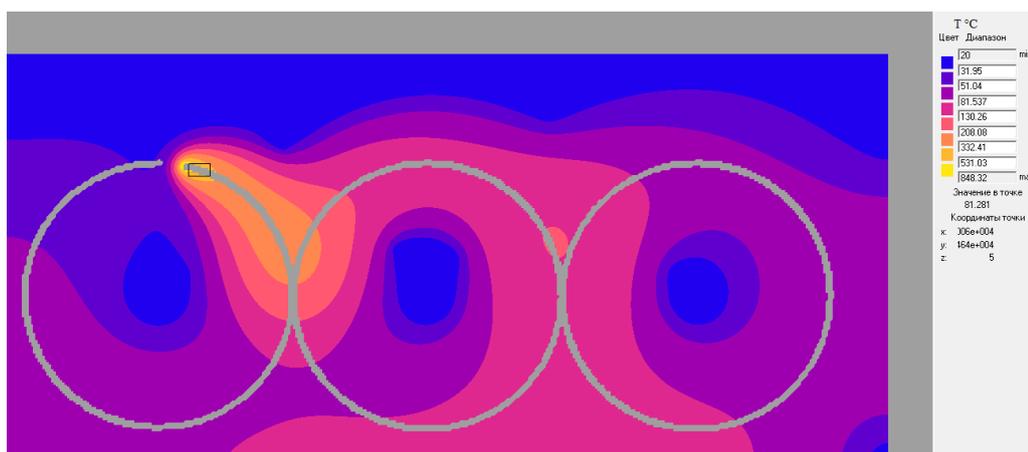


Рисунок 3.7 - Температурное поле в процессе резки первого блока с соблюдением правила «жесткости заготовки» для АМгЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.8 показано распределение температуры в процессе резки второго блока, при выборе точки врезки условие «жесткости заготовки», как было сказано выше, *не выполняется* и резка заканчивается вблизи края листа. Средняя температура в области завершения резки второго блока составила  $T_{cp} = 510,23^{\circ}\text{C}$ , что на 13% выше по сравнению с температурой в этой же области для первого блока.

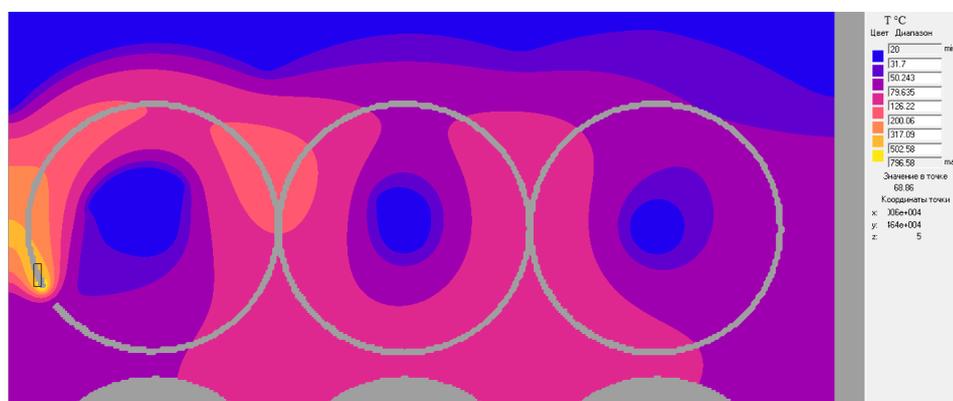


Рисунок 3.8 - Температурное поле в процессе резки второго блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМгЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.9 показано распределение температуры в процессе резки третьего блока, при этом завершение резки осуществляется вблизи вырезанной части листа и технологические ограничения термической резки *не выполняются*.

Средняя температура в области завершения резки третьего блока составила  $T_{cp} = 555.14^{\circ}\text{C}$ , что на 20% выше  $T_{cp}$  для первого блока.

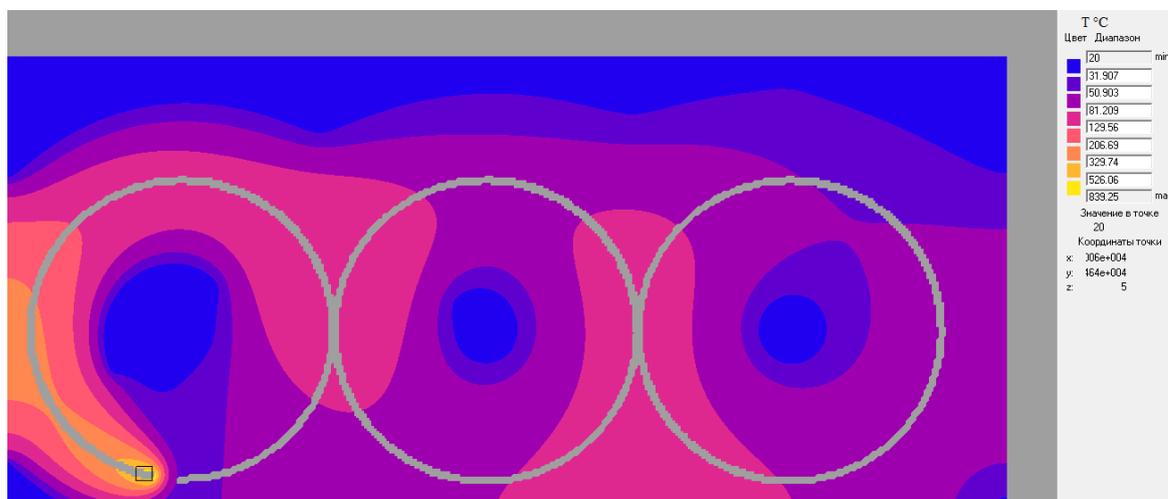


Рисунок 3.9 - Температурное поле в процессе резки третьего блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМгЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.10 показано распределение температуры в процессе резки четвертого блока, при этом при выборе точки врезки условие «жесткости заготовки» *не выполняется*, резка завершается в области, граничащей с краем листа. Средняя температура в области завершения резки четвертого блока составила  $T_{cp} = 535,9^{\circ}\text{C}$ , что на 17% выше по сравнению со значением температуры в этой же области для первого блока.

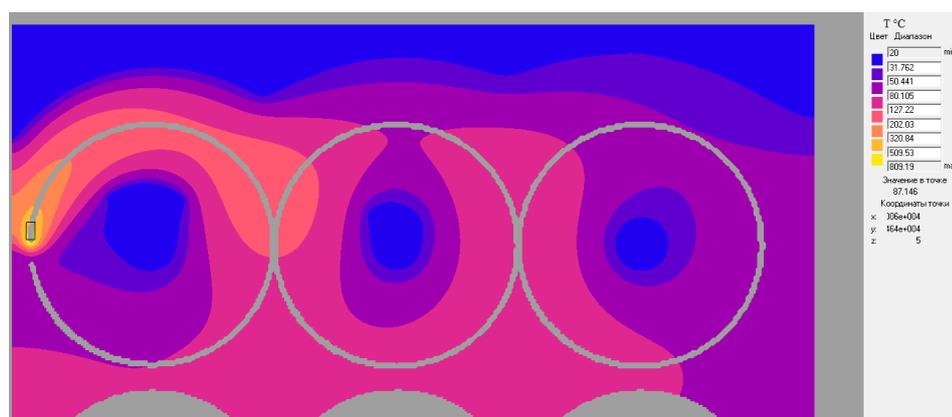


Рисунок 3.10 - Температурное поле в процессе резки четвертого блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМгЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.11 показано распределение температуры в процессе резки пятого блока, при этом при выборе точки врезки условие «жесткости заготовки» *не выполняется*, т.к. резка заготовок завершится вблизи вырезанной части листа. Средняя температура в области завершения резки пятого блока составила  $T_{cp} = 521,27^{\circ}\text{C}$ .

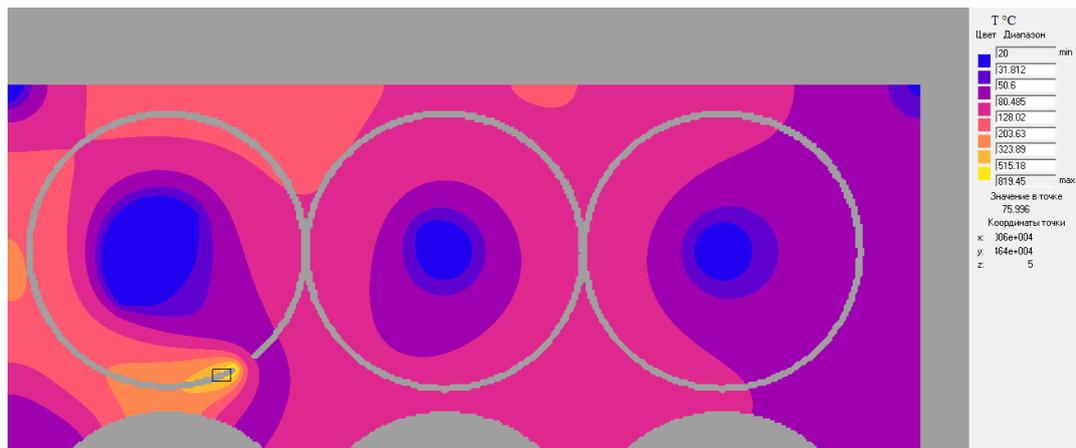


Рисунок 3.11 - Температурное поле в процессе резки пятого блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМГЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.12 показано распределение температуры в процессе резки шестого блока. При выборе точки врезки и направлении движения инструмента против часовой стрелки условие «жесткости заготовки» *не выполняется*. Средняя температура в области завершения резки шестого блока составила  $T_{cp} = 544.88^{\circ}\text{C}$ .

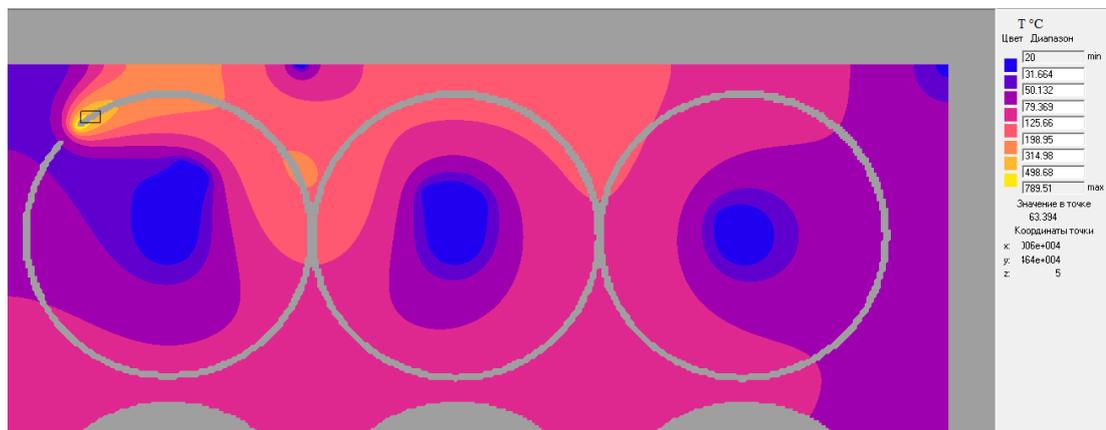


Рисунок 3.12 - Температурное поле в процессе резки шестого блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМГЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.13 показано распределение температуры в процессе резки седьмого блока, при этом при выборе точки врезки условие «жесткости заготовки» *не выполняется*. Средняя температура в области завершения резки седьмого блока составила  $T_{cp} = 533.71^{\circ}\text{C}$ .

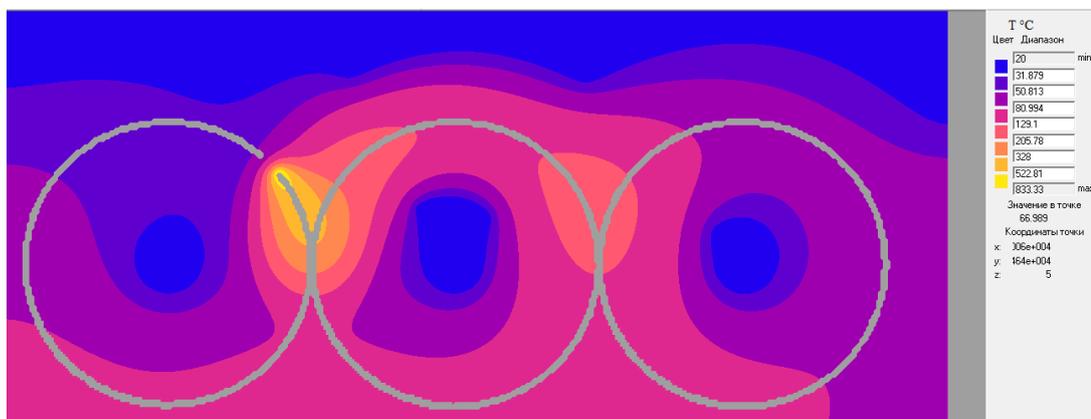


Рисунок 3.13 - Температурное поле в процессе резки седьмого блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМГЗм  $\Delta=5$  мм

На рисунке 3.14 показано распределение температуры в процессе резки восьмого блока, при этом резка завершается вблизи края листа, что не соответствует выполнению условию «жесткости заготовки». Средняя температура в области завершения резки восьмого блока составила  $T_{cp} = 557.01^{\circ}\text{C}$

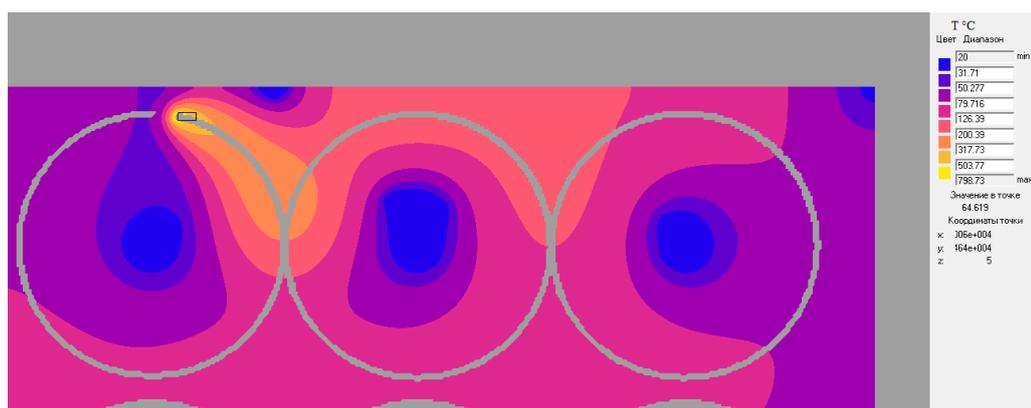


Рисунок 3.14 - Температурное поле в процессе резки восьмого блока без соблюдения правила «жесткости заготовки» для АМГЗм  $\Delta=5$  мм

Аналогично с помощью САЕ «RAPID» был произведен расчет температурных полей в процессе резки той же самой раскройной карты (рисунок

3.6) для листового материала АМгЗМ  $\Delta=1$  и 3 мм. Полученные значения средней температуры в области завершения резки каждого блока с выбранной точкой врезки и направлением обхода сведены в таблице 3.2, в которой приняты следующие обозначения:  $T_{cp}^1 - T_{cp}^8$  – значения средней температуры в процессе лазерной резки в области завершения резки 1-8 блоков.

Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты показывают, что соблюдение правила «жесткости заготовки» при проектировании маршрута резки с помощью разработанной макропрограммы для круглых заготовок позволяет сокращать температуру в зоне окончания резки до 20%. При этом подтверждается целесообразность применения геометрических правил выбора точек врезки и направления обхода контуров для построения маршрута резки с целью снижения неравномерности температурных полей в материале в процессе термической резки.

Таблица 3.2 - Значение средней температуры в процессе лазерной резки заготовок

| Материал                | $T_{cp}^1, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^2, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^3, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^4, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^5, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^6, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^7, ^\circ\text{C}$ | $T_{cp}^8, ^\circ\text{C}$ |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| АМгЗМ,<br>$\Delta=1$ мм | 588,38                     | 690,75                     | 719,38                     | 754,47                     | 724,36                     | 707,31                     | 723,05                     | 734,85                     |
| АМгЗМ,<br>$\Delta=3$ мм | 541,44                     | 642,14                     | 657,75                     | 643,29                     | 623,46                     | 677,02                     | 646,06                     | 671,43                     |
| АМгЗМ,<br>$\Delta=5$ мм | 443,27                     | 510,23                     | 555,14                     | 535,91                     | 521,27                     | 544,88                     | 533,71                     | 557,01                     |

Таким образом, разработанный алгоритм для построения маршрута резки заготовок в системах автоматизированного проектирования УП и его программная реализация для некоторых номенклатур типовых заготовок позволяют строить маршрут резки с соблюдением технологических ограничений процесса термической резки при одновременном уменьшении значений основных показателей параметров резки.

### **3.4. Модуль для расчета стоимости резки листового материала на оборудовании с ЧПУ и интеграция с универсальной САПР. Особенности и назначение**

Как было отмечено в Главе 1, обычно системы автоматизированного проектирования УП имеют модульную структуру, при этом каждый модуль позволяет автоматизировать некоторый этап. Результаты диссертационного исследования и анализ актуальных задач, возникающих при проектировании УП для оборудования листовой резки с ЧПУ, позволяют сделать вывод о необходимости наличия модуля в САПР технологической подготовки производства для расчета стоимости процесса термической резки листового материала на оборудовании с ЧПУ по причине отсутствия в настоящее время соответствующего аппарата. В основу модуля должна быть заложена методика вычисления стоимостных параметров, которая позволит учесть эксплуатационные расходы процесса резки и технологические характеристики используемого оборудования с ЧПУ. Рассмотрим основные требования к модулю для расчета стоимости резки:

- Универсальность (широкий охват типов применяемых технологий резки и технологического оборудования термической резки с ЧПУ для резки листового материала, возможность расширения используемых технологий и оборудования с ЧПУ);
- Расчет стоимости резки необходимо выполнять по методике, учитывающей эксплуатационные расходы процесса резки, а также технологические характеристики оборудования с ЧПУ;
- Учет зависимости рабочей скорости резки от количества кадров УП для точной оценки стоимости резки;
- Возможность расчета стоимости резки на основании автоматически импортированных данных из разработанной УП;

- Обеспечение возможности обновления и создания новых таблиц данных стоимостных параметров для расчета стоимости процесса резки;
- Интеграция с САПР технологической подготовкой производства;
- В модуле должен быть удобный графический интерфейс для работы пользователей и представления результатов расчета.

### **3.4.1. Выбор программной платформы и разработка алгоритма для расчета стоимости процесса резки на оборудовании с ЧПУ**

Для расширения функциональных возможностей систем автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ разработанная в Главе 2 методика была реализована в виде модуля «Расчет стоимости резки» для расчета стоимости процесса лазерной резки. Разработанный модуль может быть применен и для других технологий листовых резок (в частности для машин плазменной, кислородной, гидроабразивной резки) при условии корректировки методики расчета стоимости листовой резки, приведенной в Главе 2, с учетом особенностей конкретной технологии резки.

Используя платформу .Net Framework разработан модуль для расчета стоимости процесса резки листового материала на оборудовании с ЧПУ с пользовательским интерфейсом, для которого на рисунке 3.15 предложен алгоритм, который является общим для любого типа используемой технологии резки и используемого оборудования с ЧПУ. Алгоритм заключается в следующем.

**Шаг 1.** На первом этапе получаем значения основных параметров резки от пользователя, либо автоматически импортируем данные из разработанной УП;

**Шаг 2.** На следующем этапе необходимо выбрать тип резки, материал и толщину обрабатываемого материала;

**Шаг 3.** Для выбранных параметров загружаем данные в XML-документе, который содержат информацию о значении стоимостных параметров ( $C_{on}$ ,  $C_{off}$  и  $C_{pt}$ ). В случае отсутствия значений этих параметров для конкретного

оборудования или марки материала ее можно сформировать, используя дополнительный модуль «Расчет стоимостных параметров для лазерной резки»;

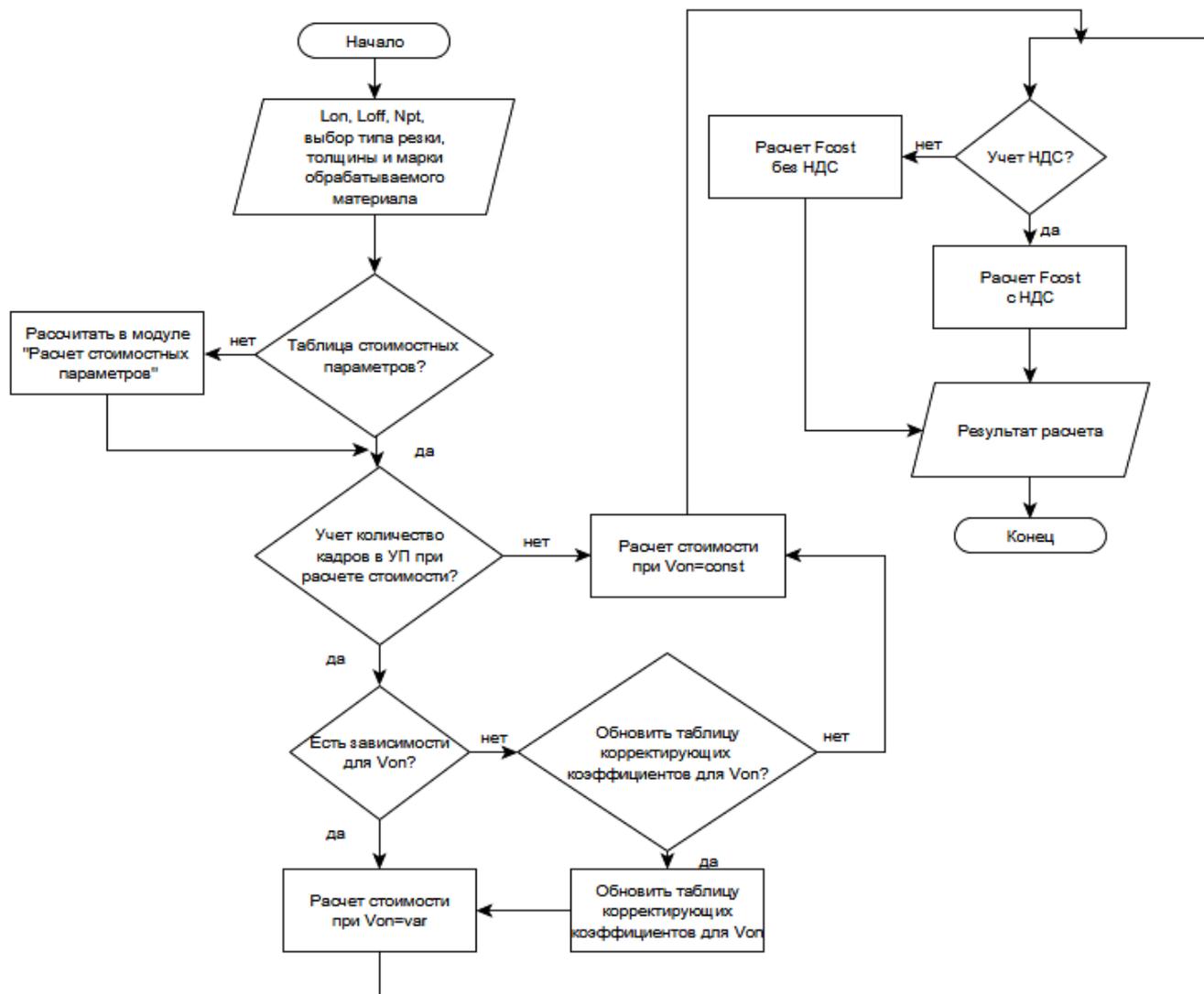


Рисунок 3.15 - Алгоритм модуля для расчета стоимости листовой резки на оборудовании с ЧПУ

**Шаг 4.** Выбор варианта расчета стоимости резки при учете количества кадров УП или без учета;

**Шаг 5.** В случае расчета при учете количества кадров УП происходит проверка на наличие функциональных зависимостей  $V_{on} = f(n)$ , полученных в Главе 2, для выбранного материала и толщины. При их наличии – происходит перерасчет рабочей скорости режущего инструмента  $V_{on}$  и последующий расчет стоимости резки, при отсутствии – предложение на обновление таблиц данных. При положительном решении и обновлении таблиц будет произведен перерасчет

$V_{on}$  и последующий расчет стоимости резки. При отрицательном решении – происходит расчет стоимости резки при условии, что  $V_{on} = const$ ;

**Шаг 6.** На последнем этапе происходит окончательный расчет  $F_{cost}$  по методике, которая позволяет учитывать эксплуатационные расходы процесса резки;

**Шаг 7.** Также в разработанном модуле есть возможность сравнения результатов расчета при разных условиях и выбор минимального значения.

На основании разработанной в Главе 2 методики для точного расчета стоимости раскроя листового материала для любого оборудования лазерной резки с ЧПУ вышеописанный алгоритм был реализован в виде модуля «Расчет стоимости резки» (интерфейс приведен на рисунке 3.16).

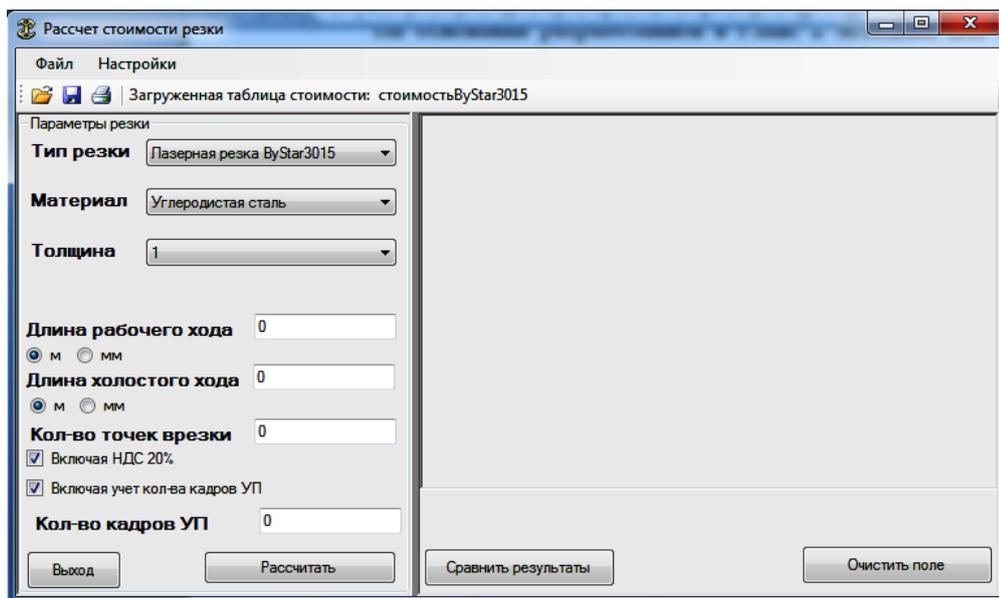


Рисунок 3.16 – Интерфейс модуля для расчета стоимости процесса лазерной резки на оборудовании с ЧПУ

Для расчета основных стоимостных параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$ ,  $C_{pt}$  был разработан дополнительный модуль «Расчет стоимостных параметров для лазерной резки», который запускается из выпадающего меню (рисунок 3.17). Рассчитанные значения параметров  $C_{on}$ ,  $C_{off}$ ,  $C_{pt}$  сводятся в XML-документе, который затем используется для последующего расчета стоимости резки в модуле «Расчет стоимости резки».

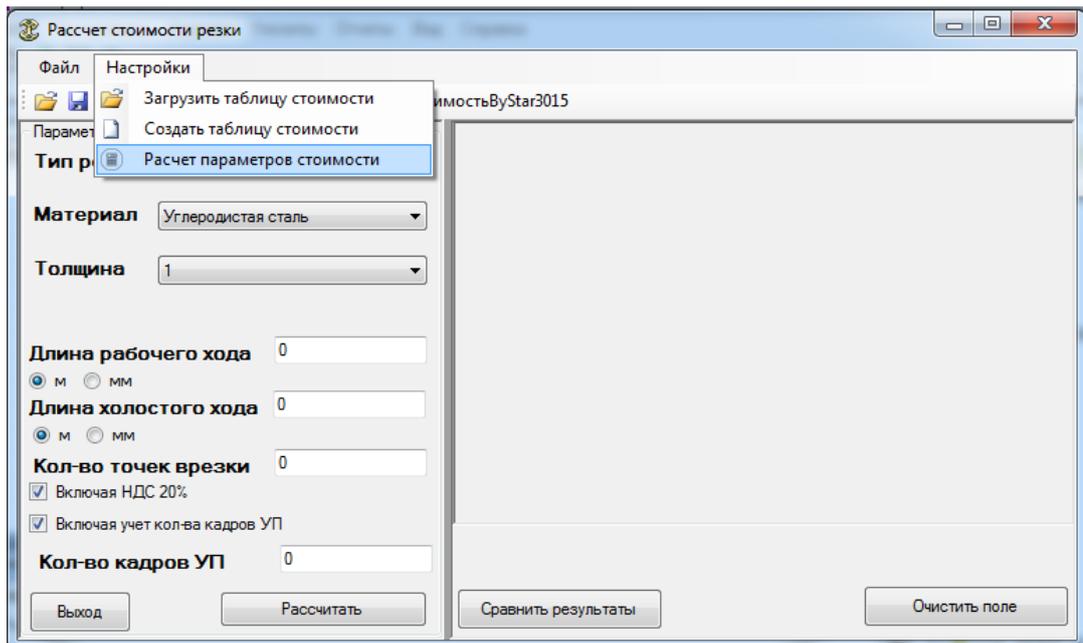


Рисунок 3.17 – Интерфейс модуля для расчета стоимости процесса лазерной резки на оборудовании с ЧПУ и запуск модуля «Расчет стоимостных параметров для лазерной резки»

Интерфейс дополнительного модуля приведен на рисунке 3.18.

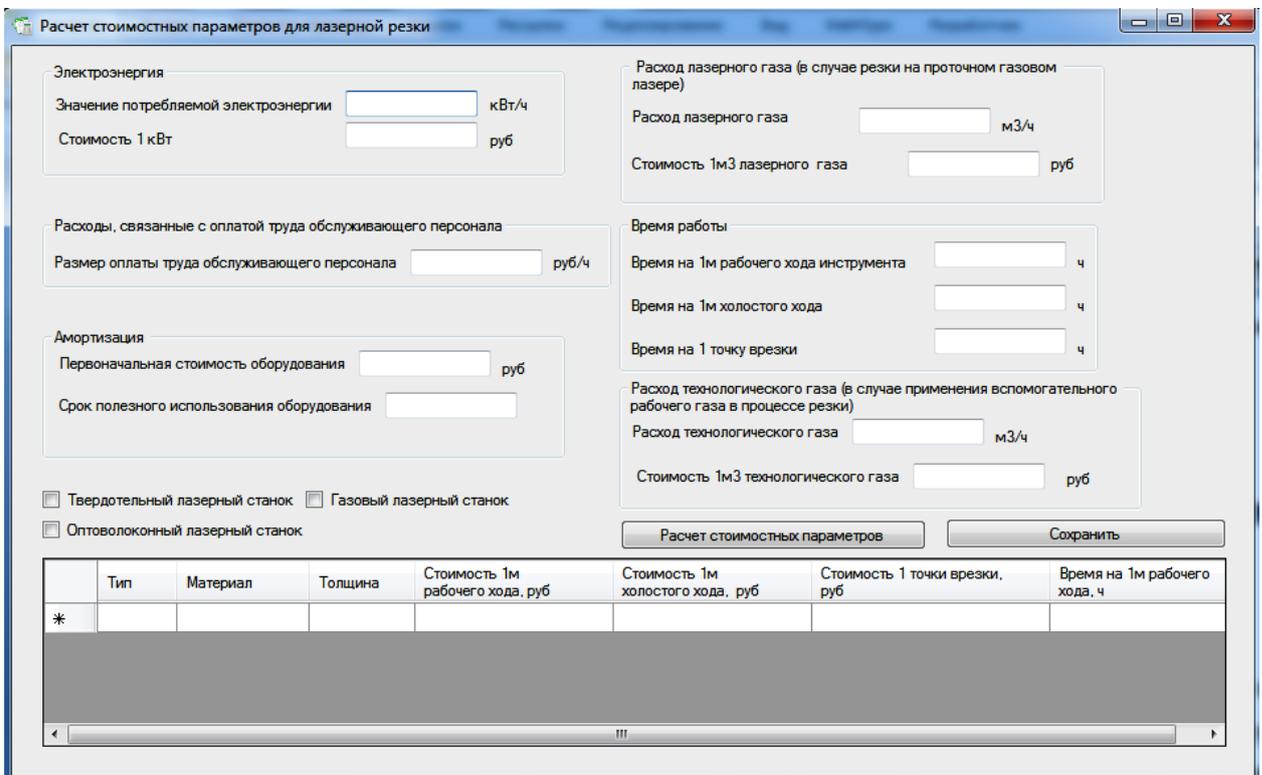


Рисунок 3.18 – Интерфейс модуля для расчета основных стоимостных параметров процесса лазерной резки на оборудовании с ЧПУ

Алгоритм, рассмотренный выше, и методика точного расчета стоимости процесса резки, реализованные в виде отдельного модуля, имеют теоретический интерес и могут быть использованы для решения практических задач. Модуль «Расчет стоимости резки» интегрирован в САПР «СИРИУС» и позволяет расширять функциональные возможности системы для расчета стоимости резки реальных производственных процессов, учитывая при этом влияние на значение стоимости эксплуатационных затрат, основных показателей резки и технологических характеристик оборудования с ЧПУ. Разработанный модуль может быть расширен для другого типа используемого оборудования с ЧПУ и других технологий резки.

### **3.5. Выводы по Главе 3**

1. Сформулированы требования к функциям подсистемы автоматизированного проектирования маршрута резки при подготовке УП в универсальной САПР;
2. Выполнена программная реализация разработанных методик резки для некоторых номенклатур типовых деталей в виде специальных функций в САПР «СИРИУС» для автоматизации процесса формирования маршрута резки с соблюдением технологических ограничений процесса термической резки при одновременном уменьшении значений основных параметров резки по сравнению с резкой «по замкнутому контуру»;
3. Обоснована необходимость разработки модуля для расчета стоимости процесса резки и сформулированы основные требования, предъявляемые к нему. Выполнена программная реализация модуля с использованием методики, разработанной в Главе 2, для случая расчета стоимости лазерной резки на оборудовании с ЧПУ с использованием технологии .NET. Framework. Разработанный модуль интегрирован в САПР «СИРИУС».

## ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ НА ПРАКТИКЕ

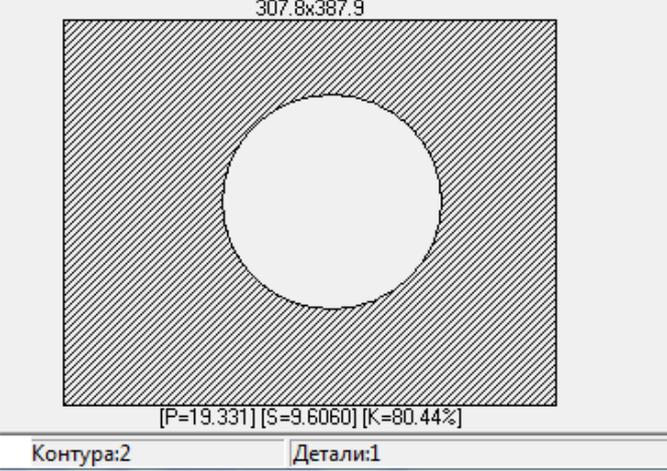
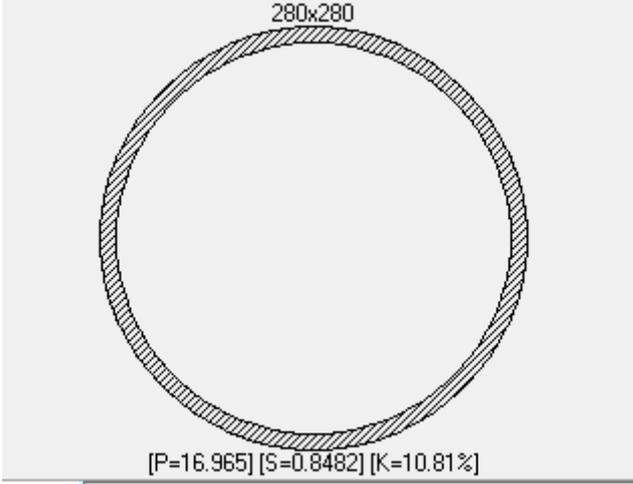
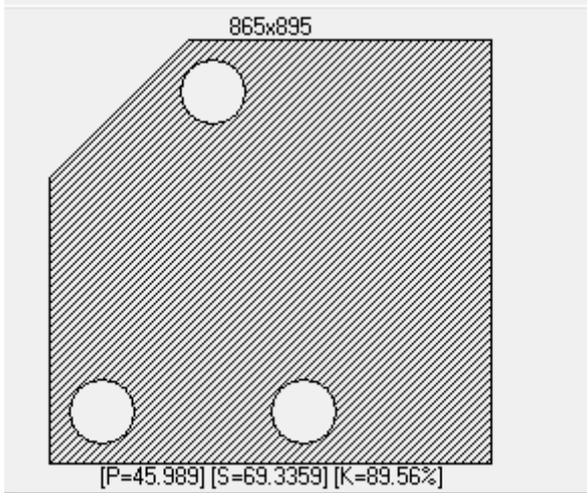
В данной главе приведены примеры практического применения разработанных методик и алгоритмов при проектировании УП в САПР «СИРИУС». Приводится расчет экономической эффективности разработанных проектных решений для оборудования лазерной резки с ЧПУ по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». Для оценки использовался разработанный модуль «Расчет стоимости резки». Документы о внедрении результатов диссертационного исследования приведены в Приложении А.

### 4.1 Пример проектирования управляющей программы в САПР «СИРИУС»

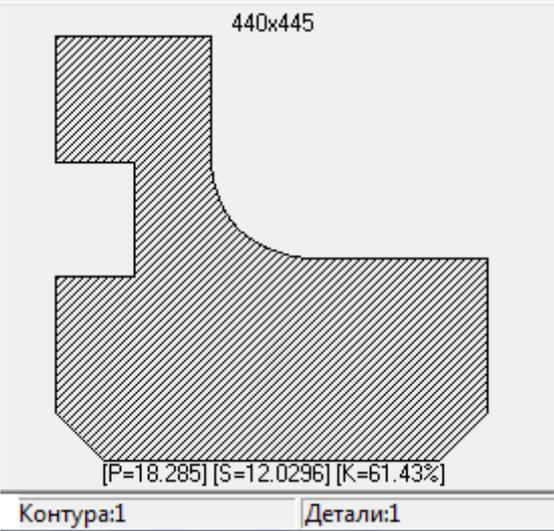
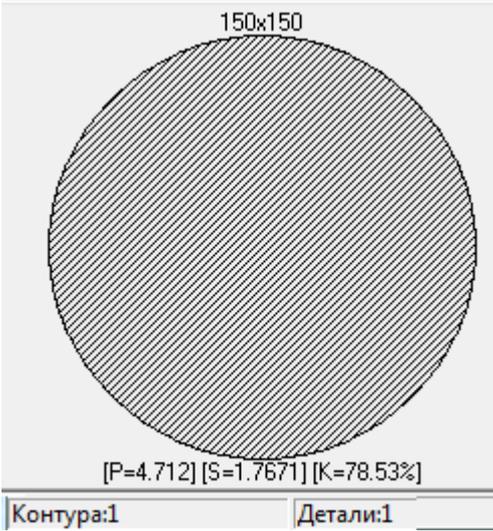
Рассмотрим типичный для машиностроительной области пример автоматизированного проектирования УП в САПР «СИРИУС» при выполнении условий технологичности и одновременном снижении стоимости процесса резки, расхода газа, электроэнергии, расходных материалов и увеличении срока службы технологического оборудования с использованием разработанных в диссертационной работе методик и программных средств.

Условия задачи можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется набор геометрических объектов, представляющих собой области, ограниченными одной или несколькими замкнутыми кривыми, т.н. граничные контура. Данные объекты являются моделями плоских деталей, примеры которых приведены в таблице 4.1. Выделенные детали вырезаются из листового материала определенной марки и толщины. Необходимо спроектировать УП для вырезки всех деталей из листового материала определенного размера (при этом, не превышая значений габаритных размеров рабочего стола для раскройного комплекса), уменьшая значения основных параметров  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$ ,  $L_{off}$  при одновременном уменьшении значений параметров  $F_{cost}$  и  $T_{cut}$  с одновременным соблюдением технологических ограничений процесса термической резки.

Таблица 4.1 - Пример плоских деталей

| Название детали | Геометрия плоских деталей и их параметры   |
|-----------------|--|
| К1              |  <p>307.8x387.9</p> <p>[P=19.331] [S=9.6060] [K=80.44%]</p> <p>Контура:2      Детали:1</p> |
| К2              |  <p>280x280</p> <p>[P=16.965] [S=0.8482] [K=10.81%]</p> <p>Контура:2      Детали:1</p>    |
| К3              |  <p>865x895</p> <p>[P=45.989] [S=69.3359] [K=89.56%]</p> <p>Контура:4      Детали:1</p>  |

Продолжение таблицы 4.1

|    |  |
|----|--|
| К4 |  <p>440x445</p> <p>[P=18.285] [S=12.0296] [K=61.43%]</p> <p>Контур:1      Детали:1</p> |
| К5 |  <p>150x150</p> <p>[P=4.712] [S=1.7671] [K=78.53%]</p> <p>Контур:1      Детали:1</p>  |

Общее требуемое количество деталей  $N$  в плане, количество внутренних контуров  $n$  для каждой детали приведены в таблице 4.2. Разработка УП была выполнена с помощью САПР «СИРИУС» для оборудования лазерной резки с ЧПУ и состоит из нескольких этапов.

На первом этапе при проектировании УП для машины лазерной резки с ЧПУ необходимо разработать геометрические объекты, например, с помощью подсистемы описания геометрии в САПР «СИРИУС» (таблица 4.1). При этом геометрия 2D объектов кодируется во внутреннем формате системы (dbs), который хранит геометрические и технологические данные.

Таблица 4.2 - Основные параметры выделенных деталей

| Деталь | Периметр, м | Площадь, м <sup>2</sup> | N  | n | Общий периметр, м |
|--------|-------------|-------------------------|----|---|-------------------|
| K1     | 1,933       | 0,0961                  | 1  | 1 | 1,933             |
| K2     | 1,697       | 0,0085                  | 18 | 1 | 30,546            |
| K3     | 4,599       | 0,6934                  | 2  | 3 | 9,198             |
| K4     | 1,829       | 0,1203                  | 4  | 0 | 7,316             |
| K5     | 0,471       | 0,0177                  | 38 | 0 | 17,898            |

На втором этапе формируем задание на раскрой с использованием баз данных заготовок и материалов (рисунок 4.1). При этом задаем требуемое количество для каждой детали и выбираем заготовку определенного размера. В рассматриваемом примере выбран листовая материал с габаритными размерами 3000x1500 мм и толщиной  $\Delta=5$  мм.

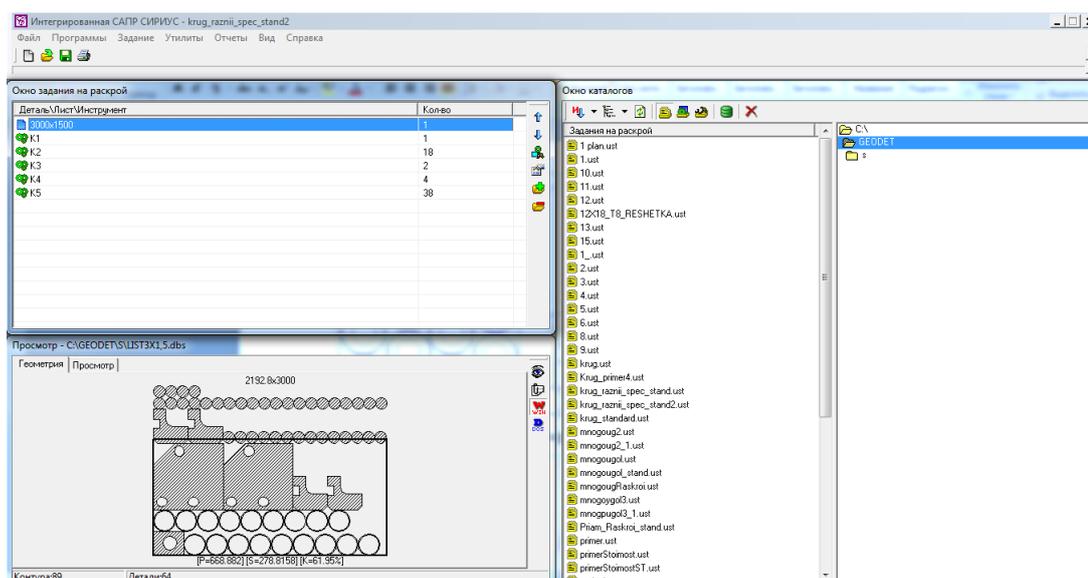


Рисунок 4.1 - Пример задания на раскрой для выбранных деталей

На следующем этапе получаем раскройные карты либо с помощью модуля автоматического, либо интерактивного раскроя (рисунок 4.2). При этом выполняются условия взаимного не пересечения объектов и другие дополнительные условия, обусловленные технологическими требованиями резки деталей на конкретном оборудовании, например, учет ширины реза. После чего переходим к проектированию маршрута режущего инструмента для раскройной карты с помощью подсистемы автоматизированного проектирования УП.

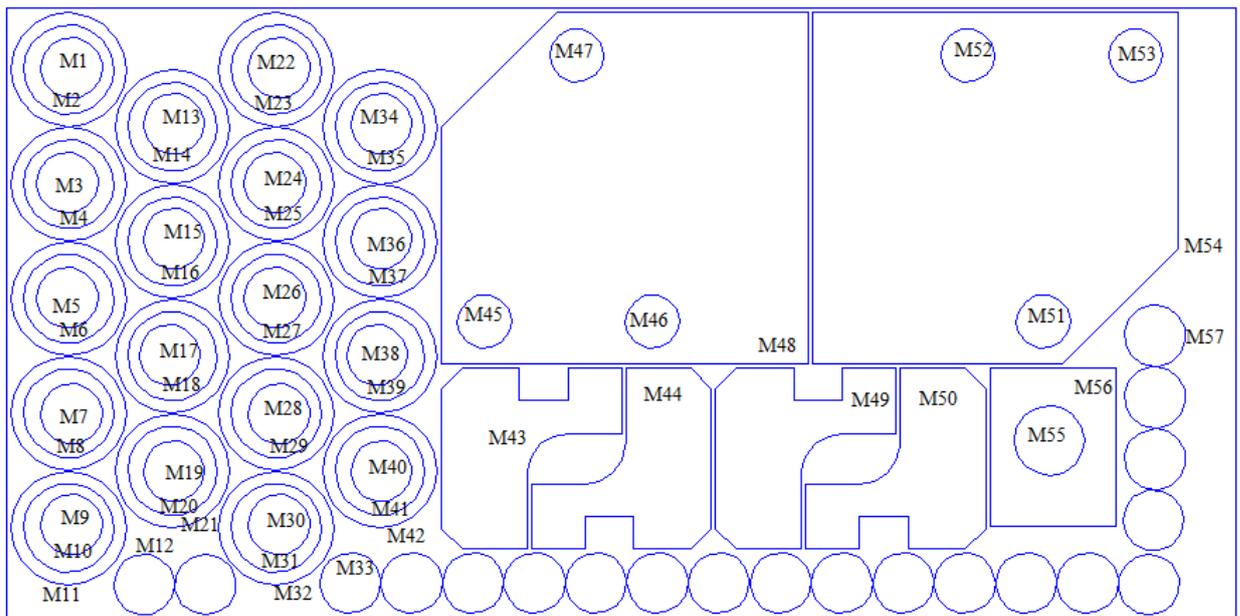


Рисунок 4.2 - Пример раскройной карты для приведенного задания на раскрой в случае применения специальной техники резки

В рассматриваемом примере маршрут режущего инструмента построен с применением специальных функций, реализованных в САПР «СИРИУС», предназначенных для построения маршрута резки нескольких контуров без выключения режущего инструмента при выполнении условий технологичности и снижении термических деформаций, возникающих в процессе резки. Для оценки эффективности реализованных специальных способов резки по сравнению со стандартной функцией построения маршрута перемещения режущего инструмента (резка «по замкнутому контуру») для той же раскройной карты был построен маршрут перемещения режущего инструмента с применением резки «по замкнутому контуру» (рисунок 4.3).



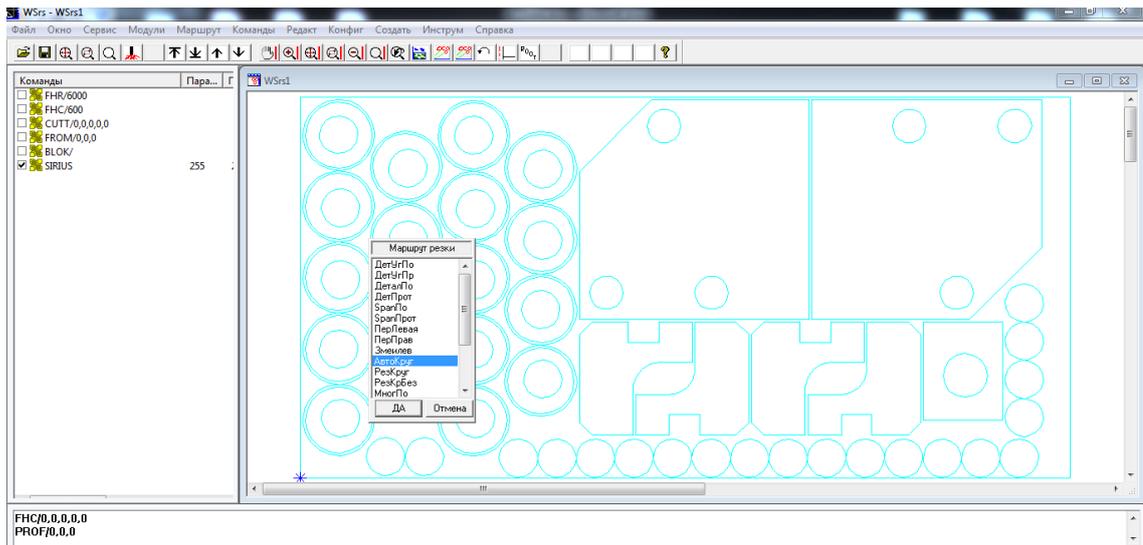


Рисунок 4.4 - Интерфейс подсистемы для проектирования маршрута перемещения режущего инструмента

Пример маршрута режущего инструмента, построенного с применением специальных функций для круглых заготовок, приведен на рисунке 4.5. На следующем этапе с помощью постпроцессора преобразуем информацию об УП в формат команд системы ЧПУ (в виде G- и M-кодов) для конкретного оборудования с ЧПУ.

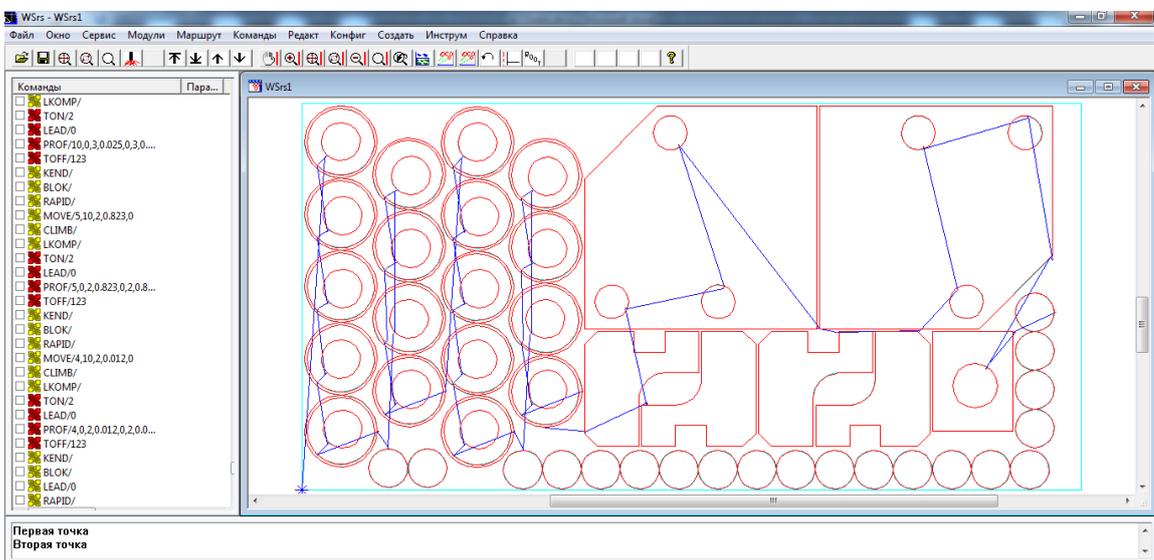


Рисунок 4.5 - Пример маршрута перемещения режущего инструмента, построенного с помощью специальной функции

В результате применения специальной техники резки для круглых заготовок (рисунок 4.5) уменьшаются значения основных параметров резки по сравнению с

резкой «по замкнутому контуру» (рисунок 4.3) при одновременном уменьшении стоимости и с соблюдением необходимых технологических требований термической резки. В таблице 4.3 приведены значения параметров резки  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$  и  $L_{off}$  для примера с реализацией резки «по замкнутому контуру» и с реализацией специальной техники резки круглых заготовок.

Таблица 4.3 - Значения основных параметров резки

|                               | $N_{pt}$ | %  | $L_{on}, \text{м}$ | $L_{off}, \text{м}$ | %  |
|-------------------------------|----------|----|--------------------|---------------------|----|
| Специальный способ резки      | 57       | 36 | 68,12              | 15,34               | 23 |
| Резка «по замкнутому контуру» | 89       |    | 68,27              | 19,98               |    |

Как видно из таблицы 4.3 за счет применения специальных функций в подсистеме автоматизированного проектирования маршрута резки при подготовке УП, с помощью которых можно спроектировать резку нескольких деталей без выключения режущего инструмента, число точек врезки сократилось на 36%, что в конечном итоге должно привести к сокращению стоимости процесса резки. При этом следует отметить, что проектирование маршрута перемещения режущего инструмента в подсистеме автоматизированного проектирования маршрута резки в САПР «СИРИУС» осуществлялось при выполнении условий технологичности термической резки.

Реальную стоимость резки  $F_{cost}$  для разработанной УП можно оценить с помощью модуля «Расчет стоимости резки», алгоритм и программная реализация которого описаны в Главе 3. Расчет был произведен для АМгЗМ  $\Delta=5$  мм при резке на машине  $\text{CO}_2$  лазерной резки с ЧПУ. Расчет стоимости резки может производиться с учетом и без учета НДС. В разработанном модуле есть возможность расчета  $F_{cost}$  с учетом  $V_{on} = \text{var}$  и  $V_{on} = \text{const}$ .

Для вычисления стоимости резки  $F_{cost}$  необходимо либо рассчитать значения основных стоимостных параметров резки  $C_{on}, C_{off}, C_{pt}$  и создать новую таблицу данных, либо загрузить существующую с соответствующими значениями. В рассматриваемом примере был произведен расчет значений параметров  $C_{on}, C_{off}, C_{pt}$  в модуле «Расчет стоимостных параметров для лазерной резки», интерфейс которого приведен на рисунке 4.6. При этом значения основных стоимостных параметров могут быть рассчитаны для любых твердотельных, газовых и оптоволоконных станков лазерной листовой резки с ЧПУ, значения которых сводятся в XML-документе.

Расчет стоимостных параметров для лазерной резки

Электроэнергия  
 Значение потребляемой электроэнергии 48 кВт/ч  
 Стоимость 1 кВт 4 руб

Расходы, связанные с оплатой труда обслуживающего персонала  
 Размер оплаты труда обслуживающего персонала 250 руб/ч

Амортизация  
 Первоначальная стоимость оборудования 10800000 руб  
 Срок полезного использования оборудования 7

Твердотельный лазерный станок  Газовый лазерный станок  
 Оптоволоконный лазерный станок

Расход лазерного газа (в случае резки на проточном газовом лазере)  
 Расход лазерного газа 0,0015 м3/ч  
 Стоимость 1м3 лазерного газа 1466 руб

Время работы  
 Время на 1м рабочего хода инструмента 0,00462963 ч  
 Время на 1м холостого хода 0,000334672 ч  
 Время на 1 точку врезки 0,0005556 ч

Расход технологического газа (в случае применения вспомогательного рабочего газа в процессе резки)  
 Расход технологического газа 2,3 м3/ч  
 Стоимость 1м3 технологического газа 590 руб

Расчет стоимостных параметров Сохранить

|  | Тип     | Материал      | Толщина | Стоимость 1м рабочего хода, руб | Стоимость 1м холостого хода, руб | Стоимость 1 точки врезки, руб | Время на 1м рабочий хода, ч |
|--|---------|---------------|---------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|  | Газо... | Углеродист... | 1       | 7,535324                        | 0,4168579                        | 0,8415118                     | 0,002487562                 |
|  | Газо... | Углеродист... | 1,2     | 9,525787                        | 0,4168579                        | 1,093878                      | 0,003144654                 |
|  | Газо... | Углеродист... | 2       | 11,74118                        | 0,4168579                        | 1,430449                      | 0,003876                    |
|  | Газо... | Углеродист... | 2,5     | 14,02408                        | 0,4168579                        | 1,683024                      | 0,00462963                  |

Рисунок 4.6 - Интерфейс модуля для расчета  $C_{on}, C_{off}, C_{pt}$  и создания таблиц данных для основных стоимостных показателей

Для расчета стоимости резки  $F_{cost}$  данные о значениях основных показателей резки ( $N_{pt}, L_{on}$  и  $L_{off}$ ) автоматически импортируются из разработанной УП (рисунок 4.7). Далее выбираются необходимые условия для расчета стоимости (учет НДС, выбор условия расчета при  $V_{on} = var$  или  $V_{on} = const$ ). После чего выполняется расчет  $F_{cost}$  для выбранного раскроя, и

результаты выводятся в правом окне в модуле «Расчет стоимости резки» (рисунок 4.7).

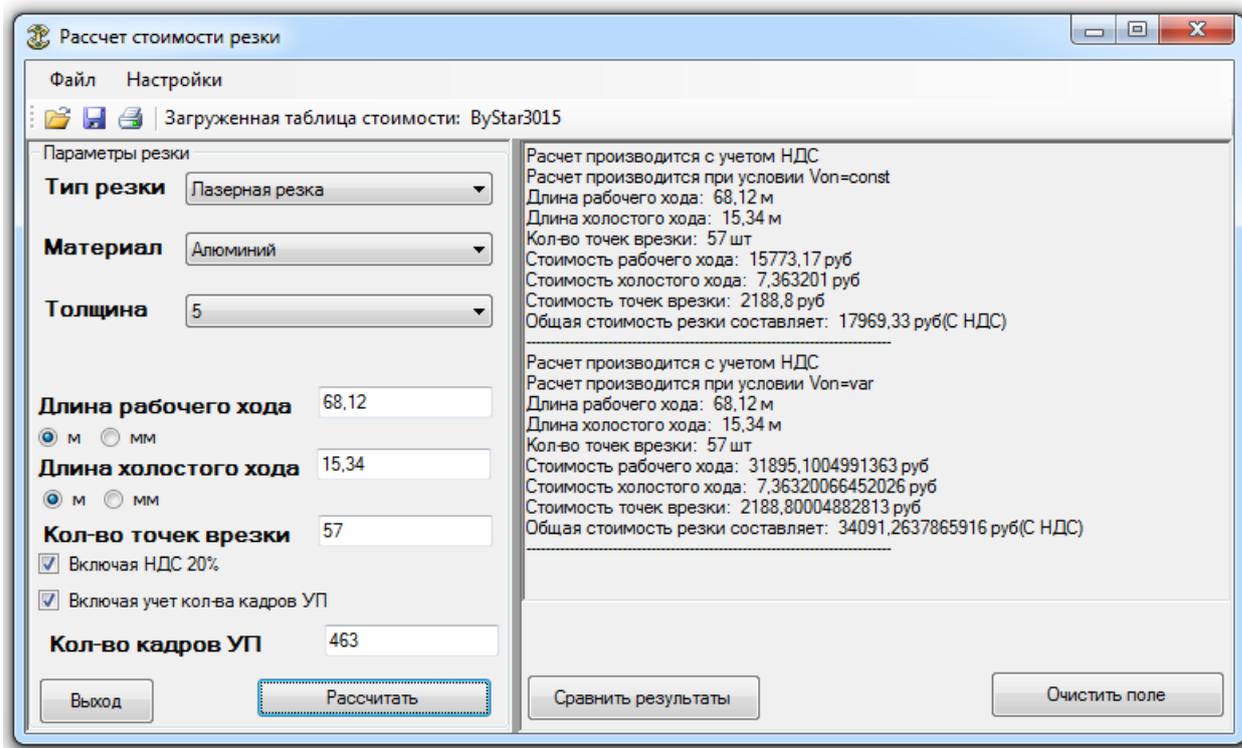


Рисунок 4.7 - Интерфейс модуля с результатами расчета при условии  $V_{on} = var$  и  $V_{on} = const$  для случая применения специального способа резки

Аналогичный расчет (рисунок 4.8) произведен для случая резки «по замкнутому контуру» с соответствующими значениями  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$  и  $L_{off}$  для рассматриваемого маршрута резки, приведенного на рисунке 4.3.

Из приведенных результатов видно, что сокращение значений основных параметров резки  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$  и  $L_{off}$  приводит к одновременному снижению значения стоимости резки листового материала при получении требуемых деталей соответствующего качества в результате построения маршрута перемещения режущего инструмента и выбора точек резки в подсистеме автоматизированного проектирования маршрута резки при подготовке УП в САПР «СИРИУС». В рассмотренном примере уменьшение значения стоимости резки в результате применения специального способа составляет около 7% по сравнению с резкой «по замкнутому контуру».

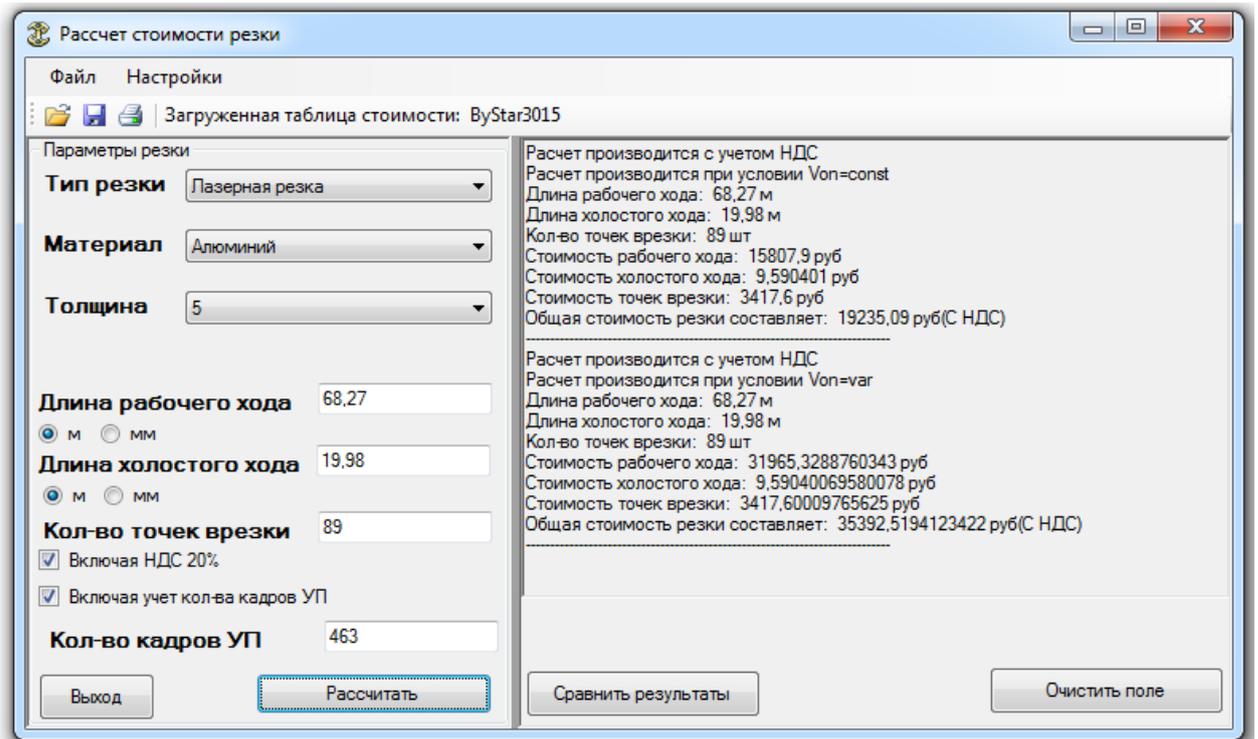


Рисунок 4.8 - Интерфейс модуля с результатами расчета при условии  $V_{on} = var$  и  $V_{on} = const$  для случая применения резки «по замкнутому контуру»

В рассмотренном примере при проектировании УП для изготовления требуемых деталей методом лазерной резки на машине с ЧПУ можно увидеть все шаги от получения геометрических объектов, которые являются моделями плоских деталей, до построения маршрута режущего инструмента и получения готовой УП. Разработка УП осуществлялась в САПР «СИРИУС» для технологической подготовки раскройно-заготовительного производства. При этом при проектировании маршрута резки соблюдаются технологические ограничения и особенности процесса термической резки при одновременном снижении стоимости процесса резки на оборудовании с ЧПУ.

#### 4.2 Расчет экономической эффективности внедрения полученных результатов

Для оценки эффективности разработанных методов, применяемых при проектировании маршрута резки, по сравнению с резкой «по замкнутому контуру» при подготовке УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ был произведен анализ и расчет основных показателей процесса резки для раскройных

карт на примере листовых материалов АМгЗМ, 10кп и 12Х18Н10Т различной толщины. Для раскройных карт был построен маршрут резки с использованием разработанных автором диссертации специальных техник резки для номенклатуры типовых деталей. Результаты для десяти раскройных карт приведены на рисунке 4.9 и в Приложении Г. Для оценки эффективности полученных результатов маршрут резки строился с применением разработанных методик и с применением резки «по замкнутому контуру» для одних и тех же раскройных карт с одинаковым количеством и расположением деталей. В таблице 4.4 приведены полученные значения параметров резки  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$ ,  $L_{off}$ , в таблице 4.5 и в Приложении Г приведены значения стоимости процесса резки, рассчитанные с помощью модуля «Расчет стоимости резки», для случаев резки «по замкнутому контуру» и с реализацией специальных техник резки.

Анализ полученных данных, которые приведены в таблицах 4.4, 4.5 и в Приложении Г, показал, что применение разработанных автором диссертации специальных способов резки для круглых заготовок позволяет сокращать значения  $N_{pt}$  и  $L_{off}$  до 95%, при одновременном снижении значения  $F_{cost}$  до 27% по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». Для случая применения специального способа резки для многоугольных заготовок значения  $N_{pt}$  и  $L_{off}$  сокращаются до 94%, значения  $L_{on}$  сокращаются до 34%, при одновременном снижении значения  $F_{cost}$  до 50% по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». Для получения усредненных значений был проведен анализ 100 раскройных карт с применением специальных способов резки для круглых и многоугольных заготовок. Оценка эффективности специальных способов оценивалась по сравнению с резкой «по замкнутому контуру». В результате применения специального способа резки для круглых заготовок в среднем значение  $N_{pt}$  сокращается на 60%, значение  $L_{off}$  на – 65%. При этом стоимость обработки раскройной карты в среднем сокращается на 15%.

Таблица 4.4 - Значения основных параметров резки  $N_{pt}$ ,  $L_{on}$ ,  $L_{off}$  для раскройных карт

| Раскройная карта    | Тип резки | $N_{pt}$ , шт | %  | $L_{off}$ , м | %  | $L_{on}$ , м | %  |
|---------------------|-----------|---------------|----|---------------|----|--------------|----|
| Раскройная карта №1 | спец.     | 34            | 65 | 13,58         | 33 | 48,9         | 20 |
|                     | станд.    | 95            |    | 20,12         |    | 61,2         |    |
| Раскройная карта №2 | спец.     | 5             | 89 | 1,2           | 92 | 44,67        | -  |
|                     | станд.    | 45            |    | 14,5          |    | 44,7         |    |
| Раскройная карта №3 | спец.     | 5             | 94 | 1             | 94 | 43,14        | 20 |
|                     | станд.    | 75            |    | 16,4          |    | 54,1         |    |
| Раскройная карта №4 | спец.     | 82            | 50 | 8,5           | 56 | 53,7         | 25 |
|                     | станд.    | 165           |    | 19,26         |    | 70,8         |    |
| Раскройная карта №5 | спец.     | 51            | 69 | 8,9           | 67 | 74,73        | 27 |
|                     | станд.    | 163           |    | 26,92         |    | 101,85       |    |
| Раскройная карта №6 | спец.     | 2480          | 7  | 66            | 19 | 194,15       | -  |
|                     | станд.    | 2660          |    | 80,9          |    | 194,21       |    |
| Раскройная карта №7 | спец.     | 10            | 95 | 1,3           | 95 | 99,47        | -  |
|                     | станд.    | 190           |    | 26            |    | 99,5         |    |
| Раскройная карта №8 | спец.     | 45            | 69 | 6,5           | 71 | 59,46        | 25 |
|                     | станд.    | 144           |    | 22,4          |    | 79,23        |    |
| Раскройная карта №9 | спец.     | 12            | 94 | 2,3           | 92 | 65,32        | 34 |
|                     | станд.    | 204           |    | 29,7          |    | 98,5         |    |
| Раскройная карта 10 | спец.     | 27            | 91 | 1,05          | 93 | 139,49       | 1  |
|                     | станд.    | 297           |    | 15,43         |    | 141,46       |    |

Таблица 4.5 - Значения  $F_{cost}$  для 10кп, АМГ3М и 12Х18Н10Т

| Раскройная карта        | Тип<br>резки | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб     | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб         | %  |
|-------------------------|--------------|------------------------|----|-------------------------|----|-----------------------------|----|
|                         |              | 10кп,<br>$\Delta=1$ мм |    | АМГ3М, $\Delta=1$<br>мм |    | 12Х18Н10Т,<br>$\Delta=1$ мм |    |
| Раскройная карта<br>№1  | спец.        | 399,1                  | 26 | 1040,2                  | 31 | 1308,2                      | 26 |
|                         | станд.       | 539,8                  |    | 1497,5                  |    | 1770,5                      |    |
| Раскройная карта<br>№2  | спец.        | 340,5                  | 10 | 848,9                   | 15 | 1124,8                      | 9  |
|                         | станд.       | 376,1                  |    | 1003,3                  |    | 1231,8                      |    |
| Раскройная карта<br>№3  | спец.        | 328,9                  | 30 | 820,4                   | 37 | 1086,7                      | 30 |
|                         | станд.       | 469,9                  |    | 1289,9                  |    | 1542                        |    |
| Раскройная карта<br>№4  | спец.        | 468,8037               | 29 | 1305,165                | 33 | 1546,325                    | 29 |
|                         | станд.       | 663,7404               |    | 1935,017                |    | 2185,218                    |    |
| Раскройная карта<br>№5  | спец.        | 604,252                | 33 | 1581,115                | 37 | 1991,885                    | 33 |
|                         | станд.       | 899,2145               |    | 2507,649                |    | 2956,143                    |    |
| Раскройная карта<br>№6  | спец.        | 3333,074               | 4  | 12827,78                | 5  | 11099,12                    | 4  |
|                         | станд.       | 3473,6                 |    | 13502,4                 |    | 11559,7                     |    |
| Раскройная карта<br>№7  | спец.        | 756,8623               | 16 | 1885,585                | 27 | 2501,284                    | 16 |
|                         | станд.       | 901,2                  |    | 2563,7                  |    | 2965,2                      |    |
| Раскройная карта<br>№8  | спец.        | 483,8265               | 32 | 1274,183                | 37 | 1595,753                    | 32 |
|                         | станд.       | 712,9035               |    | 2015,093                |    | 2343,495                    |    |
| Раскройная карта<br>№9  | спец.        | 501,6591               | 45 | 1258,971                | 52 | 1656,817                    | 44 |
|                         | станд.       | 905,635                |    | 2598,557                |    | 2977,083                    |    |
| Раскройная карта<br>№10 | спец.        | 1070,7                 | 17 | 2692                    | 28 | 3539,983                    | 17 |
|                         | станд.       | 1292,2                 |    | 3735,5                  |    | 4274,323                    |    |

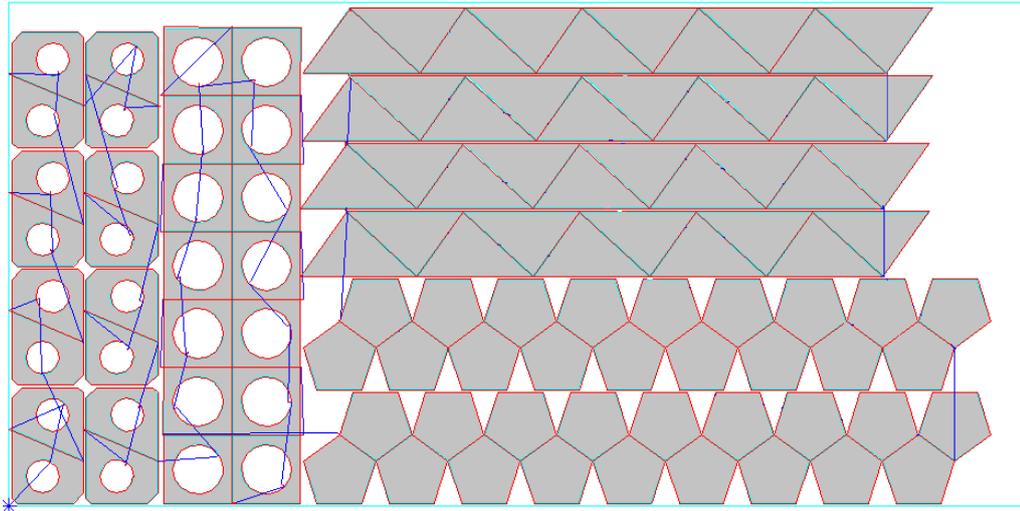


Рисунок 4.9 – Раскройная карта № 5.

Для случая применения специального способа резки для многоугольных заготовок в среднем значение  $N_{pt}$  сокращается на 57%, значение  $L_{off}$  на 56%, значение  $L_{on}$  на 20%. При этом стоимость обработки в среднем сокращается на 35%.

Таким образом, предложенные в диссертационной работе методы проектирования маршрута резки позволяют уменьшать значения основных параметров процесса резки с одновременным снижением стоимости резки. Реализация этих методов в системах автоматизированного проектирования УП для оборудования термической резки с ЧПУ позволит получать рациональные варианты маршрута резки при одновременном уменьшении искажений по форме и размерам вырезаемых деталей.

В целом как показывает опыт, внедрение автоматизированного проектирования УП с использованием специальных функций для построения маршрута резки при одновременном выполнении условий технологичности для оборудования термической резки позволяет:

1. Сократить сроки подготовки УП для оборудования термической резки с ЧПУ;

2. Сократить термические деформации, возникающие в процессе резки, тем самым снизить процент брака от искажения геометрических форм и размеров вырезаемых деталей;
3. Сократить время и стоимость процесса термической резки для полученных раскройных карт, включая расход газа и расходных материалов, электроэнергии, а также повысить срок службы технологического оборудования;
4. Получать раскройные карты, обеспечивающие сокращение суммарной стоимости раскроя (стоимость материала плюс стоимость процесса резки).

#### **4.3. Выводы по Главе 4**

1. Рассмотрена апробация разработанных методик и алгоритмов для проектирования маршрута резки при подготовке УП в САПР «СИРИУС» для оборудования термической резки с ЧПУ. Разработанные алгоритмы и их реализация расширяют штатные возможности систем автоматизированного проектирования УП, позволяют учитывать технологические ограничения процесса термической резки и применять их для снижения термических деформаций в процессе резки, а также сокращать время и стоимость процесса резки;
2. Приведены практические примеры разработки УП и произведен расчет экономической эффективности реализованных новых методик и алгоритмов при проектировании маршрута резки для оборудования лазерной резки с ЧПУ;
3. Обобщен опыт внедрения автоматизированного проектирования УП с использованием специальных функций, который показывает следующее:
  - Сокращаются сроки подготовки УП для оборудования термической резки при одновременном соблюдении технологических ограничений и уменьшении численных значений основных параметров процесса термической

резки (количества точек врезки, длин перемещений режущего инструмента на рабочем и холостом ходе);

- Сокращаются термические деформации, возникающие в процессе резки, тем самым снижается процент брака от геометрических искажений формы и размеров изготавливаемых деталей;
- Сокращаются время и стоимость процесса резки, расход газа и расходные материалы, расходы электроэнергии и повышается срок службы технологического оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе в результате проведенных исследований разработаны методики для расчета временных и стоимостных параметров процесса резки в системах автоматизированного проектирования управляющих программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ. Было также разработано и реализовано новое алгоритмическое и программное обеспечение для систем автоматизации проектирования маршрута резки, обеспечивающее повышение эффективности функционирования САПР УП машин термической резки с ЧПУ и сокращающее время и стоимость процесса резки с учетом соблюдения необходимых технологических ограничений.

В соответствии с целью и задачами исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Впервые разработана научно-обоснованная методика расчета стоимостных параметров процесса резки в САПР УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Разработанная методика используется на ряде предприятий Свердловской области для расчета табличных значений стоимостных параметров и себестоимости деталей, изготавливаемых из листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ;
2. Впервые получены формулы для вычисления фактических значений параметра  $V_{on}$  для точного вычисления целевой функции времени резки в задаче оптимизации траектории перемещения режущего инструмента для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Полученные формулы использованы в САПР «СИРИУС» для оптимизации маршрута инструмента по времени резки  $T_{cut}$  в автоматическом режиме с использованием точного и эвристического алгоритмов. Предложенная методика и табличные значения корректирующих коэффициентов также применяются в производственном процессе на ряде предприятий Свердловской области при разработке УП.

3. Для некоторых номенклатур типовых деталей разработаны методики и алгоритмы проектирования маршрута резки с применением специальных способов резки, ориентированные на минимизацию времени и стоимости процесса резки с соблюдением технологических ограничений термической резки;
4. Осуществлена программная реализация предложенных методик и алгоритмов резки в виде макропрограмм для построения траектории перемещения режущего инструмента в САПР «СИРИУС». Разработанное программное обеспечение используется для подготовки УП при резке типовых деталей, изготавливаемых из листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ. Кроме того, разработанные методики используются в интерактивном режиме в производственном процессе при проектировании УП в САПР «BySoft» и САПР «Tru Tops»;
5. Предложен алгоритм и разработан модуль для расчета стоимости листовой резки на оборудовании с ЧПУ. Расчет стоимостных параметров проводится по разработанной методике с учетом эксплуатационных затрат, возникающих в процессе лазерной резки на оборудовании с ЧПУ;
6. Описанные практические методики позволяют имплементировать их в существующих САПР УП и получать рациональные варианты маршрута резки, учитывающие технологические ограничения процесса термической резки при одновременном снижении стоимости процесса резки;
7. Результаты диссертационной работы внедрены и используются на промышленных предприятиях Свердловской области с целью снижения себестоимости выпускаемой продукции и процента брака, связанного с термическими деформациями листового материала. При этом снижается стоимость процесса резки при изготовлении типовых деталей (до 45%) при одновременном выполнении условий технологичности;
8. В учебном процессе Уральского Федерального Университета результаты работы используются при проведении практических занятий по

дисциплинам «Автоматизация конструкторского и технологического проектирования», «Автоматизация проектирования раскройно-заготовительного производства» при подготовке бакалавров. Выпущено учебное электронное пособие «Автоматизация проектирования раскроя листового материала и подготовка управляющих программ для машин с ЧПУ в САПР «СИРИУС»».

### **Перспективы дальнейшей разработки темы.**

В ходе внедрения результатов диссертационного исследования, направленного на повышение эффективности автоматизированного проектирования УП для машин листовой лазерной резки с ЧПУ, можно выделить следующие направления дальнейшего развития и совершенствования алгоритмического и программного обеспечения САПР УП для технологического оборудования листовой резки:

1. Разработка новых алгоритмов проектирования УП в автоматическом режиме на базе применения различных специальных техник резки для широкой номенклатуры деталей, учитывающих ограничения процесса резки и оптимизирующих временные и стоимостные характеристики резки;
2. Реализация разработанных методик, алгоритмического и программного обеспечения в рамках универсальных САПР проектирования УП для всех типов технологического оборудования листовой резки с ЧПУ (плазменной, газовой, гидроабразивной).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЧПУ – числовое программное управление

САПР – система автоматизированного проектирования

УП – управляющая программа

CAD (англ. Computer-aided design) – автоматизированное проектирование

CAM (англ. Computer-aided manufacturing) – автоматизированная система управления производством

TSP (англ. Traveling Salesman Problem) – задача коммивояжера

GTSP (англ. Generalized Traveling Salesman Problem) – обобщенная задача коммивояжера

ССР (англ. Continuous Cutting Problem) – задача непрерывной резки

ЕСР (англ. Endpoint Cutting Problem) – задача резки с конечным набором точек

ICP (англ. Intermittent Cutting Problem) – задача произвольной резки

СССР (англ. Segment Continuous Cutting Problem) – задача с фиксированным числом сегментов резки

GСССР (англ. Generalized Segment Continuous Cutting Problem) – обобщенная задача с фиксированным числом сегментов резки

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бурылов, А.В. Автоматическое и интерактивное формирование маршрута режущего инструмента в программном комплексе раскроя ITAS NESTING /А.В. Бурылов, Р.Т. Мурзакаев, В.С. Приступов// Приволжский научный вестник. – 2016. – №1 (53). – с. 32-37.
2. Верхотуров, М.А. Оптимизация пути режущего инструмента при нерегулярном раскрое листовых материалов на основе алгоритма «Муравьиная колония» /М.А. Верхотуров, П.Ю. Тарасенко// Вестник УГАТУ. – 2008.
3. Верхотуров, М.А. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки /М.А. Верхотуров, П.Ю. Тарасенко// Вестник УГАТУ. Управление, ВТиТ. – 2008. – Т.10, №2 (27). – с.123-130.
4. Верхотуров, М.А. Раскрой листовых материалов на фигурные заготовки: оптимизация пути режущего инструмента на основе применения группировки контуров /М.А. Верхотуров, П.Ю. Тарасенко, А.Р. Тарасенко// Альманах современной науки и образования. – 2008. – №1(8). – с. 36-39.
5. Верхотуров, М.А. Раскрой листовых материалов на фигурные заготовки: оптимизация пути режущего инструмента на основе алгоритма «муравьиная система» /М.А. Верхотуров, А.Р. Тарасенко// Альманах современной науки и образования. – 2008. – №1(8). – с. 34-36.
6. Верхотуров, М.А. О задаче построения пути режущего инструмента с учетом термических воздействий при раскрое плоского материала/ М.А. Верхотуров, Г.Н. Верхотурова, М.И. Айбулатов, Д.Р. Зарипов// Перспективные информационные технологии: сборник трудов междунар. научно-технической конференции – 2020. – с. 346-351.
7. Ганелина, Н.Д. Исследование методов построения кратчайшего пути обхода отрезков на плоскости /Н.Д. Ганелина, В.Д. Фроловский// Сибирский журнал вычислительной математики. – 2006. – №3. Т.9. – с.201-212.

8. Ганелина, Н.Д. Решение задачи гамильтонова цикла на отрезках методом муравьиных колоний /Н.Д. Ганелина, В.Д. Фроловский// ГРАФИКОН – 2005: труды 15-й междунар. конференции по компьютерной графике и ее приложениям. – Новосибирск, 2005. – с. 207-210.
9. Жукова, Г.Н. Эффективный по времени точный комбинированный алгоритм для асимметричной задачи коммивояжера /Г.Н. Жукова, М.В. Ульянов, М.И. Фомичев// математические методы и алгоритмы бизнес информатики. – 2018. – 3(45). – с.20-28.
10. Канторович, Л.В. Рациональный раскрой промышленных материалов /Л.В. Канторович, В.А. Залгаллер//Новосибирск: Изд-во «Наука». – 1971. – с.290.
11. Киселев, С.О. Исследование и сравнение бионических методов и моделей для автоматизированного проектирования маршрутов обхода геометрических объектов /С.О. Киселев, В.Д. Фроловский// НАУ. – 2015. – №4 (9). – с. 111-115.
12. Компания "ADEM" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://adem.ru/products/>, свободный.
13. Компания "AMADA". Software solution packs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amada.ru/ru/programmnoe-obespechenie/software-solution-packs.html>, свободный.
14. Компания "TRUMPF" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.trumpf.com/ru\\_RU/produkcija/programmnoeobespechenie/](https://www.trumpf.com/ru_RU/produkcija/programmnoeobespechenie/), свободный.
15. Конников, Е.А. Специфика определения штучно-калькуляционного времени при расчете себестоимости производства изделий с применением технологии лазерной резки /Е.А. Конников, А.М. Куклина// Экономика и управление народным хозяйством. – 2016. – №2(30) – с.41-49.
16. Мартынов А.В. Гибридный алгоритм решения задачи коммивояжера /А.В. Мартынов, В.М. Курейчик// Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – 4(165). – с.36-44.

- 17.Макаровских, Т.А. Алгоритм построения самонепересекающегося OE-маршрута в плоском графе /Т.А. Макаровских, А.В. Панюков// Информационные технологии и системы: труды шестой международной конференции. – 2017. – с.157-163.
- 18.Макаровских, Т.А. Математические модели и алгоритмы маршрутизации для САПР технологической подготовки процессов раскрыя /Т.А. Макаровских, А.В. Панюков, Е.А. Савицкий// Автоматика и телемеханика. – 2017. – №5. – с. 123-140.
- 19.Макаровских, Т.А. Программное обеспечение для построения А-цепей с упорядоченным охватыванием в плоском связном 4-регулярном графе /Т.А. Макаровских// Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2019. – 8(1). – с. 36-53.
- 20.Меламед, И.И. Задача Коммивояжера. Вопросы теории / И.И. Меламед, С.И. Сергеев, И.Х. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №9. – с.3-34.
- 21.Меламед, И.И. Задача Коммивояжера. Приближенные алгоритмы/ И.И. Меламед, С.И. Сергеев, И.Х. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №11. с. 3-26.
- 22.Меламед, И.И. Задача Коммивояжера. Точные алгоритмы / И.И. Меламед, С.И. Сергеев, И.Х. Сигал // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №10. – с.3-29.
- 23.Мильцин, А.Н. Современные методы резки листовых материалов /А.Н. Мильцин, М.Л. Шабанов, М.Н. Лысыч, В.В. Романов// Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т.3, №2-1(13-1). – с. 83-87.
- 24.Мурзакаев, Р.Т. Построение маршрута режущего инструмента на основе алгоритма «всемирного потопы» /Р.Т. Мурзакаев, В.С. Приступов// В мире научных открытий. – 2015. – №10.2(70).с. 828-839.
- 25.Мурзакаев, Р.Т. Применение метаэвристических алгоритмов для минимизации длины холостого хода режущего инструмента /Р.Т.

- Мурзакаев, В.С. Шилов, А.В. Бурылов// Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – №14. – с.123-136.
26. Мухачева, Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов /Э.А. Мухачева. – Изд-во: Машиностроение, 1984. – 176 с.
27. Мухачева, Э.А. Модели и методы расчета раскроя – упаковки геометрических объектов /Э.А. Мухачева, М.А. Верхотуров, В.В. Мартынов – Уфа: УГАТУ, 1998. – 217 с.
28. О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы: постановление Правительства РФ от 27.12.2019 №1924 – 2002.
29. Пантелеев, А.В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы /А.В. Пантелеев, Д.В. Метлицкая, Е.А. Алешина. – М.: Изд-во Вузовская книга, 2013. – 244 с.
30. Петунин А.А. Расчет тепловых полей при термической резке заготовок из листовых материалов /А.А. Петунин, Е.Г. Полищук// Информационные технологии и системы: сборник трудов 5<sup>ой</sup> междунар. конференции. – 2016. – с. 142-144.
31. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Об одной задаче маршрутизации перемещений инструмента при листовой резке деталей /А.А. Петунин, А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов// Моделирование и анализ информационных систем. – 2015. – Т.22, №2. – с. 278-294.
32. Петунин, А.А. Две задачи маршрутизации режущего инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ /А.А. Петунин// Intelligent Technologies for Information Processing and Management: proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference. – Ufa, 2014. – V.1. – с. 215-220.
33. Петунин, А.А. Интегрированная САПР «СИРИУС» для автоматизации раскройно-заготовительного производства. Концепция. Опыт разработки и внедрения /А.А. Петунин// Ресурсосберегающие технологии: математическое обеспечение оптимизационных задач в системах

- автоматизированного проектирования: сборник докладов 1<sup>ой</sup> Всероссийской научно-практической конференции. – СПб, 2001. – с. 126-129.
34. Петунин, А.А. О классификации техник фигурной листовой резки для машин с ЧПУ и одной задаче маршрутизации инструмента /А.А. Петунин, В.И. Кротов// Материаловедение. Машиностроение. Энергетика: сборник научных трудов, 2015. – с. 466-475.
35. Петунин, А.А. О некоторых стратегиях формирования маршрута инструмента при разработке управляющих программ для машин термической резки материала /А.А. Петунин// Вестник УГАТУ. Управление, ВТиИ. – 2009. – Т.13, №2 (35). – с. 280-286.
36. Петунин, А.А. Элементы динамического программирования в конструкциях локального улучшения эвристических решений маршрутизации с ограничениями / А.А. Петунин, А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов// Автоматика и телемеханика. – 2017. – №4.– с. 106-125.
37. Петунин, А.А., К вопросу о маршрутизации движения инструмента в машинах листовой резки с числовым программным управлением /А.А. Петунин, А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов // Научно-технические ведомости. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – № 2(169). – с.103-111.
38. Петунин А.А., Ченцов А.Г., Ченцов П.А. Оптимальная маршрутизация инструмента машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением. Екатеринбург – УрФУ, 2020. – 244 с.
39. Пушкарева, Г.В. Генетическое программирование при автоматизированном проектировании управляющих программ для систем ЧПУ /Г.В. Пушкарева// Сборник научных трудов НГТУ. – 2004. – №1. – с.67-72.
40. Пушкарева, Г.В. Исследование и применение бионических методов и моделей для автоматизированного проектирования маршрутов обхода геометрических объектов /Г.В. Пушкарева// Графикон-2005: труды 15й международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям. – 2005. – с.255-262.

- 41.Пушкарева, Г.В. Применение гибридного генетического алгоритма для оптимизации маршрутов /Г.В. Пушкарева// Автометрия. – 2006. – №2, Т.42. – с. 68-79.
- 42.Салий, Я.В. Об одной маршрутной задаче на узкие места с внутренними работами /Я.В. Салий, А.Г. Ченцов// Вестник ТГУ. – 2012. – №3(17). – с.827-847.
- 43.Субботин, А.М. Оптимизация процесса вычисления холостого хода режущего инструмента за счет распараллеливания метаэвристического алгоритма /А.М. Субботин, Р.Т. Мурзакаев// Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2017. – №1. – с.50-55.
- 44.Суперфин, А.Р. О стоимостном критерии комплексной оптимизации задачи плоского раскроя-упаковки /А.Р. Суперфин// Успехи современной науки. – 2015. – №5. – с.102-106.
- 45.Таваева, А.Ф. Вычисление стоимости лазерной резки в задаче оптимизации маршрута режущего инструмента на машинах с ЧПУ/А.Ф. Таваева, А.А. Петунин// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №12. – с. 194-202.
- 46.Таваева, А.Ф. К вопросу о разработке алгоритмов маршрутизации инструмента лазерных машин листовой резки с ЧПУ при использовании «цепной» техники резки /А.Ф. Таваева, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 3<sup>й</sup> междунар. научной конференции. – 2014. – с.48-51.
- 47.Таваева, А.Ф. К вопросу оптимизации стоимостных параметров лазерной резки на машинах с ЧПУ /А.Ф. Таваева, А.А. Петунин// Information Technologies for Intelligent Decision Making Support: proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference. – 2014. – V.2. – с. 74-78.
- 48.Таваева, А.Ф. Об одном способе минимизации пути режущего инструмента для машин термической резки /А.Ф. Таваева, А.А. Петунин// Инженерная мысль машиностроения будущего: труды 2<sup>ой</sup> всероссийской молодежной научно-практической конференции. – 2013. – с. 365-373.

49. Таваева, А.Ф. Определение условий эффективного применения специальных методов резки при разработке автоматических методов оптимизации маршрута инструмента /А.Ф. Таваева// Интеллектуальные технологии обработки информации и управления: труды 2<sup>ой</sup> международной конференции. – 2014. – с. 225-231.
50. Таваева, А.Ф. Точное вычисление стоимости резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с ЧПУ в задаче оптимизации маршрута перемещения режущего инструмента /А.Ф. Таваева, А.А. Петунин// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – №4 (23). – с.298-312.
51. Топ Системы. Российский программный комплекс T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tflex.ru/products/priklad/raskr/>, свободный.
52. Файзрахманов, Р.А. Минимизация общего времени резки с учетом технологий для станков с ЧПУ /Р.А. Файзрахманов, Р.Т. Мурзакаев, А.В. Бурьлов, В.С. Приступов// Электротехника. – 2016. – №11. – с. 7-12.
53. Файзрахманов, Р.А. Формирование энергоэкономичного маршрута режущего инструмента станков гидроабразивной и лазерной резки с ЧПУ /Р.А. Файзрахманов, Р.Т. Мурзакаев, А.В. Бурьлов, В.С. Шилов// Электротехника. – 2015. – №11. – с. 32-36.
54. Фроловский, В.Д. Автоматизация проектирования управляющих программ тепловой резки металла на оборудовании с ЧПУ /В.Д. Фроловский// Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2005. – №4. – с. 63-66.
55. Ченцов, А.А. Задача последовательного обхода мегаполисов /А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов// Вестник ТГУ. – 2014. – №2(19). – с. 454-475.
56. Ченцов, А.А. Обобщенная модель курьера с дополнительными ограничениями /А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов// Вестник ЮУрГУ. Математическое моделирование и программирование. – 2016. – Т.9, №1. – с.46-58.

57. Ченцов, А.А. Элементы динамического программирования в экстремальных задачах маршрутизации /А.А. Ченцов, А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов// Проблемы управления. – 2013. – №5. – с. 12-21.
58. Ченцов, А.Г. Динамическое программирование в одной нестационарной задаче маршрутизации /А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов// Известия института математики и информатики УдГУ. – 2012. – №1 (39). – с. 151-154.
59. Ченцов, А.Г. Задача последовательного обхода мегаполисов с условиями предшествования /А.Г. Ченцов// Автоматика и телемеханика. – 2014. – №4. – с. 170-190.
60. Ченцов, А.Г. Маршрутизация в условиях ограничений: задача о посещении мегаполисов /А.Г. Ченцов, П.А. Ченцов// Автоматика и телемеханика. – 2016. – №11. – с. 96-117.
61. Ченцов, А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории /А.Г. Ченцов. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 240 с.
62. Шапарев, А.В. Технологическое и экономическое сравнения резки материалов плазмой и CO<sub>2</sub> лазерами /А.В. Шапарев, А.И. Савина// Наука и современность. – 2016. – №3(9). – с. 181-189.
63. Ченцов, А.Г. Эффективный метод решения задачи обхода мегаполисов при ограничениях предшествования специального типа /А.Г. Ченцов, Д.М. Хачай// Proceedings 47th International Youth School -Conference «Modern Problems in Mathematics and its Applications». – 2016. – vol.1662. – с.191-199.
64. Arkin, E. Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem /E. Arkin, R. Hassin// Discrete Applied Mathematics . – 1994. – Vol.55. – p. 197-218.
65. Ascheuer, N. A branch & cut algorithm for the asymmetric traveling salesman problem with precedence constraints /N. Ascheuer, M. Jiinger, G. Reinelt//Computational Optimization and Applications. – 2000. – 17(1). – p. 61-84.

66. Bysoft CAD/CAM system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bystronic.ru/ru/produkty/software/BySoft-7.php>, свободный.
67. Castelino, K. Optimization for minimizing airtime during machining / K. Castelino, R. D'Souza, P.K. Wright// Journal of Manufacturing Systems. – 2003. – Vol.22, Issue 3. – p. 173-180.
68. Chentsov, A.G. Elements of dynamic programming in extremal routing problems / A.G. Chentsov, P.A. Chentsov, A.A. Chentsov// Automation and Remote control. – 2014. – 75(3). – p.537-550.
69. Chentsov, A.G. Model of megapolises in the tool path optimization for CNC plate cutting machines /A.G. Chentsov, P.A. Chentsov, A.A. Petunin, A.N. Seseikin// International Journal of Production Research. – 2018. – 56(1).
70. Chentsov, A.G. Routing problems: Constraints and Optimality /A.G. Chentsov, P.A. Chentsov, A.A. Petunin, A.N. Seseikin// IFAC – Paper OnLine. – 2016. – Vol. 49(12). – p.640-644.
71. Chentsov, P.A. Heuristic algorithms for solving of the tool routing problem for CNC cutting machines /P.A. Chentsov, A.A. Petunin, A.N. Seseikin, E.N. Shipacheva, A.E. Sholohov// AIP: proceedings inter. conf. – 2015. – 1690: 030004(1)-030004(6).
72. Chentsov, P.A. Tool routing problem for CNC plate cutting machines /P.A. Chentsov, A.A. Petunin // IFAC – Paper OnLine. – 2016. – Vol. 49(12). – p. 645-649.
73. Chentsov, A.G. An exact algorithm with linear complexity for a problem of visiting megapolises /A.G. Chentsov, M.Yu. Khachai, D.M. Khachai// Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. – 2016. – p. 38-46.
74. Chentsov, A.G. Linear time algorithm for precedence constrained asymmetric generalized traveling salesman problem / A. Chentsov, M. Khachai, D. Khachai// IFAC-PapersOnLine. – 2016. – 49(12). – p.651-655.
75. Dewil, R. A review of cutting path algorithms for laser cutters /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse// International Journal of Manufacturing Technologies. – 2016. – 87 (5-8). – p. 1865-1884.

76. Dewil, R. An improvement heuristic framework for the laser cutting tool path problem /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse, T. Vossen, M. Laguna // International Journal of Production Research. – 2015. – Vol. 53, № 6. – p. 1761-1776.
77. Dewil, R. Construction heuristics for generating tool paths for laser cutters /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse// International Journal of Production Research. – 2014. – Vol. 52, № 20. – p. 5965-5984.
78. Dewil, R. Cutting path optimization using tabu search /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse// Key Engineering Materials. – 2011. – Vol. 473. – p. 739-748.
79. Dewil, R. Heuristics for laser cutting tool path generation /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse// Applied Mathematics and Optimization. – 2012. – Vol.10. – p. 210-216.
80. Dewil, R. Sheet metal laser cutting tool path generation – dealing with overlooked problem aspects /R. Dewil, P. Vansteenwegen, D. Cattrysse// Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 639. – p. 517-524.
81. Ezzat, A. A bare-bones ant colony optimization algorithm that performs competitively on the sequential ordering problem /A. Ezzat, A.M. Abdelbar, D.C. Wunsch// Memetic computing. – 2014. – Vol.6, Issue 1. – p. 19-29.
82. Gambardella, L.M. Coupling ant colony systems with strong local searches / L.M. Gambardella, R. Montemanni, D. Weyland// European Journal of Operational Research. – 2012. – 220(3). – p. 831-843.
83. Han, G. A study on torch path planning in laser cutting processes part 1: calculation of heat flow in contour laser beam cutting /G. Han, S. Na// Journal of Manufacturing Processes. – 1999. – Vol.1, No.1. – p. 54-61.
84. Han, G. A study on torch path planning in laser cutting processes part 2: cutting path optimization using simulated annealing /G. Han, S. Na// Journal of Manufacturing Processes. – 1999. – Vol.1, No.1. – p. 62-70.

- 85.Helsgaun, K. An effective implementation of the Lin-Kernighan traveling salesman heuristic / K. Helsgaun // European Journal of Operational Research. – 2000. – Vol.126, Issue 1. – p.106-130.
- 86.Hoeft, J. Heuristics for the plate – cutting traveling salesman problem /J. Hoeft, U. Palekar// IIE Transactions. – 1997. – Vol. 29, Issue 9. – p. 719-731.
- 87.Jing, Y. An optimized algorithm of numerical cutting-path control in garment manufacturing /Y. Jing, C. Zhige// Advanced Materials Research. – 2013. – Vol.796. – p. 454-457.
- 88.Kim, Y. Global cutting-path optimization considering the minimum heat effects with microgenetic algorithms /Y. Kim, K. Gotoh, M. Toyosada// Journal of Marine Science and Technology. – 2004. – Vol.9, Issue 2. – p. 70-79.
- 89.Lee, M. Cutting path optimization in CNC cutting processes using a two step genetic algorithm /M. Lee, K. Kwon// International Journal of Production Research. – 2006. – Vol. 44 (24). – P. 5307-5326.
- 90.Levichev, N. Anticipating heat accumulation in laser oxygen cutting of thick metal plates /N. Levichev, G.C. Rodrigues, R. Dewil, J. Duflon// Journal of Laser Applications. – 2020. – 32(2). – 022018.
- 91.Lin, L. Route planning based on genetic algorithm /L. Lin, Zh. Yuhua// Journal of Mathematics Research. – 2018. – 10(2). – 122.
- 92.Lin, S. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem / S. Lin, B. Kernighan// Operations Research. – 1973. – Vol. 21 (2). – p. 498-516.
- 93.Manber, U. Pierce point minimization and optimal torch path determination in flame cutting /U. Manber., S.Israni// Journal of Manufacturing Systems. – 1984. – Vol.3, No 1. – p. 81-89.
- 94.Nicolakopoulos, A. A threshold accepting heuristic with intense local search for the solution of special instances of the traveling salesman problem /A. Nicolakopoulos, H. Sarimveis// European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol.177, Issue 3. – p. 1911-1929.

95. Petunin A.A. General model of tool path problem for the CNC sheet cutting machines /A.A. Petunin// IFAC – PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52 (13). – p. 2662-2667.
96. Petunin, A.A. About some types of constraints in problems of routing /A.A. Petunin, E.G. Polishuk, A.G. Chentsov, P.A. Chentsov, S.S. Ukolov// AIP: proceedings inter. conf. – 2016. – Vol. 1789. 060002.
97. Petunin, A.A. Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints /A.A. Petunin, A.A. Chentsov, A.G. Chentsov, P.A. Chentsov// Automation and Remote Control. – 2017. – Vol.78, Issue 4. – p. 666-681.
98. Petunin, A.A. Modeling of tool path for the CNC sheet cutting machines /A.A. Petunin// AIP: proceedings inter. conf. – 2015. – 1690: 060002(1)-060002(7).
99. Petunin, A.A. Optimization models of tool path problem for CNC sheet metal cutting machines /A.A. Petunin, C. Stylios// IFAC – Paper OnLine. – 2016. – Vol. 49(12). – p. 23-28.
100. Petunin, A. The dependence of actual laser cutting speed on CNC sheet equipment on number of NC program commands for metal grades 1.0114 and AWAIMG / A. Petunin, A. Tavaeva// Journal of Physics. – 2020. Vol.1527. Issue 1.
101. Petunin, A. A. On the new algorithm for solving continuous cutting problem / Petunin, A.A., Polishchuk, E.G., Ukolov, S.S. // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – Vol.52(13). – p. 2320-2325.
102. Pintea, C. The generalized traveling salesman problem solved with ant algorithms /C. Pintea, P.C. Pop, C. Chira// Complex Adaptive Systems Modeling. – 2017. – 5.
103. Skinderowicz, R. Population-based ant colony optimization for sequential ordering problem /R. Skinderowicz// Optimization for sequential ordering problem. – 2015. – p. 99-109.

104. Sherif, S.U. Sequential optimization approach for nesting and cutting sequence in laser cutting /S.U. Sherif, N. Jawahar, M. Balamurali// Journal of Manufacturing Systems. – 2014. – Vol.33, Issue 4. – p. 624-638.
105. Shipacheva, E.N. A genetic algorithm used for solving one optimization problem /E.N. Shipacheva, A.A. Petunin, I.M. Berezin// AIP Conference Proceedings. – 2017. – 1915. – 040052.
106. Tamajidy, M. Biogeography based optimization (BBO) algorithm to minimize non-productive time during hole-making process /M. Tamajidy, S. Paslar, H. Baharuding, T. Hibs, M. Arrifin// International Journal of Production Research. – 2015. – 53(6). – 1880-1894.
107. Tavaeva, A. A cost minimizing at laser cutting of sheets parts on CNC machines /A. Tavaeva, A. Petunin, S. Ukolov, V. Krotov// Communications in Computer and Informational Science. – 2019. – p.422-437.
108. Tavaeva, A.F. About effectiveness of special cutting techniques application during development of automatic methods of tool path optimization applied to CNC thermal cutting machines /A.F. Tavaeva, A.A. Petunin, V.I. Krotov// Computer science and information technologies: proceedings of 19<sup>th</sup> intern. workshop. – 2017. – p. 221-226.
109. Tavaeva, A.F. Cost minimizing of cutting process for CNC thermal and water-jet machines /A.F. Tavaeva, D.V. Kurennov// AIP: proceedings inter. conf. – 2015. – Vol. 1690. 020003.
110. Tavaeva, A.F. Methods of Cutting Cost Minimizing in Problem of Tool Route Optimization for CNC Laser Machines /A.F. Tavaeva, A.A. Petunin, E.G. Polishchuk// Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020.
111. Veeramani, S. Optimization of the nibbling operation of the NC turret punch press /S. Veeramani, D. Kumar// International Journal of Production Research. – 1998. – Vol.36 (7). – p. 1901-1916.
112. Vicencio, K. Multi-goal path planning based on the generalized Traveling Salesman Problem with neighborhoods / K. Vicencio, B. Davis. I. Gentilini//

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2014. – p. 2985 – 2990
113. Wah, P. Tool path optimization in layered manufacturing / P. Wah, K. Murty, A. Joneja, L. Chiu// IIE Transactions. – 2002. – Vol.34, Issue 4. – p. 335-347.
114. Wang, G.G. Optimal process planning for a combined punch-and-laser cutting machine using ant colony optimization /G.G. Wang, S.Q. Xie// International Journal of Production Research. – 2005. – Vol.43, №11. – p. 2195-2216.
115. Wäscher, G. An improved typology of cutting and packing problems /G. Wäscher, H. Haußner, H. Schumann// European Journal of Operational Research. – 2007.- no.183. – p. 1109-1130.
116. Xie, S.Q. Optimal process planning for compound laser cutting and punch using genetic algorithms /S.Q. Xie, J. Gan, G.G. Wang// International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. – 2009. – Vol.2, №1. – p.20-38.
117. Yang, W. An effective algorithm for tool path airtime optimization during leather cutting / W. Yang, Y. Zhao, J. Jie, W. Wang // Advanced Material Reaesrch. – 2010. – p. 373-377.
118. Yun, Y. Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem /Y. Yun,H. Chung, C. Moon// Computers and Industrial Engineering. – 2013. – Vol. 65. – p. 137-147.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Документы о внедрении результатов диссертационного исследования



УТВЕРЖДАЮ  
Исполнительный директор  
АО «ПО «УОМЗ»

К.В. Шкуревых  
\_\_\_\_\_ 2020 г.

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Таваевой Анастасии Фидагилевны

Мы, нижеподписавшиеся, начальник департамента технологической подготовки производства и сопровождения ERP системы Самылов А.А., главный технолог Старицын В.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на тему «Разработка методик расчета временных и стоимостных параметров процесса резки в системах автоматизированного проектирования управляющих программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ», выполненного главным специалистом группы по развитию заготовительного производства и сопровождения ERP системы Таваевой А.Ф., внедрены и имеют высокую практическую значимость в производственном процессе АО «ПО «УОМЗ», а именно:

1. Разработанные специальные функции резки и сформулированные научно-практические рекомендации по их применению для деталей, изготавливаемых из листового материала, используются при проектировании управляющих программ в САПР BySoft для оборудования лазерной резки с ЧПУ. Внедрение новых способов резки при проектировании управляющих программ позволило снизить трудоемкость изготовления номенклатуры типовых деталей до 45% при одновременном выполнении условий технологичности;
2. Разработанная методика расчета параметров стоимости резки и рассчитанные на ее основании значения основных стоимостных параметров процесса резки используется при оценке реальной себестоимости получаемой продукции из листового материала на оборудовании лазерной резки с ЧПУ;
3. Разработанная методология точного расчета рабочей скорости перемещения режущего инструмента применяется в производственном процессе с целью корректного проектирования управляющих программ в САПР BySoft для оборудования лазерной резки с ЧПУ.

Начальник департамента  
технологической подготовки  
производства и сопровождения ERP  
системы

А.А. Самылов

Главный технолог

В.С. Старицын





Основан в 1997

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 18.  
Тел.: 8 (800) 550-66-09, (343) 272-30-80, РЦЛТ.РФ, mail@ural-lazer.ru

*23 года мы работаем для Вас!*

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

А.Г. Сухов



10 2020 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Таваевой А.Ф. на тему:  
**«Разработка методик расчета временных и стоимостных параметров процесса резки в системах автоматизированного проектирования управляющих программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ»**

Настоящим актом подтверждается, что теоретические и практические результаты диссертационной работы Таваевой А.Ф. в виде методик и программных средств для автоматизированного проектирования УП для оборудования листовой резки с ЧПУ используется в ЗАО «Региональный центр лазерных технологий» при подготовке УП для оборудования лазерной резки с ЧПУ; при расчете стоимости процесса резки.

Применение указанных методик и программных средств позволяет минимизировать временные и стоимостные показатели процесса резки при одновременном выполнении технологических ограничений процесса термической резки.

Советник ГД по науке  
профессор

д.т.н.

С.М. Шанчуров



ГОСТ РВ 0015-002

ИНН 6659042028 ОКПО 46662640 ОГРН 1026602958250 КПП 667801001



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Уралинтех»

В.И. Кротов

2020 г.



## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Таваевой Анастасии  
Фидагилевны на тему:

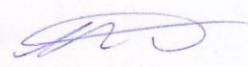
**«Разработка методик расчета временных и стоимостных параметров  
процесса резки в системах автоматизированного проектирования  
управляющих программ для машин листовой лазерной резки с ЧПУ»**

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной  
работы Таваевой А.Ф.:

1. Методики точного расчета временных и стоимостных параметров  
процесса резки и их программная реализация в САПР «СИРИУС»;
2. Методы и алгоритмы для построения маршрута перемещения  
режущего инструмента для номенклатуры типовых деталей с учетом  
выполнения технологических ограничений процесса термической  
резки и их программная реализация в САПР «СИРИУС»

внедрены и используются в ООО «Уралинтех» для  
автоматизированного проектирования управляющих программ при  
выполнении заказов на изготовление деталей из листовых материалов на  
оборудовании с ЧПУ, что позволило сократить время проектирования  
управляющих программ и уменьшить стоимость процесса резки при  
одновременном выполнении технологических ограничений процесса  
термической резки.

Исполнительный директор Мамонтов И.П.

подпись 

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме диссертации**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:**

1. Петунин, А.А. Об оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ при условии непостоянства скорости рабочего хода /А.А. Петунин, **А.Ф. Таваева**// *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №6-1. – С.56-62 (0.42 п.л./0.3 п.л.).
2. **Tavaeva, A.F.** Cost minimizing of cutting process for CNC thermal and water-jet machines /**A.F. Tavaeva**, D.V. Kurennov// *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1690. – 020003 (0.42 п.л./0.35 п.л.) (Scopus, WoS).
3. **Tavaev, A.F.** The cutter speed determination of CNC laser cutting machines for precise calculation of objective function of tool path problem /**A.F. Tavaeva**, A.A. Petunin // *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference*. – 2016. – 7911618 (0.24 п.л./0.19 п.л.) (Scopus, WoS).
4. **Таваева, А.Ф.** Некоторые вопросы оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с числовым программным управлением /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2017. – №9. – С. 147-153 (0.42 п.л./0.35 п.л.).
5. **Таваева, А.Ф.** Вычисление стоимости лазерной резки в задаче оптимизации маршрута режущего инструмента на машинах с ЧПУ/**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2017. – №12. – С. 194-202 (0.54 п.л. / 0.5 п.л.).
6. **Tavaeva, A.F.** Investigation of cutting speed influence on optimality of the tool path route for CNC laser cutting machines /**A.F. Tavaeva**, A.A. Petunin// *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing: proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference*. – 2017 – 8076452 (0.3 п.л./0.25 п.л.) (Scopus, WoS).
7. **Таваева, А.Ф.** Точное вычисление стоимости резки заготовок из листового материала на машине лазерной резки с числовым программным управлением в задаче оптимизации маршрута перемещения

режущего инструмента /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т.6. – №4 (23). – С.298-312 (0.9 п.л./0.85 п.л.).

8. **Tavaeva, A.** A cost minimizing at laser cutting of sheets parts on CNC machines /**A. Tavaeva**, A. Petunin, S. Ukolov, V. Krotov// Communications in Computer and Informational Science. – 2019. – P.422-437 (1 п.л./0.8 п.л.) (Scopus).

9. **Tavaeva, A.F.** Methods of Cutting Cost Minimizing in Problem of Tool Route Optimization for CNC Laser Machines /**A.F. Tavaeva**, А.А. Petunin, E.G. Polishchuk// Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P.447-455 (0.54 п.л./0.47 п.л.) (Scopus).

10. Petunin A. The dependence of actual laser cutting speed on CNC sheet equipment on number of NC program commands for metal grades 1.0114 and AWAIMG / A. Petunin, **A. Tavaeva**// Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol.1527. – Issue 1. – 012013 (0.42 п.л./0.2 п.л.) (Scopus).

#### **Другие публикации:**

11. **Таваева, А.Ф.** Об одном способе минимизации пути режущего инструмента для машин термической резки /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Инженерная мысль машиностроения будущего: труды 2<sup>ой</sup> всероссийской молодежной научно-практической конференции. – 2013. – С. 365-373 (0.54 п.л./0.45 п.л.).

12. **Таваева, А.Ф.** К вопросу о разработке алгоритмов маршрутизации инструмента лазерных машин листовой резки с ЧПУ при использовании «цепной» техники резки /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 3<sup>й</sup> междунар. научной конференции. – 2014. – С.48-51 (0.24 п.л./0.2 п.л.).

13. **Таваева, А.Ф.** Определение условий эффективного применения специальных методов резки при разработке автоматических методов оптимизации маршрута инструмента /**А.Ф. Таваева**// Интеллектуальные

технологии обработки информации и управления: труды 2<sup>ой</sup> международной конференции. – 2014. – С. 225-231 (0.42 п.л.).

14. **Таваева, А.Ф.** К вопросу оптимизации стоимостных параметров лазерной резки на машинах с ЧПУ /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: сборник трудов 2<sup>ой</sup> международной конференции. – 2014. – С. 74-78 (0.3 п.л./0.2 п.л.).

15. **Таваева, А.Ф.** Определение поправочных коэффициентов для скорости рабочих переходов инструмента в целевой функции для задач оптимизации маршрута инструмента /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 4<sup>ой</sup> международной научной конференции. – 2015. – С.48-50 (0.2 п.л./0.15 п.л.).

16. **Tavaeva, A.F.** Standard and special cutting techniques and their effective combination at solving of problem of tool path optimization for CNC thermal cutting machines /**A.F. Tavaeva**, А.А. Petunin// Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: материалы 11<sup>ой</sup> международной конференции. – 2016. – С.22-23 (0.12 п.л./0.09 п.л.).

17. **Таваева, А.Ф.** Определение зависимости изменения рабочей скорости инструмента от числа кадров управляющей программы для машины лазерной резки с ЧПУ /**А.Ф. Таваева**, А.А. Петунин// Информационные технологии и системы: труды 6<sup>й</sup> международной научной конференции. – 2017. – С.303-309 (0.42 п.л./0.3 п.л.).

18. **Tavaeva, A.F.** About effectiveness of special cutting techniques application during development of automatic methods of tool path optimization applied to CNC thermal cutting machines /**A.F. Tavaeva**, А.А. Petunin, V.I. Krotov// Computer science and information technologies: proceedings of 19<sup>th</sup> intern. workshop. – 2017. – P. 221-226 (0.36 п.л./0.3 п.л.).

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики зависимости рабочей скорости режущего инструмента от количества кадров в УП для лазерного CO<sub>2</sub> комплекса с ЧПУ**

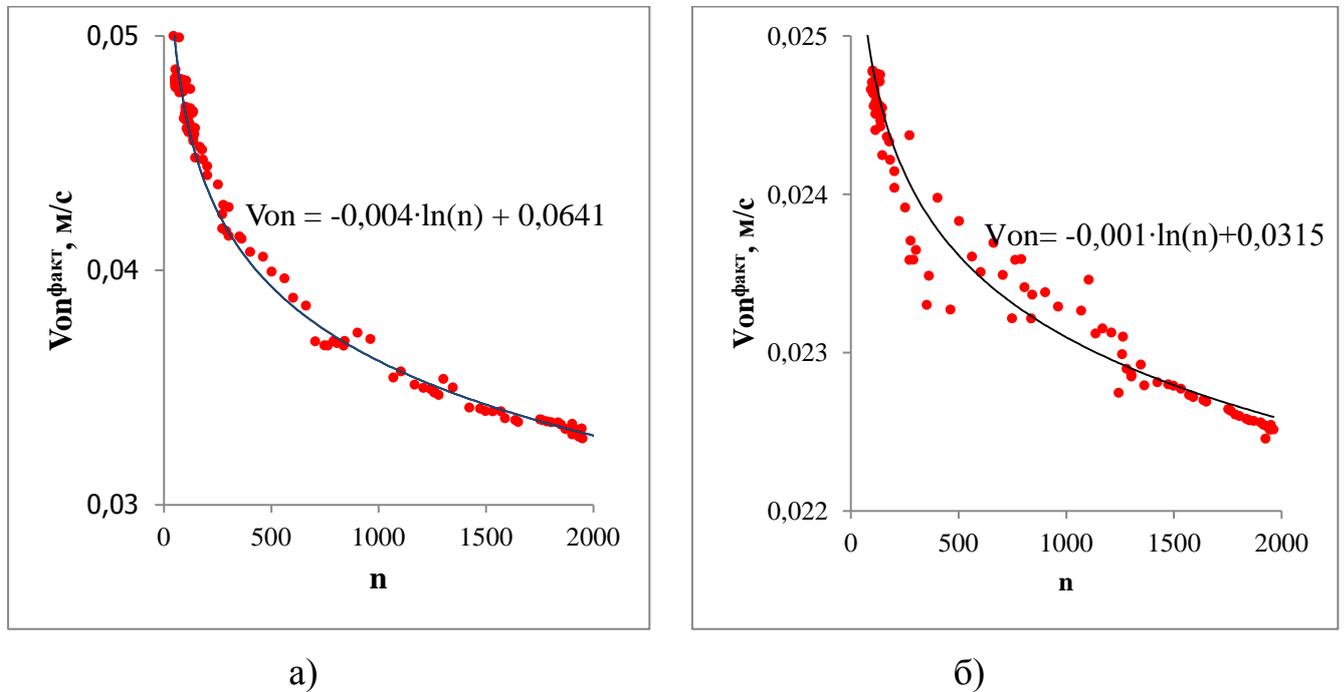


Рисунок В.1 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для АМГЗМ,  $\Delta=2$  мм (а) и АМГЗМ,  $\Delta=3$  мм (б)

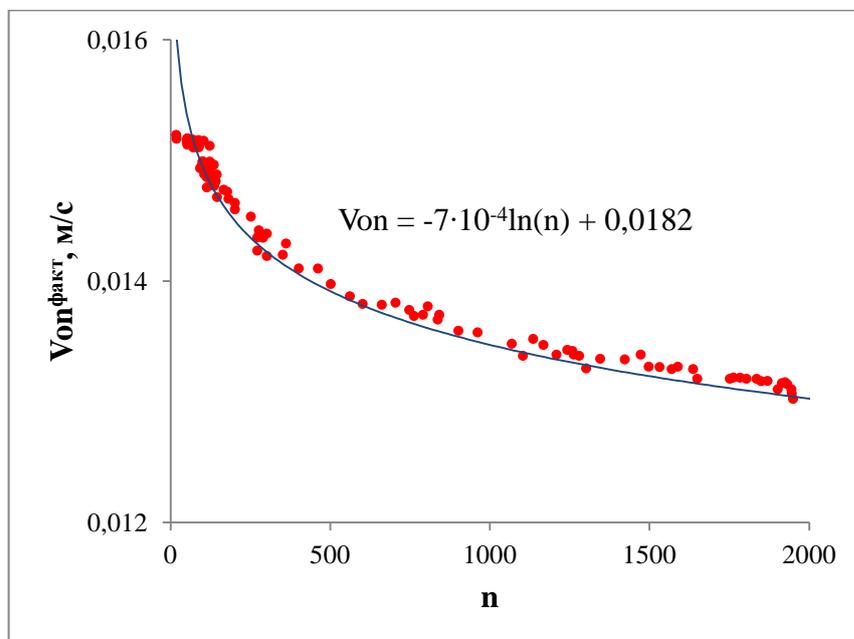
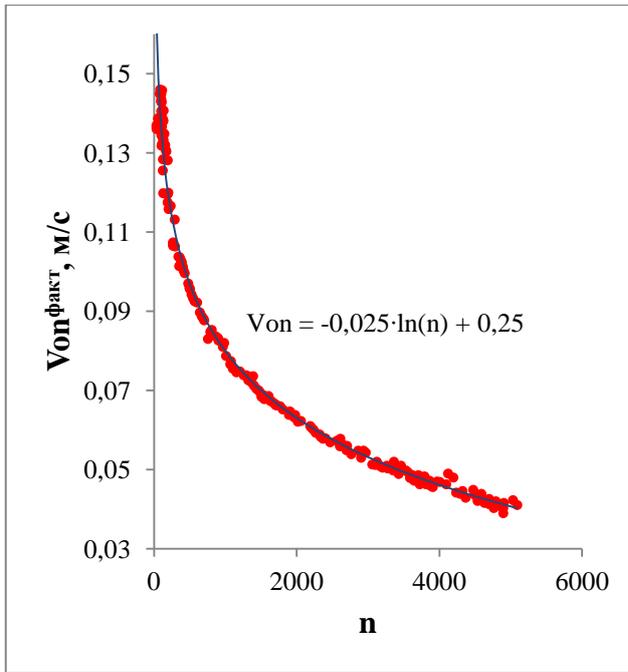
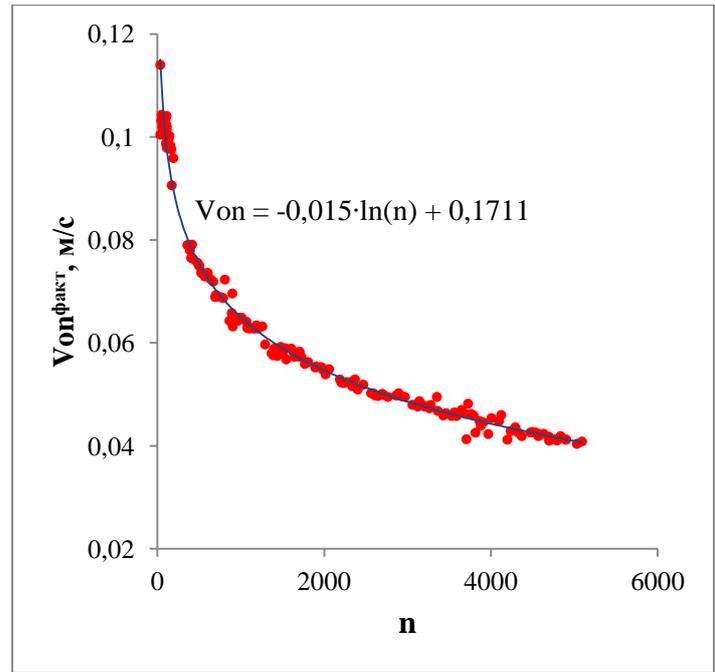


Рисунок В.2 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для АМГЗМ,  $\Delta=5$  мм (б)

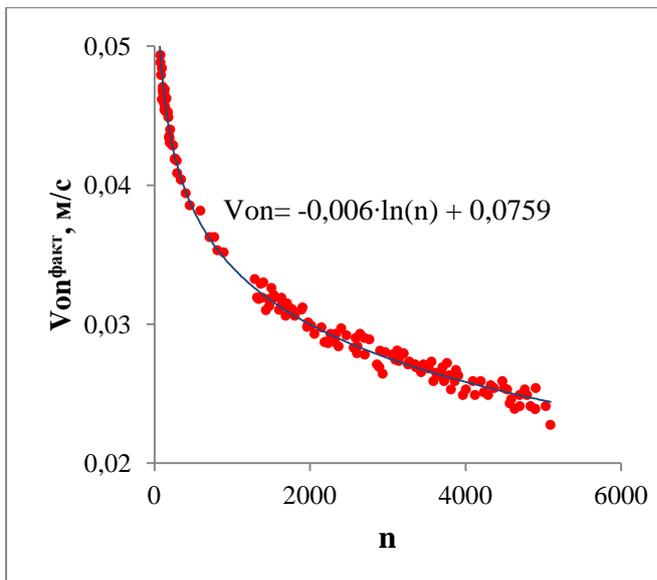


а)

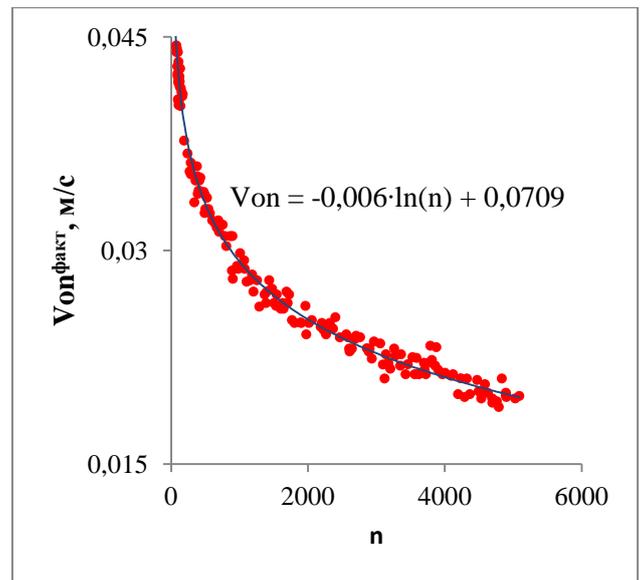


б)

Рисунок В.3 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для 10кп,  $\Delta=1$  мм (а) и 10кп,  $\Delta=2$  мм (б)

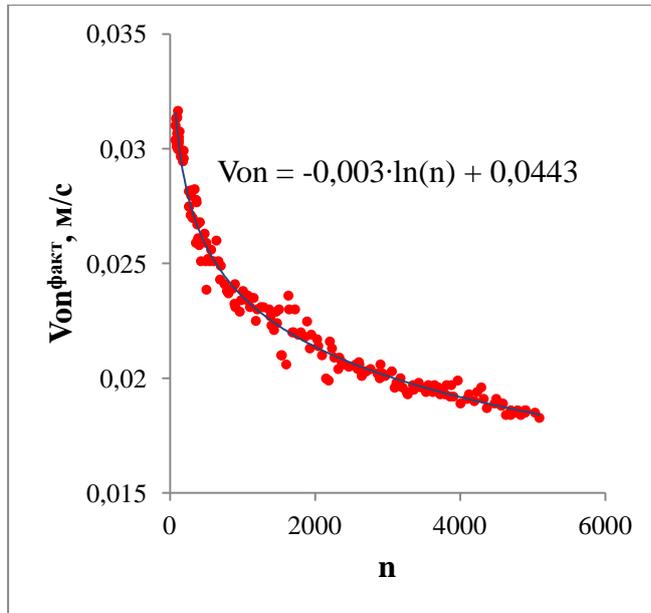


а)

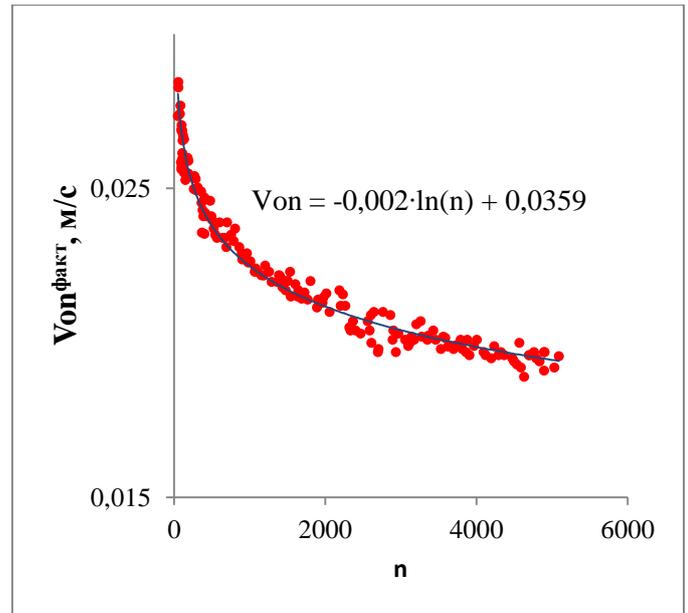


б)

Рисунок В.4 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для 10кп,  $\Delta=3.5$  мм (а) и 10кп,  $\Delta=4$  мм (б)



а)



б)

Рисунок В.5 - Изменение скорости режущего инструмента на рабочем ходе для 10кп,  $\Delta=8$  мм (а) и 10кп,  $\Delta=10$  мм (б)

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Результаты расчета стоимости резки листового материала на лазерном комплексе с ЧПУ**

Таблица Г.1.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №1 - №3 для углеродистой стали марки 10кп

| Марка материала<br>и толщина | Тип<br>резки | $F_{cost}$ ,           | %  | $F_{cost}$ ,           | %  | $F_{cost}$ ,           | %  |
|------------------------------|--------------|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|
|                              |              | руб                    |    | руб                    |    | руб                    |    |
|                              |              | Раскройная<br>карта №1 |    | Раскройная<br>карта №2 |    | Раскройная<br>карта №3 |    |
| 10 кп, $\Delta=1,5$ мм       | спец.        | 508,9839               | 27 | 431,2225               | 11 | 416,5774               | 31 |
|                              | станд.       | 696,8045               |    | 481,6616               |    | 605,375                |    |
| 10 кп, $\Delta=2$ мм         | спец.        | 622,2734               | 27 | 530,8372               | 10 | 512,8056               | 30 |
|                              | станд.       | 846,3889               |    | 587,2905               |    | 736,2705               |    |
| 10 кп, $\Delta=3$ мм         | спец.        | 909,3139               | 26 | 785,298                | 8  | 758,6018               | 29 |
|                              | станд.       | 1221,228               |    | 853,8171               |    | 1064,953               |    |
| 10 кп, $\Delta=4$ мм         | спец.        | 1106,738               | 26 | 950,1451               | 9  | 917,9045               | 30 |
|                              | станд.       | 1499,507               |    | 1042,565               |    | 1305,607               |    |
| 10 кп, $\Delta=5$ мм         | спец.        | 1373,235               | 26 | 1178,21                | 9  | 1138,259               | 30 |
|                              | станд.       | 1863,989               |    | 1294,387               |    | 1622,506               |    |
| 10 кп, $\Delta=8$ мм         | спец.        | 1991,205               | 26 | 1724,833               | 8  | 1666,277               | 29 |
|                              | станд.       | 2673,409               |    | 1868,837               |    | 2331,858               |    |
| 10 кп, $\Delta=10$ мм        | спец.        | 2337,076               | 27 | 1996,056               | 10 | 1928,505               | 31 |
|                              | станд.       | 3196,3                 |    | 2208,894               |    | 2778,675               |    |
| 10 кп, $\Delta=15$ мм        | спец.        | 3743,147               | 26 | 3209,256               | 9  | 3126,05                | 29 |
|                              | станд.       | 5046,067               |    | 3518,091               |    | 4398,434               |    |

Таблица Г.2.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №4 - №6 для углеродистой стали марки 10кп

| Марка материала<br>и толщина | Тип<br>резки | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб    | % |
|------------------------------|--------------|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|---|
|                              |              | Раскройная<br>карта №4 |    | Раскройная<br>карта №5 |    | Раскройная<br>карта №6 |   |
| 10 кп, $\Delta=1,5$ мм       | спец.        | 606,0814               | 30 | 771,8286               | 34 | 4641,112               | 4 |
|                              | станд.       | 865,8802               |    | 1162,361               |    | 4848,636               |   |
| 10 кп, $\Delta=2$ мм         | спец.        | 737,1325               | 30 | 944,8173               | 33 | 5439,608               | 4 |
|                              | станд.       | 1047,122               |    | 1412,03                |    | 5674,03                |   |
| 10 кп, $\Delta=3$ мм         | спец.        | 1065,631               | 29 | 1383,193               | 32 | 7276,653               | 4 |
|                              | станд.       | 1497,145               |    | 2037,3                 |    | 7564,947               |   |
| 10 кп, $\Delta=4$ мм         | спец.        | 1309                   | 29 | 1684,331               | 33 | 9455,288               | 4 |
|                              | станд.       | 1851,847               |    | 2503,33                |    | 9850,861               |   |
| 10 кп, $\Delta=5$ мм         | спец.        | 1628,014               | 29 | 2091,03                | 33 | 11897,3                | 4 |
|                              | станд.       | 2306,019               |    | 3112,798               |    | 12399,4                |   |
| 10 кп, $\Delta=8$ мм         | спец.        | 2337,308               | 29 | 3034,767               | 32 | 15960,86               | 4 |
|                              | станд.       | 3280,236               |    | 4463,211               |    | 16587,28               |   |
| 10 кп, $\Delta=10$ мм        | спец.        | 2793,788               | 30 | 3561,686               | 33 | 21359,11               | 4 |
|                              | станд.       | 3979,72                |    | 5341,825               |    | 22294,84               |   |
| 10 кп, $\Delta=15$ мм        | спец.        | 4414,538               | 29 | 5708,826               | 32 | 30966,73               | 4 |
|                              | станд.       | 6214,219               |    | 8428,647               |    | 32213,06               |   |

Таблица Г.3.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №7 - №10 для углеродистой стали марки 10кп

| Марка материала<br>и<br>толщина | Тип<br>резки | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб     | %  |
|---------------------------------|--------------|------------------------|----|------------------------|----|------------------------|----|-------------------------|----|
|                                 |              | Раскройная<br>карта №7 |    | Раскройная<br>карта №8 |    | Раскройная<br>карта №9 |    | Раскройная<br>карта №10 |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=1,5$ мм       | спец.        | 958,3985               | 18 | 618,8048               | 33 | 636,0237               | 46 | 1358,153                | 19 |
|                                 | станд.       | 1169,722               |    | 924,0016               |    | 1177,361               |    | 1684,01                 |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=2$ мм         | спец.        | 1180,049               | 17 | 757,1031               | 33 | 782,3854               | 45 | 1670,912                | 18 |
|                                 | станд.       | 1418,205               |    | 1120,779               |    | 1425,712               |    | 2041,278                |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=3$ мм         | спец.        | 1746,339               | 14 | 1107,218               | 31 | 1155,872               | 44 | 2468,904                | 16 |
|                                 | станд.       | 2038,196               |    | 1612,297               |    | 2044,203               |    | 2930,722                |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=4$ мм         | спец.        | 2112,742               | 16 | 1349,452               | 32 | 1399,714               | 44 | 2990,444                | 17 |
|                                 | станд.       | 2511,77                |    | 1985,057               |    | 2522,48                |    | 3619,995                |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=5$ мм         | спец.        | 2619,922               | 16 | 1675,658               | 32 | 1735,975               | 44 | 3709,343                | 18 |
|                                 | станд.       | 3125,33                |    | 2469,319               |    | 3139,263               |    | 4508,164                |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=8$ мм         | спец.        | 3836,349               | 14 | 2429,591               | 31 | 2538,509               | 43 | 5424,099                | 16 |
|                                 | станд.       | 4465,704               |    | 3531,627               |    | 4477,089               |    | 6432,25                 |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=10$ мм        | спец.        | 4438,356               | 18 | 2856,43                | 33 | 2943,161               | 46 | 6290,593                | 19 |
|                                 | станд.       | 5376,844               |    | 4244,632               |    | 5406,379               |    | 7773,76                 |    |
| 10 кп,<br>$\Delta=15$ мм        | спец.        | 7196,971               | 15 | 4572,421               | 32 | 4764,016               | 44 | 10181,39                | 16 |
|                                 | станд.       | 8445,242               |    | 6675,421               |    | 8471,246               |    | 12182,28                |    |

Таблица Г.4.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №1 - №8 для сплава АМг3М

| Марка материала<br>и<br>толщина | Тип<br>резки | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %                      | $F_{cost}$ ,<br>руб    | %                      | $F_{cost}$ ,<br>руб | %  | $F_{cost}$ ,<br>руб | %  |
|---------------------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----|---------------------|----|
|                                 |              | Раскройная<br>карта №1 | Раскройная<br>карта №2 | Раскройная<br>карта №3 | Раскройная<br>карта №4 |                     |    |                     |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=1$ мм         | спец.        | 1040,172               | 31                     | 848,9234               | 15                     | 820,4154            | 36 | 1305,165            | 33 |
|                                 | станд.       | 1497,536               |                        | 1003,304               |                        | 1289,941            |    | 1935,017            |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=2$ мм         | спец.        | 1662,252               | 30                     | 1368,891               | 14                     | 1322,891            | 36 | 2071,089            | 32 |
|                                 | станд.       | 2373,301               |                        | 1597,755               |                        | 2047,463            |    | 3050,28             |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=3$ мм         | спец.        | 5023,941               | 29                     | 4214,663               | 12                     | 4072,672            | 33 | 6148,597            | 31 |
|                                 | станд.       | 7033,662               |                        | 4790,966               |                        | 6089,594            |    | 8917,665            |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=5$ мм         | спец.        | 17148,56               | 26                     | 14820,54               | 8                      | 14318,37            | 29 | 20268,77            | 29 |
|                                 | станд.       | 23153,84               |                        | 16125,23               |                        | 20177,7             |    | 28560,09            |    |
| X                               |              | Раскройная<br>карта №5 | Раскройная<br>карта №6 | Раскройная<br>карта №7 | Раскройная<br>карта №8 |                     |    |                     |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=1$ мм         | спец.        | 1581,115               | 37                     | 12827,78               | 5                      | 1885,585            | 27 | 1274,183            | 37 |
|                                 | станд.       | 2507,649               |                        | 13502,36               |                        | 2563,695            |    | 2015,093            |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=2$ мм         | спец.        | 2530,012               | 36                     | 19644,1                | 5                      | 3041,335            | 25 | 2037,381            | 36 |
|                                 | станд.       | 3974,192               |                        | 20652,99               |                        | 4053,416            |    | 3187,812            |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=3$ мм         | спец.        | 7659,126               | 35                     | 53249,51               | 5                      | 9368,431            | 22 | 6156,629            | 35 |
|                                 | станд.       | 11772,36               |                        | 55817,18               |                        | 11937,4             |    | 9402,674            |    |
| АМг3М,<br>$\Delta=5$ мм         | спец.        | 26170,92               | 32                     | 143676,5               | 4                      | 32964,88            | 15 | 20965,53            | 32 |
|                                 | станд.       | 38688,16               |                        | 149504,3               |                        | 38786,89            |    | 30650,9             |    |

Таблица Г.5.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №9 и №10 для сплава АМг3М

| Марка материала и толщина | Тип резки | $F_{cost}$ , руб    | %  | $F_{cost}$ , руб     | %  |
|---------------------------|-----------|---------------------|----|----------------------|----|
|                           |           | Раскройная карта №9 |    | Раскройная карта №10 |    |
| АМг3М, $\Delta=1$ мм      | спец.     | 1258,971            | 52 | 2692,018             | 28 |
|                           | станд.    | 2598,557            |    | 3735,496             |    |
| АМг3М, $\Delta=2$ мм      | спец.     | 2027,999            | 51 | 4336,827             | 27 |
|                           | станд.    | 4102,794            |    | 5903,269             |    |
| АМг3М, $\Delta=3$ мм      | спец.     | 6229,816            | 48 | 13321,69             | 23 |
|                           | станд.    | 12044,98            |    | 17344,23             |    |
| АМг3М, $\Delta=5$ мм      | спец.     | 21823,12            | 44 | 46645,99             | 17 |
|                           | станд.    | 38911,53            |    | 56001,26             |    |

Таблица Г.6.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №1 - №4 для сплава 12Х18Н10Т

| Марка материала и толщина   | Тип резки | $F_{cost}$ , руб    | %  | $F_{cost}$ , руб    | % | $F_{cost}$ , руб    | %  | $F_{cost}$ , руб    | %  |
|-----------------------------|-----------|---------------------|----|---------------------|---|---------------------|----|---------------------|----|
|                             |           | Раскройная карта №1 |    | Раскройная карта №2 |   | Раскройная карта №3 |    | Раскройная карта №4 |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=1$ мм  | спец.     | 1308,214            | 26 | 1124,815            | 9 | 1086,653            | 30 | 1546,325            | 29 |
|                             | станд.    | 1770,535            |    | 1231,745            |   | 1541,962            |    | 2185,218            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=2$ мм  | спец.     | 2231,845            | 26 | 1916,098            | 9 | 1851,179            | 30 | 2650,516            | 29 |
|                             | станд.    | 3032,057            |    | 2104,065            |   | 2639,058            |    | 3755,526            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=3$ мм  | спец.     | 4021,871            | 26 | 3444,897            | 9 | 3328,314            | 30 | 4798,581            | 29 |
|                             | станд.    | 5486,449            |    | 3797,174            |   | 4772,054            |    | 6819,855            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=5$ мм  | спец.     | 10333,08            | 26 | 8942,717            | 8 | 8639,584            | 29 | 12187,68            | 29 |
|                             | станд.    | 13923,42            |    | 9709,181            |   | 12138,08            |    | 17145,76            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=8$ мм  | спец.     | 43297               | 23 | 38446,95            | 4 | 37137,26            | 25 | 49429,74            | 27 |
|                             | станд.    | 56403,01            |    | 40166,74            |   | 49479,91            |    | 67574,79            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=10$ мм | спец.     | 104034,9            | 22 | 93154,02            | 3 | 89975,65            | 24 | 117461,1            | 25 |
|                             | станд.    | 133982,1            |    | 96102,89            |   | 117791,1            |    | 158965,7            |    |

Таблица Г.7.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №5 - №8 для сплава 12Х18Н10Т

| Марка материала и толщина   | Тип резки | $F_{cost}$ , руб    | %  | $F_{cost}$ , руб    | % | $F_{cost}$ , руб    | %  | $F_{cost}$ , руб    | %  |
|-----------------------------|-----------|---------------------|----|---------------------|---|---------------------|----|---------------------|----|
|                             |           | Раскройная карта №5 |    | Раскройная карта №6 |   | Раскройная карта №7 |    | Раскройная карта №8 |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=1$ мм  | спец.     | 1991,885            | 33 | 11099,12            | 4 | 2501,284            | 16 | 1595,753            | 32 |
|                             | станд.    | 2956,143            |    | 11559,7             |   | 2965,205            |    | 2343,495            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=2$ мм  | спец.     | 3401,466            | 33 | 19486,27            | 4 | 4261,01             | 16 | 2726,205            | 32 |
|                             | станд.    | 5065,449            |    | 20310,2             |   | 5087,758            |    | 4018,964            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=3$ мм  | спец.     | 6133,103            | 33 | 36166,63            | 4 | 7660,671            | 17 | 4917,721            | 33 |
|                             | станд.    | 9170,089            |    | 37727,43            |   | 9223,271            |    | 7282,221            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=5$ мм  | спец.     | 15768,17            | 32 | 85291,69            | 4 | 19891,44            | 15 | 12629,38            | 32 |
|                             | станд.    | 23261,32            |    | 88707,19            |   | 23305,08            |    | 18420,45            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=8$ мм  | спец.     | 66121,93            | 30 | 270902              | 3 | 85564,23            | 8  | 52797,26            | 29 |
|                             | станд.    | 94070,86            |    | 278558,1            |   | 93198,77            |    | 73905,27            |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=10$ мм | спец.     | 158914,3            | 29 | 581959,7            | 2 | 207350,7            | 6  | 126760,6            | 28 |
|                             | станд.    | 223325,3            |    | 595055,1            |   | 220387,9            |    | 174966,2            |    |

Таблица Г.8.- Значения  $F_{cost}$  для раскройных карт №9 и №10 для сплава 12Х18Н10Т

| Марка материала<br>и толщина | Тип<br>резки | $F_{cost}$ , руб       | %  | $F_{cost}$ , руб        | %  |
|------------------------------|--------------|------------------------|----|-------------------------|----|
|                              |              | Раскройная<br>карта №9 |    | Раскройная карта<br>№10 |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=1$ мм   | спец.        | 1656,817               | 44 | 3539,983                | 17 |
|                              | станд.       | 2977,083               |    | 4274,323                |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=2$ мм   | спец.        | 2823,33                | 45 | 6033,841                | 18 |
|                              | станд.       | 5110,327               |    | 7346,088                |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=3$ мм   | спец.        | 5078,002               | 45 | 10854,31                | 19 |
|                              | станд.       | 9269,226               |    | 13335,33                |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=5$ мм   | спец.        | 13165,47               | 44 | 28139,21                | 16 |
|                              | станд.       | 23372,79               |    | 33631,51                |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=8$ мм   | спец.        | 56418,32               | 39 | 120537,8                | 10 |
|                              | станд.       | 92935,36               |    | 133627,9                |    |
| 12Х18Н10Т<br>$\Delta=10$ мм  | спец.        | 136555,1               | 38 | 291711                  | 8  |
|                              | станд.       | 219320,5               |    | 315256,1                |    |

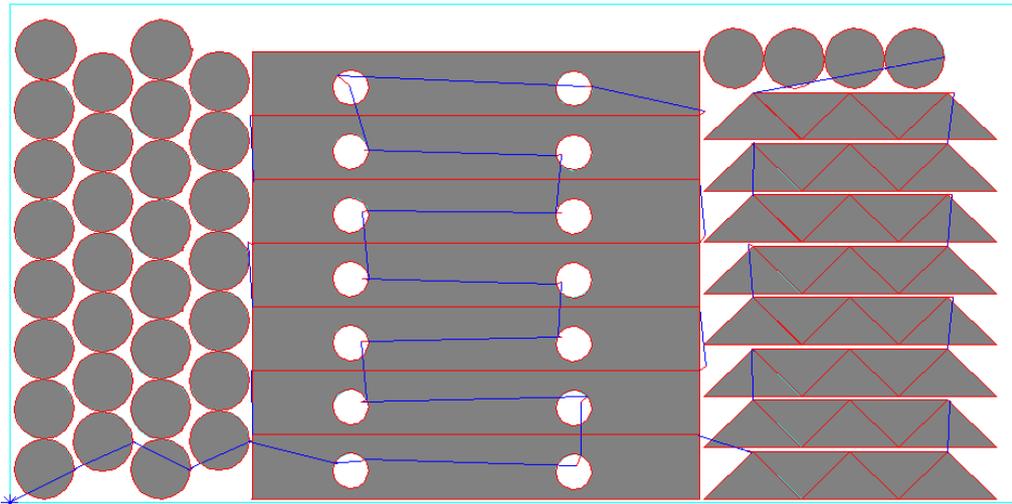


Рисунок Г.1. – Раскройная карта №1

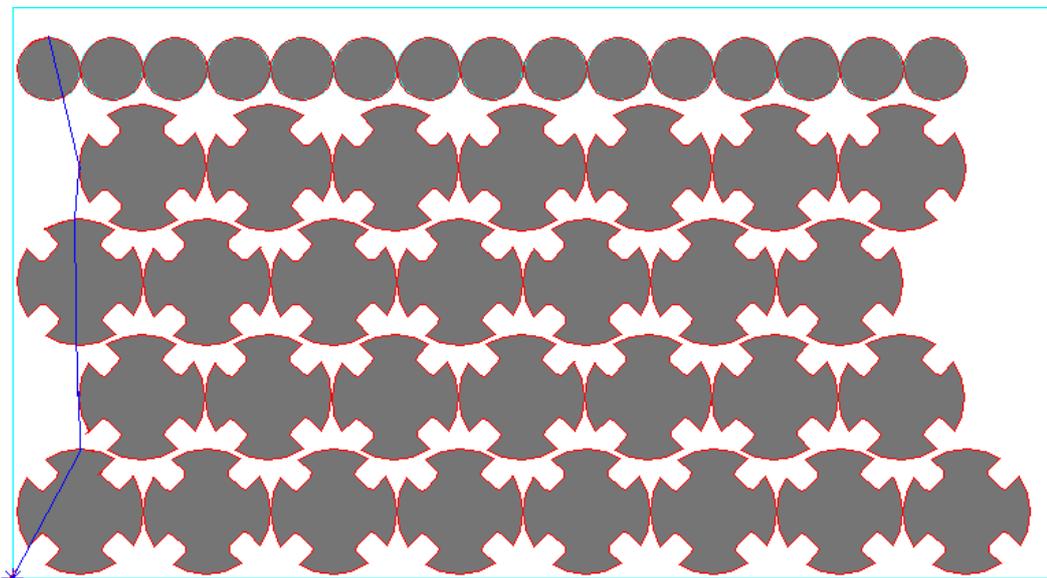


Рисунок Г.2. – Раскройная карта №2

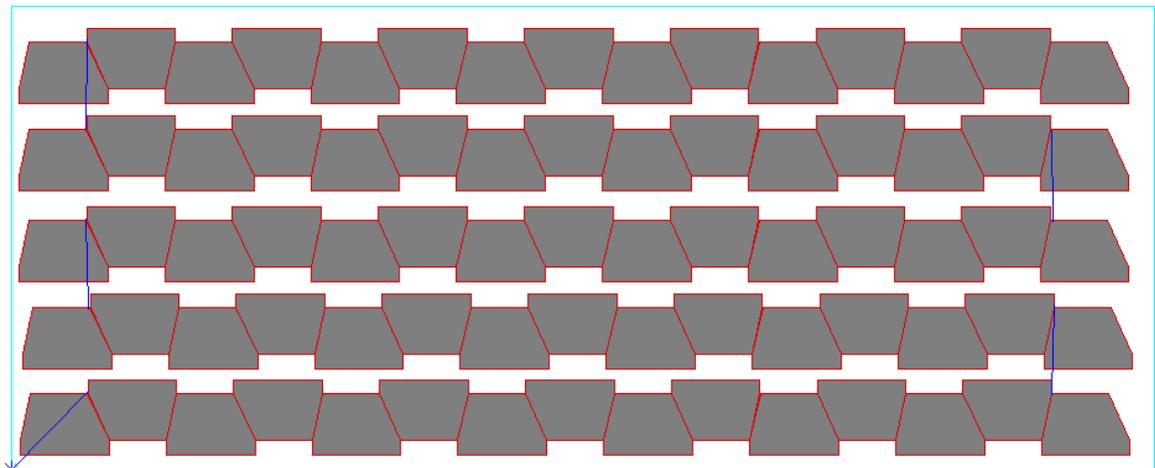


Рисунок Г.3. – Раскройная карта №3

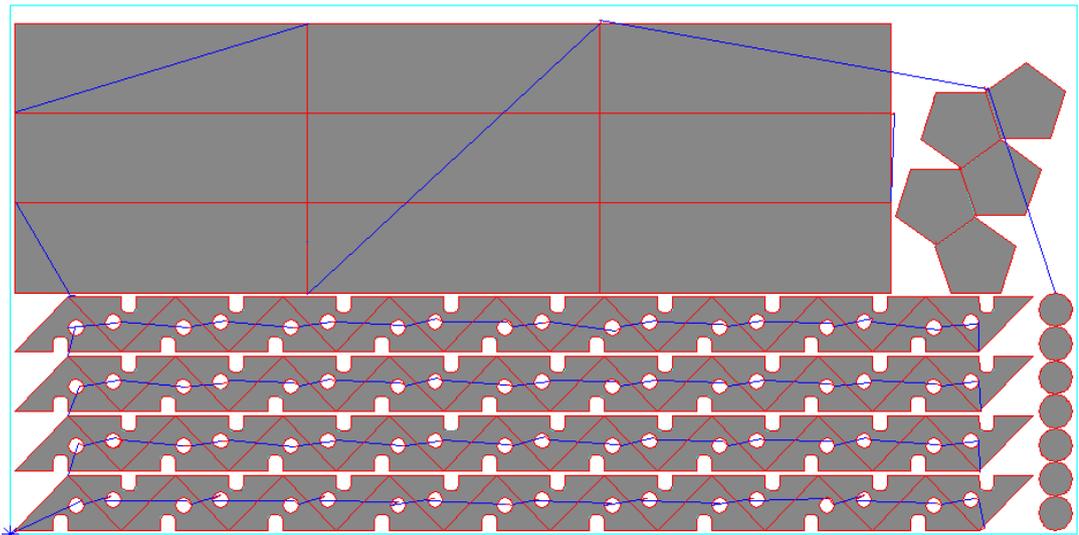


Рисунок Г.4. – Раскройная карта №4

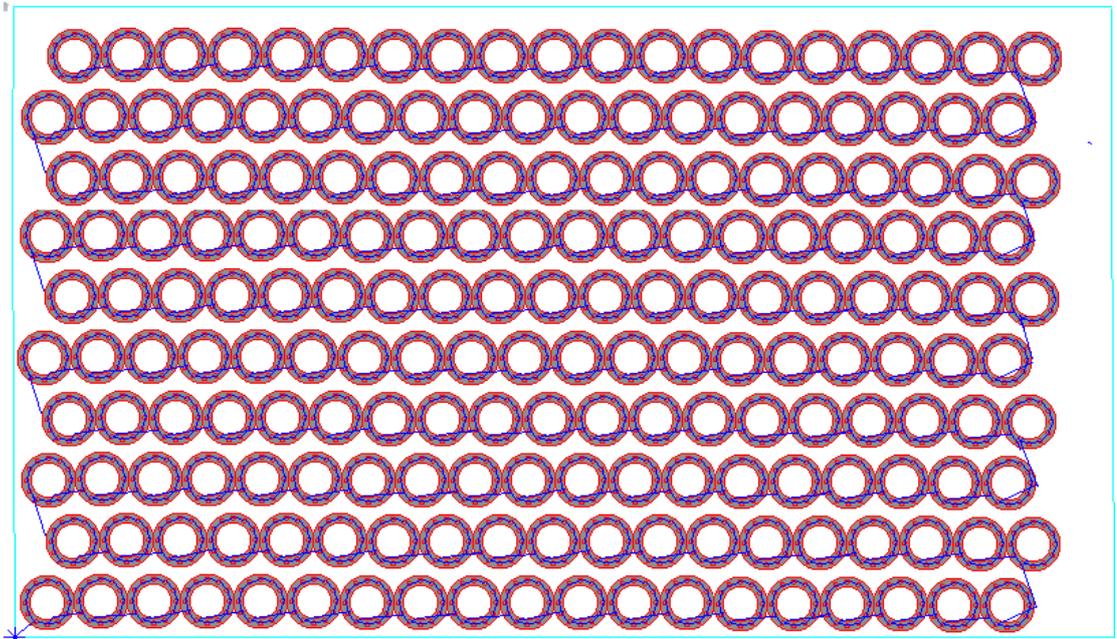


Рисунок Г.5. – Раскройная карта №6

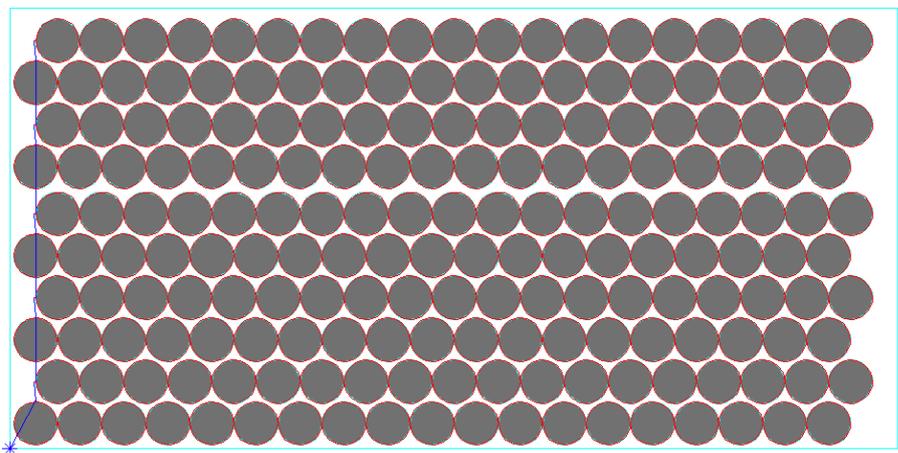


Рисунок Г.6. – Раскройная карта №7

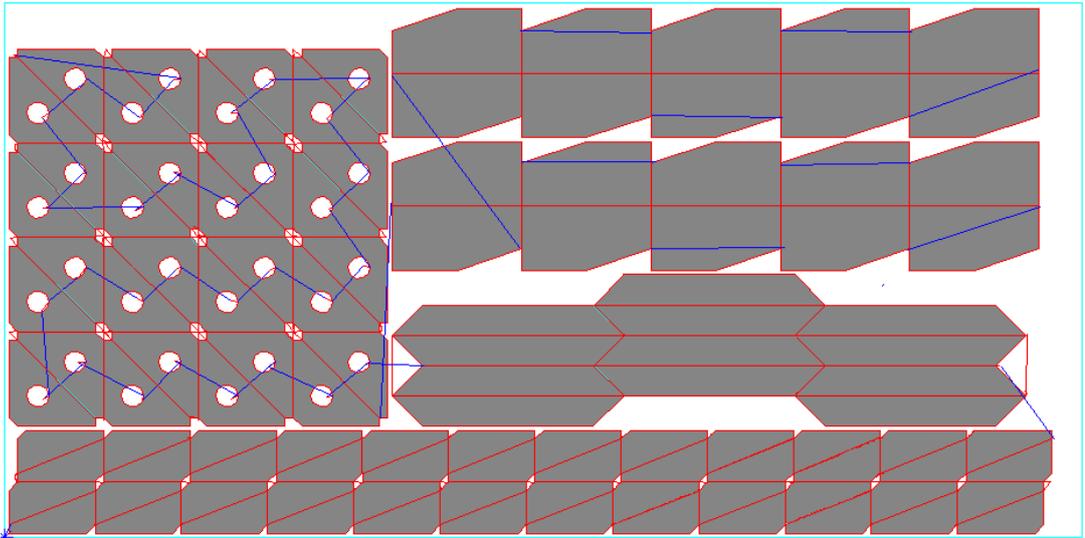


Рисунок Г.7. – Раскройная карта №8

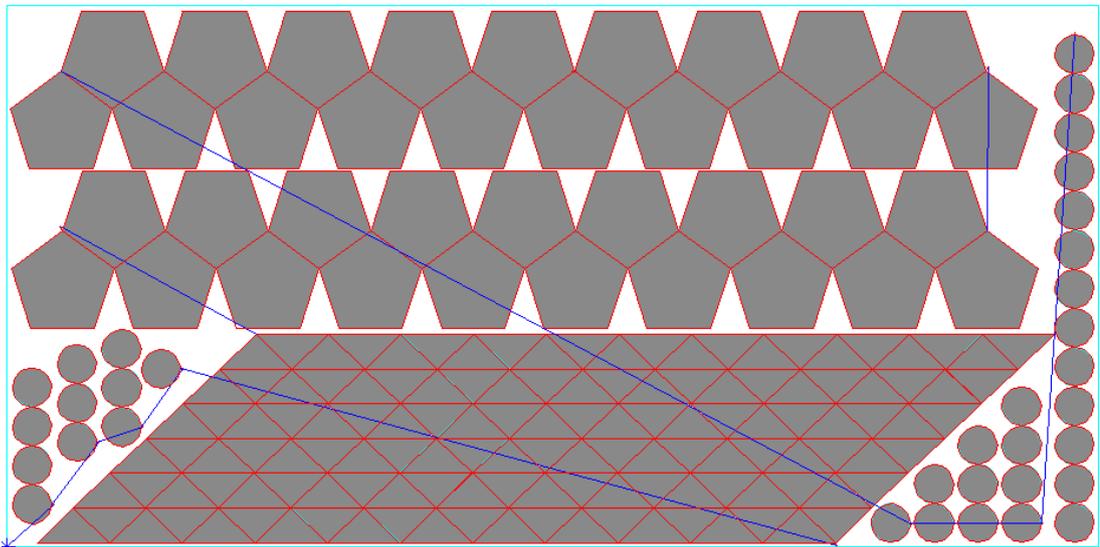


Рисунок Г.8. – Раскройная карта №9

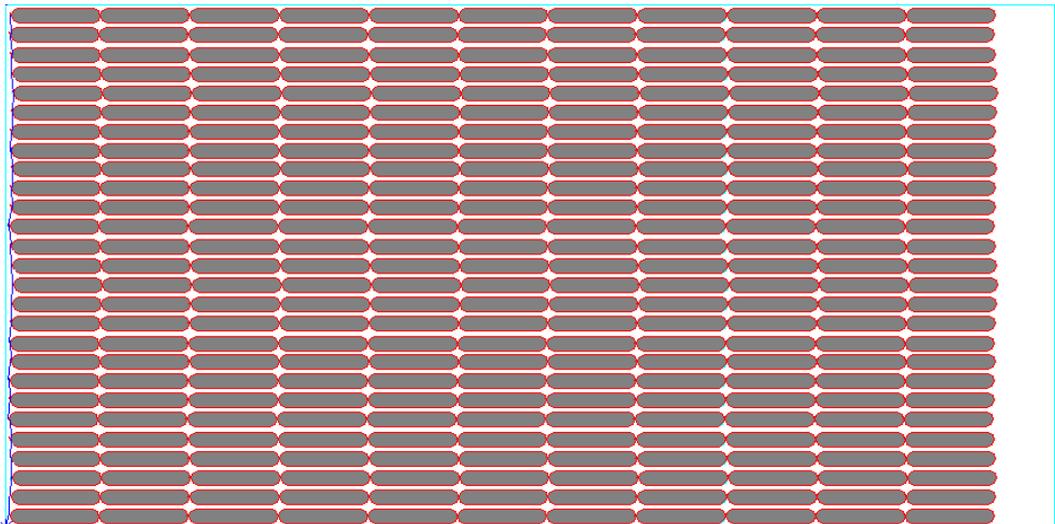


Рисунок Г.9. – Раскройная карта №10