

## АЛГОРИТМ УПЛОТНЕНИЯ КАРТЫ РАСКРОЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

**Мурзакаев Р. Т.,**

к. т. н., доцент кафедры ИТАС Пермского  
национального исследовательского политехнического университета  
RTmurz@mail.ru

**Лялин Д. А.,**

аспирант кафедры АТП Березниковского филиала (БФ)  
Пермского национального исследовательского политехнического университета  
lialin3yo@rambler.ru

**Аннотация.** *Описаны проблемы получения карт оптимального раскроя листовых материалов, возникающие при использовании широко распространенных программных пакетов. Предложен оригинальный алгоритм уплотнения на основе представления о выкройках как двумерных телах с ненулевой массой, подвергающихся гравитационным воздействиям, позволяющий на 5-12% улучшить качество укладки.*

**Ключевые слова:** *листовой материал, раскрой, оптимизация.*

## ALGORITHMS OF CUTTING CARD COMPRESSION BY TWO-DIMENSIONAL GRAVITY SIMULATION MODEL

**Murzakaev R. T.,**

candidate of technical science, assoc. prof. on information technology  
and automation systems department in Perm national polytechnic research university.

**Lyalin D. A.,**

post-graduate on automation department in Berezniki branch  
of Perm national polytechnic research university.

**Abstract.** *The problems of obtaining maps of optimal cutting of sheet materials arising in use of common software packages are described. An original algorithm for compression based on the idea of patterns as a two-dimensional bodies with non-zero mass, exposed to gravitational effects is given. It allows to improve the quality of stacking for 5-12%.*

**Keywords:** *sheeting, cutting, optimization.*

**Д**ля предприятий, использующих машины термической резки, лазерной, гидроабразивной, и прочих видов резки металла внедрение современных информационных технологий – задача из числа самых актуальных. Сокращение сроков подготовки программ раскроя, оптимальное размещение деталей на листе, меньший расход материала решающим образом повлияют на себестоимость и качество выпускаемой продукции. Одной из технологических операций, автоматизация, которой особенно выгодна и широко распространена – раскрой листового материала.

Во многом такая эффективность достигается за счет формирования рациональных карт раскроя, что, в свою очередь, зависит от выбранного метода и алгоритма раскроя или упаковки.

Проблемам раскроя и упаковки (Р-У) посвящено множество публикаций и диссертаций как отечественных, так и зарубежных школ, например, [1, 2]. Большая часть из такого рода работ отражает подходы к решению тривиальных задач раскроя. В частности, линейного и прямоугольного вида. Вопросам же раскроя деталей сложной формы посвящено меньшее количество публикаций, например, [3, 4], что еще

больше повышает востребованность методов решения данной проблемы. Раскрой и упаковку сложных деталей принято называть нестингом.

Среди задач класса Р-У вопрос нестинга менее всего изучен, что обусловлено сложностью фигур, с учетом которой оптимальный план раскроя или упаковки просто не может быть найден. Ведь даже при самой плотной упаковке деталей безотходного производства не удастся достигнуть, так как детали могут быть самой разной формы, от которой напрямую зависит плотность упаковки.

Следует отметить, что ввиду NP-трудности задач Р-У, не существует алгоритмов решения задач нестинга, позволяющих получать максимальный коэффициент упаковки.

Еще больше затруднений возникает, когда при размещении деталей требуется учитывать технологические ограничения. К таковым, в частности относят петли, обеспечивающие качественную обработку углов детали, и перемычки, соединяющие между собой детали малого размера.

Рынок программных систем раскроя предлагает большой ассортимент продукции, что обусловлено востребованностью таких систем. Обобщенно, можно выделить следующие особенности систем раскроя:

1. модульный подход к разработке;
2. ориентация на конкретного заказчика;
3. интуитивно понятный интерактивный интерфейс;
4. импорт DXF;

5. формирование задания на раскрой;
6. автоматическое размещение на листах (формирование карты раскроя);
7. автоматическое отслеживание отступов и перемычек;
8. формирование спецификации раскроя;
9. экспорт карты раскроя в DXF.

Ряд систем учитывают технологические особенности производства (например, зазоры, петли, направление проката).

Однако следует отметить, что рост количества разрабатываемых систем раскроя свидетельствует о том факте, что не может быть универсальной системы, учитывающей все факторы отдельно взятого производства.

Поскольку истоком решения задач Р-У является труд отечественного ученого П.Л. Чебышева [5], неудивительно, что российский рынок автоматизированных систем предлагает весьма богатый выбор программ раскроя. Среди известных систем можно выделить САМ-систему «Техтран», программу T-FLEX/Раскрой и Astra S-Nesting. Среди зарубежных аналогов можно выделить программное обеспечение автоматического нестинга NestFab.

Проанализировав ряд статей о данных системах раскроя [2, 3, 4], а также официальные сайты разработчиков [7, 8, 9, 10], получен перечень важных для сравнения с разрабатываемой программной системой характеристик. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Анализ характеристик автоматизированных систем раскроя

Характеристика	Техтран	T-FLEX / Раскрой	Astra S-Nesting	NestFab
Создание деталей на основе макросов	+	-	-	-
Учет технологических ограничений	+	+	+	+
Ручное редактирование карты раскроя	+	+	+	-
Выбор альтернативного варианта карты раскроя	-	-	-	+
Учет делового отхода	+	+	+	-
Наличие демо-версии на сайте производителя	-	-	+	+

Самым главным отличием программных систем друг от друга является применение различных между собой алгоритмов формирования карт раскроя и управляющих программ резки. Именно от алгоритмов, в конечном счете, зависит экономия материалов.

Для компенсации недостатков вышеперечисленных систем, авторами предложен алгоритм, позволяющий проектировать карты раскроя с высоким коэффициентом раскроя за допустимое время с учетом особенностей листов, деталей, технологических ограничений.

При создании алгоритма раскроя-упаковки материала в рассмотрение попадали не только прямоугольные детали, но и фигурные, в том числе невыпуклые. Форма листа материала может быть отличной от прямоугольной, таким образом, создаются благоприятные условия для применения накопленных на предприятии технологических остатков и деловых отходов от «первоначального» раскроя. Алгоритм раскроя-упаковки материалов обладает свойством универсальности и направлен на решение задачи раскроя листового материала в общей постановке.

В алгоритме использованы следующие 4 критерия для оптимизации раскроя:

1. К1 - коэффициент раскроя – отношение суммарной площади деталей на листе к общей площади листа [6];
2. К2 - коэффициент делового остатка – отношение площади делового остатка листа к общей площади листа;
3. К3 - коэффициент расхода материала – дополнение до единицы коэффициента делового остатка;
4. К4 - коэффициент относительной плотности размещения – отношение суммарной площади деталей к разности между общей площадью листа и площадью делового остатка.

Блок-схема алгоритма раскроя-упаковки приведена на рис. 1.

Алгоритм раскроя-упаковки материала имеет следующие особенности:

1. распознавание и использование геометрических особенностей объектов-деталей: выпуклые и невыпуклые фигуры, внутренние контуры деталей;

2. возможность использования делового остатка производства;
3. учет и использование объектов-деталей одного типа: попарная компоновка, группировка однотипных деталей;
4. оптимальное конструирование технологических зазоров, точек входа-выхода, «петель», перемычек между деталями и других вспомогательных технологических объектов;
5. возможность параллельного выполнения частей алгоритмов.

Работа программной системы, реализующей указанный алгоритм, включает набор следующих шагов:

1. Обработка входных данных. Данный этап предполагает работу оператора со справочником «Входимость деталей». При работе со справочником доступны следующие функции:

- а. добавление чертежей деталей;
- б. удаление чертежей деталей;
- в. просмотр чертежей деталей;
- г. редактирование количества деталей;
- д. создание деталей на основе макросов;
- е. импорт деталей в формате DXF.

2. Выбор станка. При выборе типа станка на карте раскроя автоматически учитываются технологические особенности данного станка.

3. Выбор режима работы. Доступно два режима работы, которые могут выполняться после автоматического размещения деталей:

4. автоматическое уплотнение на всех листах;
5. применение уплотнения к отдельным областям карт раскроя.

6. Задание на раскрой. Программа организует взаимодействие различных объектов, задействованных в процессе раскроя листового материала. Из деталей, которые необходимо изготовить, формируется задание на раскрой. Затем в задание на раскрой включаются листы для изготовления деталей. Программа обеспечивает возможность автоматического и ручного размещения деталей задания на раскрой на листах. При этом отслеживается количество неразмещенных деталей и возможность изготовления детали из выbranного листа. При этом оператор может самосто-

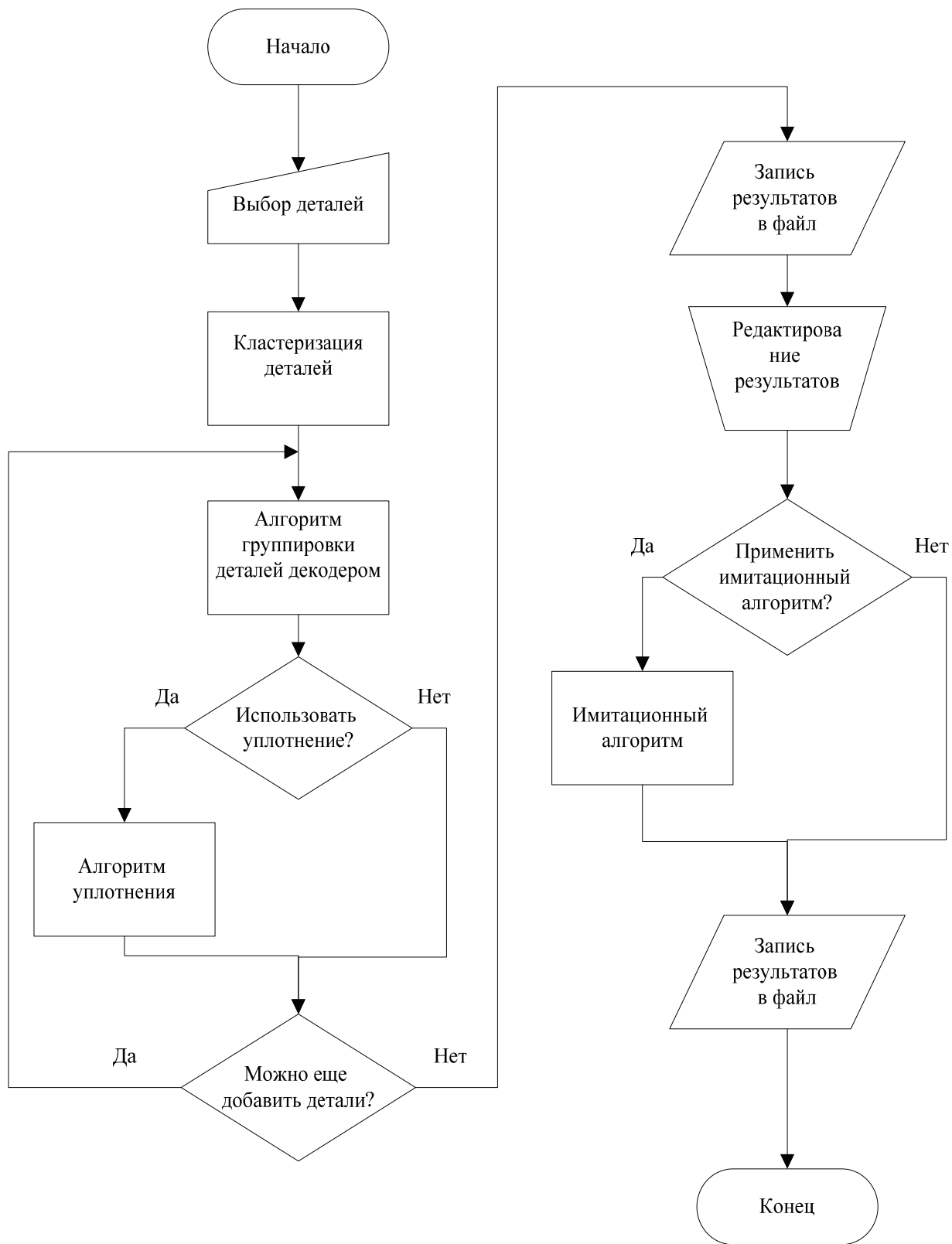


Рис. 1. Блок-схема алгоритма раскроя-упаковки

тельно удалить из задания ненужные элементы или добавить новые.

7. Формирование карты раскроя. На основе задания на раскрой программной системы формирует карту раскроя. По умолчанию предлагается рациональная карта раскроя, однако пользователю предлагается самостоятельно выбрать наиболее приемлемый для него вариант упаковки (программа сохраняет варианты карты раскроя до достижения наиболее рационального варианта).

8. Формирование итогового протокола. Завершив процесс формирования карты раскроя, пользователю предлагается просмотреть информацию о выполненной работе. Протокол по раскрою можно экспортировать в формат PDF и распечатать на принтере.

9. Экспорт в КОМПАС-3D. Выполнив шаги 1-6, оператор АРМ может произвести экспорт карты раскроя и деловых отходов в файлы формата DXF.

Программа уплотнения (пп. 4 и 5) включает дополнительные и вспомогательные алгоритмы и эвристические правила, целью которых является улучшение решения, получаемого алгоритмом раскроя материала, а так же выполнение некоторых технологических требований и условий. В программе закладываются действия (операции), которые алгоритму необходимо выполнить. На данный момент реализовано 19 действий, позволяющих настраивать процедуру уплотнения:

1. shakeX(time, delay, force, yforce) – перемещение вправо влево, это симметричное изменение точки гравитации относительно центра стакана по оси OX на расстояние force, с задержкой delay. Данная операция выполняется time итераций мира, и гравитация по оси OY равно yforce;
2. shakeY(time, delay, force, xforce) – перемещение вверх вниз, это изменение точки гравитации симметрично относительно центра стакана по оси OY на расстояние force, с задержкой delay. Данная операция выполняется time итераций мира, и гравитация по оси OX равно xforce;
3. rotate(time, velocity) – поворот листа со скоростью velocity. Время выполнения операции равно time итераций мира. Если velocity отрицательна, поворот осуществляется против часовой стрелки;
4. rotate(angle, velocity) – поворот листа на угол angle, со скоростью velocity;
5. rotate(delay, velocity) – поворот листа со скоростью velocity за время delay. То есть лист совершает поворот, пока не истечет время delay. Если velocity отрицательна, поворот осуществляется против часовой стрелки;
6. applyForceDown(time, force) – перемещение точки гравитации вниз на расстояние force. Время выполнения операции равно time итераций мира;
7. applyForceUp(time, force) – перемещение точки гравитации вверх на расстояние force. Время выполнения операции равно time итераций мира;
8. applyForceLeft(time, force) – перемещение точки гравитации влево на расстояние force. Время выполнения операции равно time итераций мира;
9. applyForceRight(time, force) – перемещение точки гравитации вправо на расстояние force. Время выполнения операции равно time итераций мира;
10. rotateDetail(time, velocity) – поворот всех деталей со скоростью velocity. Если velocity отрицательна, поворот осуществляется против часовой стрелки. Время выполнения операции равно time итераций мира;
11. rotateDetail(time, index, velocity) – поворот детали с индексом index со скоростью velocity. Если velocity отрицательна, поворот осуществляется против часовой стрелки. Время выполнения операции равно time итераций мира;
12. tracDetail(time, point\_to, force) – притяжение деталей к точке point\_to с силой force;
13. tracDetail(time, index, point\_to, force) – притяжение детали с индексом index к точке point\_to с силой force;
14. applyGravityChange(time, function\_count, dx) – изменение положения точки гравитации по заданной функции function\_count, с шагом dx. Внутри данной операции есть набор функций изменения положения точки гравитации. Каждая функция имеет свой номер. При необходимости можно добавить свои функции. Время выполнения операции равно time итераций мира;

15. `applyTracChange(time, function_count, dx, force)` – изменение положения точки притяжения по заданной функции `function_count`, с шагом `dx`. Внутри данной операции есть набор функций изменения положения точки гравитации. Каждая функция имеет свой номер. При необходимости можно добавить свои функции;
16. `randomGravity(delay)` – изменение положения точки гравитации случайным образом в течении времени `delay`;
17. `randomGravity(time, delay, minx, maxx, miny, maxy)` – изменение положения точки гравитации случайным образом в течении времени `time`, с задержкой `delay`. Случайность положения точки ограничена параметрами `minx`, `maxx` - минимальная и максимальная координата X, `miny`, `maxy` – минимальная и максимальная координата Y. Время выполнения операции равно `time` итераций мира;
18. `setDelay(delay)` – ожидание алгоритма. На детали действуют все силы, кроме сторонних, применимых в других операциях. Не распространяется на силы, применяемые к листу;
19. `setDefaultGravity(gravity)` – установка положения точки гравитации по умолчанию в точку `gravity`. Это позволяет улучшить коэффициент использования материала после начальной укладки, при которой не учитывается сложная форма деталей (рис. 2).  
Более подробное описание процесса уплотнения выглядит следующим образом:
  1. сортировка деталей по координате левой нижней точки. Данный шаг позволяет сначала совершить попытку сдвига крайних деталей, таким образом, они могут освободить место для последующих деталей. В итоге, цикл сдвига будет состоять из меньшего числа итераций;
  2. последовательный сдвиг по одной детали влево. Остановка процесса в том случае, если ни одна деталь больше не может быть сдвинута;
  3. последовательный сдвиг по одной детали вниз. Остановка процесса в том случае, если ни одна деталь больше не может быть сдвинута;
  4. если на шаге 3 были произведены какие-то действия, переход к шагу 2. Иначе переход на шаг 5.
  5. конец работы алгоритма.

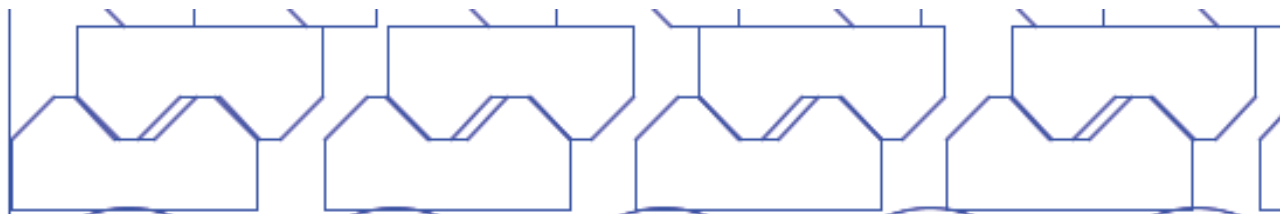


Рис. 2. Пример начальной укладки деталей сложной формы

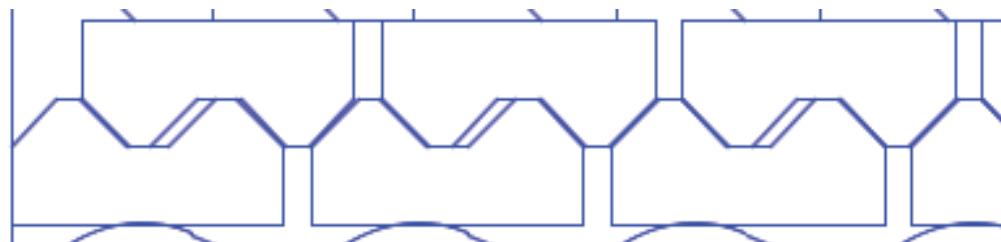


Рис. 3. Пример уплотнения деталей



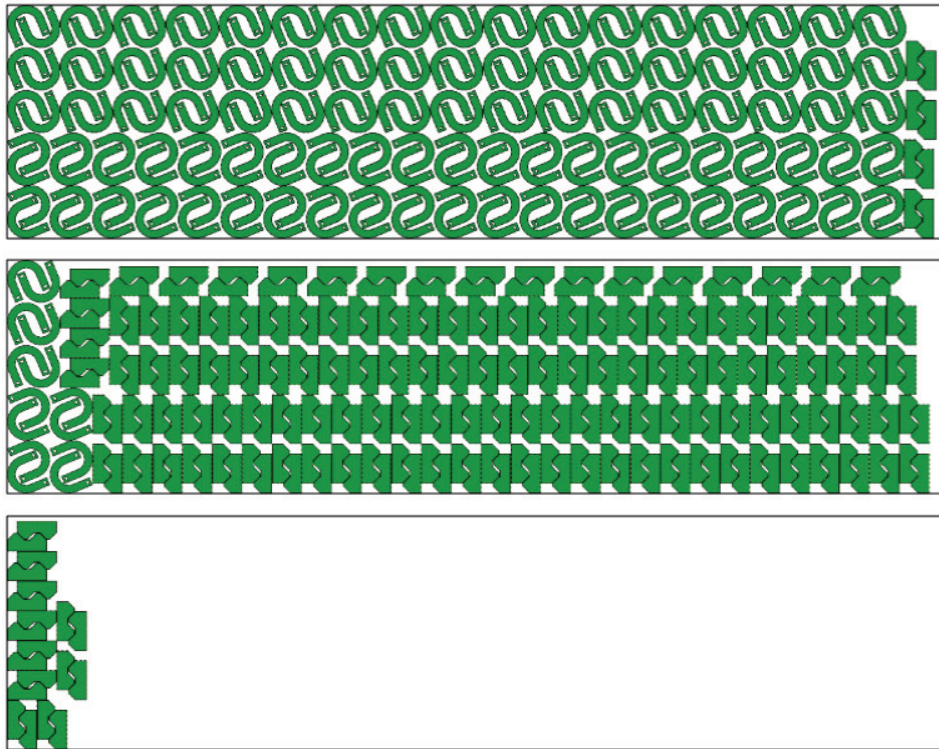


Рис. 4. Пример карты раскроя, построенной программной системой по раскрою материала, без этапа «Алгоритм уплотнения»

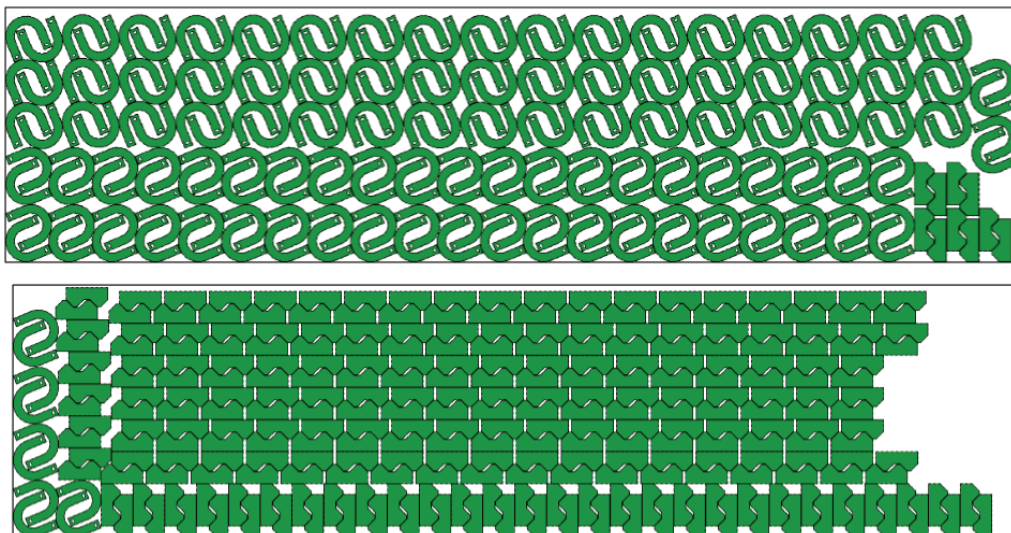


Рис. 5. Пример карты раскроя, построенной программной системой по раскрою материала с применением алгоритма уплотнения

После выполнения данного алгоритма укладка деталей будет иметь следующий вид, как представлено в соответствии с рис. 3.

Таким образом, рассмотренный алгоритм позволяет получить более плотную укладку деталей. После уплотнения деталей на листе может освободиться место, куда могут быть помещены дополнительные детали. По результатам объемных имитационных экспериментов, применение данного алгоритма позволяет экономить в среднем 7-10% материала (рис. 4 и рис. 5).

Авторами проведено тестирование алгоритмов, входящих в состав системы. Тестирование проводилось на типичных для пользователей наборах данных.

В результате тестирования подобраны наилучшие параметры, позволяющие производить попарную

сборку деталей, а также наилучшие режимы работы алгоритмов. Благодаря этому алгоритм попарной сборки обладает определенной универсальностью, которая дает возможность собирать пары различных по форме деталей (дуги, буквы «U» и пр.).

Выявлены наилучшие программы испытаний (режимы работы) алгоритмов уплотнения для листов прямоугольной и произвольной формы, а также подобраны временные ограничения для данных алгоритмов.

Произведено сравнение программной системы с аналогичными программными продуктами российского и зарубежного производства (по доступным версиям с ограниченной по срокам лицензией). При некоторых испытаниях программная система показала улучшение коэффициента раскроя до 12% по сравнению с аналогичным ПО и работает в более широком диапазоне данных.

### Список литературы

1. Файзрахманов Р.И. Оптимизация процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Уфа, 2011. 19 с.
2. Lodi A., Martello S., and Monaci M. Two-dimensional packing problems: a survey. // *European Journal of Operational Research*. №141. 2002. С. 241-252.
3. Петунин А.А., Мухачева Э.А., Филиппова А.С.. Метод прямоугольной аппроксимации для решения задач нерегулярного фигурного раскроя-упаковки. // *Информационные технологии*. №1. 2008. С. 28 – 31.
4. Авакумов В.Д.. Оптимальное размещение плоских объектов произвольной геометрической формы // *Информационные технологии*. №5. 2009. С. 31 – 35.
5. Канторич Л. В., Залгаллер В. А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Новосибирск: Изд-во Наука, 1971. 299 с.
6. ГОСТ 14.322-83. Нормирование расхода материалов. Основные положения. Введ. 1984-01-01. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 5с.
7. «Техтран. Раскрой листового материала» [электронный ресурс]. // Материалы сайта <http://www.cadmaster.ru> – URL: [http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_02\\_tehtran\\_steelsheet\\_cutout.html](http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_02_tehtran_steelsheet_cutout.html) (дата обращения 11.02.2013).
8. «ТЕХТРАН» [электронный ресурс]. // Материалы сайта <http://www.tehtran.com> – URL: <http://www.tehtran.com/> (дата обращения 10.02.2013).
9. «NestFab» [электронный ресурс]. // Материалы сайта <http://www.nestfab.com> – URL: <http://www.nestfab.com/> (дата обращения 10.02.2013).
10. «Программа раскроя Astra S-nesting» [электронный ресурс]. // Материалы сайта <http://nesting.astrapro.ru> – URL: <http://nesting.astrapro.ru/> (дата обращения 12.02.2013).