

О стоимостном критерии комплексной оптимизации задачи плоского раскроя-упаковки

А.Р. Суперфин
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный технический университет
Уфа, Россия
e-mail: ada.superfin@gmail.com

Аннотация¹

В статье рассматриваются существующие методы генерации карт рационального раскроя и формирования пути режущего инструмента с учетом ряда технологических ограничений. Предлагается использовать комплексный подход стоимостной оптимизации вырезки деталей из листового материала.

1. Введение

Для предприятий, использующих резку листовых материалов, особенно в единичном и мелкосерийном производстве, сокращение сроков подготовки карт программ раскроя, плотное размещение деталей на листе для уменьшения расхода материала, оптимизация маршрутов и режимов резания является одной из актуальных задач. Ее успешное решение существенным образом влияет на себестоимость и качество выпускаемой продукции.

Проблемам раскроя и упаковки (Р-У) посвящено множество публикаций и диссертаций как отечественных, так и зарубежных школ, например, [9, 10].

Это обусловлено тем, что задачи Р-У относятся к классу NP-сложных [3], поэтому в общем случае не существует аналитических алгоритмов решения этих задач, позволяющих получать максимальный коэффициент плотности упаковки.

Еще больше трудностей возникает, когда при размещении деталей требуется учитывать технологические режимы и ограничения.

Рынок программных систем раскроя предлагает большой ассортимент продукции, что обусловлено востребованностью таких систем. Основным отличием программных систем друг от друга является применение различных алгоритмов формирования карт раскроя и управляющих программ резки. 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. Сравнительный анализ характеристик перечисленных систем показан в таблице на рис. 1 [6].

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	-	-	+	+

Рис. 1. Сравнительный анализ характеристик существующих систем рис. 1

Труды третьей международной конференции
"Интеллектуальные технологии обработки
информации и управления", 10 - 12 ноября, Уфа,
Россия, 2015

Третья международная конференция "Интеллектуальные технологии обработки информации и управления", Уфа, Россия, 2015

При этом общими свойствами программных систем раскроя является ряд последовательно выполняемых этапов разработки программы резки [1]:

- аппроксимации исходных контуров заготовок с учетом технологических параметров режущего инструмента и раскраиваемого материала (диаметра режущего инструмента, толщины материала и т. д.);
- плотного размещения геометрических объектов (ГО), полученных на предыдущем шаге, в заданных областях;
- построения пути режущего инструмента с учетом генерации вспомогательных технологических траекторий и контуров (траекторий подхода/отхода к/от контуру/а, контуров обработки острых углов - петель, соединительных сегментов и т. д.);
- генерации программ для станка с ЧПУ.

Наиболее сложными являются второй и третий этапы, на которых решаются задачи оптимизационного геометрического моделирования.

2. Задачи оптимизации раскроя и пути режущего инструмента

Существо задачи размещения можно сформулировать следующим образом – «разместить геометрические объекты так, чтобы для полученной карты раскроя минимизировались непокрытые части (остатки) области размещения» [1]. Эта формулировка полностью совпадает с общеизвестной постановкой задачи по минимизации занятой части листа, но, в отличие от последней, применима для областей размещения произвольной формы. Качество карты раскроя принято характеризовать величиной коэффициента раскроя K_p :

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n S(p_i)}{S(Q)} \quad (1)$$

где $S(p_i)$ – площадь p_i -ого объекта (детали);

$S(Q)$ – площадь использованной части листа, причем $S_l = S(Q) + S(H)$, где $S(H)$ – деловой остаток

Задача построения пути режущего инструмента (ПРИ) может быть формализована следующим образом: имеется множество геометрических объектов n , состоящих из внутренних и внешних контуров. Каждый контур имеет точку врезки, траектории подхода и отхода.

Пусть l_{jk}^i ($k = 1 \div (ic_i + 1)$; $j \neq k$; $i = 1 \div n$) – длина перехода от точки отхода одного внутреннего контура до точки врезки другого, ic_i – количество внутренних контуров i -ого объекта. Последний переход в рамках обработки объекта делается на точку врезки его внешнего контура. Используем

следующие обозначения: $L_{im_q}^q$ ($i = 1 \div n$; $m_q = 1 \div ic_q$; $q = 1 \div n$; $i \neq q$) – длина перехода от точки отхода внешнего контура i -ого объекта до m_q -го внутреннего контура q -го объекта;

$L_{im_q}^q$ – длина перехода их начальной точки расположения режущего инструмента к m_q -контуру q -го объекта;

L_B^n – длина перехода с внешнего контура n -ого объекта в начальную точку расположения режущего инструмента. Тогда задача построения ПРИ может быть записана в виде выражения (2) [1]:

$$\min(L_{B1}^1 + \sum_{i=1}^n (\sum_{i'=i+1}^{ic_{i+1}} l_{jj'}^i + L_{i1}^i) + L_B^n). \quad (2)$$

В такой формулировке задача построения минимального пути движения режущего инструмента оптимизирует геометрический вариант задачи о коммивояжере. Причем в зависимости от наличия у деталей внутренних контуров оптимизируемый граф может быть смешанным и неполным.

Обычно при оптимизации ПРИ минимизируют длину холостого хода. Однако длина ПРИ – не единственная характеристика, влияющая на стоимость раскроя. Второй по важности характеристикой является количество врезок на лист. В зависимости от типа и толщины листового материала стоимость одной врезки может доходить до 20–30% стоимости одного погонного метра реза, и в десятки раз превышать стоимость одного метра холостого хода [2].

При определении пути режущего инструмента также следует учитывать ряд технологических ограничений [7]:

а) точка врезки должна располагаться на некотором расстоянии от обрабатываемого контура для того, чтобы избежать «наплыва» материала на поверхность заготовки;

б) при термической и гидроабразивной резке происходит «сгорание», «выметание» материала, поэтому контур вырезаемой детали и линия движения режущего инструмента в общем случае не совпадают. В частности, при обработке острых углов в управляющих программах используются специальные макрокоманды, изменяющие режимы резания и скругляющие угол по определенному радиусу [7, 8];

в) необходимость выполнения, так называемого, условия предшествования. Оно заключается в том, что, если деталь содержит внутренний контур, то сначала, чтобы избежать смещения детали на рабочем столе, вырезается он, а только потом – внешний контур. В свою очередь, если на карте раскроя внутренний контур одной детали будет содержать внешний контур другой, «вложенной» детали, то сначала вырезается вложенная деталь, а затем – внешняя.

Время и стоимость вырезки деталей рассчитываются по формулам (3) и (4), соответственно [2, 7]:

$$T_{cut} = L_{off}/V_{off} + L_{on}/V_{on} + N \cdot t_{pt}; \quad (3)$$

$$F_{cost} = L_{off} \cdot C_{off} + L_{on} \cdot C_{on} + N \cdot C_{pt}, \quad (4)$$

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

Кроме того, в статье [5] исследованы режимы оптимальной резки металлов на примере стали 10X12НВМФА и показано, что:

а) размеры пятна нагрева можно изменять с помощью фокусировки луча лазера относительно поверхности детали в довольно широких пределах, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. При этом форма пятна нагрева и распределение плотности мощности излучения по пятну нагрева зависят от типа и мощности лазера, режима генерации, а также от оптической системы лазерной установки;

б) скорость резки металла, определяющая производительность технологического оборудования, существенным образом влияет на величину шероховатости боковой стенки реза Rz . При увеличении скорости резки V_{on} шероховатость реза снижается, что связано с уменьшением времени термического влияния. За счет уменьшения времени оплавления металла при этом также уменьшается ширина реза b .

Основные технологические ограничения, зависящие от способа резки и вида материала: ширина реза (зависящая как от типа резки, так и от толщины материала), отступы на механическую обработку (например, в случае термического воздействия на материал), условие гильотинности, припуски на окантовку материала (сверху, снизу, слева и справа от боковых сторон промышленного материала – для фиксации материала), отступы между заготовками (для фиксации материала), учет дефектных областей материала, учет направления волокон материала, исследованы также в диссертации Р.И. Файзрахманова [9].

Из изложенного выше следует, что в общем случае стоимость работы по вырезанию детали зависит от трех основных факторов:

длины пути холостого хода;

длины пути реза;

количества точек врезки.

Причем эти параметры не являются независимыми [2]. Так, уменьшение количества точек врезки

приводит к увеличению пути рабочего реза за счет перемещений между контурами. Увеличение количества точек врезки приводит к тому, что перемещение между контурами может производиться в режиме холостого хода, что позволяет перемещать режущий инструмент по кратчайшему пути, пересекая при необходимости ранее вырезанные участки. Длины путей холостого хода и реза также связаны между собой. При увеличении пути рабочего реза путь холостого хода может сокращаться, и наоборот. При этом длина пути рабочего реза ограничена снизу суммой длин вырезаемых контуров.

В этом смысле особый интерес при раскрое прямоугольных или однотипных фигурных заготовок может представлять использование общих резов («common cut» или «common line») при котором за один проход может быть прорезана общая граница двух и более контуров [2]. В этом случае длина пути рабочего реза может быть меньше суммы периметров контуров. Однако такой подход увеличивает длину пути холостого хода, и позволяет, как уменьшать, так и увеличивать количество точек врезки в зависимости от взаимного положения смежных деталей.

3. Комплексная задача оптимизации стоимости деталей.

Таким образом, мы видим, что учет технологических ограничений, оптимизация технологических режимов в зависимости от вида, толщины и качества боковых поверхностей деталей, в общем случае влияют на карту раскроя материала. Поэтому традиционный и последовательный двухэтапный подход к оптимизации стоимости вырезаемых деталей, при котором сначала максимизируется коэффициент раскроя, а затем на полученной карте раскроя минимизируется стоимость обработки, рассмотренный в [1, 4], не учитывает превалирования или приоритета тех или иных технологических параметров и ограничений.

В этих случаях, а также при использовании технологии общих резов, целесообразней использовать комплексный критерий стоимостной оптимизации вырезки деталей из листового материала. Этот критерий, при заданном качестве, должен минимизировать общую стоимость деталей, учитывая как стоимость материала, так и стоимость обработки. При этом также желательно, чтобы этот критерий позволял оценивать степень эффективности соответствующих алгоритмов оптимизации карт раскроя и пути режущего инструмента, а также полученных на их основе управляющих рабочих программ.

Для этого введем понятие базовой стоимости детали p_i :

$$F_{p_i} = F_{p_i}^m + F_{p_i}^{cost} \quad (5)$$

где

$F_{p_i}^m = C_m \cdot m_{p_i}$ – стоимость материала,

C_m – цена одного килограмма материала, m_{p_i} – масса вырезанной детали.

$F_{p_i}^{cost}$ – стоимость вырезки контура детали.

Тогда фактическая себестоимость детали может быть рассчитана следующим образом:

$$F_{p_i} = k_m \cdot F_{p_i}^m + k_p \cdot F_{p_i}^{cost} \quad (6)$$

где $k_m = 1/K_p$ и $k_p = F_{cost}/F_{p_i}^{cost}$, коэффициенты эффективности использования материала и стоимости обработки детали, соответственно.

4. Заключение

В современных условиях, когда все более актуальной становится проблема экономии ресурсов, ее решение происходит по всем возможным направлениям науки, техники и производства. К ним относятся как задачи раскроя фигурных заготовок из листового материала так и задачи оптимизации построения пути режущего инструмента. Эти задачи сочетают возможность экономии раскраиваемого материала, экономии энергии и времени, затрачиваемых на процесс резки. Традиционно методы раскроя и маршрутизации решают независимые друг от друга задачи. В данной статье предлагается рассмотреть комплексный подход стоимостной оптимизации вырезки деталей из листового материала, который ранее не рассматривался, но позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы использования материала и обработки деталей.

Список используемых источников

1. Верхотуров М.А. Задача нерегулярного раскроя фигурных заготовок: оптимизация размещения и пути режущего инструмента // Вестник УГАТУ: Управление, ВТ и И Т. – 2007, т. 9, № 2 (20). – С. 106–118.
2. Верхотуров М.А., Тарасенко П.Ю. Математическое обеспечение задачи оптимизации пути режущего инструмента при плоском фигурном раскрое на основе цепной резки // Вестник УГАТУ: Управление, ВТ и И Т. – 2008, т. 10, № 2 (27). – С. 123–130.

3. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
4. Логинов Е.В. Проектирование нерегулярного раскроя листовых материалов на заготовки сложных форм с использованием дискретно-логического представления информации: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2002. – 16 с.
5. Могилевский Д.В., Литвинова Т.А., Подрезов Н.Н., Пирожков Р.В. Определение оптимальных параметров резки стали 10X12НВМФА // Инженерный вестник Дона. – 2013, том 25, выпуск № 2 (25).
6. Мурзакаев Р.Т., Лялин Д.А. Алгоритм уплотнения карты раскроя на основе двумерной гравитационной модели // Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей. Серия: Естественные и технические науки. – 2013, №9/10 (сентябрь/октябрь). – С. 34-41.
7. Петунин А.А., Таваева А.Ф. Об оптимизации маршрута инструмента для машин фигурной листовой резки с ЧПУ при условии непостоянства скорости рабочего хода // Фундаментальные исследования. – 2015. № 6–1. – С. 56-62.
8. Усовершенствованный эвристический алгоритм для разработки траектории перемещения инструмента лазерной резки /Р. Девил, П. Ванштеенвеген, Д. Каттрюссеа и др. // International Journal of Production Research. – 2014, № 8. – Р. 1-18.
9. Файзрахманов Р.И. Оптимизация процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений: автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 19 с.
10. Lodi A., Martello S., and Monaci M. Two-dimensional packing problems: a survey. // European Journal of Operational Research. – 2002, №141. – Р. 241-252