

Оптимизация техпроцессов раскроя деталей с использованием базы данных стоимостных параметров процесса листовой резки

А.Ф. Таваева^{1,2}✉, А.А. Петунин^{2,3}

¹ Уральский оптико-механический завод, г. Екатеринбург, 620100, Россия

² Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, 620002, Россия

³ Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского
Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Ссылка для цитирования

Таваева А.Ф., Петунин А.А. Оптимизация техпроцессов раскроя деталей с использованием базы данных стоимостных параметров процесса листовой резки // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 1. С. 150–156. doi: 10.15827/0236-235X.149.150-156

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.3, 2.3.7

Поступила в редакцию: 18.06.2024

После доработки: 21.07.2024

Принята к публикации: 27.07.2024

Аннотация. В статье рассматривается интегрированная задача раскроя и маршрутизации, объединяющая задачи оптимизации раскроя и минимизации стоимости процесса резки на технологическом оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ). Для ее решения и разработки соответствующих оптимизационных алгоритмов, эффективных на практике, необходимо получить научно обоснованные данные о значениях стоимостных параметров процесса листовой резки на технологическом оборудовании с ЧПУ для различных марок и толщин обрабатываемых материалов. В данной статье описывается база данных таких стоимостных параметров этого процесса, приводятся ее схема, основная структура и организация. Для хранения данных стоимостных параметров выбрана реляционная модель, которая состоит из восьми таблиц и содержит информацию о марках и толщинах обрабатываемых материалов, значениях стоимости и плотности материалов, стоимости единицы пути режущего инструмента на рабочем и холостом ходу, а также одной точки врезки. Для удобства работы с данными (визуализация, добавление новых записей, удаление записей, расчет стоимостных параметров для новых марок материалов и толщин, изменение значений параметров), хранящимися в базе, разработано ПО на языке Python. Его можно использовать либо как отдельный продукт, либо совместно с ПО для автоматического проектирования управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ при решении практических задач. Значимость работы показана на модельном примере проектирования раскроя и маршрутизации инструмента для одного типа машины лазерной резки.

Ключевые слова: оптимизация раскроя листового материала, оптимизация маршрутизации, интегрированная задача раскроя и маршрутизации, база данных, стоимостные параметры

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-21-00343, <https://rscf.ru/project/23-21-00343/>)

Введение. Во многих отраслях промышленности одним из современных и востребованных методов обработки листового материала на промежуточном этапе работы с металлопрокатом является резка. Во время этого процесса материал разделяют на заготовки различных размеров и форм. Для резки листового материала используют в основном оборудование термической (лазерной, плазменной, кислородной) и гидроабразивной резки с ЧПУ.

Проектирование управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ осуществляется с помощью систем автоматизированного проектирования. Однако из-за сложности решаемых оптимизационных задач они не обеспечивают получение оптимального варианта раскроя листового материала (минимальная стоимость использованного при раскрое материала) и маршрута перемещения режущего инструмента (минимальная стоимость

процесса резки). В частности, в [1] показано, что наиболее приемлемое решение задачи маршрутизации инструмента, полученное для оптимального варианта раскроя листового материала, не гарантирует экстремума стоимостного критерия интегрированной задачи раскроя и маршрутизации. Интегрированная задача объединяет две известные проблемы – оптимизация раскроя листового материала и минимизация стоимости процесса резки на технологическом оборудовании с ЧПУ.

Разработка концепции единого стоимостного критерия для интегрированной задачи предполагает необходимость получения научно обоснованных данных о реальной стоимости резки на разном технологическом оборудовании с ЧПУ для различных марок и толщин материалов. Получение данных такого рода является хорошей предпосылкой для создания оптимизационных алгоритмов, эффективных

для решения практических задач, однако эта область остается малоисследованной. Малочисленны исследования, в которых задача оптимизации раскроя материала рассматривается совместно с задачей оптимизации маршрута резки. Можно отметить, в частности, работу [2], в которой предложены метод для минимизации расхода материала и пути режущего инструмента за счет применения совмещенного реза. В [3] предлагается математическая модель, объединяющая задачи упаковки заготовок в полосе и минимизации длины реза этих заготовок. Целевая функция при этом не является интегрированным стоимостным критерием. Достоинство работы заключается в возможности получения в рамках предложенной модели точных решений, однако, как известно, это реально только для задач малой размерности. В работе [4] рассматриваются интегрированная задача упаковки заготовок в обрезках листовых материалов неправильной формы, которые остаются в больших количествах в заготовительном производстве, и задача оптимизации холостого хода режущего инструмента. Вторая вызывает преимущественно только теоретический интерес, а на практике наиболее интересна минимизация рабочего хода режущего инструмента.

Следует также отметить, что в большинстве научных публикаций задачи оптимизации раскроя и маршрутизации инструмента машин листовой резки исследуются отдельно. Обзор методов для решения задач оптимизации нерегулярного раскроя приведен, например, в [5, 6]. Обычно выделяют три основных подхода к решению: методы математического программирования, эвристические алгоритмы и методы машинного обучения [7]. Методы математического программирования могут быть использованы для учета сложных ограничений и получения оптимальных решений [3, 8]. При этом глобальная оптимизация стоимости раскроя в реальном диапазоне размерностей возможна только для простых геометрических форм [9]. Для решения производственных задач наиболее часто используются эвристические алгоритмы [10, 11]. В последние годы исследователи начали применять методы машинного обучения для решения задач двумерного нерегулярного раскроя [12, 13].

Число публикаций по вопросам минимизации стоимости процесса резки уступает их количеству по оптимизации раскроя листового материала, но неуклонно растет. Одним из подходов к решению задач маршрутизации инстру-

мента для машин листовой резки является использование моделей задачи коммивояжера. В частности, обзор существующих алгоритмов решения обобщенной задачи коммивояжера приведен в [14]. Задачи небольшой размерности могут быть решены с помощью точных алгоритмов [15]. Однако большинство методов ориентировано на применение эвристических алгоритмов, например, в [16] предложены эволюционные алгоритмы для оптимизации рабочих и холостых перемещений режущего инструмента для лазерного комплекса.

Таким образом, следует отметить, что в современных исследованиях не приводятся научно обоснованные данные о реальной стоимости процесса резки на конкретном технологическом оборудовании с ЧПУ, знание которых необходимо для разработки оптимизационных алгоритмов, эффективных при решении практических задач. В настоящей работе предлагается БД стоимостных параметров, приводятся схема БД, а также ее основная структура и организация. В БД были добавлены данные стоимостных параметров для лазерного СО2 комплекса с ЧПУ.

Материалы и методы

Предложенная в данной статье БД Cost Parameters содержит информацию о значениях стоимостных параметров для технологического оборудования с ЧПУ. Для хранения данных о стоимостных параметрах была выбрана реляционная модель, ее схема приведена на рисунке 1.

БД Cost Parameters состоит из восьми таблиц, которые содержат следующую информацию:

material – марки материалов (*name_material*);

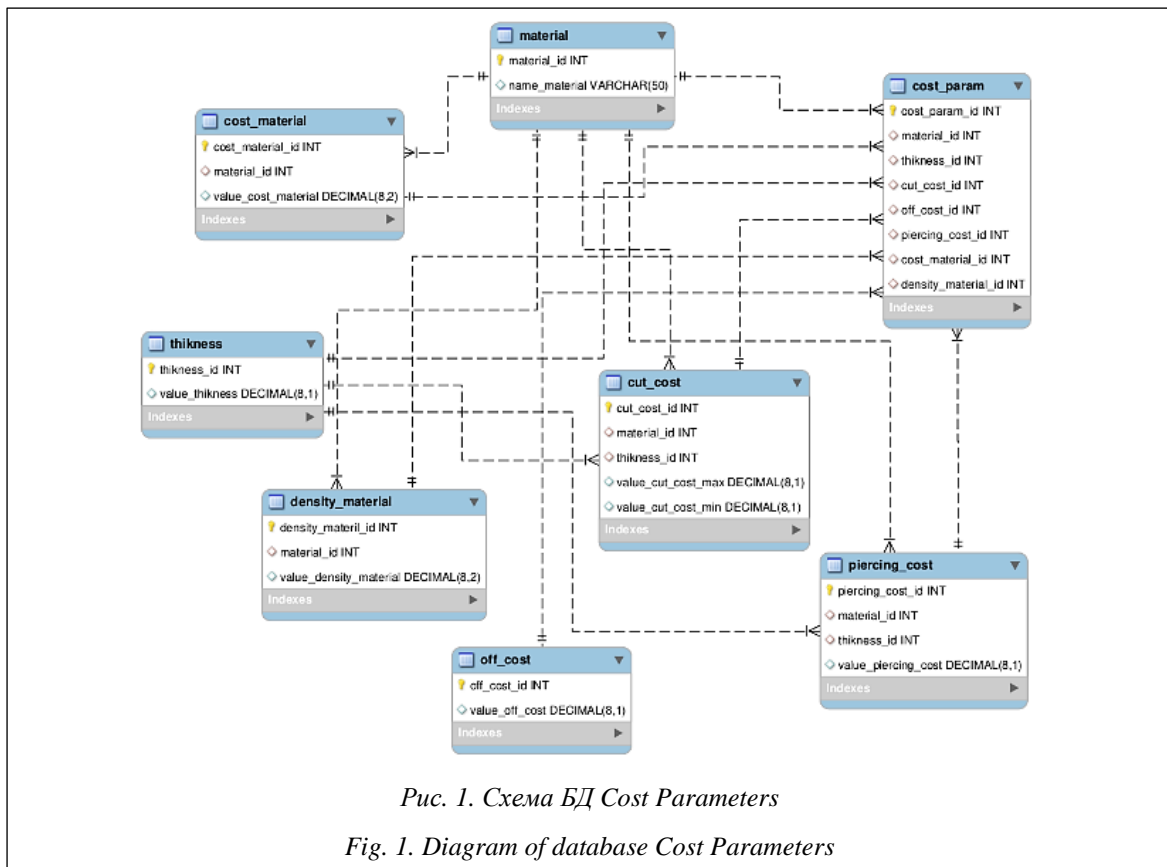
thickness – толщины материалов (*value_thickness*);

density_material – плотность *value_density_material* для марок материалов из таблицы *material* (*material_id*);

cost_material – стоимость *value_cost_material* для марок материалов из таблицы *material* (*material_id*);

cut_cost – стоимость единицы пути режущего инструмента на рабочем ходу *value_cut_cost* для марок материалов и соответствующих толщин из таблиц *material* и *thickness* (соответственно *material_id*, *thickness_id*);

off_cost – стоимость единицы пути режущего инструмента на холостом ходу (*value_off_cost*);



piercing_cost – стоимость одной точки врезки $value_piercing_cost$ для марок материалов и соответствующих толщин из таблиц *material* и *thickness* (соответственно $material_id$, $thickness_id$);

cost_param – стоимостные параметры для марок материалов и соответствующих толщин из таблиц *material* и *thickness* соответственно.

Для удобства работы с данными (визуализация БД, добавление новых записей, удаление записей из БД, расчет стоимостных параметров для новых марок материалов и толщин, изменение значений параметров), хранящимися в БД Cost Parameters, было разработано одноименное ПО на языке Python. Основные функциональные блоки ПО: интерфейс ввода данных, интерфейс корректировки, интерфейс для расчета стоимостных параметров, интерфейс выдачи.

Интерфейс ввода данных реализован в виде графического интерфейса для добавления новой записи в БД. Пользователю необходимо либо выбрать марку материала и толщину из значений, уже хранящихся в БД, либо ввести новые. Затем вводятся значения следующих параметров для выбранного материала: C_{on_max} , C_{on_min} – стоимость единицы пути режущего инструмента на рабочем ходу при максимально и

минимально возможных значениях скоростей резки, C_{off} – стоимость единицы пути режущего инструмента на холостом ходу, C_{pt} – стоимость одной точки врезки, C_m – стоимость материала, p – плотность материала.

Интерфейс для расчета стоимостных параметров реализован в виде графического интерфейса (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-1/29.jpg>).

Пользователю необходимо выбрать марку материала и значение толщины из БД либо добавить свои значения, после чего ввести значения параметров для дальнейшего расчета C_{on_max} , C_{on_min} , C_{off} , C_{pt} и сохранения соответствующей записи в БД. За основу для расчета значений стоимостных параметров была взята методика из [17].

Интерфейс выдачи обращается к БД и переводит эти результаты в таблицу (рис. 2).

Используя методику [17], в БД Cost Parameters были добавлены значения стоимостных параметров на примере лазерного CO₂ комплекса листовой резки с ЧПУ.

Разработанное ПО Cost Parameters может использоваться либо как отдельный продукт, либо совместно с ПО для автоматического проектирования управляющей программы для оборудования листовой лазерной резки с ЧПУ

| Cost Parameters | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-----------|-----|-------|------|------|---------|------|
| id | Material | Thickness | Con | Coff | Cpt | Cm | density | |
| 1 | 1 | st10kp | 1 | 5,4 | 0,42 | 0,74 | 79 | 7856 |
| 2 | 2 | st10kp | 1,2 | 6,64 | 0,42 | 0,97 | 79 | 7856 |
| 3 | 3 | st10kp | 1,5 | 6,64 | 0,42 | 1,12 | 79 | 7856 |
| 4 | 4 | st10kp | 2 | 8,14 | 0,42 | 1,26 | 79 | 7856 |
| 5 | 5 | st10kp | 2,5 | 9,7 | 0,42 | 1,49 | 79 | 7856 |
| 6 | 6 | st10kp | 3 | 12,01 | 0,42 | 1,56 | 79 | 7856 |
| 7 | 7 | st10kp | 3,5 | 13,27 | 0,42 | 1,64 | 79 | 7856 |
| 8 | 8 | st10kp | 3,9 | 13,27 | 0,42 | 1,86 | 79 | 7856 |
| 9 | 9 | st10kp | 4 | 14,84 | 0,42 | 2,16 | 79 | 7856 |
| 10 | 10 | st10kp | 5 | 17,91 | 0,42 | 2,75 | 79 | 7856 |
| 11 | 11 | st10kp | 8 | 26,06 | 0,42 | 3,43 | 79 | 7856 |
| 12 | 12 | st10kp | 10 | 31,85 | 0,42 | 5,15 | 79 | 7856 |
| 13 | 13 | st10kp | 15 | 52,11 | 0,42 | 6,87 | 79 | 7856 |
| 14 | 14 | amg3m | 1 | 11,15 | 0,42 | 3,71 | 390 | 2670 |
| 15 | 15 | amg3m | 2 | 18 | 0,42 | 5,56 | 390 | 2670 |

0, 0 мм

Рис. 2. Таблица стоимостных параметров

Fig. 2. Table of Cost Parameters

в качестве отдельного модуля, например, с ПО, разработанным в [18].

В качестве примера для расчета стоимости процесса резки рассмотрим упаковку двух заготовок (рис. 3) в прямоугольной полосе шириной 200 мм. Для варианта раскроя, который является оптимальным решением задачи 2D-раскроя, на рисунке приведены допустимые точки врезки и соответствующий ему оптимальный маршрут резки с применением стандартной техники. Построить оптимальный маршрут перемещения режущего инструмента позволяет алгоритм динамического программирования. Значения стоимости процесса резки рассчитаны для алюминиевого листа Амг3М толщиной 5 мм. Данные по стоимостным параметрам взяты из БД Cost Parameters, предложенной в данной статье. Для приведенного на рисунке примера длина рабочих перемещений режущего инструмента $L_{on} = 1383$ мм, количество точек врезки $N_{pt} = 2$ (равно количеству вырезаемых контуров). Соответственно стоимость процесса резки C_{cut} составила 331.65 руб.

На рисунке 4 показаны вариант вырезки деталей для раскроя (рис. 3) с применением техники резки «мост», а также маршрут резки. Детали вырезаются с одной точкой врезки, без выключения режущего инструмента при переходе от первой детали ко второй за счет наличия «моста». Для данного примера длина рабочих перемещений режущего инструмента $L_{on} = 1383 + 20 = 1403$ мм (длина «моста» 10 мм

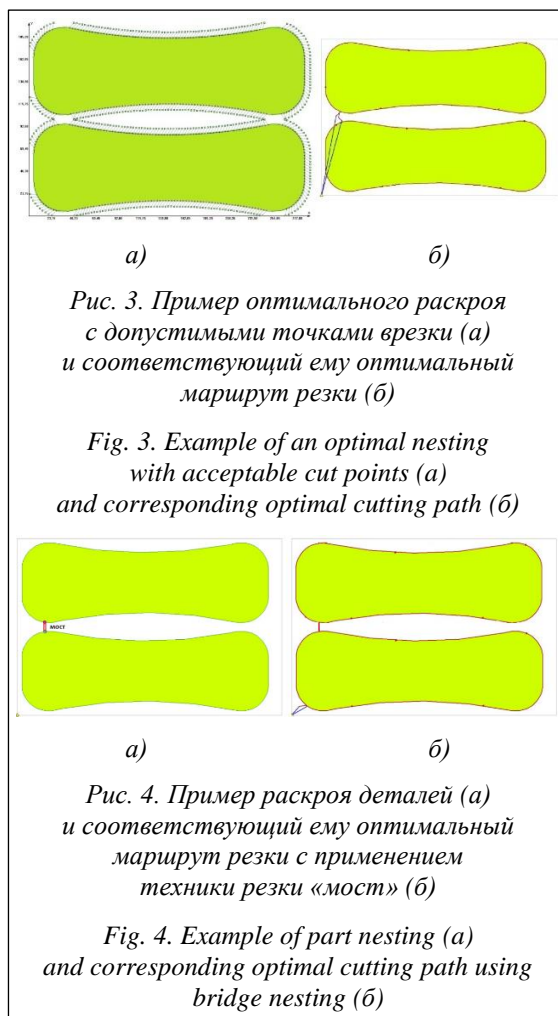


Рис. 3. Пример оптимального раскроя с допустимыми точками врезки (а) и соответствующий ему оптимальный маршрут резки (б)

Fig. 3. Example of an optimal nesting with acceptable cut points (a) and corresponding optimal cutting path (b)

Рис. 4. Пример раскроя деталей (а) и соответствующий ему оптимальный маршрут резки с применением техники резки «мост» (б)

Fig. 4. Example of part nesting (a) and corresponding optimal cutting path using bridge nesting (b)

в каждую сторону), количество точек врезки $N_{pt} = 1$, соответственно стоимость процесса резки $C_{cut} = 303.18$ руб.

Таким образом, C_{cut} при резке деталей с помощью техники «мост» (рис. 4) оказывается меньше, чем C_{cut} для стандартной техники резки (рис. 3), на 8.5 %. При других значениях стоимостных параметров итоговая стоимость процесса резки на стандартной технике может оказаться ниже либо равной стоимости резки при использовании техники резки «мост». Например, для листа марки Ст10кп толщиной 1 мм итоговые значения стоимости процесса резки C_{cut} для примера на рисунках 3 и 4 практически равны.

Очевидно, что получение научно обоснованных данных о значениях стоимости резки на различном технологическом оборудовании с ЧПУ для разных марок и толщин обрабатываемых материалов является неотъемлемым процессом при разработке оптимизационных алгоритмов, эффективных для решения практических задач.

Выводы

В статье предложена общая схема БД Cost Parameters для стоимостных параметров процесса листовой резки на технологическом оборудовании с ЧПУ, приведены ее основная структура и организация.

Для хранения данных стоимостных параметров выбрана реляционная модель, которая содержит информацию о марках и толщинах обрабатываемых материалов, значениях стоимости и плотности материалов, стоимости единицы пути режущего инструмента на рабочем и холостом ходу, а также одной точки врезки.

Для удобства работы с данными (визуализация БД, добавление новых записей, удаление

записей из БД, расчет стоимостных параметров для новых марок материалов и толщин, изменение значений параметров), хранящимися в БД Cost Parameters, разработано одноименное ПО на языке программирования Python.

Разработанное ПО может использоваться либо как отдельный продукт, либо совместно с ПО для автоматического проектирования управляющих программ для оборудования листовой резки с ЧПУ при решении практических задач в качестве отдельного модуля.

На простом примере показано получение научно обоснованных данных о реальной стоимости процесса резки на различном технологическом оборудовании с ЧПУ для разных марок и толщин обрабатываемых материалов.

Список литературы

1. Петунин А.А., Котел Н.С., Таваева А.Ф. Об одном примере оптимального решения интегрированной задачи 2D-раскрой и маршрутизации инструмента машин листовой резки с ЧПУ // Вестн. Югорского государственного университета. 2023. № 4. С. 88–101. doi: 10.18822/byusu20230488-101.
2. Hu Q., Lin Z., Fu J., Luan C. Optimizing cutting sequences and paths for common-edge nested parts. *Computer-Aided Design*, 2023, vol. 164, art. 103610. doi: 10.1016/j.cad.2023.103610.
3. Oliveira L.T., Silva E.F., Oliveira J.F., Toledo F.M.B. Integrating irregular strip packing and cutting path determination problems: A discrete exact approach. *CAIE*, 2020, vol. 149, art. 106757. doi: 10.1016/j.cie.2020.106757.
4. Li L., Wu Z., Zhang Z., Zhang Y. An optimization method for CNC laser combination cutting of irregular plate remainders. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 914. doi: 10.3390/coatings13050914.
5. Leao A.A.S., Toledo F.M.B., Oliveira J.F., Carravilla M.A., Alvarez-Valdés R. Irregular packing problems: A review of mathematical models. *EJOR*, 2020, vol. 282, no. 3, pp. 803–822. doi: 10.1016/j.ejor.2019.04.045.
6. do Nascimento D.N., Cherri A.C., Oliveira J.F. The two-dimensional cutting stock problem with usable leftovers: Mathematical modelling and heuristic approaches. *Operational Research*, 2022, vol. 22, pp. 5363–5403. doi: 10.1007/s12351-022-00735-9.
7. Oliveira O., Gamboa D., Silva E. An introduction to the two-dimensional rectangular cutting and packing problem. *ITOR*, 2022, vol. 30, no. 6, pp. 3238–3266. doi: 10.1111/itor.13236.
8. Iori M., de Lima V.L., Martello S., Miyazawa F.K., Monaci M. Exact solution techniques for two-dimensional cutting and packing. *EJOR*, 2021, vol. 289, no. 2, pp. 399–415. doi: 10.1016/j.ejor.2020.06.050.
9. Romanova T., Stoyan Y., Pankratov A. et al. Optimal layout of ellipses and its application for additive manufacturing. *IJPR*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 560–575. doi: 10.1080/00207543.2019.1697836.
10. Guerriero F., Saccomanno F.P. A hierarchical hyper-heuristic for the bin packing problem. *Soft Computing*, 2023, vol. 27, pp. 12997–13010. doi: 10.1007/s00500-022-07118-4.
11. Hu X., Li J., Cui J. Greedy adaptive search: A new approach for large-scale irregular packing problems in the fabric industry. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 91476–91487. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994635.
12. Huang S., Wang Z., Zhou J., Lu J. Planning irregular object packing via hierarchical reinforcement learning. *IEEE RA-L*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 81–88. doi: 10.1109/LRA.2022.3222996.
13. Tu C., Bai R., Aickelin U., Zhang Y., Du H. A deep reinforcement learning hyper-heuristic with feature fusion for online packing problems. *Expert Systems with Applications*, 2023, vol. 230, art. 120568. doi: 10.1016/j.eswa.2023.120568.
14. Pop P.C., Cosma O., Sabo C., Sitar C.P. A comprehensive survey on the generalized traveling salesman problem. *EJOR*, 2023, vol. 314, no. 3, pp. 819–835. doi: 10.1016/j.ejor.2023.07.022.
15. Chentsov A.G., Chentsov P.A. To the application of two-stage dynamic programming in the problem of sequential visiting of megalopolises. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 40, pp. 105–111. doi: 10.1016/j.prostr.2022.04.013.
16. Junior B.A., de Carvalho G.N., Santos M.C., Pinheiro P.R., Celedonio J.W.L. Evolutionary algorithms for optimization sequence of cut in the laser cutting path problem. *Applied Sci.*, 2023, vol. 13, no. 18, art. 10133. doi: 10.3390/app131810133.
17. Tavaeva A., Petunin A., Ukolov S., Krotov V. A cost minimizing at laser cutting of sheet parts on CNC machines. In: *CCIS. Proc. MOTOR*, 2019, vol. 1090, pp. 422–437. doi: 10.1007/978-3-030-33394-2_33.
18. Петунин А.А., Таваева А.Ф. Раскрой и маршрутизация (РиМ): Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2024615623. Рос. Федерация, 2024.

Optimization of technological processes for nesting parts: Using a database of sheet cutting cost parameters

Anastasia F. Tavaeva ^{1,2}✉, Aleksandr A. Petunin ^{2,3}

¹ Ural Optical and Mechanical Plant, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

² Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

³ IMM UB RAS, Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

For citation

Tavaeva, A.F., Petunin, A.A. (2025) 'Optimization of technological processes for nesting parts: Using a database of sheet cutting cost parameters', *Software & Systems*, 38(1), pp. 150–156 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.149.150-156

Article info

Received: 18.06.2024

After revision: 21.07.2024

Accepted: 27.07.2024

Abstract. The paper considers an integrated nesting and routing task. It combines the problems of nesting optimization and cost minimization of the cutting process with numerical control (CNC). To solve the problem and develop appropriate optimization algorithms, it is necessary to obtain scientifically substantiated data. Specifically, the data on the values of the cost parameters of a sheet cutting process on the CNC technological equipment for different grades and thicknesses of processed materials. The paper describes a database of such cost process parameters. There is also its diagram, basic structure and organization. The authors chose a relational model to store the data on cost parameters. It consists of 8 tables and contains information on grades and thicknesses of materials processed, cost and density values of materials, cost per unit of cutting tool path at working and idle speeds, as well as one piercing point. Usability of working with data in the database (visualization, adding new records, deleting records, calculating cost parameters for new material grades and thicknesses, changing parameter values) is provided by the designed software in Python. The authors propose to use it either as a separate product or together with the software for automatic design of control programs for CNC sheet cutting equipment to solve practical problems. The authors show this work significance on a model example of designing nesting and tool routing for one type of a laser cutting machine.

Keywords: sheet nesting optimization, routing optimization, integrated nesting and routing problem, database, cost parameters

Acknowledgements. The work was perf financially supported by the Russian Science Foundation (grand no. 23-21-00343)

References

1. Petunin, A.A., Kotel, N.S., Tavaeva, A.F. (2023) 'About one optimal solution example to the integrated 2D nesting and routing problem for CNC sheet cutting machines', *Yugra State University Bull.*, (4), pp. 88–101 (in Russ.). doi: 10.18822/byusu20230488-101.
2. Hu, Q., Lin, Z., Fu, J., Luan, C. (2023) 'Optimizing cutting sequences and paths for common-edge nested parts', *Computer-Aided Design*, 164, art. 103610. doi: 10.1016/j.cad.2023.103610.
3. Oliveira, L.T., Silva, E.F., Oliveira, J.F., Toledo, F.M.B. (2020) 'Integrating irregular strip packing and cutting path determination problems: A discrete exact approach', *CAIE*, 149, art. 106757. doi: 10.1016/j.cie.2020.106757.
4. Li, L., Wu, Z., Zhang, Z., Zhang, Y. (2023) 'An optimization method for CNC laser combination cutting of irregular plate remainders', *Coatings*, 13(5), art. 914. doi: 10.3390/coatings13050914.
5. Leao, A.A.S., Toledo, F.M.B., Oliveira, J.F., Carravilla, M.A., Alvarez-Valdés, R. (2020) 'Irregular packing problems: A review of mathematical models', *EJOR*, 282(3), pp. 803–822. doi: 10.1016/j.ejor.2019.04.045.
6. do Nascimento, D.N., Cherri, A.C., Oliveira, J.F. (2022) 'The two-dimensional cutting stock problem with usable leftovers: Mathematical modelling and heuristic approaches', *Operational Research*, 22, pp. 5363–5403. doi: 10.1007/s12351-022-00735-9.
7. Oliveira, O., Gamboa, D., Silva, E. (2022) 'An introduction to the two-dimensional rectangular cutting and packing problem', *ITOR*, 30(6), pp. 3238–3266. doi: 10.1111/itor.13236.
8. Iori, M., de Lima, V.L., Martello, S., Miyazawa, F.K., Monaci, M. (2021) 'Exact solution techniques for two-dimensional cutting and packing', *EJOR*, 289(2), pp. 399–415. doi: 10.1016/j.ejor.2020.06.050.
9. Romanova, T., Stoyan, Y., Pankratov, A. et al. (2021) 'Optimal layout of ellipses and its application for additive manufacturing', *IJPR*, 59(2), pp. 560–575. doi: 10.1080/00207543.2019.1697836.
10. Guerriero, F., Saccomanno, F.P. (2023) 'A hierarchical hyper-heuristic for the bin packing problem', *Soft Computing*, 27, pp. 12997–13010. doi: 10.1007/s00500-022-07118-4.
11. Hu, X., Li, J., Cui, J. (2020) 'Greedy adaptive search: A new approach for large-scale irregular packing problems in the fabric industry', *IEEE Access*, 8, pp. 91476–91487. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994635.
12. Huang, S., Wang, Z., Zhou, J., Lu, J. (2023) 'Planning irregular object packing via hierarchical reinforcement learning', *IEEE RA-L*, 8(1), pp. 81–88. doi: 10.1109/LRA.2022.3222996.
13. Tu, C., Bai, R., Aickelin, U., Zhang, Y., Du, H. (2023) 'A deep reinforcement learning hyper-heuristic with feature fusion for online packing problems', *Expert Systems with Applications*, 230, art. 120568. doi: 10.1016/j.eswa.2023.120568
14. Pop, P.C., Cosma, O., Sabo, C., Sitar, C.P. (2023) 'A comprehensive survey on the generalized traveling salesman problem', *EJOR*, 314(3), pp. 819–835. doi: 10.1016/j.ejor.2023.07.022.

15. Chentsov, A.G., Chentsov, P.A. (2022) 'To the application of two-stage dynamic programming in the problem of sequential visiting of megalopolises', *Procedia Structural Integrity*, 40, pp. 105–111. doi: 10.1016/j.prostr.2022.04.013.
16. Junior, B.A., de Carvalho, G.N., Santos, M.C., Pinheiro, P.R., Celedonio, J.W.L. (2023) 'Evolutionary algorithms for optimization sequence of cut in the laser cutting path problem', *Applied Sci.*, 13(18), art. 10133. doi: 10.3390/app131810133.
17. Tavaeva, A., Petunin, A., Ukolov, S., Krotov, V. (2019) 'A cost minimizing at laser cutting of sheet parts on CNC machines', in *CCIS. Proc. MOTOR*, 1090, pp. 422–437. doi: 10.1007/978-3-030-33394-2_33.
18. Petunin, A.A., Tavaeva, A.F. (2024) *Nesting & Routing (N&R)*, Pat. RF, № 2024615623.

Авторы

Таваева Анастасия Фидагилевна ^{1,2},
к.т.н., главный специалист,
научный сотрудник, a.f.tavaeva@urfu.ru
Петунин Александр Александрович ^{2,3},
д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник,
a.a.petunin@urfu.ru

¹ Уральский оптико-механический завод,
г. Екатеринбург, 620100, Россия

² Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург, 620002, Россия

³ Институт математики и механики
им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург, 620108, Россия

Authors

Anastasia F. Tavaeva ^{1,2}, Cand. of Sci. (Engineering),
Chief Engineer, Research Associate,
a.f.tavaeva@urfu.ru
Aleksandr A. Petunin ^{2,3}, Dr.Sci. (Engineering),
Professor, Leading Researcher,
a.a.petunin@urfu.ru

¹ Ural Optical and Mechanical Plant,
Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

² Ural Federal University, Ekaterinburg,
620002, Russian Federation

³ IMM UB RAS,
Ekaterinburg, 620108,
Russian Federation