

УДК 621.96

Балабанов В. Н., Скобцов Ю. А.

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАСКРОЯ РУЛОННОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА
НА СЛИТТЕРЕ**

Рулонные материалы применяются во многих отраслях промышленности для производства различных заготовок и деталей, а также готовой продукции. Для снижения издержек на хранение и транспортировку на заводах-изготовителях из металла, бумаги, тканей, полимерных пленок и других материалов, технологически пригодных для подобного способа отгрузки, формируются рулоны. В таком виде материал поступает в раскройно-заготовительные цеха предприятий, где производится его последующий раскрой на специализированном оборудовании.

Линии, предназначенные для продольной резки рулонных материалов, называются слиттерами (от англ. *slit* – разрезать) [1, 2]. Состав и технические характеристики подобной линии могут варьироваться в зависимости от свойств перерабатываемого металла и требований, предъявляемых к производимой продукции. Типовой состав линии, применяемой при продольном раскросе широкорулонной листовой стали на узкие полосы, сматываемые в рулоны, представлен на рис. 1.

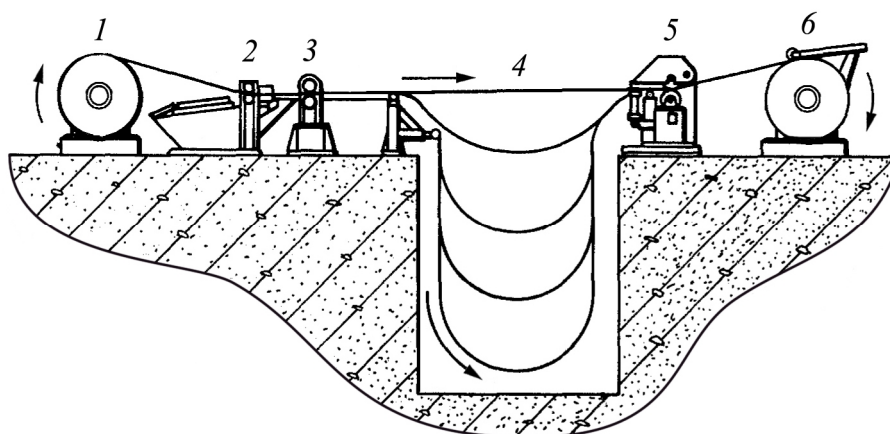


Рис. 1. Принципиальная схема линии продольной резки металла:

1 – разматывающий комплекс; 2 – правильное устройство; 3 – дисковые ножницы; 4 – петлеобразователь; 5 – натяжное устройство; 6 – рулононаматыватель

Петлевой компенсатор и натяжное устройство вводятся в состав линии для решения проблем, связанных с неоднородностью толщины распускаемого на полосы материала [2]. Кроме того, слиттерные линии могут быть дополнены гильотинными ножницами и пакетирующими устройствами, что позволяет осуществлять поперечные резы и раскрой ленты на мерные листы (технологические карты).

Целью данной работы является изучение, классификация и обзор методов решения раскройной задачи, которая возникает при роспуске рулонного металлопроката на полосы заданной ширины с использованием линий продольной резки.

Рассмотрим последовательность действий обслуживающего персонала линии при выполнении продольного раскроя. Исходный рулон устанавливают на барабан разматывающего комплекса, после чего переходят к настройке дисковых ножниц на резку требуемого количества полос заданной ширины. Рабочие валы ножниц последовательно набирают из

разделительных втулок и режущих дисков в соответствии с применяемой раскройной картой. Вручную осуществляют заправку ленты в направляющие планки правильного устройства до тянущих валков, затем в режиме наладки производят раскрой на полосы и их подачу через натяжное устройство в рулононаматыватель. Зафиксировав концы полос на барабане рулононаматывателя, оператор выполняет продольный раскрой ленты заданной длины. Готовые рулоны снимают с барабана рулононаматывателя при помощи разгрузочного устройства и осуществляют подготовку линии для раскроя нового рулона или смены используемой раскройной карты.

Масса рулона, который может устанавливаться на барабан разматывающего комплекса, толщина и ширина раскраиваемой ленты, скорости её подачи, а также суммарная мощность продольного реза являются наиболее важными техническими характеристиками слиттерных линий. Выпускаются как линии, ориентированные на мелкосерийное производство, так и линии, позволяющие раскраивать рулонный металлопрокат в промышленных масштабах. Налажено производство подобного оборудования и несколькими украинскими предприятиями.

Повысить эффективность работы слиттерных линий можно несколькими способами: совершенствованием технологии продольной резки и оптимизацией использования раскраиваемого рулонного материала. Первый подход основан на внесении конструктивных изменений в оборудование с учетом технологических особенностей продольного раскроя. Реализация таких мер требует значительных капиталовложений и предполагает модификацию, частичную или полную замену устройств, входящих в состав линии, внедрение современных систем управления для автоматизации процесса раскроя [3].

Полное использование ширины металлической ленты, раскраиваемой на продольные полосы, как правило, оказывается невозможным, и некоторая часть её идет в отход (потери в концевую и боковую обрезь). Решение задачи рационального раскроя, возникающей в данном случае, позволяет экономно расходовать рулонный металлопрокат за счет применения раскройных карт, составленных таким образом, чтобы неиспользуемая ширина раскраиваемой ленты была минимальной. Такой подход не требует замены оборудования, но предполагает разработку новых или использование существующих программных средств, реализующих составление раскройных карт с учетом конструктивных, технологических и организационных факторов, характерных для данного производства, а также последующее обучение технологов и обслуживающего персонала линии.

Задача о рациональном раскрое была одной из проблем, сформулированных Канторовичем в 1939 году в работе [4]. Рассматривалась задача формирования такого плана раскроя, который в серийном производстве дал бы минимальный расход материала в среднем на один комплект заготовок. Постановка задачи, предложенная в [4], выглядела следующим образом.

Пусть комплект состоит из n видов заготовок каждого вида в количестве b_j ; пусть a_{ij} – число заготовок вида j , получаемых при раскрое одной части материала i -ым способом. Допускается возможность свободного выбора частей материала из множества имеющихся, c_i – ценность части, использованной в i -том раскрое. Обозначим через x_i употребимость (в среднем на один комплект заготовок) i -го раскроя. Если допустить, что все возможные частные раскрои перечислены, то задача составления плана раскроя заключается в нахождении неизвестных x_i , удовлетворяющих требованиям (1)–(3):

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} x_i \geq b_j \quad (j = 1, \mathbf{K}, n). \quad (1)$$

$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, \mathbf{K}, N). \quad (2)$$

$$\min \sum_{i=1}^N c_i x_i. \quad (3)$$

Как видим, измерение, по которому предполагается оптимизировать расход материала (Канторович рассматривал линейный раскрой), в постановке задачи в явном виде не фигурирует, вместо этого вводится понятие стоимости i -той части материала. Такой подход позволяет легко расширить предложенную формулировку для произвольной n -мерной задачи с введением дополнительных факторов, учитывающих характерные особенности частной задачи раскроя. Задача рационального раскроя, сформулированная в таком виде, представляет собой одну из типовых задач линейного программирования.

В дальнейшем были предложены и другие модели, основанные на использовании графов, ациклических сетей и т. д. [5]. В обзорных работах 70-х годов была выявлена устойчивая взаимосвязь между задачами упаковки и раскроя, обоснована целесообразность их совместного рассмотрения как NP-полных задач комбинаторной оптимизации. Первая значительная работа, посвященная вопросам систематизации задач раскроя и упаковки, была опубликована в 1990 году [6]. Для классификации произвольной задачи раскроя или упаковки Dycckhoff предложил использовать систему из 4 типологических критериев, одним из которых выступала размерная задача. Рассматривались 1-, 2-, 3- и n -мерные задачи. Разработанная система классификации обладала определенными недостатками, поэтому в недавней работе была предложена улучшенная типология [7], основанная на применении многоуровневого подхода в классификации задач раскроя и упаковки. Хотя некоторые из типологических критериев были уточнены, критерий размерности задачи изменений не претерпел, поэтому в рамках новой типологии по-прежнему рассматриваются 1-, 2-, 3- и n -мерные задачи. Классифицируем задачу оптимизации раскроя рулонных материалов на продольные полосы, сравнив ее с одно- и двухмерными задачами рационального раскроя. Примеры карт раскроя, соответствующие этим задачам, приведены на рис. 2, заштрихованные области обозначают концевую и торцевую обрезь, идущую в отход.

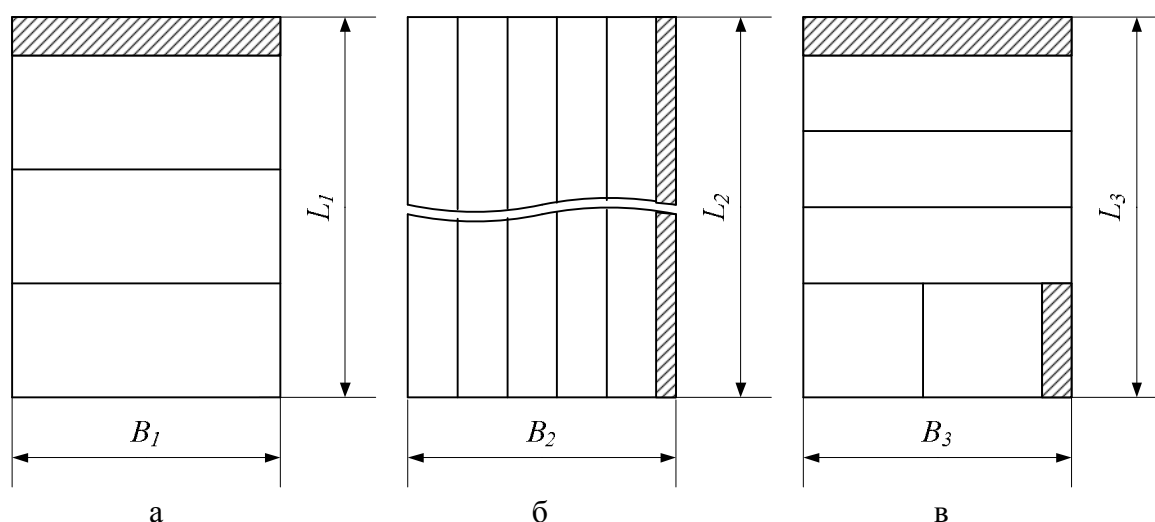


Рис. 2. Примеры раскройных карт для задач различной размерности:
а – одномерной; б – промежуточной 1,5-мерной; в – двухмерной

Работа, в которой Канторович описал классическую одномерную задачу рационального раскроя, была переведена на английский язык и впервые опубликована за пределами СССР лишь в 1960 году [8], поэтому при рассмотрении задач такого типа большинство зарубежных авторов ссылается на работы Gilmore & Gomory [9, 10]. Одномерные задачи возникают при раскрое линейных материалов по длине. В этом случае необходимо минимизировать концевые отходы за счет оптимального подбора длин заготовок при соблюдении условия комплектности. Раскрой сортового, пруткового проката, полос и труб – типичные примеры одномерного раскроя.

В работах [9, 10] описывается одномерная задача поперечного раскроя рулонной бумаги на комплект рулонов меньшей длины (см. рис. 2, а) и предлагается метод ее решения. Сравним эту задачу с рассматриваемой задачей продольного раскроя рулонного металлопроката (см. рис. 2, б). На первый взгляд, раскройные карты, представленные на рис. 2, а и рис. 2, б, отличаются лишь направлениями сквозных резов, которые выполняются от края до края полосы. При этом в первом случае минимизируют расход материала в концевую обрезь, во втором случае – в боковую обрезь.

Если учитывать только геометрическую информацию о направлении и протяженности резов, выполняемых дисковыми ножницами, то раскрой рулонного материала на продольные полосы можно классифицировать как одномерный раскрой. В тоже время, при внимательном анализе требований к получаемым в результате раскроя заготовкам можно обнаружить, что в случае поперечного раскроя (рис. 2, а) ширина полосы B_1 не учитывается при нахождении решения, поскольку все получаемые рулоны меньшей длины имеют одинаковую ширину, равную B_1 , – минимизируются потери материала по длине L_1 . В случае продольного раскроя (рис. 2, б) минимизируются потери полосы по ширине B_2 , но длину полосы L_2 также необходимо учитывать при планировании раскроев, поскольку именно от длины зависит степень выполнения заказа на раскрой узкой полосы заданной ширины. Объемы заказов обычно указываются в единицах массы. Принимая во внимание, что в случае поперечного раскроя учитывается только длина L_1 , а в случае продольного раскроя необходим учет обоих измерений (как ширины B_2 , так и длины L_2), можно сделать вывод, что задача продольного раскроя рулонного материала на полосы по сложности превосходит классическую одномерную задачу.

Классическая задача двухмерного рационального раскроя возникает при раскрое листового материала на комплекты заготовок [11]. Различают прямоугольный раскрой, при котором исходный материал и заготовки имеют прямоугольную форму, и фигурный раскрой, при котором заготовки могут иметь произвольную форму. Кроме этого, для прямоугольных раскроев вводится понятие гильотинного реза. При гильотинном раскрое реализуемыми считаются только резы, параллельные кромкам раскраиваемого прямоугольника и выполняемые от края до края листа, а материал может резаться на отдельные заготовки в несколько этапов. В случае с негильотинным раскроем эти ограничения снимаются (такие раскрои обычно реализуются при помощи термической резки). Раскрой листового проката гильотинными ножницами производят для изготовления полос и заготовок, идущих в дальнейшем на штамповку, и для получения заготовок, максимально соответствующих по форме и размерам готовой детали и поступающих прямо на сборку или обработку резанием. На рис. 2, в приведена раскройная карта для двухступенчатого гильотинного раскроя.

При сравнении задачи продольного раскроя рулонного металлопроката с двухмерными раскройными задачами становится ясно, что даже при введении в состав слиттерной линии гильотинных ножниц, позволяющих осуществлять поперечные резы, раскрой, выполняемый на такой линии, не является полноценным двухмерным гильотинным раскроем. Использование дополнительных поперечных гильотинных резов не влияет объемы боковой и концевой обрезки, идущей в отход, поскольку такие резы лишь разбивают полосу по длине на несколько полос одинаковой ширины. Длина получаемых продольных полос настолько больше их ширины, что при решении задачи рационального раскроя учетом концевой обрезки в этом случае можно пренебречь. Подобный продольно-поперечный раскрой условно можно называть гильотинным раскроем, хотя, по существу, такая классификация будет некорректной, поскольку сложность рассматриваемой раскройной задачи, очевидно, уступает сложности истинных двухмерных задач рационального раскроя.

Как показывает приведенный выше сравнительный анализ, рассматриваемая задача оптимизации продольного и продольно-поперечного раскроя рулонного металлопроката на

слиттерных линиях является в некотором смысле промежуточной задачей между одно- и двухмерными классическими задачами рационального раскроя. В ранней работе [12], посвященной оптимизации продольного раскроя рулонной бумаги, Haessler классифицирует такую задачу как одномерную, однако уже в следующей своей работе [13], также изучающей проблемы оптимизации продольного раскроя, но уже рулонного металлопроката, автор вводит новый термин и определяет такую раскройную задачу как 1,5-мерную, тем самым подчеркивая отличие от классических одномерных задач. В дальнейшем этот термин приобрел широкое распространение и стал использоваться для обозначения задач, предполагающих оптимизацию продольного и продольно-поперечного раскроя рулонных материалов [14, 15].

В существующих типологических системах [6, 7] 1,5-мерные задачи рационального раскроя и упаковки не рассматриваются, в тоже время классификация таких задач по остальным критериям не представляет каких-либо сложностей. В соответствие с актуальной типологической системой [7] задача продольного раскроя рулонного материала обозначается как 1,5-MSSCSP (1,5-dimensional Multiple Stock-Size Cutting Stock Problem; 1,5/V/D/R в нотации устаревшей типологии [6]).

Библиография работ, посвященных оптимизации 1,5-мерного раскроя, не столь обширна, как соответствующий перечень для одно- и двухмерных раскройных задач [6, 7, 16]. Большинство авторов ограничивается рассмотрением частных задач, в которых проблема формализуется с учетом множественных технологических и организационных ограничений, возникающих в условиях того или иного производства. Обзорные работы и работы, посвященные сравнительному тестированию различных методов решения 1,5-мерных задач, рассматриваемых как отдельный класс, еще не публиковались.

При решении частных задач 1,5-мерного раскроя наиболее часто используются эвристические методы и их гибридные модификации [17–20], применению современных метаэвристических методов посвящены лишь недавние работы [21, 22]. Значительный потенциал таких методов, выявленный при решении двухмерных раскройных задач, в промежуточных 1,5-мерных задачах, по существу, не востребован. Актуальной остается и разработка специализированных программных средств, реализующих автоматическую генерацию раскройных карт для задачи продольного раскроя и распространяемых на условиях свободного доступа.

ВЫВОДЫ

1. Продольный раскрой рулонных материалов в промышленном производстве осуществляется на специализированных линиях, называемых слиттерными. Принцип их действия основан на использовании вращающихся дисковых ножниц, через которые пропускается раскраиваемый материал. Состав слиттерной линии может быть дополнен гильотинными ножницами, позволяющими осуществлять поперечные резы, – в таком случае раскрой называется продольно-поперечным.

2. Для повышения эффективности работы слиттерной линии необходимо совершенствование технологии продольного раскроя и оптимизация использования рулонного материала по ширине.

3. Сравнительный анализ сложности раскройных задач различной размерности показывает, что задача, которая возникает при роспуске рулонного материала на продольные полосы заданной ширины, может быть классифицирована как задача 1,5-мерного рационального раскроя. В соответствии с нотацией, принятой в рамках существующей типологии задач рационального раскроя и упаковки, рассматриваемая раскройная задача может быть обозначена как 1,5-MSSCSP.

4. Для решения 1,5-мерной раскройной задачи в большинстве опубликованных работ применяются эвристические методы комбинаторной оптимизации и их гибридные модификации.

5. Дальнейшая работа может быть основана на проведении комплексных исследований, в рамках которых предполагается создание проблемно-ориентированных программных реализаций метаэвристических методов и изучение их эффективности при решении 1,5-мерных задач рационального раскроя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schuler Gmb. H. *Metal forming handbook* / Schuler Gmb.H. – Berlin : Springer-Verlag, 1998. – 563 p.
2. H. Wisselink *Analysis of guillotining and slitting. Finite element simulations* : Ph.D-Thesis / H. Wisselink ; University of Twente, The Netherlands – Wageningen : Ponsen & Looijen, 2000. – 146 p.
3. K. Shoop *6 ways to focus on slitting lines* [Электронный ресурс] / K. Shoop // *The Fabricator*. – 2005. – No. 9. – Режим доступа : http://www.thefabricator.com/coilprocessing/coilprocessing_article.cfm?id=1144.
4. Канторович Л. В. *Математические методы в организации и планировании производства* / Л. В. Канторович. – Л. : ЛГУ, 1939.
5. Desaulniers G. *Column generation* / G. Desaulniers, J. Desrosiers, M. M. Solomon. – New-York : Springer Science + Business Media, Inc., 2005. – 358 p.
6. H. Dyckhoff *A typology of cutting and packing problems* / H. Dyckhoff // *European Journal of Operational Research*. – 1990. – Vol. 44. – No. 2. – Pp. 145–159.
7. Wäscher G. *An improved typology of cutting and packing problems* / G. Wäscher, H. Haußner, H. Schumann // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 183. – No. 3. – Pp. 1109–1130.
8. Kantorovich L. V. *Mathematical methods of organizing and planning production* / L. V. Kantorovich // *Management Science*. – 1960. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 366–422.
9. Gilmore P. C. *A linear programming approach to cutting-stock problem* / P. C. Gilmore, R. E. Gomory // *Operations Research*. – 1961. – Vol. 9. – No. 6. – Pp. 849–859.
10. Gilmore P. C. *A linear programming approach to cutting-stock problem. Part II* / P. C. Gilmore, R. E. Gomory // *Operations Research*. – 1963. – Vol. 11. – No. 6. – Pp. 863–888.
11. Gilmore P. C. *Multistage cutting stock problems of two and more dimensions* / P. C. Gilmore, R. E. Gomory // *Operations Research*. – 1965. – Vol. 13. – No. 1. – Pp. 94–120.
12. Haessler R. W. *Controlling cutting pattern changes in one-dimensional trim problems* / R. W. Haessler // *Operations Research*. – 1975. – Vol. 23. – No. 3. – Pp. 483–493.
13. Haessler R. W. *A procedure for solving the 1.5-dimensional coil slitting problem* / R. W. Haessler // *IIE Transactions*. – 1978. – Vol. 10. – No. 1. – Pp. 70–75.
14. Hinxman A. I. *The trim-loss and assortment problems : a survey* / A. I. Hinxman // *European Journal of Operational Research*. – 1980. – Vol. 5. – No. 1. – Pp. 8–18.
15. Haessler R. W. *Cutting stock problems and solution procedures* / R. W. Haessler, P. E. Sweeney // *European Journal of Operational Research*. – 1991. – Vol. 54. – No. 2. – Pp. 141–150.
16. Sweeney P. E. *Cutting and packing problems: a categorized, application-orientated research bibliography* / P. E. Sweeney, E. R. Paternoster // *The Journal of the Operational Research Society*. – 1992. – Vol. 43. – No. 7. – Pp. 691–706.
17. Haessler R. W. *A 0-1 model for solving the corrugator trim problem* / R. W. Haessler, F. B. Talbot // *Management Science*. – 1983. – Vol. 29. – No. 2. – Pp. 200–210.
18. Sarker B. R. *An optimum solution for one-dimensional slitting problems : a dynamic programming approach* / B. R. Sarker // *The Journal of the Operational Research Society*. – 1988. – Vol. 39. – No. 8. – Pp. 749–755.
19. Ferreira J. S. *A two-phase roll cutting problem* / J. S. Ferreira, M. A. Neves, P. F. Castro // *European Journal of Operational Research*. – 1990. – Vol. 44. – No. 2. – Pp. 185–196.
20. Song X. *An iterative sequential heuristic procedure to a real-life 1.5-dimensional cutting stock problem* / X. Song, C. B. Chu, Y. Y. Nie, J. A. Bennell // *European Journal of Operational Research*. – 2006. – Vol. 175. – No. 3. – Pp. 1870–1889.
21. Sarac T. A. *Genetic Algorithm for 1,5 Dimensional Assortment Problems with Multiple Objectives* / T. A. Sarac, M. S. Ozdemir // *Developments in Applied Artificial Intelligence*. – 2003. – Vol. 2718. – Pp. 85–117.
22. Li-Qun Zheng *Using two-stage method to solve 1.5-dimensional cutting stock problem* / Li-Qun Zheng, Hui Xiong, Da-Wei Li // *3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*. – 2008. – Pp. 483.